

Smart Cities Demo – Ausschreibung 2020

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Projekt:

Easy Energy Saver

Monitoring eines Empfehlungssystems zur Behaglichkeitssteigerung in Wohnräumen

DELIVERABLE 3.1

Bericht zum sozialen Monitoring

Erstellt am 16. September 2022

Erstellt von:

Patricia Jasek (Forschung Burgenland)

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Umsetzung des sozialen Monitorings	5
Bewohner*innenprofile	6
Ergebnisse	8
Fazit	11
Abbildungsverzeichnis	12
Anhang I: Erhebung zum subjektivem Empfinden des Raumklimas	13

Einleitung

Das vorliegende Dokument wurde im Rahmen der Endberichtslegung zum Projekt „Easy Energy Saver“ erstellt. Es umfasst das Deliverable 3.1, den Bericht über das soziale Monitoring und über alle Begleitmaßnahmen im Rahmen des Arbeitspaketes 3.

Die Methode zur Erreichung des technisch-wissenschaftlichen Lösungsansatzes folgt der Methode aus "Empower Citizens", dem vorangegangenen Smart Cities Projekt mit der FFG-Nr. 855526.

Das im Projekt „Empower Citizens“ entwickelte Empfehlungssystem unterstützt die Nutzerin bzw. den Nutzer dabei, durch optimales Lüften und Verschatten, das Raumklima zu verbessern, ohne dabei unnötige Lüftungsverluste hinnehmen zu müssen. Weiters werden auch noch Empfehlungen zur Regelung von manuell einstellbaren Heizungen ausgegeben. Die Beurteilung der Behaglichkeit erfolgt über den sogenannten PMV-Index (Predicted Mean Vote), welcher die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen voraussagt, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Dieser Wert ist abhängig von der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, dem Energieumsatz, der Bekleidungsisolation, der Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit. Je weiter dieser Wert von 0 abweicht, umso höher ist die Anzahl der unzufriedenen Personen, die es als zu kalt oder zu warm empfinden. Über- oder unterschreitet der aktuelle PMV-Index eine zuvor eingestellte Toleranzgrenze so versucht das System durch die Ausgabe von Empfehlungen die Behaglichkeit für die Personen wieder zu steigern. Diese Behaglichkeitssteigerung kann entweder über Stoßlüften oder Verschatten geschehen. Parallel zu dieser Funktion der Behaglichkeitssteigerung gibt das System auch aus, wann die CO₂-Konzentration in der Zone überschritten wird, und eine Stoßlüftung notwendig ist. Diese Messung wird durch Daten zur subjektiven Behaglichkeit ergänzt, um das persönliche Empfinden der BewohnerInnen in Verbindung zum PMV Index zu stellen.

Da die Messungen ausschließlich im Privatbereich der Bewohner*innen stattfanden, wurden diese über alle Vorkehrungen informiert, so dass es zu keinen Missverständnissen und Bedenken hinsichtlich der Projektziele kommt.

Folgende Methoden wurden aus "Empower Citizens" übernommen und wurden in "Easy Energy Saver" optimiert:

- Regelmäßige Befragung der Bewohner*innen zu ihrem Gesundheitszustand und Behaglichkeitszustand
- Regelmäßige Kontrolle der Messwerte
- Regelmäßige Kontrolle der vom selbstlernenden System festgelegten Parameter

Diese beinhalten:

- o Behaglichkeitszone der BewohnerInnen

- o Zeit der vorwiegenden Anwesenheit und Motivation
- o Zeit der Empfehlungsausgabe
- Regelmäßige Erhebung der Nutzer*innenakzeptanz in Hinblick auf das Empfehlungssystem

Ziele des Arbeitspaketes 3 zum sozialen Monitoring waren

- Die Steigerung der subjektiven Behaglichkeit durch ein angepasstes Nutzer*innenverhalten,
- die Bewusstseinssteigerung zum Thema Behaglichkeit bei den Bewohner*innen,
- die soziale Vernetzung und Austauschmöglichkeiten der Bewohner*innen untereinander und
- die Schaffung einer hohen Nutzer*innenakzeptanz in Bezug auf das Empfehlungssystems.

Umsetzung des sozialen Monitorings

Das Arbeitspaket „Soziales Monitoring“ wurde auf folgende Tasks aufgeteilt:

- Konzepterstellung subjektive Behaglichkeit

Im ersten Task wird auf Basis der bereits erlangten Ergebnisse aus dem Projekt „Empower Citizens“ ein Konzept (Zeitplan, Ablauf) zur Erhebung der subjektiven Behaglichkeit erstellt. Die erlangten Daten werden in Bezug zu den Messergebnissen der Behaglichkeit (PMV und CO₂) gestellt. Aus diesem Grund ist es wichtig den Zeitraum der Messungen (subjektive Behaglichkeit, CO₂, PMV) aufeinander abzustimmen und in der Umsetzung genau zu timen.

- Laufende Einbindung der Bewohner*innen: Die Bewohner*innen werden aktiv eingebunden.

Diese aktive Einbindung findet statt durch

- die Messung der subjektiven Behaglichkeit,
- eine laufende Bewusstseinsbildung durch das Empfehlungssystem,
- laufende Feedbackmöglichkeiten zum Empfehlungssystem.

- Schaffung einer hohen Nutzer*innenakzeptanz:

Eine hohe Nutzer*innenakzeptanz wird durch die aktive Einbindung der Bewohner*innen geschaffen. Im Rahmen von persönlichen Gesprächen soll das Empfehlungssystem mit den Bewohner*innen besprochen und adaptiert werden. Die Bewohner*innen sollen vor allem befragt werden zu der Art der Ausgabe der Empfehlungen (visuell, akustisch...), dem präferierten Standort in der eigenen Wohnung, dem Aussehen, ...

Bewohner*innenprofile

In diesem Kapitel werden die Bewohner*innenprofile inkl. des Nutzer*innenverhaltens der beteiligte Bewohner*innen beschrieben. Es wird angemerkt, dass auf Namen und konkrete Zuordnungen verzichtet wird, stattdessen wurden den Personen bei der Auswertung Nummern zugewiesen.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der 4 Teilnehmer*innen und ihren Präferenzen in Bezug auf das Raumklima.

Teilnehmer 1	Teilnehmer 2	Teilnehmer 3	Teilnehmerin 4
•Männlich •Großraumbüro •6-8h Aufenthalt •Stoßlüftung Sommer & Winter – Morgens & über den Tag verteilt •Wohlfühltemperatur: 21 Grad •Bei kurzfristigem Kältegefühl: Wärmere Kleidung •Verschattung: Nein	•Männlich •Büro/4 Personen Haushalt •6-8h Aufenthalt •Stoßlüftung Sommer: Nacht, Winter: Morgens, Abends •Wohlfühltemperatur: 22-23 Grad •Heizt Tag & Nacht •Bei kurzfristigem Kältegefühl: Wärmere Kleidung •Verschattung: Ja	•Männlich •Büro/4 Personen Haushalt •6-8h Aufenthalt •Kipplüftung, Sommer: Morgens, Abends Winter: über den Tag verteilt •Wohlfühltemperatur: 22 Grad •Heizt den ganzen Tag •Bei kurzfristigem Kältegefühl: Wärmere Kleidung •Verschattung: Ja	•Weiblich •Wohnzimmer/4 Personen Haushalt •6-8h Aufenthalt •Kipp- & Stoßlüftung, Sommer & Winter – Morgens & über den Tag verteilt •Wohlfühltemperatur unbekannt •Heizt den ganzen Tag •Bei kurzfristigem Kältegefühl: Wärmere Kleidung •Verschattung: Nein

Abbildung 1: Übersicht Teilnehmer

Teilnehmer 1

Teilnehmer 1 arbeitet in einem Großraumbüro. In der Monitoring Phase hat sich die Person, männlich, dort üblicherweise 6 bis 8 Stunden, größtenteils aufgehalten. Die Person geht dort ausschließlich passiven Tätigkeiten nach.

Das präferierte Lüftungsverhalten ist Stoßlüften morgens im Sommer wie auch im Winter sowie häufigeres Lüften, verteilt über den Tag. Der Nutzer gibt die eigene Wohlfühltemperatur mit 21 Grad an. Wenn es zu kurzfristig kühl ist, bevorzugt es die Person, wärmere Kleidung anzuziehen.

Im Sommer wird nicht auf Verschattung zurückgegriffen.

Teilnehmer 2

Teilnehmer 2 ist ebenfalls männlich. Die Messungen fanden im Büro statt, wo sich die Person alleine, für 6 bis 8 Stunden aufhält.

Die Person geht dort zum großen Teil inaktiven Tätigkeiten nach. Der Teilnehmer heizt Tag und Nacht. Im Sommer wird auf Verschattung zurückgegriffen.

Wenn es zu kurzfristig kühl ist, bevorzugt es die Person, wärmere Kleidung anzuziehen.

Das präferierte Lüftungsverhalten ist Stoßlüften.

In den heißen Monaten wird in der Wohnung mittels Stoßlüftung nachts gelüftet.

Im Winter werden mehrere Stoßlüftungen durchgeführt, vor allem morgens und abends.

Der Nutzer kennt die eigene Wohlfühltemperatur, diese liegt im Bereich von 22°C und 23°C.

Es wird auf Verschattung zurückgegriffen.

Teilnehmer 3

Auch Teilnehmer 3 ist männlich. Die Messungen fanden im Büro statt, wo sich die Person für 6 bis 8 Stunden aufhält.

Die Person geht dort zum großen Teil inaktiven Tätigkeiten nach.

Das präferierte Lüftungsverhalten ist Kipplüften morgens und abends im Sommer. Im Winter wird ebenfalls mittels Kipplüftung mehrmals täglich gelüftet.

Der Nutzer kennt die eigene Wohlfühltemperatur, diese liegt im Bereich von 22°C.

Die Person heizt ausschließlich unter tags. Wenn es zu kurzfristig kühl ist, bevorzugt es die Person, wärmere Kleidung anzuziehen.

Es wird auf Verschattung zurückgegriffen um die Hitze aus der Wohnung draußen zu halten.

Teilnehmerin 4

Im Haus von Teilnehmerin 4 leben vier Personen im Haushalt. Die Messungen wurden im Wohnzimmer durchgeführt, wo sich die Person im Monitoring-Zeitraum 6 bis 8 Stunden aufgehalten hat. Die Person nutzt Kipp- als auch Stoßlüftung im Sommer wie im Winter, vor allem morgens, aber auch mehrmals über den Tag verteilt. Die Wohlfühltemperatur ist ihr unbekannt.

Teilnehmerin 4 heizt vor allem unter Tags.

Bei kurzfristigem Wärmegefühl greift auch sie, wie alle anderen Teilnehmer, auf wärmere Kleidung zurück.

Verschattung nutzt sie nicht.

Generell gestalten die Person ihren Tag unterschiedlich aktiv.

Ergebnisse

Die Bewohner*innen wurden auf unterschiedliche Weise um Feedback gebeten. Als Feedbackmöglichkeit wurden zum einen Fragebögen gewählt, die kurz nach Installation des EES per Email versendet wurden, sowie ein telefonischer Kontakt zu einem späteren Zeitpunkt in der Mitte und gegen Ende des Projekts.

Feedbackmöglichkeit zu Beginn der Referenzmessung

Im Rahmen der Testphase des EES konnten vier Bewohner*innen zur Teilnahme motiviert werden. Die Installation und Einrichtung des Empfehlungssystems wurden vom Projektpartner 4ward Energy Research GmbH organisiert und durchgeführt und ist im entsprechenden Deliverable 2.1 beschrieben. Bei allen 4 Bewohner*innen wurde ein komplettes Set des EES (kabelgebunden) inklusive Wetterstation eingerichtet.

Die Bewohner*innen wurden wenige Wochen nach Installation des Easy Energy Savers im Juli 2021 mittels Fragebogen kontaktiert und zur Referenzmessung befragt. Zu diesem Zeitpunkt hat der EES (Easy Energy Saver) bereits Empfehlungen an die Bewohner*innen ausgegeben.

In diesem Zusammenhang erhielten die 4 Teilnehmer*innen auch die Kontaktdaten einer Ansprechperson und sollten sich bei Auffälligkeiten in Bezug zum Easy Energy Saver telefonisch melden.

Zusätzlich erhielten sie einen Fragebogen (siehe Anhang I) zur Erhebung der subjektiven Behaglichkeit im Raum. Folgende Fragen wurden gestellt:

- Wie empfinden Sie generell die Raumtemperatur bei Ihnen?
- Wie aktiv sind Sie gerade?
- Welche Kleidung tragen Sie gerade?

Alle Teilnehmer*innen waren laut ihren Angaben gerade wenig/nicht aktiv und luftig gekleidet. 2 Teilnehmer*innen war etwas zu warm, den anderen beiden Teilnehmer*innen war die Umgebungstemperatur angenehm.

Feedbackmöglichkeit EES inkl. finale Evaluierung

Keiner der Teilnehmer*innen hat sich während der Pilotphase telefonisch bei der Ansprechperson gemeldet. Daher wurden die Nutzer*innen während und am Ende der Testphase telefonisch kontaktiert und ihnen wurden folgende Fragen gestellt:

- Wie empfinden Sie generell die Raumtemperatur bei Ihnen?
- Wie zufrieden sind Sie mit den Empfehlungen des Easy Energy Savers?
- Wenn der EES Empfehlungen ausgibt, können Sie diese nachvollziehen?
- Kommen Sie den Empfehlungen nach? Bitte begründen Sie Ihre Antwort.
- Wie gefällt Ihnen die Art der Ausgabe der Empfehlungen?

- Wie zufrieden sind Sie mit der Optik des Easy Energy Savers?
- Haben Sie weitere Anmerkungen zum EES?

Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Rückmeldungen, die während der geführten Telefonate mit den Nutzer*innen des EES gegeben wurden. Aufgrund des Datenschutzes wird auch an dieser Stelle auf die Namen der Bewohner*innen verzichtet.

Tabelle 1: Übersicht – Rückmeldung der Teilnehmer*innen

Teilnehmer*in	Rückmeldung
1	• CO₂ Ampel wird genutzt, leuchtet bei mehr als einer Person • Leuchten der CO₂ Ampel führt dazu, dass gelüftet wird • Verschattung ist kaum ein Thema • Selten werden Empfehlungen zur Temperatur ausgegeben und diese werden auch weniger angenommen • Die Lichter sind in größerem Raum schwer erkennbar
2	• Die CO₂ Ampel wird genutzt. • Es werden keine Eingriffe bei der Heizung vorgenommen aufgrund von Hinweisen am EES • Da das Display des EES direkt vor dem Laptop steht wird die ppm Konzentration angeschaut • Die LEDs sind zu hell, so wie der EES platziert ist • Die Verkabelung ist nicht professionell, ein kabelloses System wäre nett, es stört aber nicht • Die Hinweise zur Verschattung werden nicht genutzt
3	• Nutzung der CO₂ Lampe fürs Lüften – guter Hinweis um über das eigene Gefühl nachzudenken, ob man lüften sollte • Im Sommer verschatten funktioniert automatisch, daher wird diese Funktion nicht genutzt • Die Temperatur und Feuchte wird kontrolliert, was einen netten Überblick bietet • Die Verkabelung ist nicht vorteilhaft
4	• Es wird ausschließlich die CO₂ Ampel fürs Lüften genutzt • Die Lichter sind sehr schwer erkennbar • Die Verkabelung im Wohnzimmer ist sehr unschön • Hinweise zum Heizen werden selten ausgegeben und auch nicht genutzt, da die Fußbodenheizung ohnehin sehr träge ist

- Die Hinweise zur Verschattung werden ebenfalls nicht genutzt

Zusammenfassend lässt sich also erkennen, dass vor allem die CO₂ Ampel von allen Teilnehmer*innen sehr gut angenommen wurde während die Hinweise zum Heizen nicht umgesetzt wurden.

Die Verkabelung wurde ebenfalls von allen Teilnehmer*innen als negativ bezeichnet. Auch bei den LEDs wünschen sich 3 von 4 Teilnehmer*innen eine andere Ausführung. Interessant ist, dass die Sichtbarkeit entweder sehr schlecht gegeben war oder aber die LEDs zu hell waren. Eine Einstellmöglichkeit wäre hier also vorteilhaft.

Hinweise zur Nutzung der Verschattung wurden nicht angenommen, während die Hälfte der Teilnehmer*innen die Ausgabe der diversen Parameter am Display als sehr nützlich erachtet hat.

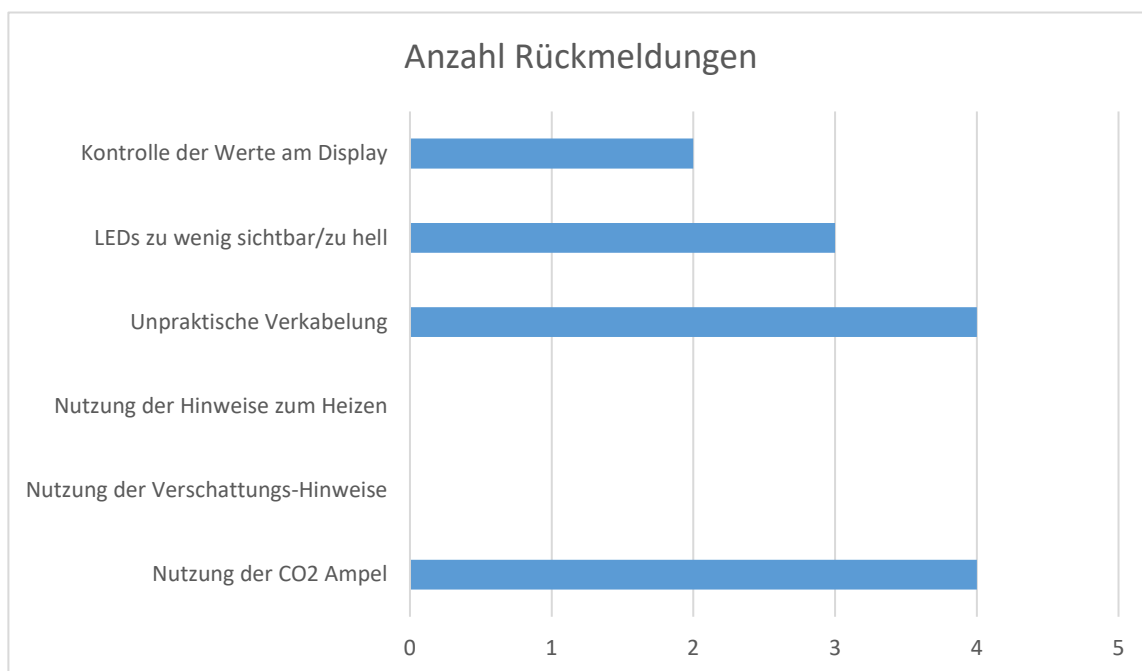


Abb. 1-1: Auswertung der Rückmeldungen

Eine erneute Aussendung des Fragebogens zur Erhebung der subjektiven Behaglichkeit erschien am Ende des Projektes nicht weiter zielführend, da Hinweise zum Heizen/Verschatten vom EES nicht angenommen wurden.

Fazit

Das Wohlbefinden des Menschen ist eine subjektive Wahrnehmung, die von zahlreichen Faktoren abhängig ist. Die Intensität der geistigen und körperlichen Tätigkeit gehört dazu, die Bekleidung, die individuelle physische und psychische Verfassung der Person, aber auch Einflüsse aus der jeweiligen Umgebung wie etwa die thermische und stoffliche Belastung (z.B. durch Gerüche), Geräusche, Akustik sowie die Aufenthaltsdauer und die Anzahl der anwesenden Personen in einem Raum.

Wegen des individuellen Empfindens und der Anpassungsfähigkeit des menschlichen Körpers, lässt sich Behaglichkeit nicht einheitlich messen. Allerdings ist es möglich, Raumzustände herzustellen, in denen sich die meisten Menschen besonders wohl fühlen.

Die Lufttemperatur hat den größten Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden des Menschen.

Veränderungen in Bezug auf die Raumtemperatur, vor allem im Hinblick auf Einsparung von Heizkosten, wurden mithilfe des Easy Energy Savers nicht bewirkt.

Die Raumluft sollte sauerstoffreich, geruchsneutral und schadstoffarm sein. Ein wichtiger Faktor ist die mit Kohlendioxid (CO₂) angereicherte Ausatemluft. Der Mensch erhöhte CO₂-Konzentrationen als schlechte Luft. Konzentrationen von ca. zwei Prozent sind kurzzeitig tolerierbar, ab drei bis vier Prozent treten zunehmend Atembeschwerden auf. Die Erfassung der CO₂-Konzentration des Easy Energy Savers wurde positiv bewertet und Hinweise zum Lüften aufgrund höherer Konzentrationen gerne angenommen.

Die Steigerung der subjektiven Behaglichkeit durch ein angepasstes Nutzer*innenverhalten konnte daher in Hinsicht auf die CO₂-Konzentrationen durch die Empfehlungen des EES erreicht werden, auch eine Bewusstseinssteigerung zum Thema Behaglichkeit bei den Bewohner*innen wurde erzielt, da diese angaben, über ihr Lüftungsverhalten nachzudenken.

Die Monitoring-Phase des Easy Energy Savers hat weiters gezeigt, dass das Display mit seiner Alarmfunktion zwar leicht verständlich ist, aber aus unterschiedlichen Gründen nicht gut ablesbar. Diese verschiedenen Gründe machen es notwendig, eine individuelle Einstellung der LEDs vornehmen zu können um die Nutzer*innenakzeptanz in Bezug auf das Empfehlungssystem zu erhöhen.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-2: Auswertung der Rückmeldungen	10
--	----

Anhang I: Erhebung zum subjektivem Empfinden des Raumklimas

Name:	Geschlecht: ☐ w ☐ m ☐ divers
Datum:	Uhrzeit:

1. Wie empfinden Sie die aktuelle Temperatur im Raum, in dem der Easy Energy Saver installiert ist?

Bezeichnung	Viel zu warm	Zu warm	Etwas zu warm	Angenehm	Etwas zu kalt	Zu kalt	Viel zu kalt
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
PMV-Wert	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

2. Wie aktiv sind Sie gerade?

☐ ...wenig/nicht aktiv (sitzen) ☐ ...aktiv (stehen, gehen)

3. Welche Kleidung tragen Sie gerade?

Oberteil		Unterteil		Schuhe		
warm	luftig	warm	luftig	fest	offen	keine
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Danke für Ihre Teilnahme!

IMPRESSUM

Verfasser:in:

Markus Rabensteiner
4ward Energy Research GmbH
Reininghausstraße 13A, 8020 Graz
Telefon: 0664 88500338
E-Mail: markus.rabensteiner@4wardenergy.at

Patricia Jasek
Forschung Burgenland GmbH
Campus 1, A-7000 Eisenstadt
Telefon: +43 5 7705
E-Mail: patricia.jasek@forschung-burgenland.at

Projekt- und Kooperationspartner:

4ward Energy Research GmbH
Forschung Burgenland GmbH

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:

Klima- und Energiefonds
Leopold-Ungar-Platz 2/ Stiege 1/ Top 142
1190 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer:

Die Autor:innen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes:

ZS communication + art GmbH

Smart Cities Demo – Ausschreibung 2020

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Projekt:

Easy Energy Saver

Monitoring eines Empfehlungssystems zur Behaglichkeitssteigerung in Wohnräumen

DELIVERABLE 2.1

Bericht zur technischen Weiterentwicklung

Erstellt am 16. September 2022

Erstellt von:

Markus Rabensteiner (4ward Energy Research GmbH)

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
EES	Easy Energy Saver
UO	Untersuchungsobjekt

Ansonsten wurden nur gängige Abkürzungen verwendet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Simulationstechnische Abbildung des Systems	9
2.1	Simulationsaufbau	9
2.2	Parameterstudie	9
2.3	Ergebnisse der Simulation	10
3	Reglerimplementierung.....	13
3.1	Übersicht	13
3.2	Matlab vs Python	14
3.3	Python-Programm.....	14
4	Aufbau	17
4.1	Hauptstation	17
4.1.1	Display	17
4.1.2	LEDs	18
4.1.3	USV.....	18
4.1.4	I2C-Anschluss	19
4.2	Wetterstation	19
4.3	Sensoren	20
4.3.1	DHT11.....	20
4.3.2	CCS811	20
4.3.3	SCD30	21
4.3.4	BME280	22
4.3.5	DHT22.....	23
4.4	Verbindung Wetterstation-Hauptstation	23
4.4.1	Funkverbindung.....	23
4.4.2	Kabelverbindung	25
4.5	Kommerzielle Wetterstation	25
4.6	Endgültige EES-Konfiguration.....	25
5	Untersuchungsobjekte und Messreihen.....	26
5.1	Untersuchungsobjekte	26
5.1.1	Wohnungen in Pinkafeld (Burgenland) – UO1	26

5.1.2	Großraumbüro in Graz (Steiermark) – UO2	27
5.1.3	Heimbüro in Güssing (Burgenland) – UO3	28
5.1.4	Heimbüro in Frohnleiten (Steiermark) – UO4	28
5.1.5	Wohnzimmer in Neufeld (Burgenland) – UO5	28
5.2	Messreihen	29
5.2.1	Referenzmessung - Sommer 2020	29
5.2.2	1. Messreihe - Weihnachtsferien 2020/2021	29
5.2.3	2. Messreihe - Frühjahr 2021	29
5.2.4	3. Messreihe - Sommer 2021 bis Frühjahr 2022	31
6	Auswertung der Messreihen	32
6.1	Messungen in UO1	32
6.2	Messungen in UO2	35
6.2.1	2. Messreihe	35
6.2.2	3. Messreihe	37
6.3	Messungen in UO3	45
6.4	Messungen in UO4	50
6.5	Messungen in UO5	56
6.6	CO ₂ -Ampel	59
7	Zusammenfassung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7.1	Technische Herausforderungen	61
7.2	Mehrwert des Empfehlungssystems	62
8	Programmcode	63
8.1	Beschreibung einzelner Funktionen	63
8.2	Konfigurationsfile	65
8.3	Gesamter Programmcode	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Literaturverzeichnis	71
	Abbildungsverzeichnis	72

1 Einleitung

Der *Easy Energy Saver* (EES) stellt eine kostengünstige Möglichkeit dar, durch optimales Lüften, Verschatten und durch händische Regelung der Heizung, das Raumklima der Personen in Räumen zu verbessern, ohne dabei unnötige Lüftungsverluste hinnehmen zu müssen. Je nach Wahl der Referenzfälle, kann auch eine Senkung des Heizbedarfs bzw. bei aktiver Kühlung des Kühlbedarfs, erreicht werden.

Hierbei empfängt die Hauptstation im Inneren der Wohnung die Wetterdaten des Außensensors und berechnet mithilfe der gemessenen Daten innerhalb der Wohnung die eventuelle Notwendigkeit des manuellen Eingreifens, um durch die Regelung der Temperatur bzw. der Luftqualität (CO₂-Konzentration) und Luftfeuchtigkeit das Wohlbefinden der Personen zu verbessern. Der Aufbau des Systems ist in Abb. 1 gezeigt.

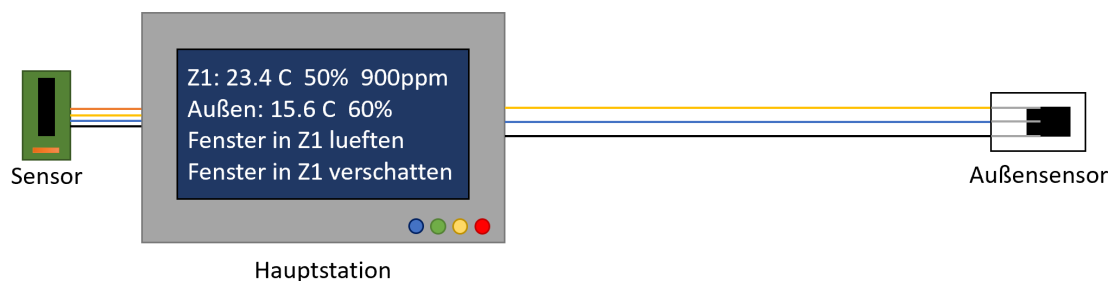


Abb. 1: Schematischer Aufbau des EES

Beim EES wurde auf die ausschließliche Verwendung von kostengünstigen Komponenten geachtet, um auch ein Produkt für den sozialen Wohnbau anbieten zu können. Das System wurde im Zuge des Vorprojekts *Empower Citizens* (FFG-Nr.: 855526) zusammen mit „Software in the Loop“ vorab in den Simulationsumgebungen IDA ICE und Matlab erfolgreich getestet. Im Zuge der Umsetzungsphase wurde dieses Modell validiert.

Die Beurteilung der Behaglichkeit erfolgt über den sogenannten PMV-Index (Predicted Mean Vote), welcher die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen voraussagt, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Dieser Wert ist abhängig von der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, dem Energieumsatz, der Bekleidungsisolations, der Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit. Je weiter dieser Wert von 0 abweicht, umso höher ist die Anzahl der unzufriedenen Personen, die es als zu kalt oder zu warm empfinden. Über- oder unterschreitet der aktuelle PMV-Index eine zuvor eingestellte Toleranzgrenze so versucht das System durch die Ausgabe von Empfehlungen die Behaglichkeit für die Personen wieder zu steigern. Diese Behaglichkeitssteigerung kann entweder über Stoßlüften, Verschatten oder aber auch durch das Zurückdrehen der Heizung geschehen. Parallel zu dieser Funktion der Behaglichkeitssteigerung gibt das System auch aus, wann die CO₂-Konzentration in der Zone überschritten wird, und eine Stoßlüftung notwendig ist.

Die Wohnungen werden in verschiedenen Zonen unterteilt, die unabhängig voneinander vom Empfehlungssystem beurteilt werden. Eine Zone ist durch das Vorhandensein einer eigenen Messstation (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration) und der Möglichkeit der Beeinflussung des Raumklimas durch das Verschatten oder das Öffnen von Fenstern oder durch die Regelung eines darin befindlichen wärmeemittierenden Gerätes definiert. Die Objekte, welche im Zuge von *Empower Citizens* und *Easy Energy Saver* als Pilotanlagen zur Verfügung standen, bestehen entweder aus einer einzelnen Zone (einzelner Raum, wie zum Beispiel Wohnzimmer oder Heimbüro) oder zwei Zonen (Schlafzimmer & Wohnzimmer). Bei den Objekten bestehend aus zwei Zonen, wurden in der Umsetzungsphase in Abstimmung mit den BewohnerInnen aber nur das Wohnzimmer als Zone herangezogen.

Die Behaglichkeit in den einzelnen Zonen wird etwas vereinfacht ohne Berücksichtigung der Luftgeschwindigkeit und der Strahlungstemperatur durchgeführt. Die Messsignale aus den einzelnen Zonen werden an eine zentrale Hauptstation in der jeweiligen Wohnung übermittelt. Weiters erhält die zentrale Ausgabestation die aktuelle Temperatur und Luftfeuchtigkeit von einer Außenwetterstation. Für eine einfache Installation wurde zunächst ein nicht-kabelgebundenes System zur Datenübertragung verwendet. Jedoch konnte nur ein kalbgebundenes System eine möglichst hohe Stabilität der Datenübertragung gewährleisten, weshalb im Zuge des Projekts schließlich auch nur solche Systeme verbaut wurden.

Einen beispielhaften Aufbau des Systems anhand einer Wohnung mit zwei Zonen ist in Abb. 2 ersichtlich.

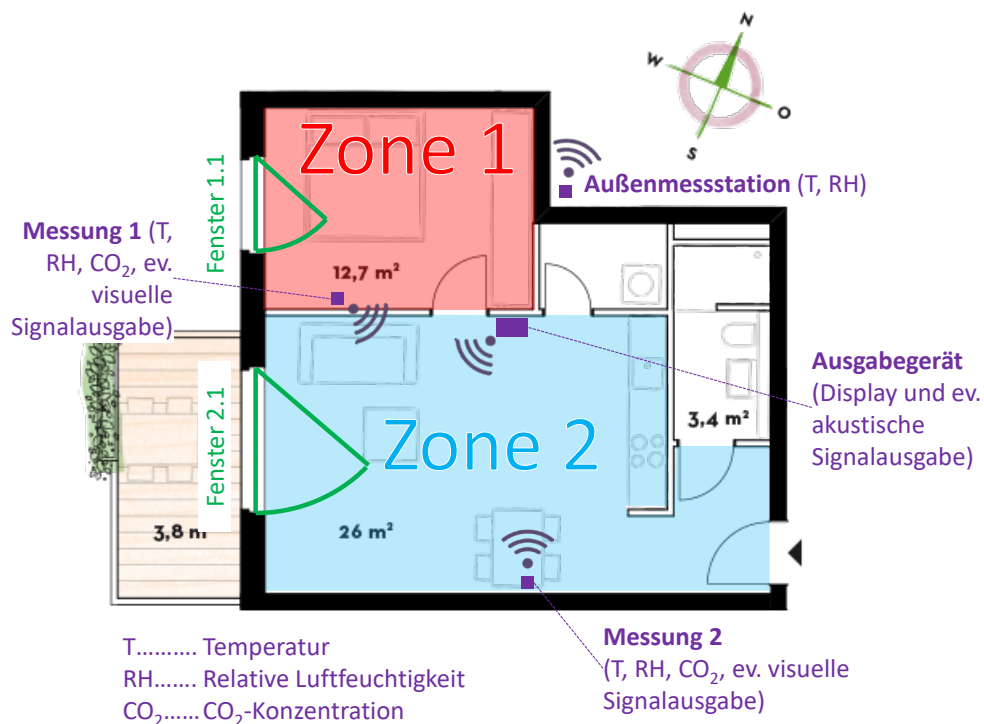


Abb. 2: Beispielhafter Aufbau des Empfehlungssystems in einer 2-Zonen-Wohnung

Nach der Installation des Systems arbeitet dieses noch nicht vorrausschauend. Das heißt, dass erst eine Empfehlung ausgegeben wird, wenn eine Toleranzgrenze über- oder unterschritten wird und eine Aktion (Stoßlüften, Verschatten, Heizung zurückdrehen) eine Behaglichkeitssteigerung oder eine Energieeinsparung zur Folge hat. Zur Senkung des Energiebedarfs sind aber auch vorgezogene Empfehlungen sinnvoll, welche vor allem das Verschatten betreffen. Ziel ist es, Empfehlungen dann auszugeben, wenn Personen anwesend und motiviert sind diese Empfehlungen auch durchzuführen. Geht jemand beispielsweise täglich um 7 Uhr außer Haus, kann es sinnvoll sein eine Verschattungsempfehlung, welche eigentlich erst zu einem späteren Zeitpunkt ausgegeben werden würde, bereits vorgezogen auszugeben, so dass die Person noch vor dem Verlassen der Wohnung daran erinnert wird, diese Tätigkeit auch auszuführen. Außerdem soll dadurch die Anzahl der ausgegebenen Empfehlungen minimiert werden. Die betroffenen Personen dürfen sich keinesfalls von dem System belastet fühlen. Diese vorgezogenen Empfehlungen können entweder über die fixe Eingabe von Zeitfenstern erreicht werden oder in einer weiteren Version mithilfe eines selbstlernenden Algorithmus.

Ist der selbstlernende Algorithmus aktiviert, versucht das System zu erkennen zu welchen Zeitpunkten bevorzugt Befehle angenommen werden. Bei einer Fensterlüftung kann die Detektion relativ einfach durch die Messung der CO₂-Konzentration geschehen, sofern die CO₂-Konzentration der Raumluft zum Zeitpunkt der mutmaßlichen Ausführung ausreichend hoch ist. Ein starker Abfall der CO₂-Konzentration bedeutet, dass das Fenster geöffnet wurde. Ein weiteres Zeichen, ob ein Fenster geöffnet wurde, ist wenn sich die Zonentemperatur der Außentemperatur anpasst, obwohl die vorherrschenden Parameter ein anderen Temperaturverlauf voraussagen würden. Ob eine Verschattung durchgeführt wurde, kann nicht festgestellt werden. Die als angenommen erkannten Befehle werden gespeichert und sobald genügend Befehle vorhanden sind mit einem statistischen Ansatz ausgewertet. Dazu werden die angenommen und die ausgegebenen Empfehlungen abhängig von der Uhrzeit, dem Wochentag und dem vorherrschenden PMV-Index ausgewertet. Werden zu einem Zeitpunkt viele Empfehlungen ausgegeben aber wenig angenommen ist das ein Hinweis auf eine häufige Abwesenheit oder Demotivation der Person während dieser Zeit. Werden umgekehrt viele der ausgegebenen Empfehlungen angenommen nimmt das System an, dass die Person zu dieser Zeit häufig zu Hause ist. Unterschiedliche Anwesenheiten an verschiedenen Wochentagen werden ebenfalls berücksichtigt. Darauf basierend kann automatisch ein Anwesenheitsprofil erstellt werden, welches in regelmäßigen Abständen mit neuen Daten upgedatet wird. Neben der Erstellung des Anwesenheitsprofiles, versucht das System auch den Komfortbereich der Personen zu erkennen. Wenn z.B. eine Person das Fenster bevorzugt ab einem PMV-Index von 1 öffnet, obwohl die Empfehlung bei der Initialisierung des Systems schon bei 0,5 ausgegeben wird, wird angenommen, dass diese Person ein wärmeres Raumklima bevorzugt und die PMV-Grenzen werden verschoben. Um den Einfluss von Empfehlungen, die aufgrund von Abwesenheiten erst bei einem höheren PMV-Index angenommen werden zu minimieren, werden nur jene Empfehlungen für die Beurteilung des Komfortbereichs gezählt, die während der vermuteten Anwesenheit

ausgegeben bzw. angenommen werden. Da das gleiche für die Erstellung des Anwesenheitsprofils gilt, wird dieser Prozess iterativ ausgeführt.

2 Simulationstechnische Abbildung des Systems

Die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten wurden Großteils im Vorprojekt *Empower Citizens* (FFG-Nr.: 855526) durchgeführt, werden aus Gründen des leichteren Verständnisses jedoch an dieser Stelle noch einmal erklärt.

2.1 Simulationsaufbau

In einer Co-Simulation mit den beiden Programmen Matlab und IDA ICE wurde der Regelalgorithmus des Empfehlungssystems entwickelt (vgl. Abb. 3). Für die Gebäudesimulation wurde in IDA ICE eine Wohnung des Pilotgebäudes aus *Empower Citizens* im Detail abgebildet. Der Regelalgorithmus des Empfehlungssystems wurde in Matlab programmiert. Um diese beiden Programme miteinander koppeln zu können, musste außerdem eine dynamische Schnittstelle zum Datenaustausch entwickelt werden. In der Simulation wurde das manuelle Regeln der Heizung nicht berücksichtigt.

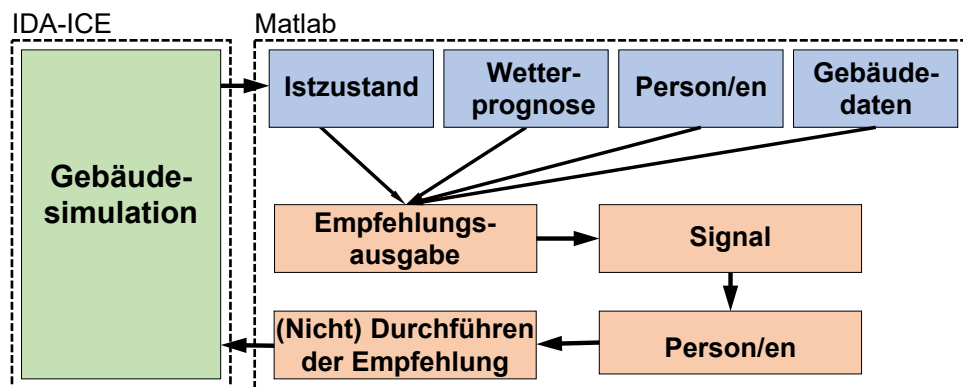


Abb. 3: Schematische Darstellung des Empfehlungssystems in der Simulationsumgebung

2.2 Parameterstudie

Mittels einer Parameterstudie wurde die Funktionsweise des Systems untersucht. Dabei wurden verschiedene Personengruppen mit unterschiedlichen Anwesenheitszeiten modelliert und miteinander verglichen. Die Motivation zur Ausführung von Empfehlungen wird abhängig von der Tageszeit variiert. In den Nachtstunden wird diese niedriger angenommen als am Tag. Nur wenn die Person anwesend und motiviert ist, wird eine Empfehlung auch ausgeführt.

In der Simulation wurde ermittelt, dass etwa 95 % der Lüftungsfälle vom selbstlernenden Algorithmus richtig erkannt werden, sofern die Parameter der Detektion optimal eingestellt wurden. Diese Parameter umfassen im Wesentlichen die zeitliche Temperatur- oder CO₂-Konzentrationsänderung und müssen an die Zoneneigenschaften sowie an die Eigenschaften der verwendenden Sensoren angepasst werden. Handelt es sich z.B. um eine große Zone mit nur einer kleinen Fensterfläche wird sich tendenziell ein langsamer Luftausgleich einstellen.

Auch die Lage der Messstation in der Zone muss beachtet werden. Befindet sich die Messstation z.B. in der Nähe eines Fensters, das geöffnet wird, wird sich tendenziell

schneller eine Temperaturanpassung an die Außenluft einstellen bzw. wird die CO₂-Konzentration tendenziell schneller sinken. Diese Abhängigkeit konnte vorab in der Gebäudesimulation noch nicht untersucht werden, so dass diese Parameter erst im Pilotversuch angepasst werden können. Simulationsbedingt konnten für den Regelalgorithmus immer nur die Zustandsgrößen in der jeweiligen Raummitte erfasst werden.

Neben der Parametervalidierung für den selbstlernenden Prozess war die Berechnung der Energieeinsparung und von raumklimatischen Zustandsgrößen Ziel dieser Parameterstudie.

In der Parameterstudie wurden jeweils zwei Referenzfälle betrachtet (Abb. 4 bis Abb. 6). Im ersten Referenzfall (Referenzfall 1) wurde eine sehr demotivierte Person angenommen, welche nur eine geringe Anzahl an Empfehlungen annimmt (und auch ohne die Ausgabe von Empfehlungen weder stoßlüftet noch verschattet). Referenzfall 2 nahm an, dass die im Haushalt lebende Person jeden Morgen eine Stoßlüftung in der gesamten Wohnung durchführt. In der restlichen Zeit bleiben die Fenster verschlossen. und es wird auch nicht verschattet. Diese beiden Referenzfälle wurden mit dem Fall einer durchschnittlich motivierten Person verglichen. Dabei wurde der Schwellenwert der CO₂-Konzentration jeweils einmal mit 2.000 ppm (EES (2000 ppm)) und 1.200 ppm (EES (1200 ppm)) festgelegt.

2.3 Ergebnisse der Simulation

Die Simulation zeigt, dass durch die Aktivierung der jeweiligen Person und der dadurch erwarteten hohen Annahmerate von Empfehlungen, die Behaglichkeit gesteigert werden kann. Die Behaglichkeitssteigerung hängt stark von der Motivation der im Haushalt lebenden Personen ab. Die Ausgabe der Empfehlungen soll zu Zeitpunkten erfolgen, an denen die Wahrscheinlichkeit der Ausführung hoch ist. Durch den selbstlernenden Prozess des Systems soll die Person das Gefühl haben, dass das System vorausschauend reagiert, und dieses bereits vor der wahrgenommenen Unbehaglichkeit eine Empfehlung ausgibt.

Auf den Heizwärmebedarf hat das System in diesen Beispielen keinen wesentlichen Einfluss (vgl. Abb. 4a). Durch häufige Anwesenheit und vermehrtes Stoßlüften aufgrund einer Überschreitung der CO₂-Konzentration kommt es sogar zu einem kleinen Anstieg des Heizwärmebedarfs. Wenn jedoch Zonen aktiv gekühlt werden, kann durch die Annahme der ausgegebenen Empfehlungen der Energiebedarf für das Kühlen um 50 % gesenkt werden. Wird dagegen ein Referenzfall angenommen, in dem die Fenster immer gekippt sind, zeigt die Simulation, einen mehr als 5-fach höheren Heizwärmebedarf als bei EES (2000 ppm).

Durch das oftmalige Stoßlüften kann die durchschnittliche CO₂-Konzentration in den Zonen gesenkt werden (vgl. Abb. 4b) und ist damit niedriger als in früheren wissenschaftlichen Arbeiten.^{1,2} Eine reine Morgenlüftung führt teilweise zu sehr hohen CO₂-Konzentrationen und

¹ Lundqvist G., Revsbech P., 1986. Ventilation in flats. Measurement of carbon dioxide and air exchange in retrofitted flats. Ugeskr Laeger 148:3475–3479

² Fehlmann J., Wanner H., 1993. Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. Indoor Air 3:41–50

ist demnach keine gute Alternative. Besonders hohe CO₂-Konzentrationen wurden im Schlafzimmer ermittelt. Dies ist der langen Anwesenheit in der Zone über Nacht und der äußerst geringen Motivation, Empfehlungen in den Nachstunden entgegenzunehmen, geschuldet. Nur im Referenzfall 2 wurde im Wohnzimmer eine höhere CO₂-Konzentration ermittelt. Zu begründen ist das damit, dass in diesem Referenzfall am Morgen gelüftet wird, und die im Haushalt lebende Person über den Tag sich vorwiegend im Wohnzimmer aufhält. Bei dieser Betrachtung wurde keine Luftaustausch zwischen den Zonen berücksichtigt.

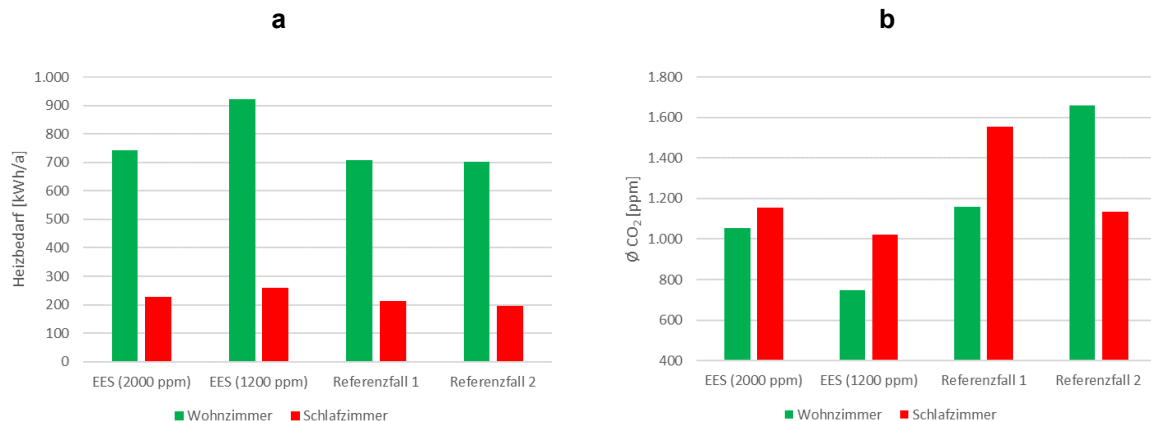


Abb. 4: Heizbedarf (a) und durchschnittliche CO₂-Konzentration (b) in den einzelnen Zonen

In Abb. 5 ist der PMV-Index (Maximal-, Minimal- und Durchschnittswert) für das Wohn- (a) als auch das Schlafzimmer (b) angegeben. Generell wird ein PMV-Index von 0 vom System angestrebt. Nur wenn durch den selbstlernenden Prozess erkannt wird, dass die Person ein anderes Raumklima bevorzugt, reagiert die Regelung mit der Ausgabe der Empfehlungen dementsprechend. In den abgebildeten Fällen der durchgeführten Parameterstudie wird von den jeweiligen Personen kein wärmeres oder kälteres Raumklima bevorzugt. Demnach wird vom System ein PMV-Index von Null angestrebt.

Bei einer durchschnittlich hohen Annahmerate nähert sich der durchschnittliche PMV-Index dem Optimalwert. Darüber hinaus kann der Maximalwert reduziert und eine wesentliche Verbesserung der Behaglichkeit in beiden Zonen erreicht werden.

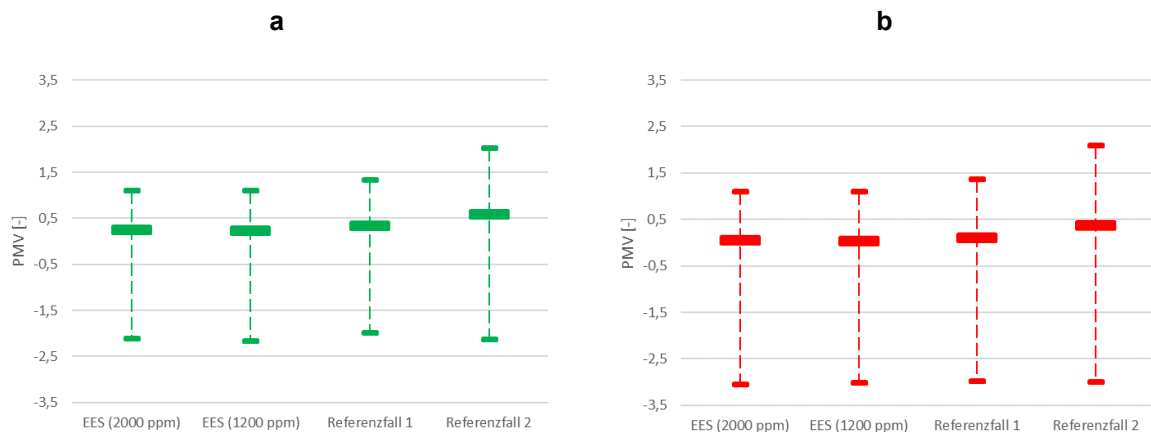


Abb. 5: PMV-Index ($\bar{x}$, min, max) für das Wohn- (a) und Schlafzimmer (b)

In Abb. 6a ist die absolute Anzahl an ausgegebenen Empfehlungen für ein Jahr im Wohnzimmer abgebildet. Generell werden mehr Empfehlungen zum Stoßlüften als fürs Verschatten ausgegeben. Bei der Einstellung eines niedrigen maximalen CO_2 -Konzentrationspegels von 1.200 ppm werden besonders viel Empfehlungen aufgrund der Überschreitung dieses Grenzwertes ausgegeben. Bei der demotivierten Person (Referenzfall 1) werden nur etwa die Hälfte der Empfehlungen für das Stoßlüften ausgegeben. Grund dafür ist, dass die Empfehlungen aufgrund einer CO_2 -Überschreitung lange bestehen bleiben und erst verschwinden, wenn die Person stoßlüftet (Eine natürlich Luftzirkulation bei geschlossenen Fenstern wurde vernachlässigt). Dadurch verringert sich die absolute Anzahl an Empfehlungen. Auf die Dauer, über die diese Empfehlungen ausgegeben werden, hat dies aber keinen Einfluss.

Diese Tatsache ist auch in Abb. 6b zu sehen. Hier ist der Prozentsatz der angenommenen Empfehlungen für das Stoßlüften etwa gleich hoch wie bei den Fällen in denen motivierte Personen angenommen wurden (Referenzfall 2 und beide EES-Fälle). Nur bei den angenommenen Empfehlungen für das Verschatten gibt es große Abweichungen zu den Fällen mit den motivierten Personen.

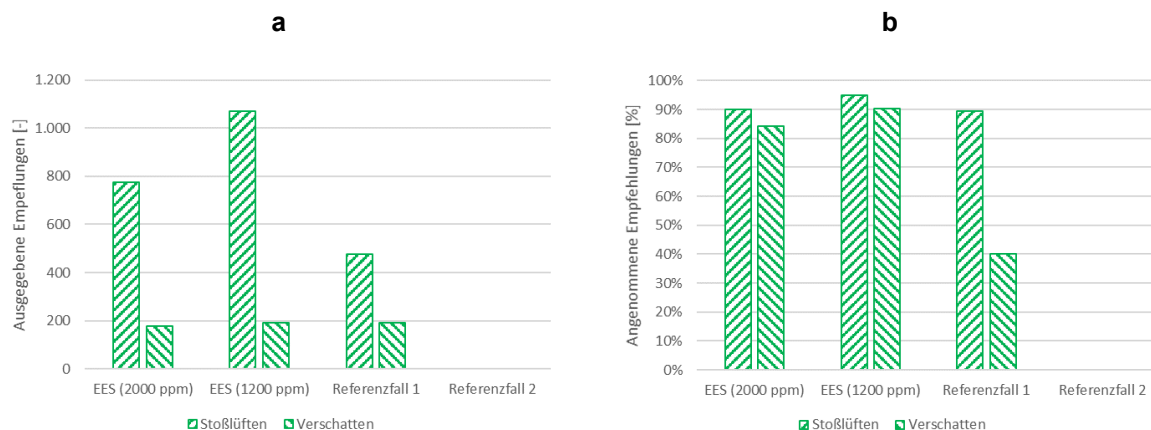


Abb. 6: Auswertung der Empfehlungsannahme für das Wohnzimmer

3 Reglerimplementierung

Die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten wurden Großteils im Vorprojekt *Empower Citizens* (FFG-Nr.: 855526) durchgeführt, werden aus Gründen des leichteren Verständnisses jedoch an dieser Stelle noch einmal erklärt.

3.1 Übersicht

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden die Außenbedingungen mit den Bedingungen im Inneren der Wohnung verglichen. Die Beurteilung der Behaglichkeit erfolgt hier über den sogenannten PMV-Index (Predicted Mean Vote), welcher die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Personen voraussagt, die dem gleichen Umgebungsklima ausgesetzt sind. Verschiedene Faktoren können diesen Index beeinflussen: die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, der Energieumsatz, die Bekleidungsisolation, die Luftfeuchte und die Luftgeschwindigkeit. In diesem Fall wird er vereinfacht ohne Berücksichtigung der Strahlungstemperatur und Luftgeschwindigkeit berechnet.

Je weiter dieser Wert von 0 abweicht, umso höher ist die Anzahl der unzufriedenen Personen, die es als zu kalt oder zu warm empfinden. Über- oder unterschreitet der aktuelle PMV-Index eine zuvor eingestellte Toleranzgrenze, so versucht das System, durch die Ausgabe von Empfehlungen, die Behaglichkeit für die Personen wieder zu steigern. Diese Behaglichkeitssteigerung kann über eine Aktion (entweder über Stoßlüften, Verschatten oder durch das Zurückdrehen der Heizung) geschehen. Parallel zu dieser Funktion der Behaglichkeitssteigerung gibt das System auch aus, wann die CO₂-Konzentration in der Zone überschritten wird, und eine Stoßlüftung notwendig ist. Zusätzlich gibt es auch Befehle, die zu einer Senkung des Energiebedarfs führen, wobei vor allem zum Verschatten bereits vorgezogene Empfehlungen sinnvoll sind, z.B. wenn Personen früh das Haus verlassen, sollte diese Empfehlung bereits in der Früh ausgegeben werden, um effektiv zu sein. Dadurch soll auch die Anzahl an Empfehlungen minimiert werden.

Innovativ an diesem System ist der selbstlernende Charakter. Wenn dieser aktiviert ist, versucht es zu erkennen, zu welchem Zeitpunkt Befehle tendenziell eher angenommen werden und speichert dies in einer Matrix ab. Das Annehmen von Befehlen zeigt sich durch eine rapide Veränderung der Temperatur/Luftfeuchtigkeit/CO₂-Konzentration in der Wohnung. Durch Sammeln dieser Informationen über einen bestimmten Zeitraum beginnt das System über einen statistischen Ansatz abhängig von Uhrzeit, Wochentag und vorherrschendem PMV-Index, das Verhalten der BewohnerInnen zu verstehen, z.B. ob sie jeden Tag acht Stunden arbeiten gehen oder ihr Wochenende regelmäßig zuhause verbringen und wo ihr Komfortbereich liegt. Entsprechend diesem Anwesenheitsprofil werden ab dann nur mehr Empfehlungen zu Zeiten ausgegeben, wo die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass jemand da ist, um die Empfehlung auch anzunehmen. Dieses Profil wird regelmäßig durch die neuen Daten upgedatet. Dabei werden nur mehr jene Befehle für den Komfortbereich bzw. das Anwesenheitsprofil in Betracht gezogen, die während der

vermuteten Anwesenheit ausgegeben bzw. angenommen werden, um den Einfluss von Befehlen, die aufgrund von Abwesenheiten erst bei einem höheren PMV angenommen werden, zu minimieren. Dies ist ein iterativer Prozess.

3.2 Matlab vs Python

Das selbstlernende Programm vom *Easy Energy Saver* basiert auf einem Matlab-Programm, bei der die Wetterdaten durch Simulation virtuell eingespeist werden, um die Funktionsweise des Programmes zu testen. Die virtuellen Daten werden beim EES durch die gemessenen Sensordaten ersetzt. Da für die eingebauten EES Raspberry Pis verwendet werden, musste der gesamte Matlab-Code in Python übersetzt werden, um ohne Probleme auf dem Minicomputer laufen zu können. Es gab auch die Überlegung, das Matlab-Programm direkt auf dem Raspberry Pi laufen zu lassen; dazu wäre aber eine eigene kostspielige Lizenz notwendig.

Erste Schwierigkeiten traten hierbei auf, da Python und Matlab Matrizen und Arrays unterschiedlich ansprechen (in Matlab beginnt alles mit Index 1, in Python mit 0) und manche Funktionen bzw. Methoden keine äquivalente in der anderen Sprache aufweisen. Dadurch mussten einige Work-Arounds eingebaut werden bzw. Programmteile umgeschrieben werden.

Verschiedene Funktionen wurden im Endprogramm auch vollständig weggelassen, da sie zur Simulation der Messdaten im Matlab-Programm notwendig waren und somit im EES keine Verwendung mehr hatten. Zunächst wurde jedoch das gesamte Programm umgeschrieben, um die Funktionsweise des Python-Programmes ohne Sensoren testen zu können.

Zusätzlich wurden die globalen Variablen aus Matlab in Python als Argumente der Funktionen weitergegeben, da zuerst mit mehreren Modulen in Python gearbeitet wurde und die Definition globaler Variablen hier zu kompliziert geworden wäre.

3.3 Python-Programm

Grundsätzlich konnte der Aufbau des Matlab-Programms mit den unterschiedlichen Unterfunktionen übernommen werden; anders als in Matlab befindet sich das gesamte Python-Programm (gesamter Programmcode siehe Kapitel 8.3) in einer Datei und wichtige Informationen über die Gegebenheiten der jeweiligen Wohnung werden über ein Konfigurationsfile (siehe Kapitel 8.2) zu Beginn eingelesen. Dieses File wird vor Einbau des EES mit Informationen über die Bewohner:innen, Anzahl und Ausrichtung der Fenster, etc. gefüllt. Zusätzlich kann angegeben werden, ob das selbstlernende System zum Einsatz kommen soll.

Eine erste Überlegung war, das Programm automatisch bei Start des Raspberry Pi mitstarten zu lassen, sodass die Bewohner selbst nichts einstellen müssten. Dazu werden zunächst die Rechte der Datei so geändert, dass sie ausführbar wird:

```
sudo chmod +x /home/pi/dateiname.py
```

Danach muss noch ein entsprechender Befehl in das Startscript eingegeben werden:

```
sudo crontab -e
@reboot sudo python3 /home/pi/dateiname.py
```

Diese Idee wurde jedoch wieder verworfen, da sowieso eine Person der *4wardEnergy Research GmbH* beim Aufbau des EES zugegen sein muss, um die der Wohnung entsprechenden Parameter in das Konfigurationsfile einzufügen und damit auch gleich das Programm starten kann, um dessen Funktion zu überprüfen.

Die Speicherung der Messdaten erfolgt in einem .txt-File, das entsprechend der Nummer des EES benannt ist, um die Daten später ohne Probleme zuordnen zu können. Dabei werden zusätzlich die Empfehlungen (Verschatten ja/nein, Lüften ja/nein), der berechnete PMV-Index und die Temperatur des Raspberry Pis sowie eventuell auftretende Fehler zur späteren Analyse gespeichert. Die vom selbstlernenden System erstellten Matrizen werden als Numpy-Arrays gespeichert, um im Falle eines Absturzes des Programmes nicht noch einmal von vorne in der Datenaufzeichnung beginnen zu müssen. Um diese gespeicherten Daten einzulesen, ändert man einen Parameter im Konfigurationsfile, der bestimmt, ob auf bereits vorhandene Matrizen beim Start des Programmes zurückgegriffen werden soll.

Anschließend wurden die Sensoren hinzugefügt. Dabei wurde zunächst für jeden neuen Sensor ein kurzes Testskript erstellt, um die Funktionsweise zu überprüfen. Danach wurden die benötigten Module in das Hauptprogramm importiert und die Initialisierung des Sensors zu Beginn des Programmes sowie die Messdaten-Auslese in der `fct_measure`-Funktion hinzugefügt.

Nachdem die Empfehlungen im Intervall von 3 Minuten aktualisiert werden sollen, werden die Messdaten über diesen Zeitraum gemittelt. Dabei wird vor allem Wert daraufgelegt, Ausreißer und unmögliche Werte (sehr tiefe oder sehr hohe Temperaturen), die einem Fehler des Sensors oder der Übertragung geschuldet sind, nicht miteinzubeziehen. Dafür werden die gemessenen Werte mit dem Mittelwert des letzten Intervalls verglichen und bei einer zu großen Abweichung werden die jeweiligen Werte verworfen. Wenn während der Messphase die Kommunikation zu einem der Sensoren nicht funktioniert, wird dies als Fehler vermerkt und wenn dieser für längere Zeit besteht, erhält der*die BenutzerIn eine entsprechende Meldung auf dem Display. Dabei beginnt auch die rote LED zu blinken, um darauf aufmerksam zu machen.

Hier gab es zunächst die Idee, das Blinken über das Programm laufen zu lassen. Dazu wird im paar Sekunden Takt das Lämpchen ein- bzw. ausgeschaltet.

```
while 1:
    GPIO.output(24, GPIO.HIGH)
    tm.sleep(1)
    GPIO.output(24, GPIO.LOW)
    tm.sleep(1)
```

Das Problem dabei ist, dass das Programm dann in dieser while-Schleife festhängt und nicht mehr weiterläuft. Um das zu lösen und die LED blinken zu lassen, während das Programm läuft, wurde das Prinzip des Threadings bzw. des Multiprocessings untersucht.

Hierbei handelt es sich um die Möglichkeit, zwei verschiedene Prozesse (z.B. das Ein- und Ausschalten der LED und der weitere Ablauf des Programmes) scheinbar zeitgleich ablaufen zu lassen. Beim Threading passiert das über unterschiedliche Threads, beim Multiprocessings – wie der Name auch vermuten lässt – mittels mehrerer Subprozesse. Vorteil des Multiprocessings ist das Umgehen des sogenannten Global Interpreter Locks, der sicherstellt, dass immer nur ein Thread ausgeführt wird.^{3,4,5} Es traten jedoch Probleme bei dieser Art der Handhabung auf, da sich das Programm öfters selbst stoppte bzw. doch nur einen Prozess ausführte. Deswegen wurde anschließend versucht, das hardwareseitig zu lösen (siehe Kapitel 4.1.2).

Grundsätzlich wurden zu Beginn des Programmes noch einige Befehle hinzugefügt, die den korrekten Anschluss der verschiedenen Sensoren vor Beginn der Messung überprüfen und gegebenenfalls auf falsch angeschlossene Teile bzw. Kommunikationsprobleme hinweisen. Außerdem leuchten alle LEDs zum Start einmal auf, um ihren richtigen Verbau zu kontrollieren.

³ www.docs.python.org, abgerufen am 16.05.2022

⁴ www.docs.python.org, abgerufen am 16.05.2022

⁵ www.docs.python.org, abgerufen am 16.05.2022

4 Aufbau

Die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten wurden Großteils im Vorprojekt *Empower Citizens* (FFG-Nr.: 855526) durchgeführt, werden aus Gründen des leichteren Verständnisses jedoch an dieser Stelle noch einmal erklärt.

4.1 Hauptstation

Es wird ein Raspberry Pi 3 des Modells B+ verwendet. Der erste Schritt ist die Installation des Raspberry Pi OS auf einer entsprechenden SD-Karte. Dazu kann das NOOBS-ZipFile von der Raspberry Pi-Website heruntergeladen und entpackt werden. Danach müssen die Dateien nur noch auf die im FAT32-Format formatierte SD-Karte kopiert und diese ins Raspberry Pi eingesetzt werden. Bei Start des Gerätes wird man gefragt, welches Programm man installieren möchte; man wählt Raspbian aus und wartet die Installation ab (ca. 30 Minuten).

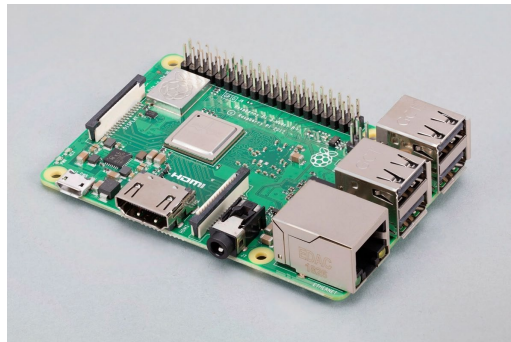


Abb. 7: Raspberry Pi 3 Model B+⁶

4.1.1 Display

Die Anforderungen an das Display waren eine gute Lesbarkeit, sowie genügend Platz, um alle wichtigen Informationen anzeigen zu können. Ein Touch-Display war im Gespräch, wurde aber - da keine Notwendigkeit dafür bestand - wieder verworfen. Aus dem zweizeiligen LCD-Display wurde schließlich ein vierzeiliges, um gleichzeitig die Messdaten sowie die Empfehlung anzeigen lassen zu können (siehe Abb. 8). Der Anschluss an das Raspberry Pi erfolgt mittels I2C-Schnittstelle. Dazu ist ein eigener Adapter notwendig, damit die Pins des Displays in vier Anschlüsse (zwei Mal Daten, Stromanschluss und Erdung) konvertiert werden.

Über den I2C-Bus können mehrere Geräte angeschlossen werden, jedes mit einer eindeutigen Adresse, die oft durch Ändern von Jumper-Einstellungen auf dem Modul eingestellt werden kann. Dies ist sehr nützlich, um zu sehen, welche Geräte an den Pi angeschlossen sind, und um sicherzustellen, dass die Kommunikation problemlos funktioniert und die einzelnen Geräte richtig angesprochen werden.⁷

⁶ www.raspberrypi.org, abgerufen am 16.05.2022

⁷ www.learn.adafruit.com, abgerufen am 16.05.2022



Abb. 8: LCD-Display mit I2C-Adapter⁸

4.1.2 LEDs

Es werden LEDs in vier verschiedenen Farben für die unterschiedlichen Empfehlungen bzw. die Anzeige eines aufgetretenen Fehlers verwendet. Wichtig für die LEDs ist der richtige Anschluss, d.h. der Strom muss in die richtige Richtung fließen, da sie sonst sperrt und nicht leuchtet. Dabei wird sie über ihren positiven Pol an den Pin angeschlossen, über den die LED später angesprochen wird (kein Ground- oder VCC-Pin); ihr negativer Pol wird mit einem Ground-Pin verbunden. Durch eine Transistorschaltung wurde das Blinken der roten LED ermöglicht (Abb. 9).

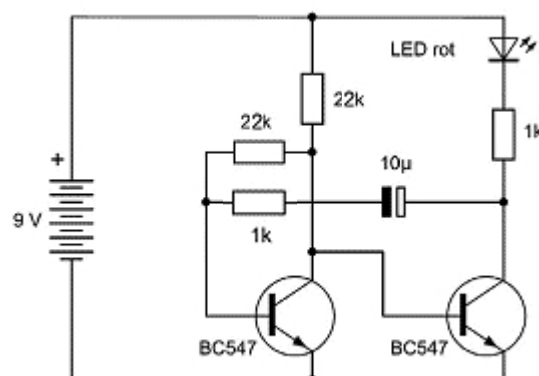


Abb. 9: Blinklichtschaltung

4.1.3 USV

Die Hauptstation enthält auch eine USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung), um eventuellen Stromausfällen, etc. vorzubeugen. Hierbei wird ein StromPi 3 mit StromPi 3 Battery Pack verwendet. Dieses wird auf die Pins des Raspberry Pi aufgesetzt; sämtliche

⁸ www.sainsmart.com, abgerufen am 16.05.2022

Verbindungen werden somit am StromPi Battery Pack angeschlossen. Der StromPi ist dafür verantwortlich, die Stromversorgung entsprechend umzuschalten, sollte die primäre Spannungsquelle nicht verfügbar sein. Dabei hat man verschiedene Möglichkeiten, wie man verfahren möchte: Generell wird in diesem Fall das Raspi über microUSB betrieben, es gibt aber auch einen WideRange-Anschluss und das Battery Pack. In der StromPi-Console kann der gewünschte Modus ausgewählt werden (siehe Abb. 11).

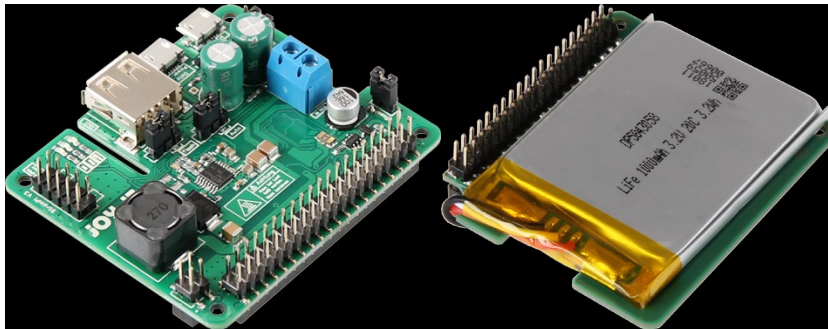


Abb. 10: StromPi 3 + Battery Pack⁹

MODUS	PRIMÄR	SEKUNDÄR	TERTIÄR
Mode 1	microUSB	Wide-Range	-
Mode 2	Wide-Range	microUSB	-
Mode 3	microUSB	Batterie	-
Mode 4	Wide-Range	Batterie	-
Mode 5 (ab V1.6)	microUSB	Wide-Range	Batterie
Mode 6 (ab V1.6)	Wide-Range	microUSB	Batterie

Abb. 11: Modi des StromPi 3 ([Quelle](#))

4.1.4 I2C-Anschluss

Da sowohl Display als auch die Sensoren auf den SCL- und SDA-Pin zugreifen müssen, um als I2C-Geräte an das Raspberry Pi angeschlossen werden zu können, wurden die entsprechenden Kabel zusammengelötet und mit einem Schrumpfschlauch versehen, um das Ganze zu sichern. Damit wurde das Breadboard, das zunächst als Verbindung zwischen den verschiedenen Teilen verwendet wurde, obligat und dadurch zusätzlich Platz im EES eingespart, damit alles andere besser verstaut werden konnte.

4.2 Wetterstation

Für die Wetterstation wurde ein Arduino MKR1000 WiFi-Board verwendet. Da die Funktion der Wetterstation nur das Auslesen der Daten aus dem Sensor und das Senden an die Hauptstation, aber keine Rechenleistungen umfängt, sind die Anforderungen an das Board eher gering und ein kleines Board mit WiFi-Funktion ist ausreichend.

Um kein Stromkabel verlegen zu müssen, wurde die Möglichkeit einer Batterie überprüft. Der Anschluss dieser an das Board war aber nicht möglich, deswegen wurde eine Powerbank verwendet. Dies bedeutet, dass diese regelmäßig getauscht werden muss, um die Versorgung des MKR1000 mit Strom zu gewährleisten.

⁹ www.joy-it.net, abgerufen am 16.05.2022

Zur Programmierung des Boards wird die Arduino IDE verwendet. Alle zehn Sekunden sollen die aktuelle Temperatur und Luftfeuchtigkeit des BME280-Sensors ausgelesen und an die Hauptstation gesendet werden. Um die Funktionsweise zu überprüfen, wurde das MKR1000 über USB an den Computer angeschlossen und der Output ausgelesen.



Abb. 12: Arduino MKR1000 WiFi¹⁰

4.3 Sensoren

4.3.1 DHT11

Der Adafruit DHT11-Sensor wurde zunächst in der Hauptstation als Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor verbaut. Das Auslesen der Daten mittels des von Adafruit bereitgestellten Moduls erforderte wenig Code und funktionierte ohne Zwischenfälle. Probleme traten jedoch auf, da die Messergebnisse nicht sehr akkurat waren und öfters größere Temperaturschwankungen ohne Lüften auftraten. Zusätzlich maßen zwei verschiedene DHT11-Sensoren, die nebeneinander aufgestellt waren, mitunter Werte, die sich stark voneinander unterschieden, und reagierten unterschiedlich schnell auf das Öffnen des Fensters.

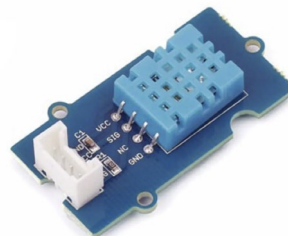


Abb. 13: DHT11-Sensor¹¹

4.3.2 CCS811

Ebenfalls von Adafruit misst der CCS811-Sensor die CO₂-Konzentration wie auch die Konzentration der volatilen Gase (wurden hier nicht miteinbezogen). Einschränkungen inkludieren einen minimal messbaren Wert von 400 ppm (Normalkonzentration von CO₂ in der Atmosphäre → bereitet in diesem Fall nicht wirklich Probleme, da die Konzentration in geschlossenen Räumen tendenziell höher ist). Es dauert außerdem teilweise sehr lange, damit er durch Lüften nach einem hohen Wert wieder sinkt, → der Vergleich mit anderen Sensoren zeigt, dass sich die Konzentration in Wirklichkeit durchaus schneller reduziert.

¹⁰ www.store.arduino.cc, abgerufen am 16.05.2022

¹¹ www.at.rs-online.com, abgerufen am 16.05.2022

Gleich wie beim DHT11-Sensor messen unterschiedliche Sensoren desselben Modells teilweise sehr unterschiedliche Werte.



Abb. 14: CCS811-Sensor¹²

In einem Laborversuch wurde die gemessene CO₂-Konzentration von CCS811 mit der kalibrierten CO₂-Sonde GMP252 gegenübergestellt (siehe Abb. 15). Es zeigte sich eine erhebliche Abweichung zum Messwert des kalibrierten Messgerätes. Somit wurde beschlossen, dass ein anderer Sensor zur Messung der CO₂-Konzentration verwendet wird.

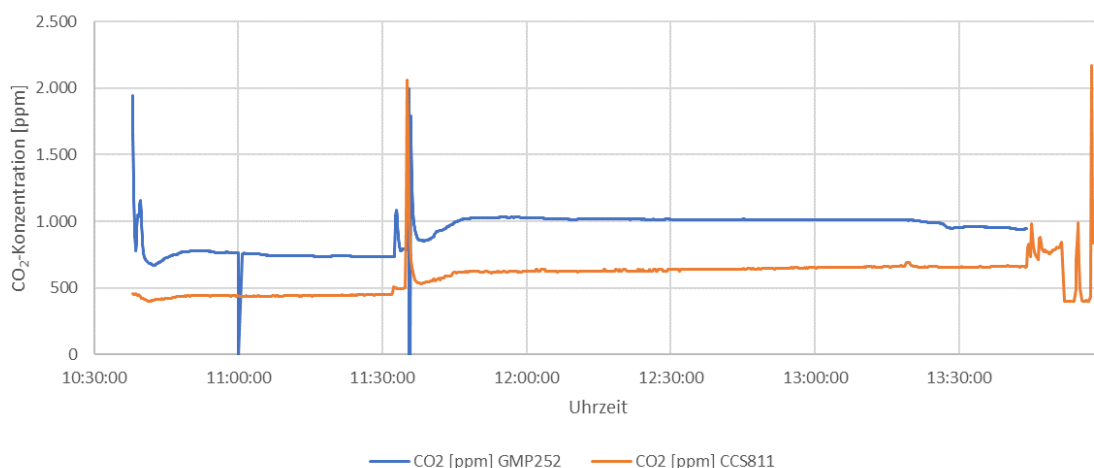


Abb. 15: Vergleich der gemessenen CO₂-Konzentration

4.3.3 SCD30

Der SCD30-Sensor von Sensirion vereint die Funktionen des DHT11- und des CCS811-Sensors in sich: Er misst neben Temperatur und Luftfeuchtigkeit auch die CO₂-Konzentration wodurch nicht mehrere Sensoren notwendig sind. Einerseits zeigt er eine bessere CO₂-Sensibilität als der CCS811-Sensor (wie in Laborversuchen gezeigt) und meistens auch akkurate Ergebnisse im Temperaturbereich wie der DHT11-Sensor. Andererseits war die Funktionstüchtigkeit bei einem Gutteil der Sensoren von Anfang an nicht gegeben, sodass einige zurückgeschickt und ersetzt werden mussten. Deshalb sollte die Funktion nach Erhalt unbedingt sofort kontrolliert werden.

¹² www.amazon.de, abgerufen am 16.05.2022

Das Auslesen gestaltet sich hier schwieriger als bei den anderen Sensoren, da die empfangenen Daten dekodiert und die richtigen Informationen zusammengefügt werden müssen, wie im folgenden Code¹³ ersichtlich wird:

```
fct_i2cWrite([0x03, 0x00], h, pi)
data = fct_read_n_bytes(18, pi, h)
struct_co2 = struct.pack('>BBBB', data[0], data[1], data[3], data[4])
float_co2 = struct.unpack('>f', struct_co2)
scd_CO2_z1_now = round(Decimal(float_co2[0]), 0)
```

Mit der `fct_i2cWrite`-Funktion werden dem Sensor die Verbindungsdaten übermittelt, mittels `fct_read_n_bytes` die entsprechenden Daten ausgelesen und die einzelnen Bytes in die verschiedenen Einträge eines Arrays gespeichert. Aus diesen werden dann für jeden Messwert (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration) die notwendigen Bytes mittels `struct.pack` zusammengesetzt und dann mittels `struct.unpack` in die angegebene Form umgewandelt (in diesem Fall von Bytes zu Float). Danach werden die Werte noch auf die notwendigen Kommastellen gerundet und in die zu übertragende Variable gespeichert.

Da dieser Sensor im Gesamten die beste Performance lieferte, wurde er für die endgültige Verbauung in der Hauptstation gewählt.



Abb. 16: SCD30-Sensor¹⁴

4.3.4 BME280

Der BME280-Sensor von Adafruit wurde als erster Sensor in der Wetterstation eingesetzt. Vom Anschluss her gab es keine Probleme und auch der Code zum Auslesen war nicht komplex. Er gibt die Temperatur und Luftfeuchtigkeit aus; ein CO₂-Sensor ist für draußen nicht notwendig, da die CO₂-Konzentration als quasi konstant angesehen werden kann (etwa 400 ppm).

Es traten aber Verbindungsstörungen auf, besonders als bei der kabelgebundenen Version längere Kabel eingesetzt wurden. Der Sensor wurde oft nicht erreicht bzw. war auf den Geräten, an denen er angeschlossen war, nicht ersichtlich. Zusätzlich gab es einen Fehler, wo ab einem gewissen Zeitpunkt als Temperatur nur mehr -145°C angezeigt wurde. Ein Neustart des Gerätes konnte diesen Fehler beheben. Da dieser aber in unregelmäßigen Abständen ohne klare Ursache auftrat, konnte er nicht behoben werden. Die

¹³ www.github.com, abgerufen am 16.05.2022

¹⁴ www.sensirion.com, abgerufen am 16.05.2022

Unzuverlässigkeit dieses Sensors machte die Suche nach einem anderen für die Wetterstation notwendig.

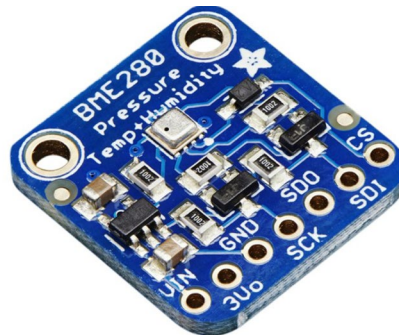


Abb. 17: BME280-Sensor¹⁵

4.3.5 DHT22

Der DHT22-Sensor von Adafruit wurde anschließend für die Wetterstation bzw. für den direkten Anschluss an die Hauptstation verwendet. Er misst Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit ausreichender Genauigkeit, liefert zuverlässig die Messdaten und ist leicht auszulesen.



Abb. 18: DHT22-Sensor¹⁶

4.4 Verbindung Wetterstation-Hauptstation

4.4.1 Funkverbindung

Der erste Versuch einer Funkverbindung zwischen Wetterstation und Hauptstation wurde über WiFi gestartet. Dabei stellt der Raspberry Pi einen Access Point dar, mit dem sich mehrere Objekte verbinden und Daten senden können. Da die Identifikation via Passwort die Verbindung unmöglich machte, wurde das Passwort entfernt. Daraus resultierte ein einigermaßen stabiler Datentransfer, der aber bereits durch eine Mauer signifikant behindert wurde. Außerdem sind WiFi-Frequenzen leicht zugreifbar, wenn keine Verschlüsselung durch ein Passwort vorliegt, weshalb die Daten ungeschützt wären. Deshalb wurde die Idee einer Funkverbindung mittels WiFi verworfen.

¹⁵ www.distrelec.at, abgerufen am 16.05.2022

¹⁶ www.amazon.de, abgerufen am 16.05.2022

Als nächstes wurde die Funkverbindung mittels NRF24L01+ Funkmodulen ohne Antenne auf beiden Seiten (Hauptstation sowie Wetterstation) versucht. Auf kurze Distanzen waren die Ergebnisse gut, wenn auch nicht immer stabil – der Raspberry Pi fiel einige Male unerklärt aus. Sobald sich aber eine Wand oder Tür dazwischen befand, nahm die Zuverlässigkeit signifikant ab und kaum Messungen kamen am Raspberry Pi an.

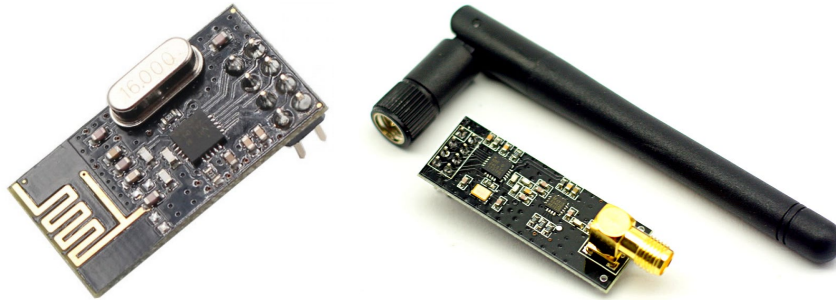


Abb. 19: NRF24L01+ Funkmodul ohne und mit Antenne^{17,18}

Bei Versuchen, mehrere Raspberry Pis mit einer Wetterstation kommunizieren zu lassen, wurde das Prinzip der Tree Topology der Funkmodule genutzt. Dabei kann eine Base-Node an mehrere Children-Nodes gleichzeitig senden, wenn die Adressen entsprechend gewählt werden (siehe Abb. 20). Dies funktionierte mit einer Wetterstation sehr gut (vier Raspis konnten angeschlossen werden), bei der zweiten fast gar nicht (maximal zwei gleichzeitig). Trotzdem fielen immer wieder Raspberry Pis aus oder empfangen nach einer gewissen Zeit keine Daten mehr.

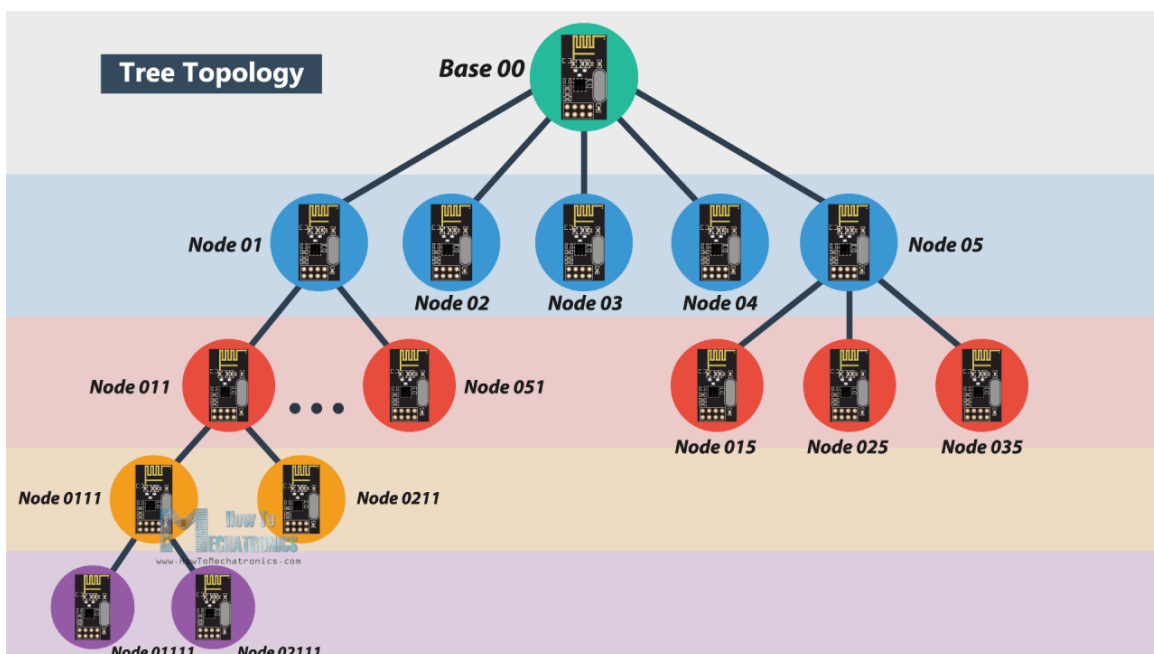


Abb. 20: Sendeprinzip Funkmodule Base-Children¹⁹

¹⁷ www.makerfabs.com, abgerufen am 16.05.2022

¹⁸ www.komputer.de, abgerufen am 16.05.2022

¹⁹ www.howtomechatronics.com, abgerufen am 16.05.2022

Deshalb wurde das Gleiche mit denselben Funkmodulen, dieses Mal aber mit Antenne, versucht. Diese zeigten weit bessere und zuverlässigere Ergebnisse und arbeiteten bei Versuchen in der *4ward Energy Research GmbH* auch durch mehrere Betonwände sowie einen Liftschacht ohne größere Probleme. Da aber die längeren Feldversuche in Pinkafeld gegenteilige Ergebnisse brachten, musste eine andere Möglichkeit der Kommunikation in Betracht gezogen werden.

4.4.2 Kabelverbindung

Zunächst wurde versucht, mit einem einfachen nichtabgeschirmten Stromkabel den Außensensor direkt an der Hauptstation anzubringen. Dazu musste das Kabel eine Länge von mindestens 10 m aufweisen, um durch die Wohnung nach draußen verlegt werden zu können. Tests mit 1-2 m langen Kabeln funktionierten mit dem BME280-Sensor nicht sehr gut, weswegen wie bereits erwähnt, der DHT22-Sensor eingesetzt wurde. Bei kürzeren Distanzen gab es kaum Probleme; bei längeren Kabeln wurde das Signal durch Störungen so abgeschwächt, dass nur selten Daten beim Raspberry Pi ankamen.

Deswegen wurde das Stromkabel durch ein abgeschirmtes Telefonkabel (Typ: J-Y(ST)Y) ersetzt und zusätzlich der Sensor mit einem 1 kOhm Widerstand versehen. Dies führte dazu, dass eine Distanz von 16 m überbrückt werden konnte, ohne zu Störungen in der Datenübertragung zu führen.

4.5 Kommerzielle Wetterstation

Es wurde überlegt, eine kommerzielle Wetterstation einzusetzen, um eine gute Funkverbindung und verlässliche Daten zu erzielen, aber die Verbindung bzw. das Auslesen der Daten gestaltete sich schwierig, wie von der *Forschung Burgenland GmbH* untersucht. Außerdem war diese teurer, weswegen diese Möglichkeit verworfen wurde.

4.6 Endgültige EES-Konfiguration

Die oben beschriebenen Schritte führten schließlich zu einem EES, basierend auf einem Raspberry Pi 3 Model B+ mit einer USV bestehend aus StromPi 3 und Battery Pack. Die Messergebnisse für außen liefert ein per 16 m langem Telefonkabel direkt angeschlossener DHT22-Sensor, die Wohnungsbedingungen misst ein SCD30-Sensor und die Ergebnisse bzw. Empfehlungen werden per vierzeiligem LCD-Display und vier LEDs ausgegeben.

5 Untersuchungsobjekte und Messreihen

Das vorliegende Kapitel fasst nicht nur die Messergebnisse zusammen, welche im Zuge des vorliegenden Projekts (*Easy Energy Saver*, FFG-Nr.: 884763) gewonnen wurden, sondern auch Ergebnisse aus dem Vorprojekt (*Empower Citizens*, FFG-Nr.: 855526). Deshalb werden im folgenden auch Messerergebnisse, welche vor dem offiziellen Projektstart (01.05.2021) generiert wurden, vorgestellt.

5.1 Untersuchungsobjekte

Die zwei Gebäude aus Kapitel 5.1.1 dienten ausschließlich in *Empower Citizens* als Untersuchungsobjekte. Wiederum wurden Messungen in den Untersuchungsobjekten aus den Kapiteln 5.1.3 bis 5.1.5 nur im Zuge vom Projekt *Easy Energy Saver* durchgeführt. Das Objekt, welches in Kapitel 5.1.2 vorgestellt wird, wurde in beiden Projekten für die Untersuchung herangezogen.

5.1.1 Wohnungen in Pinkafeld (Burgenland) – UO1

Einzelne Wohnungen der Wohnhausanlagen Wienerstraße 11 und Wienerstraße 11a in Pinkafeld (Abb. 21b) waren die Untersuchungsobjekte im Zuge des Vorprojekts *Empower Citizens*. Die Gebäude wurden im Jahr 1972 errichtet und 2010 thermisch saniert. Beide Gebäude haben eine ähnliche Raumaufteilung, sind unterkellert, dreigeschoßig und werden mittels Fernwärme versorgt. Die Wärmebereitstellung beider Objekte erfolgt über einen Wärmetauscher für Raumheizung und Warmwasserbereitstellung. Der Technikraum samt der wärmetechnischen Einrichtungen befindet sich im Kellergeschoss der Wienerstraße 11. Ausgehend von dieser Zentrale bestehen erdverlegte Wärmeversorgungsleitungen hin zum Keller der Wienerstraße 11a, welche das Gebäude in die hydraulische Anlage einbinden. Zusätzlich existiert zwischen den Gebäuden eine ganzjährig betriebene Zirkulations- und Warmwasserleitung, als Teil der zentralen Warmwasserversorgung der Wienerstraße 11/11a. Die hydraulische Anlage setzt sich im Wesentlichen aus den Komponenten Heizungsverteiler, Trenntauscher für Warmwasser und Trenntauscher für Raumheizung zusammen.

In jedem Geschöß befinden sich 4 Parteien. Demnach sind in beiden Wohngebäuden zusammengenommen 24 Wohnungen vorhanden. Die Wohnungen werden vorwiegend als Einpersonenhaushalte geführt und haben jeweils eine Nutzfläche von 46 m².

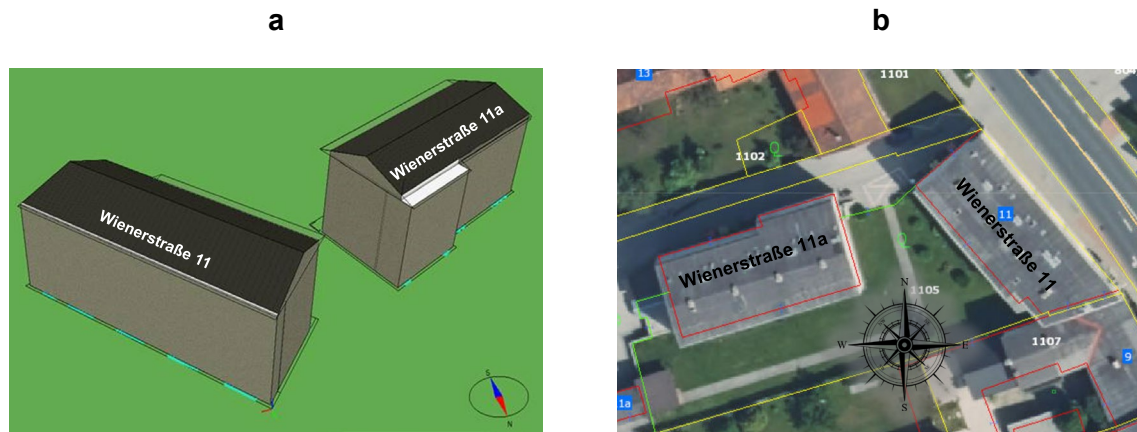


Abb. 21: Gebäudesimulation in IDA ICE (a) und Luftbild (b) Wienerstraße 11/11a

Jede Wohnung besitzt einen Balkon (siehe Abb. 22). Sowohl Schlaf- als auch Wohnzimmer haben zu diesem Balkon eine Tür und ein Fenster.



Abb. 22: Außenansicht Wienerstraße 11 von Nordwesten

5.1.2 Großraumbüro in Graz (Steiermark) – UO2

Es handelt sich hierbei um das Büro der *4ward Energy Research GmbH* in Graz (Reininghausstraße 13A, 8020 Graz). Das Büro befindet sich im ersten Obergeschoß des *Smart Business Centers* (Baujahr 2004, Abb. 23) und besteht aus zwei Räumen (Großraumbüro mit 56 m² und einem Besprechungsraum mit 28 m²). Das Gebäude wird mit einer Solewärmepumpe beheizt. Der *Easy Energy Saver* wurde im Großraumbüro installiert. Die Tür hin zum Besprechungsraum ist im Normalfall offen. Die Fensterreihe in beiden Räumen ist nach NNW (164°) ausgerichtet. Fenster in andere Himmelsrichtungen sind nicht vorhanden. Für die Berechnung des PMV-Indexes wurde angenommen, dass sowohl weibliche als auch männliche Personen anwesend sind. Für das Körpergewicht, die Körpergröße als auch für das Alter der BewohnerInnen wurden Durchschnittswerte der MitarbeiterInnen der *4ward Energy Research GmbH* eingegeben.

Die Messungen im Zuge von *Empower Citizens* und *Easy Energy Saver* wurden zum großen Teil während der COVID-19-Pandemie durchgeführt. Vor allem im gegenwärtigen

Untersuchungsobjekt kam es aufgrund der vermehrten Inanspruchnahme von Heimarbeit, zu einer starken Änderung des BenutzerInnenverhaltens im Vergleich zu der Zeit vor der Pandemie. Zumindest von einer männlichen Arbeitskraft wurde, das Großraumbüro über die gesamte Monitoringphase regelmäßig verwendet. Vor allem in der warmen Jahreszeit sowie bei niedrigem COVID-19-Infektionszahlen wurde das Büro auch von mehreren MitarbeiterInnen genutzt.



Abb. 23: Außenansicht *Smart Business Centers*²⁰

5.1.3 Heimbüro in Güssing (Burgenland) – UO3

Dieses Heimbüro wird vorrangig von einer männlichen Person benutzt und ist auf der Westseite eines Einfamilienhauses situiert und verfügt über 12 m² Nutzfläche. Das EFH wurde 2019 errichtet. Die Wände sind in Holzriegelbauweise ausgeführt, das Fenster (Ausrichtung SWW, 75°) ist mit außenliegenden Jalousien verschattet. Die Verschattung erfolgt zeitgesteuert. Die Nutzung des Büros erfolgt werktags meist zwischen 8 und 12 Uhr, sowie 13:30 bis 16:00 Uhr. Das Büro wird über eine kontrollierte Wohnraumlüftung versorgt. Eine Fensterlüftung ist zusätzlich möglich.

5.1.4 Heimbüro in Frohnleiten (Steiermark) – UO4

Dieses Heimbüro mit 19 m² Nutzfläche, welches ebenfalls vorrangig von einer männlichen Person benutzt wird, befindet sich in einem über 100 Jahre alten Gebäude, welches 2018 saniert wurde. Die Außenmauern sind etwa 70 cm dick und bestehen aus Naturstein und Ziegel. Es ist kein Vollwärmeschutz vorhanden. Das Heimbüro besitzt zwei Fenster welche nach NW (320°) und NO (50°) ausgerichtet sind.

5.1.5 Wohnzimmer in Neufeld (Burgenland) – UO5

Das Wohnzimmer, in welchem der *Easy Energy Saver* seine Messungen vorgenommen hat, befindet sich in einem Zweifamilienfamilienhaus (Baujahr 1980). Das Haus wird mit Erdgas geheizt und hat bei der Energieeffizienz Potenzial nach oben. Die Heizungsanlage wurde

²⁰ www.sfg.at, abgerufen am 16.05.2022

2011 eingebaut. Die Konstruktion besteht aus einem gedämmten Ziegelmauerwerk. Das Gebäude wurde 2013 saniert. Im Zuge der Sanierung wurden vor allem die Fenster erneuert. Das knapp 60 m² großes Wohnzimmer verfügt über eine große Fensterfront, SW (75°) ausgerichtet.

5.2 Messreihen

Im Zuge von *Empower Citizens* und *Easy Energy Saver* wurden insgesamt 3 voneinander getrennte Messreihen durchgeführt. Zu Beginn der Messungen - im Sommer 2020 - wurde auch eine Referenzmessung durchgeführt. Messungen in dem Großraumbüro der *4ward Energy Research GmbH* wurden in allen Messreihen durchgeführt.

5.2.1 Referenzmessung - Sommer 2020

Um genügend Referenzmessdaten zu erhalten und später die Messergebnisse besser interpretieren zu können, wurde im Sommer 2020 im Zuge von *Empower Citizens* sieben *Easy Energy Saver* in verschiedenen Wohnungen der Wienerstraße 11 und 11a (siehe Kapitel 5.1.1) installiert. Nur eines dieser Geräte war auch per Funkmodul und Antenne mit einer Wetterstation verbunden. Mit den anderen 6 Geräten wurden in den Wohnungen ausschließlich Referenzmessungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration) durchgeführt. Dazu wurde ein neues Python-Programm geschrieben (vgl. dazu Kapitel 3.3) und implementiert, das lediglich die Messdaten der Sensoren ausliest, speichert und ausgibt, ohne Empfehlungen auszugeben.

5.2.2 1. Messreihe - Weihnachtsferien 2020/2021

In den Weihnachtsferien 2020/2021 wurde jeweils ein Gerät in zwei Wohnungen der Untersuchungsobjekte in Pinkafeld installiert. Diese Geräte kommunizierten per Funkmodul und Antenne mit einer jeweils eigenen Wetterstation. Ein Gerät fiel sehr schnell aus und auch beim zweiten Gerät traten Probleme auf. Beide Störungen waren auf eine instabile Datenübertragung von der Wetter- hin zur Hauptstation zurückzuführen, welche aber für einen vollständigen Betrieb des Geräts zwingend notwendig ist. Aufgrund dieses Problems - welches auch im Zuge des Projekts *Easy Energy Saver* nicht vollends gelöst werden konnte - wurden danach, in diesem Untersuchungsobjekt und auch in allen anderen Untersuchungsobjekten, ausschließlich kabelgebundene Geräte, installiert.

Diese Messreihe konnte aufgrund der kurzen Dauer nicht ausgewertet werden.

5.2.3 2. Messreihe - Frühjahr 2021

Es wurden zwei *Easy Energy Saver* mit direkt angeschlossenem Außensensor in Pinkafeld verbaut, um verlässliche Ergebnisse für die Empfehlungen zu bekommen. Für die Kabelverlegung am Gang und in den einzelnen Wohnungen musste ein besonderes Augenmerk auf die Sicherheit gelegt werden. Zum Beispiel mussten durch Markierungen Stolperfallen verhindert werden (Abb. 24). Bei der Montage musste auch darauf geachtet werden, dass alle Teile und Leitungen rückstandslos entfernt werden können.



Abb. 24: Kabelverlegung am Boden eines Ganges (Wienerstraße 11a)

Nachdem nach der 1. Messreihe (Kapitel 5.2.2) feststand, dass für einen stabilen Betrieb ein kabelgebundenes System notwendig ist, war man mit dem Problem konfrontiert, dass einige BewohnerInnen des Untersuchungsobjekts in Pinkafeld der Kabelverlegung in der eigenen Wohnung skeptisch gegenüberstanden. Aus diesem Grund wurde eine vereinfachte Version des *Easy Energy Savers* erzeugt, indem dieser als CO₂-Ampel programmiert wurde.

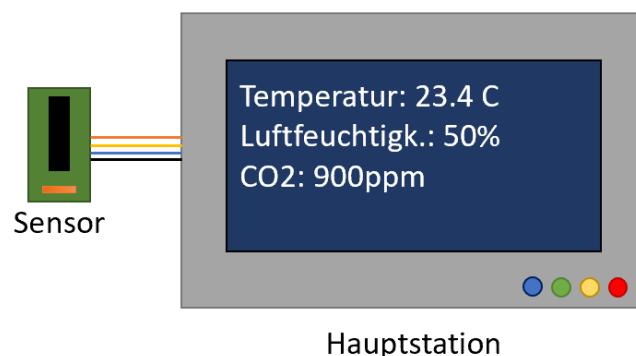


Abb. 25: Schematischer Aufbau der CO₂-Ampel

Es handelt sich hierbei um einen Raspberry Pi 3 B+ mit SCD30-Sensor und USV. Hier werden lediglich die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration des Raumes angezeigt, in dem die Ampel verbaut ist, und bei Überschreiten der CO₂-

Konzentrationsgrenze wird eine Lüftungsempfehlung ausgegeben. Damit kann auf die Wetterstation verzichtet werden. Sobald die Konzentration wieder unter einen bestimmten Wert liegt, wird die Empfehlung des Stoßlüftens wieder gelöscht. Wie auch bei den Geräten, welche mit der Wetterstation kommunizieren, werden ebenfalls die Messdaten und Empfehlungen in einem .txt-Dokument zur Analyse gespeichert.

In der Nacht vom 27. auf den 28. März 2021 kam es aufgrund der Zeitumstellung von Normal- auf Sommerzeit zu einem Ausfall aller Systeme. Dieser Ausfall wurde erst am 27. April 2021 bei der Entnahme der Messergebnisse bemerkt.

5.2.4 3. Messreihe - Sommer 2021 bis Frühjahr 2022

Die dritte – und mit Abstand längste - Messreihe wurde im Zuge des Projekts *Easy Energy Saver* (FFG-Nr.: 884763) durchgeführt. Damit konnte ein gesamtes Kalenderjahr abgebildet werden. Es wurden von 4 Geräten die Messwerte aufgezeichnet. Nur das Großraumbüro der *4ward Energy Research GmbH* wurde als Untersuchungsobjekt aus den ersten Messreihen übernommen (siehe Abb. 26). Zwei Geräte wurden in Heimbüros installiert, ein weiteres in einem Wohnzimmer. Die neuen Geräte wurden zwischen 6. Juli 2021 und 8. Juli 2021 in Betrieb gesetzt. In allen Untersuchungsobjekten wurden kabelgebundene Systeme, welche mit einer Wetterstation kommunizieren verbaut. Daher musste wieder besonderes Augenmerk auf die Kabelverlegung gelegt werden.



Abb. 26: Installierter *Easy Energy Saver* im Großraumbüro der *4ward Energy Research GmbH*

6 Auswertung der Messreihen

In diesem Kapitel werden die einzelnen Messreihen ausgewertet. Es wird so gut es geht die Referenzmessung vom Sommer 2020 als Vergleich herangezogen. Aufgrund der kurzen Versuchsdauer ist aber ein Vergleich nur bedingt möglich. Auf die Messergebnisse von Wohnungen, in denen zwar eine Referenzmessung durchgeführt wurde, aber kein *Easy Energy Saver* bzw. keine CO₂-Ampel installiert wurden, wird im Zuge dieser Arbeit nicht eingegangen.

6.1 Messungen in UO1

Am 15. Februar 2021 wurden in zwei Wohnungen der Wienerstraße 11a 2 vollwertige *Easy Energy Saver*, welche jeweils mit einer eigenen Wetterstation verbunden sind, installiert. Nach den schlechten Erfahrungen der zuvor durchgeführten Messreihe mit einer Funkverbindung, wurden die Wetterstationen mit Kabeln an die jeweilige Hauptstation verbunden.

Der erste Gerät viel bereits nach wenigen Stunden aus. Der Grund war ein Kurzschluss bei der Verbindungsleitung von der Haupt- hin zur Wetterstation. Diese Leitung musste durch die Wohnungstüre verlegt werden. Hierbei kam es bei Schließen oder Öffnen der Türe zu einem Kurzschluss, welcher einen Neustart erforderlich machte.

Dieser Neustart wurde am 18.03.2021 durchgeführt. Besonders im Bereich der Türe, wo es zu dem Kurzschluss kam, wurde besonderes Augenmerk auf die Kabelführung gelegt. Dass die Gefahr eines Quetschens und einem damit verbunden Kurschlusses minimiert wird, wurde das abgeschirmte Telefonkabel (Typ: J-Y(ST)Y) in diesem Bereich entmantelt.

Jedoch kam es nach drei Tagen wieder zu Problemen mit der Wetterstation. Es kam zwar zu keinem Kurzschluss und einem damit verbunden Ausfall des Systems, jedoch wurden von der Wetterstation keine Daten mehr empfangen. Der Grund für diesen Datenausfall ist unbekannt. Nach dem Ausfall der Wetterstation am 21.03.2021 konnte das System als normale CO₂-Ampel weiterarbeiten. In der Nacht auf den 28. März 2021 kam es zu dem bereits erwähnten Ausfall durch die Zeitumstellung.

Aufgrund der geringen Anzahl an Messergebnissen wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Auswertung der Messergebnisse von diesem Gerät verzichtet.

Der zweite EES lief bis zur Zeitumstellung problemlos. Vor allem in der ersten Phase wurden viele Empfehlungen zur Heizungsregelung ausgegeben. Das beruht auf der Tatsache, dass in dieser Phase der PMV-Index oftmals über der eingestellten Toleranzgrenze von +0,5 lag (siehe Abb. 27). Da die durchschnittliche Tagestemperatur unter der Heizgrenztemperatur von 15°C lag, wurde diese Empfehlung sehr oft ausgegeben. In Gesprächen mit den Bewohnern und Bewohnerinnen kam heraus, dass sich diese aufgrund der langen Signalausgabe Gedanken und Sorgen über deren Raumklima gemacht haben, obwohl sie dieses als angenehm empfunden hatten.

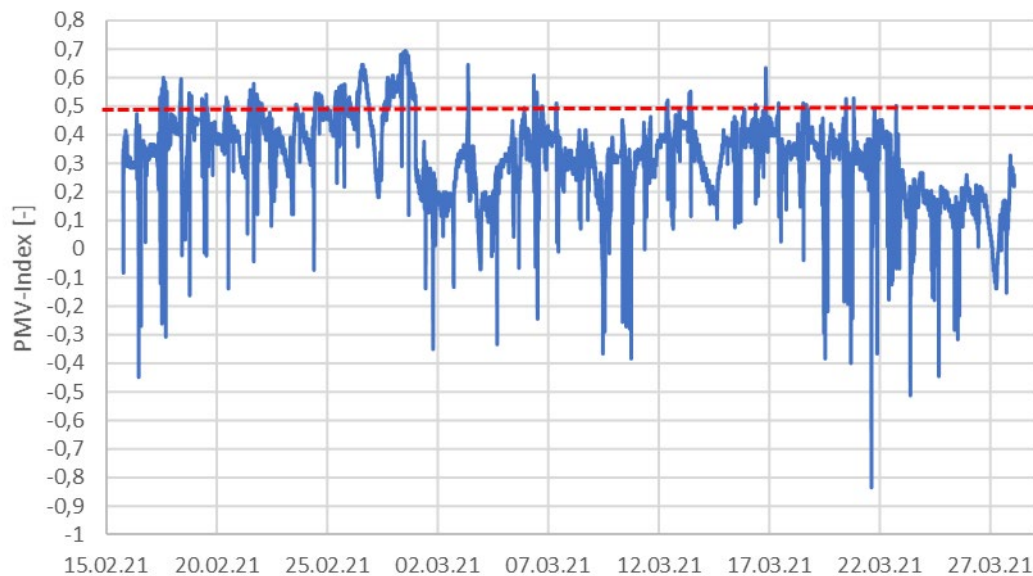


Abb. 27: PMV-Index, UO1 – WHG1, 2. Messreihe

In Abb. 28 sind die Ausgaben der Empfehlungen im Versuchszeitraum zu sehen. Am häufigsten wurden Empfehlungen zum Rückdrehen der Heizung ausgegeben. Nur einmal wurde eine Empfehlung für das Verschatten ausgegeben. Da die Wohnung nach Süden ausgerichtet ist, wird sich für einen Sommerfall ein komplett anderes Bild zeigen. Hier werden Empfehlungen zum Verschatten vermehrt ausgegeben werden. Die Empfehlung für das Verschatten wird erst ab einer Tagesmitteltemperatur von 15°C aktiviert. Demnach wird zur Senkung der Raumtemperatur entweder die Empfehlung zur Heizungsregelung oder die Empfehlung zum Verschatten ausgegeben, aber nie beide gleichzeitig.

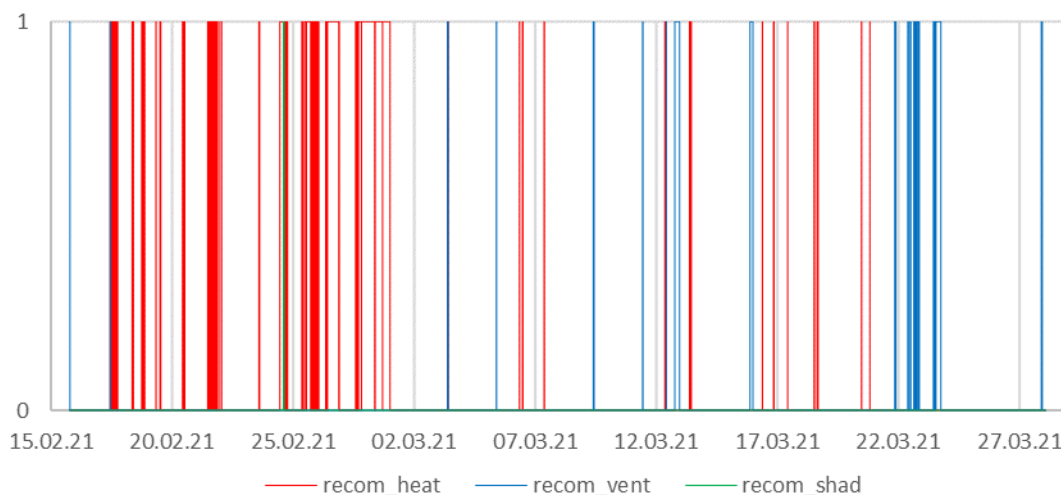


Abb. 28: Empfehlungen, UO1 – WHG1, 2. Messreihe

In Abb. 29 ist die Dauer der einzelnen Empfehlungsausgaben in summierter Form für den Versuchszeitraum dargestellt.

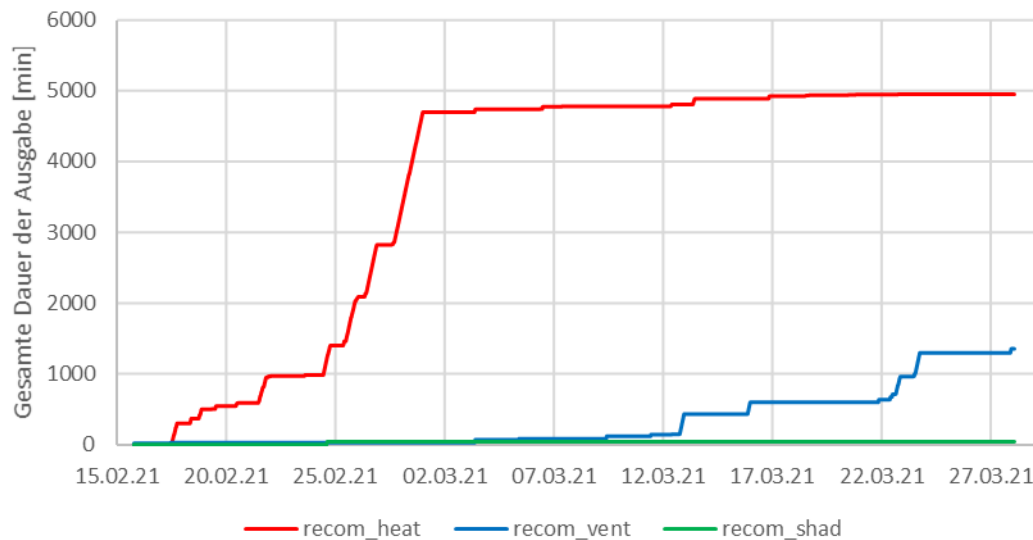


Abb. 29: Kumulierte Dauer der Empfehlungen, UO1 – WHG1, 2. Messreihe

In Abb. 30 ist die CO₂-Konzentration zu sehen. Auffallend ist, dass ähnlich wie bei der konventionellen CO₂-Ampel (vgl. Kapitel 6.6) fast keine extremen Spitzenwerte der CO₂-Konzentration mehr auftreten. Anscheinend kommt es auch in diesem Fall zu einer baldigen Empfehlungsannahme. In welchem Maße die Person die Luftqualität selbst als schlecht empfand, oder durch EES darauf aufmerksam gemacht wurde, ist schwer zu ermitteln. Auch ein Vergleich mit der Referenzmessung, welche in dieser Wohnung auch durchgeführt worden ist, ist schwer, da diese im Sommer/Herbst 2020 durchgeführt. Die Referenzmessungen im Herbst 2020 zeigen aber im Mittel etwas höhere CO₂-Konzentrationen als bei der Versuchsreihe im Frühjahr 2021.

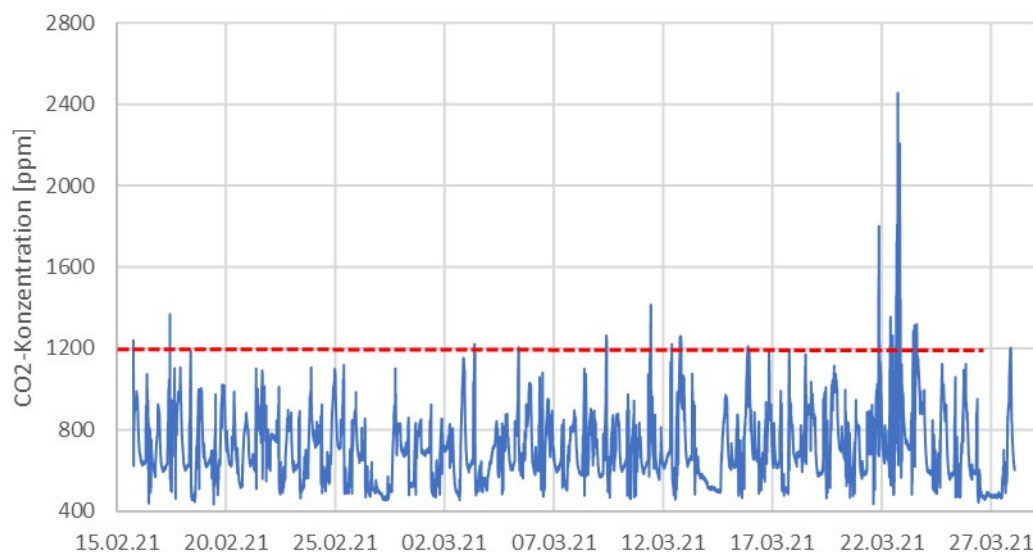


Abb. 30: CO₂-Konzentration, UO1 – WHG1, 2. Messreihe

6.2 Messungen in UO2

Die Messungen mit dem *Easy Energy Saver* in den Büroräumlichkeiten der *4ward Energy Research GmbH* wurden parallel zu den Messungen in den anderen Untersuchungsobjekten durchgeführt und dienten vor allem dazu, mögliche Fehlerquellen zu vermeiden.

6.2.1 2. Messreihe

Zunächst werden die Messergebnisse der 2. Messreihe in diesem Untersuchungsobjekt vorgestellt, welche in Deliverable 5.3 (Evaluierungsbericht) des Projekts *Empower Citizens* zum Teil bereits diskutiert wurden.

Wie bereits bei der 2. Messreihe in UO1 ist die Empfehlung der Heizungsregelung mit großem Abstand die häufigste ausgegebene Empfehlung. Als unterer und oberer Grenzwert für den PMV-Index wurde $-0,5$ bzw. $+0,5$ eingestellt. In Abb. 31 ist zu erkennen, dass vorwiegend erhöhte Werte des PMV-Indexes gemessen wurden. Während der obere Grenzwert oftmals überschritten wurde, wurde der untere Grenzwert während der 2. Messreihe nie unterschritten.

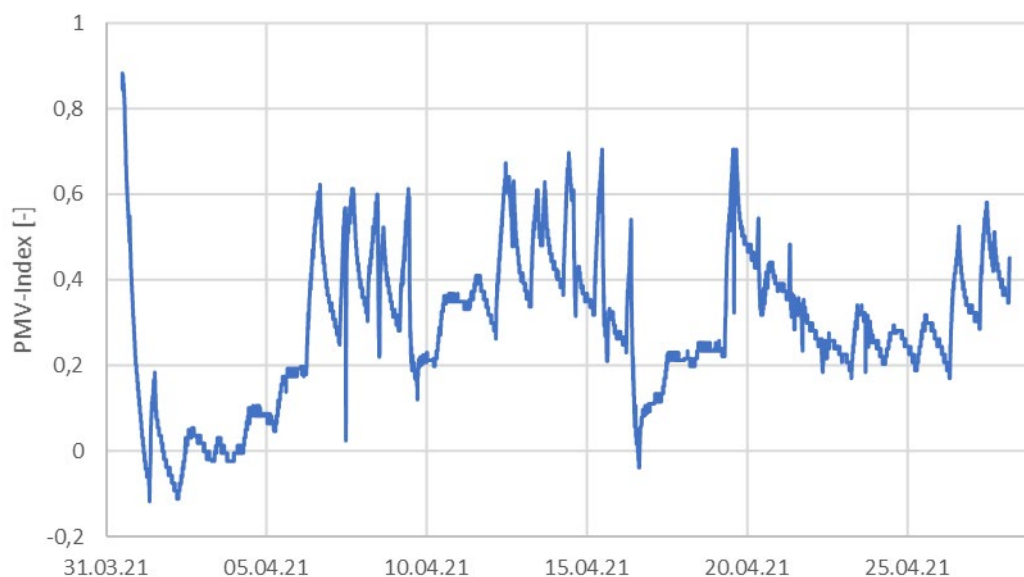


Abb. 31: PMV-Index, UO2, 2. Messreihe

Da man sich zu der Zeit dieser Messung noch in der Heizsaison befand (Heizgrenztemperatur wurde nicht überschritten) führte das zu einer oftmaligen Ausgabe einer Empfehlung zur Heizungsregulierung (siehe Abb. 32).

Verschattungsempfehlungen wurden im Versuchszeitraum kaum ausgegeben. Dass ist zum einen auf die eingestellte Heizgrenztemperatur von 15°C zurückzuführen welche, während der 2. Messreihe kaum überschritten wurde und bei der sich diese Empfehlung erst aktiviert, zum anderen sind die Fenster dieses Großraumbüros nach NNW ausgerichtet, so dass zu dieser Jahreszeit kaum direkte Sonneneinstrahlung zu erwarten ist.

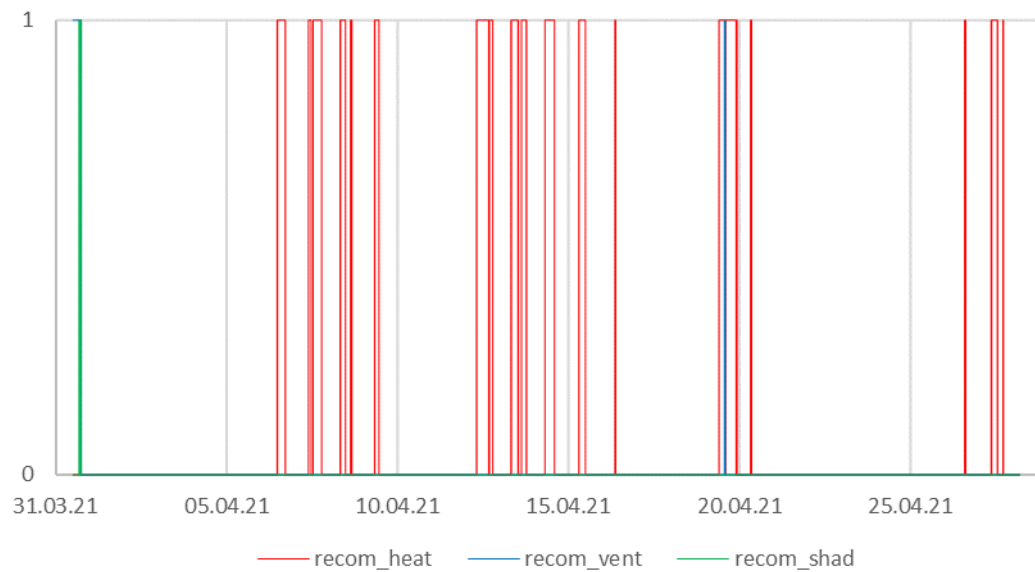


Abb. 32: Empfehlungen, UO2, 2. Messreihe

Die lange Ausgabe der Lüftungsempfehlung zu Beginn der Messreihe (siehe Abb. 33) beruht darauf, dass immer die mittlere Außentemperatur für einen Tag als Bezug herangezogen wird. Sofern das System noch keinen vollen Tag in Betrieb ist, wird die mittlere Außentemperatur seit Messbeginn herangezogen. Da es sich am Tag der Installation um einen warmen Frühlingstag handelte, war für einige Zeit die gemittelte Temperatur über 15°C und somit über der Heizgrenztemperatur. Da auch der PMV-Index von 0,5 überschritten war, kam es hier zu einer längeren Ausgabe dieser Empfehlung. Im weiteren Verlauf der Messreihe kam es aber zu keinen Lüftungsempfehlungen, welche auf eine Behaglichkeitssteigerung zurückzuführen waren. Es wurde lediglich für ein paarmal der Grenzwert CO₂-Konzentration von 1.200 ppm überschritten (siehe Abb. 34) und darauffolgend eine Lüftungsempfehlung ausgegeben.

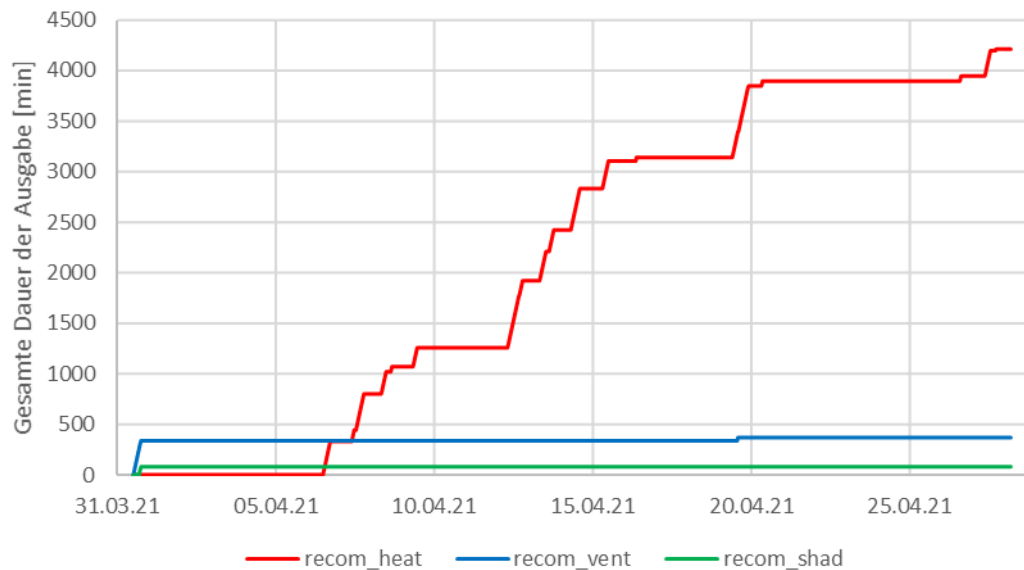


Abb. 33: Kumulierte Dauer der Empfehlungen, UO2, 2. Messreihe

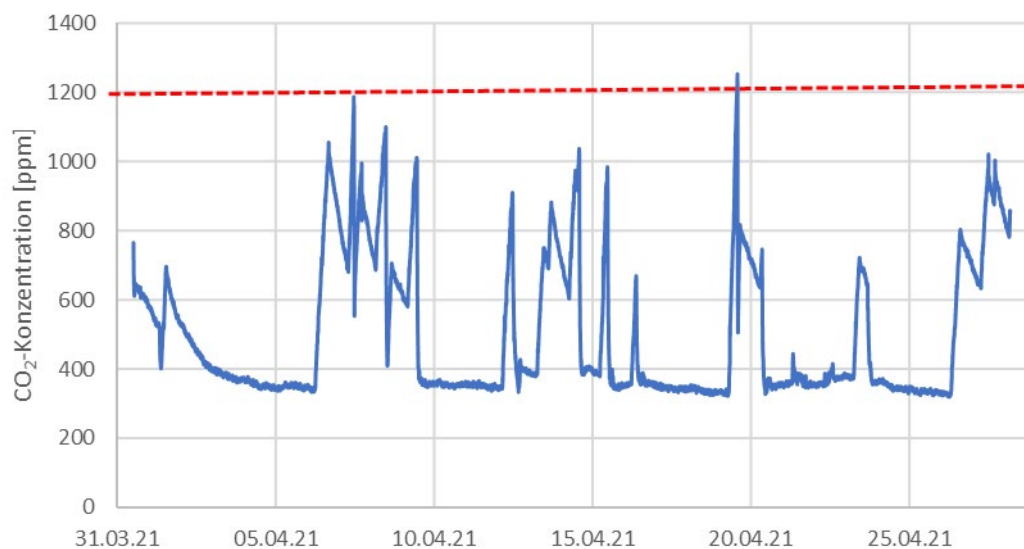


Abb. 34: CO₂-Konzentration, UO2, 2. Messreihe

6.2.2 3. Messreihe

Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus der 3. Messreihe in diesem Untersuchungsobjekt präsentiert. Diese Messreihe wurde in UO2 zweimal unterbrochen (am 10.08.2021 für 19 Stunden und zwischen 29.09.2021 und 22.11.2021). Während die erste Unterbrechung auf die Anpassung von Parametern zurückzuführen ist, wurde die zweite Unterbrechung durch einen Systemausfall verursacht. Im Zuge dessen musste der Programmcode überarbeitet werden. Dies führte dazu, dass die Messung bis zum Ende des Projekts ohne Ausfall durchgeführt werden konnte.

In Abb. 35 ist die gemessene CO₂-Konzentration über die gesamte Dauer der 3. Messreihe zu sehen. Leicht erkennbar und in Rot hervorgehoben ist der längere Messausfall zwischen

September und November 2021. Der Ausfall am 10. August 2021 ist nicht erkennbar. Innerhalb dieser Messreihe wurden Spitzenwerte von über 2.000 ppm erreicht.

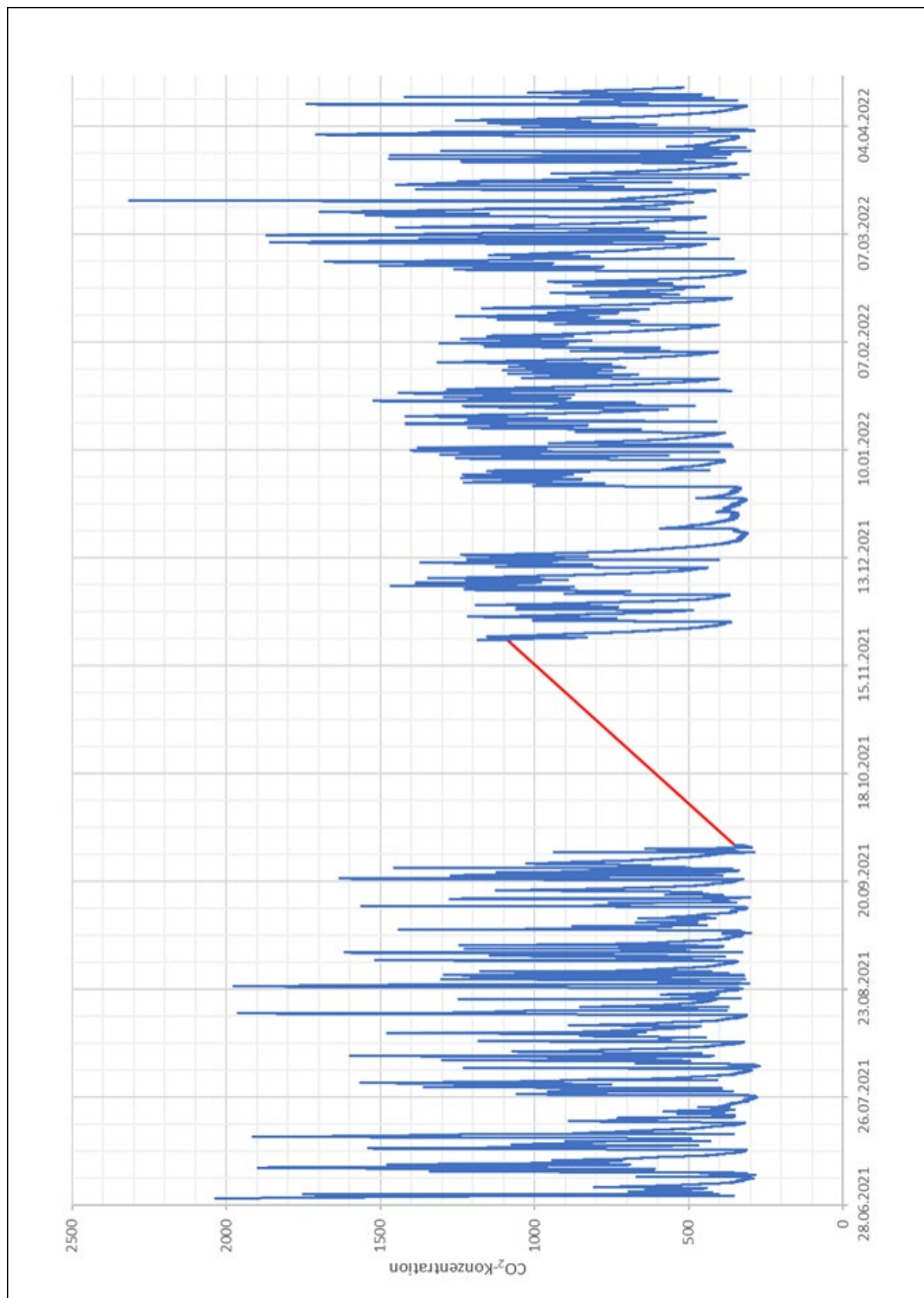


Abb. 35: CO₂-Konzentration, UO2, 3. Messreihe

Da die 3. Messreihe sehr lang ist und aus dem Diagramm schwer etwas zum Herauslesen ist, ist die mittlere monatliche CO₂-Konzentration in Abb. 36 aufgetragen. Für die Monate

Mai, Juni und Oktober gab es für eine Auswertung nicht genug Daten. Deshalb werden diese Monate hier nicht aufgelistet. Zu sehen ist, dass die mittlere CO₂-Konzentration in der kalten Jahreszeit höher ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Fenster bei warmer Witterung oft länger offen bleibt als vom *Easy Energy Saver* empfohlen.

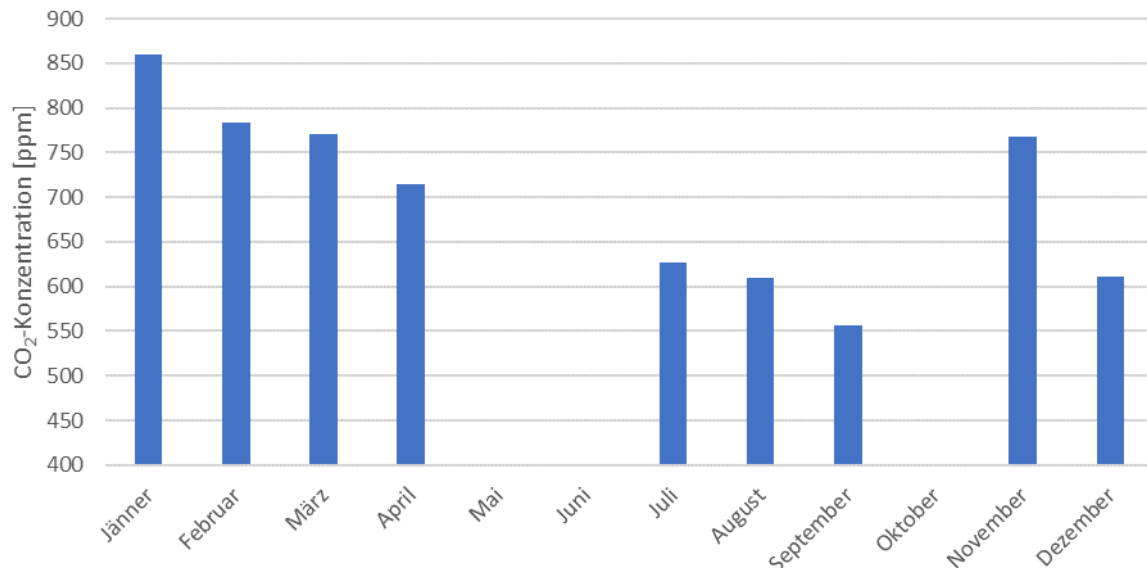


Abb. 36: Mittlere monatliche CO₂-Konzentration, UO2, 3. Messreihe

Die gemittelte CO₂-Konzentration über den Tag - wobei nur Werktage (MO bis FR) betrachtet wurden (Feiertage an diesen Wochentagen wurden ebenfalls berücksichtigt) zeigt, dass die minimale CO₂-Konzentration in den Morgenstunden (05:00 bis 06:00) erreicht wird. Danach kommt es mit Arbeitsbeginn der MitarbeiterInnen zu einer Zunahme der CO₂-Konzentration. Kurz vor Mittag kommt es zu einer markanten Abnahme. Das ist mit einer Ausgabe einer Lüftungsempfehlung und der dahingehenden Fensteröffnung durch eine Person zurückzuführen. Die Auswertung ergibt, dass die erstmalige Lüftungsempfehlung im Mittel bereits um 10:00 ausgegeben wird. Zwischen 10:00 und 11:00 ist jedoch noch keine Abnahme zu erkennen. Daraus kann man schließen, dass die Lüftungsempfehlung erst relativ spät wahrgenommen wird, bzw. die Personen erst relativ spät dazu motiviert werden können das Fenster zu öffnen. Aus den Gesprächen mit den MitarbeiterInnen kristallisierte sich heraus das sie Empfehlung oft erst auf dem Gang zur Mittagspause wahrgenommen wurde, welche bei der *4ward Energy Research GmbH* im Mittel um 11:45 begangen wird. Über die Mittagspause (bis etwa 12:00) bleiben die Fenster meist geöffnet. Bis 14:00 bleibt die CO₂-Konzentration relativ konstant. Zumeist kommt es am Nachmittag noch zu einer Überschreitung des Grenzwertes. Diese Empfehlungen werden aber bei weitem weniger gut angenommen als die vom Vormittag. Erst mit dem Ende des Arbeitstages und dem damit verbundenen Verlassen der Arbeitsplätze sinkt aufgrund der natürlichen Luftzirkulation langsam die CO₂-Konzentration.

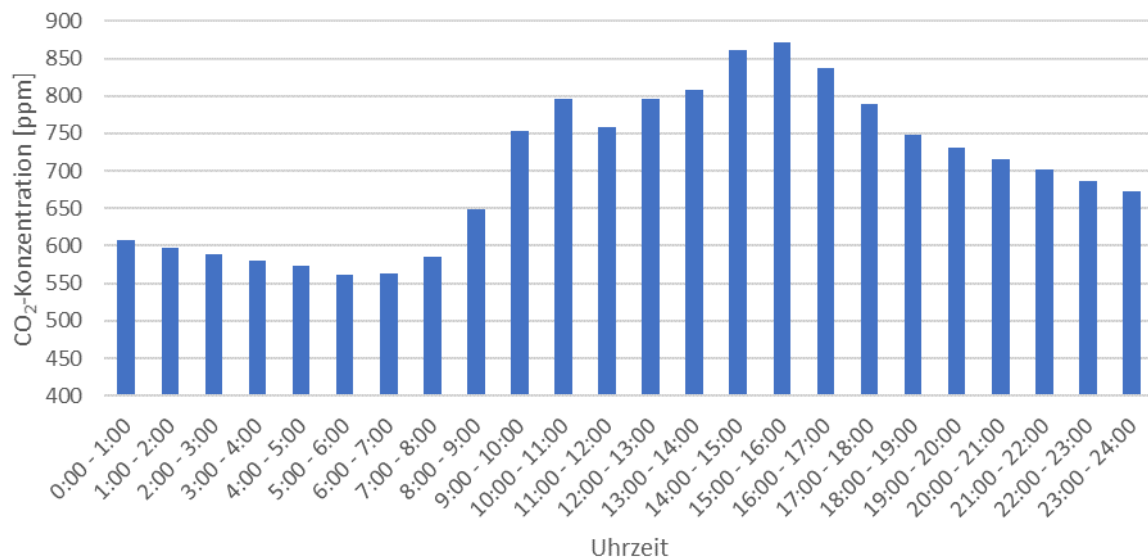


Abb. 37: Mittlere stündliche CO₂-Konzentration an Werktagen (MO-FR), UO2, 3. Messreihe

Ein durchgängiger Betrieb ist notwendig, dass die Matrizen für das Selbstlernende System richtig befüllt werden. Das Gerät war so eingestellt, dass der selbstlernende Algorithmus mit dem 29. Tag einsetzt. Als Startwert für die untere und obere Grenze des PMV-Indexes wurde -0,5 bzw. +1,0 gewählt. Eine asymmetrische Anordnung wurde gewählt, da aus früheren Messreihen (2. Messreihe) tendenziell höhere PMV-Indexes gemessen wurden (vgl. dazu Kapitel 6.2.1), und damit vermehrte Empfehlungsausgaben verhindert werden. Die maximale CO₂-Konzentration wurde auf 1.200 ppm eingestellt. Als unterer Hysteresewert für die Ausgabe der Lüftungsempfehlung basierend auf der Überschreitung der CO₂-Konzentration wurden 900 ppm eingestellt.

In Abb. 38 ist eine zeitlich etwas höher aufgelöste CO₂-Konzentration zu sehen, indem nur die Messwerte nach dem letzten Messausfall angezeigt werden. Hierbei zeigt sich ein typisches Profil für ein Büro. Von Montag bis Freitag sind teilweise erhebliche Spitzen der CO₂-Konzentration zu sehen. Der Betriebsurlaub in den Weihnachtsferien 2021/2022 ist ebenfalls mit einer niedrigen CO₂-Konzentration über 2 Woche deutlich zu erkennen. Auch der tageszeitliche Verlauf der CO₂-Konzentration an einem Arbeitstag (Abb. 39) kann deutlich abgelesen werden. Sogar auf die Anzahl der anwesenden MitarbeiterInnen kann geschlossen werden. In Abb. 38 ist ebenfalls die Ausgabe der Empfehlungen zum Stoßlüften aufgetragen. Bei einer detaillierten Auswertung fällt auf, dass diese Empfehlungen ausnahmslos auf der Überschreitung des Grenzwertes der CO₂-Konzentration basieren.

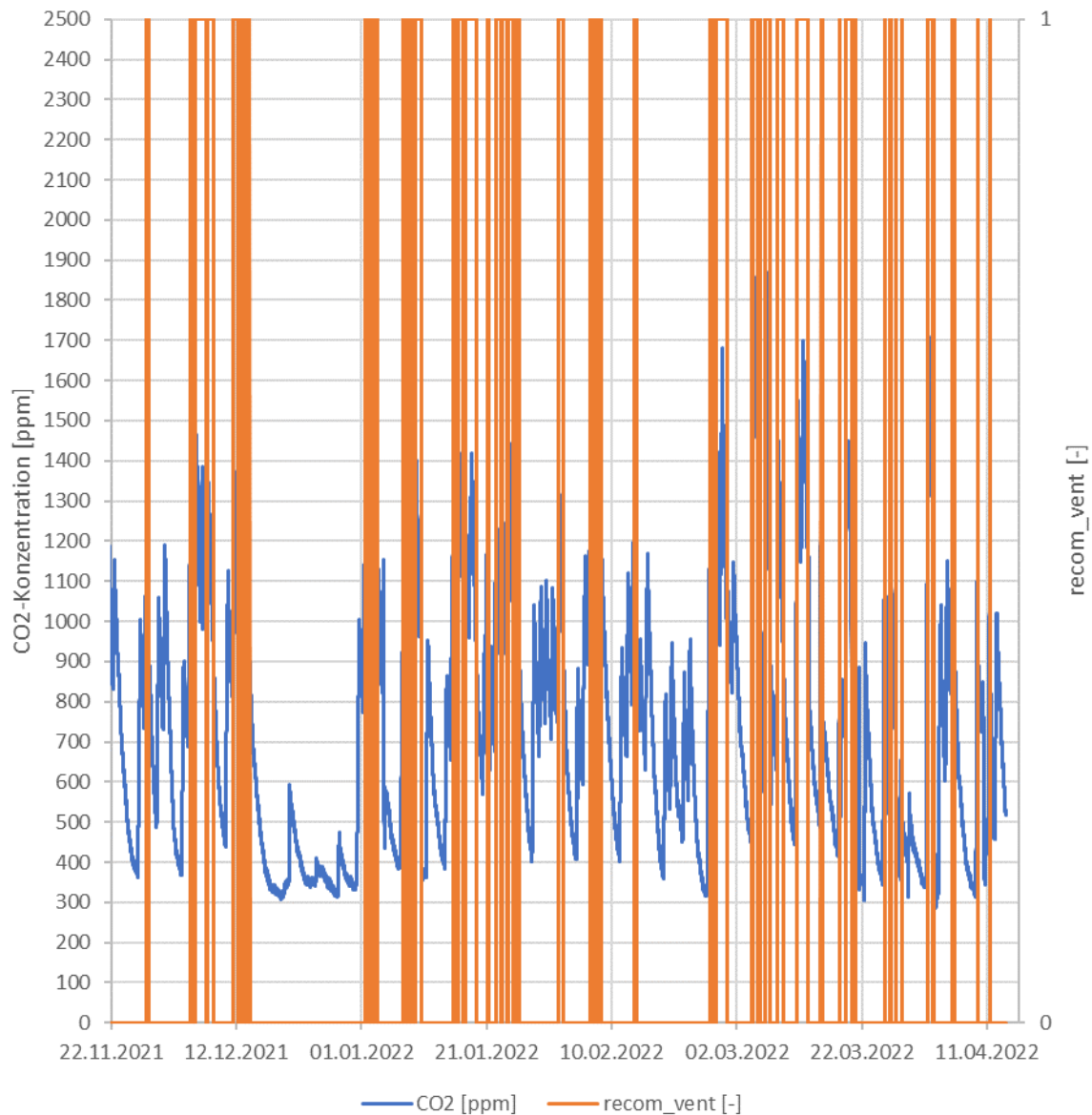


Abb. 38: CO₂-Konzentration – UO2 – November 2021 bis April 2022

In Abb. 39 ist ein typischer zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration an einem Arbeitstag zu sehen. Am Morgen entspricht die CO₂-Konzentration im Büro in etwa der der Atmosphäre. Mit dem Eintreffen der MitarbeiterInnen steigt diese sukzessive. Bis eine Empfehlung für die Stoßlüftung ausgegeben wird – an diesem Tag um etwa 11 Uhr vormittags. Bis jemand jedoch die Empfehlung bemerkt vergeht eine geraume Zeit. Erst um etwa 13 Uhr wurde an diesem Tag gelüftet – anscheinend auch das letzte Mal – da nachmittags es wieder zu einem erheblichen Anstieg kommt, ohne große Ausreißer nach unten.

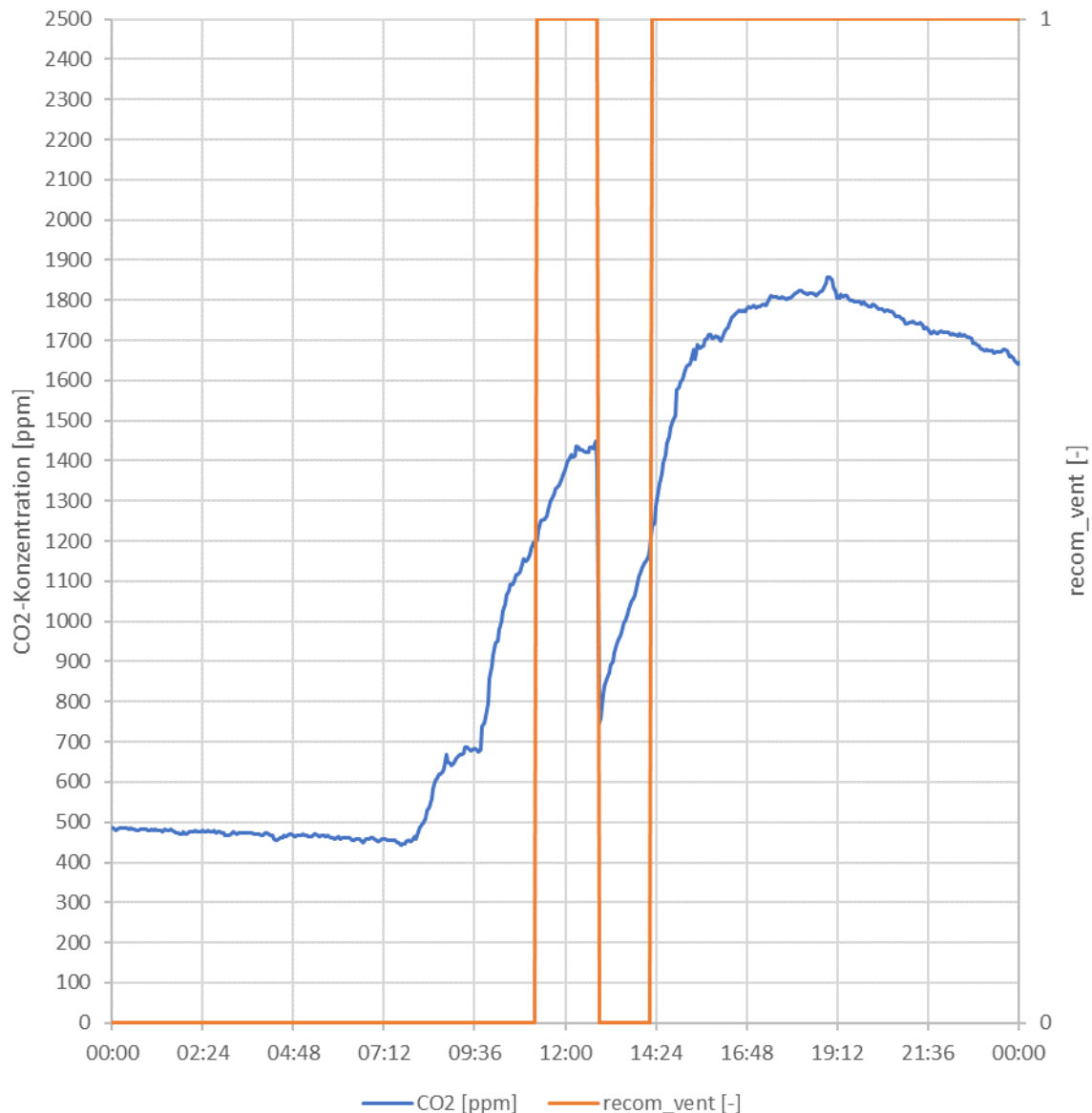


Abb. 39: CO₂-Konzentration – UO2 – Freitag, 4. März 2022

Für die Untersuchung des Phänomens, warum ausschließlich Lüftungsempfehlungen auf Basis der Überschreitung der CO₂-Konzentration ausgegeben wurde, muss der PMV-Index betrachtet werden. In Abb. 40 ist sowohl der PMV-Index der Raum- als auch der Außenluft zu sehen. Einfach zu erkennen ist, dass der PMV-Index der Raumluft oft den unteren Grenzwert (-0,5) unterschreitet, jedoch nie den oberen Grenzwert (+1,0) überschreitet. Auch wenn der obere Grenzwert bei +0,5 eingestellt wäre, würde dieser auch nur gegen Ende der Versuchsreihe überschritten worden sein. Normalerweise hätte dann bei der Überschreitung des oberen PMV-Index-Grenzwertes eine Lüftungsempfehlung ausgegeben werden müssen, da der PMV-Index der Außenluft zu der gegebenen Zeit darunter lag. Jedoch ist diese Ausgabe mit der mittleren Tagestemperatur der letzten 24 Stunden gekoppelt. Erst ab einer Tagesmittelwerttemperatur von 15°C wird diese Empfehlung ausgegeben. Diese Temperatur wurde für das Gebäude als Heizgrenztemperatur festgelegt. Damit will man größere Lüftungsverluste während der Heizsaison vermeiden. Da diese Heizgrenztemperatur im

Untersuchungszeitraum nur selten überschritten wurde, hat das die Chancen, dass eine Empfehlung für das Lüften, welches zu einer Verbesserung des PMV-Indexes führen sollte, ausgegeben wird, reduziert.

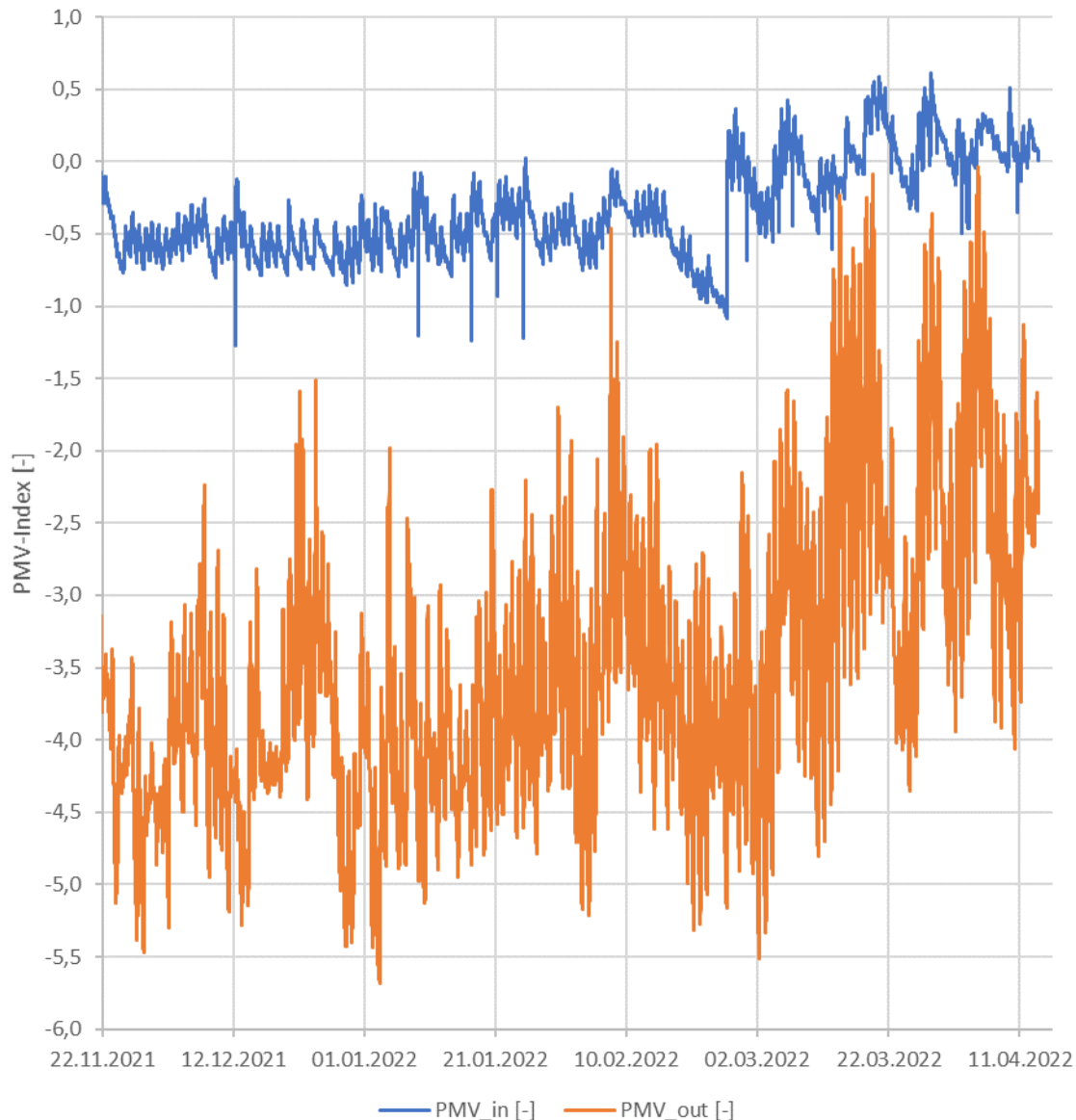


Abb. 40: PMV-Index – UO2 – November 2021 bis April 2022

Empfehlungen zum Verschatten wurden innerhalb dieses Versuchszeitraums nicht ausgegeben. Aufgrund der Fensterausrichtung nach NNO waren Verschattungsempfehlungen auch kaum zu erwarten. Empfehlungen zur Heizungsregulierung wurden ebenfalls nicht ausgegeben, da der obere Grenzwert des PMV-Indexes von +1,0 nie überschritten wurde. Während bei der 2. Messreihe wurde diese Empfehlung noch sehr oft ausgegeben (vgl. dazu Abb. 32 und Abb. 33), was auf den damals niedrigen eingestellten oberen Grenzwert von +0,5 zurückzuführen ist. Demnach ist es sehr schwer hier eine Empfehlung bei der Einstellung zu geben. Während bei der 2. Messreihe die Personen, die oftmals und über sehr lange Zeitbereiche andauernden ausgegebenen

Empfehlungen, nicht mehr bewusst wahrgenommen haben, kam es in der 3. Messreihe zu einem komplett gegenteiligen Fall.

Bei der Auswertung des selbstlernenden Systems hat sich gezeigt, dass sich die Grenzwerte des PMV-Indexes sich nicht geändert haben. Es wurden auch keine Zeitfenster für die vorgezogenen Empfehlungen ausgegeben. Die Auswertung hat gezeigt, dass die Detektion der Stoßlüftens durch das Beobachten der CO₂-Konzentration schon zielführend ist, und hier mit einem geringen Fehleranteil richtig detektiert wird. Jedoch ist die Anzahl der angenommenen Empfehlungen im Vergleich zu der Anzahl der ausgegebenen Empfehlungen zu gering, als das man mit diesen Daten ein entsprechendes Anwesenheitsprofil generieren kann. Die entsprechende Variable (pres_matrix) ist eine Matrix mit lauter „1“. Demnach konnte keine bevorzugte Anwesenheit bzw. Motivation im Untersuchungszeitraum erkannt werden.

Folgende Parameter wurden für den selbstlernenden Prozess verwendet:

- PMV_diff = 20...Differenz zwischen prozentueller Verteilung der angenommenen Empfehlungen (angenommen pro PMV-Index / angenommen gesamt) zu den ausgegebenen Empfehlungen [-]
- p_t_min_I = 7...Prozentwert eines Zeitpunktes (eines Tages) bei dessen Unterschreitung der Zeitpunkt als "nicht anwesend" deklariert wird [%]
- PMV_u_elim = -1.5...Minimal zulässiger PMV-Index (ermöglicht das Verhindern von Extremwerten) [-]
- PMV_o_elim = 1.5...Maximal zulässiger PMV-Index (ermöglicht das Verhindern von Extremwerten) [-] (Dim: 1x1)
- accept_abs_min = 1...Minimale absolute Anzahl an angenommenen Empfehlungen, um eine Auswertung durchführen zu können [-]
- accept_p_min = 2...Minimaler prozentueller Anteil an angenommenen Empfehlungen, um eine Auswertung durchführen zu können (Ansonsten ist das Benutzerverhalten nicht erkennbar, wenn die Motivation zu gering ist) [%]
- prox_max = 100...Maximale Anzahl an Interpolationen, um gegenseitige Abhängigkeit von PMV-Index und Anwesenheit zu berücksichtigen [-]

Ausschlaggeben warum keine Anwesenheitsmatrix erzeugt werden konnte sind die Parameter accept_abs_min und accept_p_min, welche trotz ihrer sehr geringen Größe noch immer zu groß sind. Würde man diese größer ansetzen, dann würden sich zwar Zeitfenster bilden, jedoch würden auch Detektionsfehler verstärkt auf deren Bildung Einfluss nehmen.

6.3 Messungen in UO3

Zu Beginn der 3. Messreihe kam es in diesem Untersuchungsobjekt zu Problemen bei der Datenübertragung von der Wetterstation hin zur Hauptstation. Eine durchgängige Messung konnte erst mit Ende Oktober 2021 erreicht werden. Hierbei kam es jedoch

zwischen 26. November 2021 und 2. Dezember 2021 zu einem Ausfall des Systems. Der *Easy Energy Saver* musste daraufhin neu gestartet werden.

In Abb. 41 ist die gemessene CO₂-Konzentration über die gesamte Dauer der 3. Messreihe zu sehen. Leicht erkennbar und in Rot hervorgehoben ist der längere Messausfall zwischen 26. November 2021 und 2. Dezember 2021. Zu sehen ist, dass die CO₂-Konzentration nie unter 500 ppm fällt, also immer eine anthropogen erhöhte CO₂-Konzentration vorhanden. Als Grenzwert für die CO₂-Konzentration wurde wieder 1.200 ppm eingestellt.

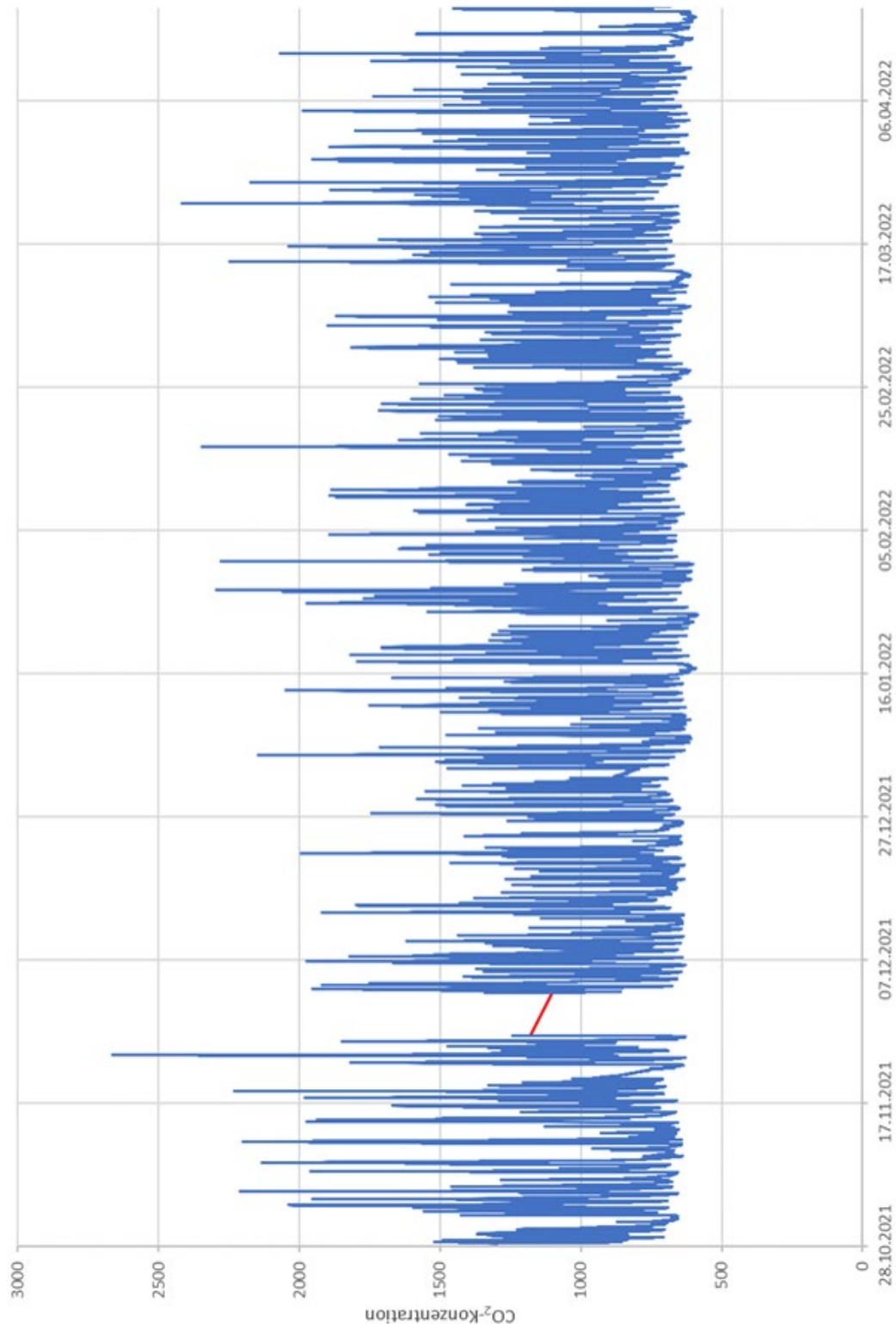


Abb. 41: CO₂-Konzentration, UO3, 3. Messreihe

Da die 3. Messreihe sehr lang ist und aus dem Diagramm schwer etwas zum Herauslesen ist, ist in Abb. 42 die mittlere monatliche CO₂-Konzentration aufgetragen. Für die Monate Mai bis September gab es für eine Auswertung nicht genug Daten. Deshalb werden diese

Monate hier nicht aufgelistet. Anders als in UO2 ist keine jahreszeitliche Änderung erkennbar. Die mittlere CO₂-Konzentration ist höher als in UO2.

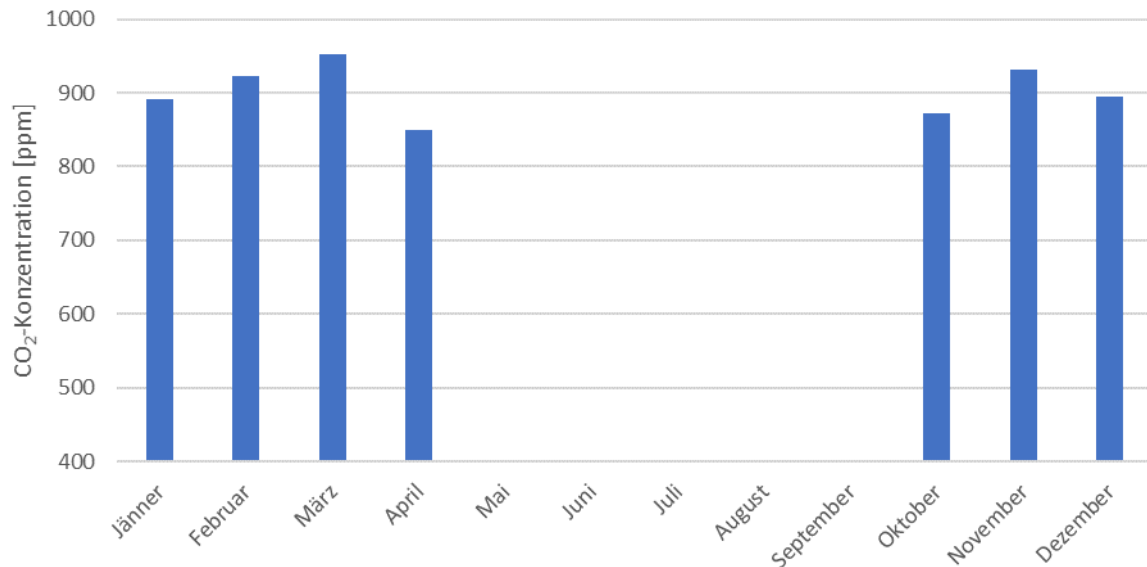


Abb. 42: Mittlere monatliche CO₂-Konzentration, UO3, 3. Messreihe

Die mittlere CO₂-Konzentration für die Wochentage (Abb. 43) zeigt niedrigere Werte für das Wochenende, was auch zu erwarten war, da der Raum als Heimbüro verwendet wird.

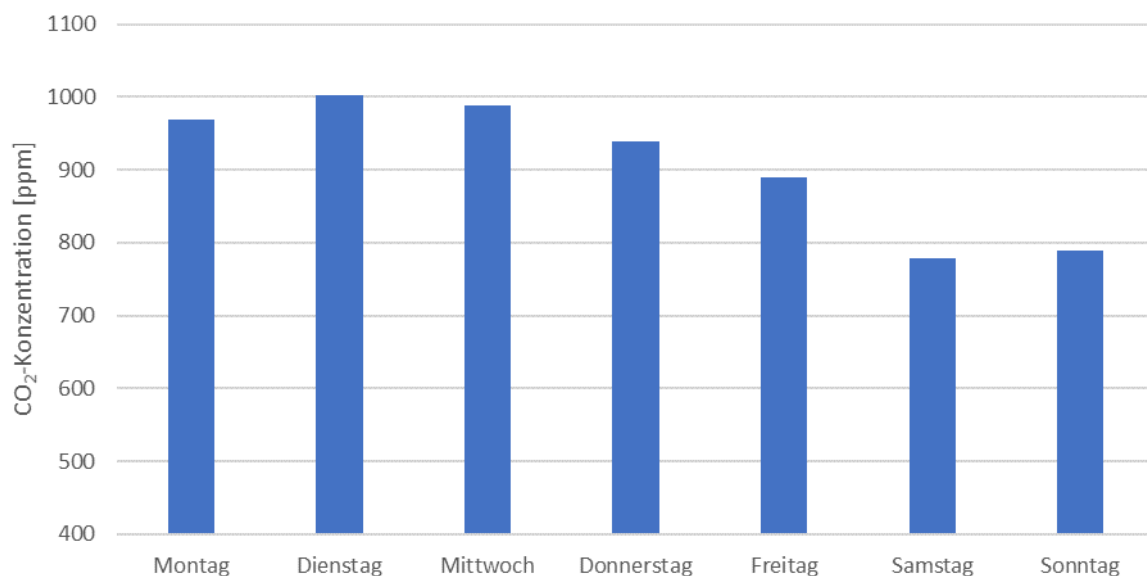


Abb. 43: Mittlere CO₂-Konzentration auf den Wochentag bezogen, UO3, 3. Messreihe

Der tageszeitliche Verlauf der durchschnittlichen CO₂-Konzentration ist in Abb. 44 zu sehen. Ähnlich wie bei UO2 ist das Minimum in der Früh erreicht (05:00 bis 06:00). Danach kommt es zu einem Anstieg. Am Vormittag wird die erste Lüftungsempfehlung ausgegeben. Die über die Mittagszeit absinkende CO₂-Konzentration ist zum einen auf eine, zu dieser Tageszeit, seltenere Anwesenheit und der damit verbundenen größeren Auswirkung der

natürlichen Zirkulation zurückzuführen, zum anderen werden die, am Vormittag ausgegebenen Lüftungsempfehlungen auch angenommen und ausgeführt. Am frühen Vormittag steigt die CO₂-Konzentration wieder. Die darauffolgende Abnahme am späteren Nachmittag ist eher auf natürliche Luftzirkulation zurückzuführen, da hier die Person sich seltener in diesem Raum aufhält. Am Abend kommt es wieder zu einem Anstieg. Danach sinkt die CO₂-Konzentration bis zum morgendlichen Minimum.

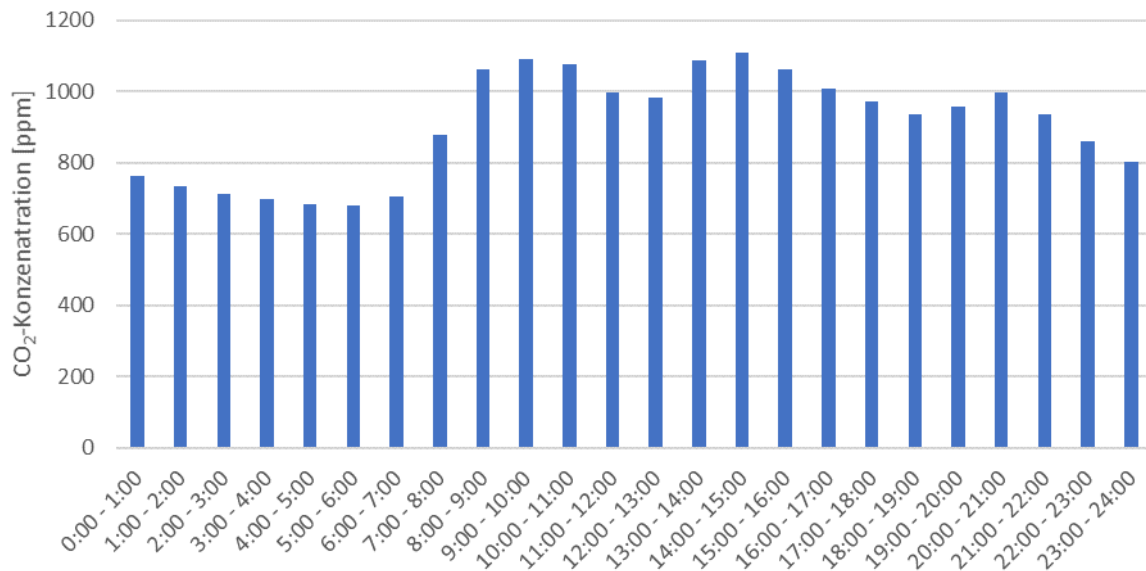


Abb. 44: Mittlere stündliche CO₂-Konzentration, UO3, 3. Messreihe

Abb. 45 zeigt den PMV-Index der Raum- und Außenluft. Am 9. Februar kam es jedoch zu einem Ausfall der Wetterstation, der bis zum Ende der Versuchsreihe unbemerkt blieb. Daher könnten die Messergebnisse bezüglich des PMV-Indexes ab diesem Zeitpunkt nicht mehr ausgewertet werden. Jedoch arbeitete das Gerät ab diesem Zeitpunkt als normale CO₂-Ampel weiter.

Das Gerät war so eingestellt, dass der selbstlernende Algorithmus mit dem 29. Tag einsetzt. Als Startwert für die untere und obere Grenze des PMV-Indexes wurde -0,5 bzw. +1,0 gewählt. Eine asymmetrische Anordnung wurde gewählt, da in früheren Messreihen (2. Messreihe) tendenziell höhere PMV-Indexes gemessen wurden (vgl. dazu Kapitel 6.2.1), und damit sehr häufige Empfehlungsausgaben verhindert werden sollen.

Ähnlich wie bei UO2 wurde der obere Grenzwert des PMV-Indexes während der Messung nicht überschritten. Auch der untere Grenzwert wurde nicht unterschritten. Deshalb hat das System auch keine Lüftungsempfehlungen zur Anpassung des PMV-Indexes ausgegeben. Da die mittlere Tagestemperatur die Heizgrenztemperatur (15°C) während der Versuchsreihe nicht überschritten hat, wurde auch keine Empfehlung für das Verschatten ausgegeben.

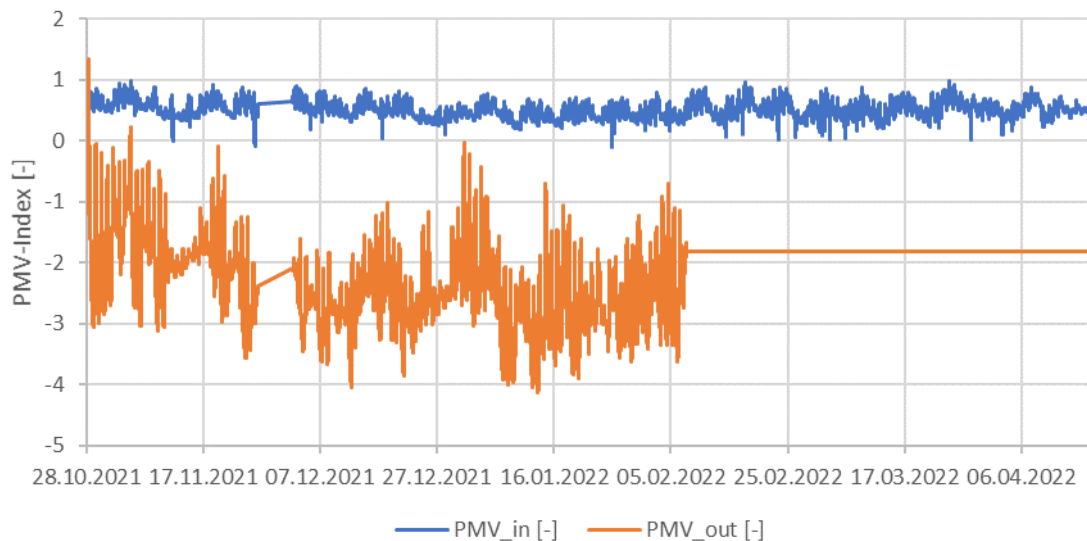


Abb. 45: PMV-Index, UO3, 3. Messreihe

Bei der Auswertung des selbstlernenden Systems hat sich gezeigt, dass sich die Grenzwerte des PMV-Indexes sich nicht geändert haben. Das selbstlernende System konnte eine Anwesenheitsmatrix generieren. Jedoch hat diese Matrix nur für Freitag für etwa 16:00 eine kurze Anwesenheit prognostiziert. Es wurden keine Timeslots für vorgezogene Empfehlungen generiert. Der Grund war, dass man für die Bildung eines Timeslots vorgegeben hat, dass mindestens 45 min eine durchgehende Anwesenheit prognostiziert wird. Dies wurde jedoch im Untersuchungszeitraum mit einer maximalen prognostizierten durchgängigen Anwesenheit von 3 Minuten nicht erreicht.

Die Auswertung hat gezeigt, dass die Detektion der Stoßlüftens durch das Beobachten der CO₂-Konzentration schon zielführend ist, und hier mit einem geringen Fehleranteil richtig detektiert wird. Jedoch ist die Anzahl der angenommenen Empfehlungen im Vergleich zu der Anzahl der ausgegebenen Empfehlungen zu gering, als das man mit diesen Daten ein entsprechendes Anwesenheitsprofil generieren kann.

6.4 Messungen in UO4

In Abb. 46 ist die gemessene CO₂-Konzentration über die gesamte Dauer der 3. Messreihe zu sehen. Es kam zu dieser Zeit zu keinem Messausfall.

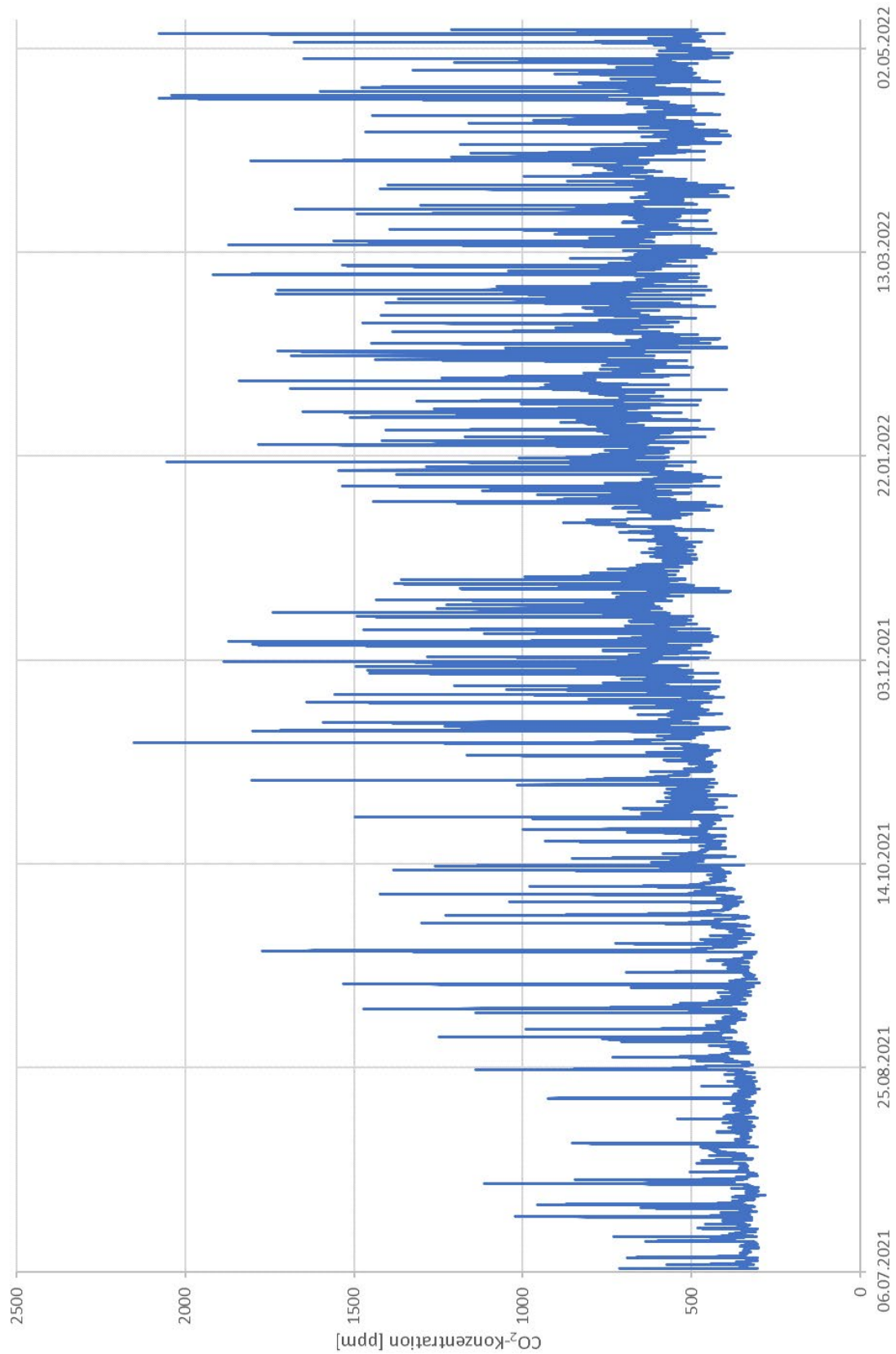


Abb. 46: CO₂-Konzentration, UO4, 3. Messreihe

Da die 3. Messreihe sehr lang ist und aus dem Diagramm schwer etwas zum Herauslesen ist, ist in Abb. 47 die mittlere monatliche CO₂-Konzentration aufgetragen. Für den Monat Juni gab es für eine Auswertung nicht genug Daten. Deshalb wurde dieser Monat hier nicht aufgelistet. Wie in UO2 ist eine deutliche jahreszeitliche Änderung erkennbar. Die mittlere CO₂-Konzentration ist in der warmen Jahreszeit deutlich niedriger.

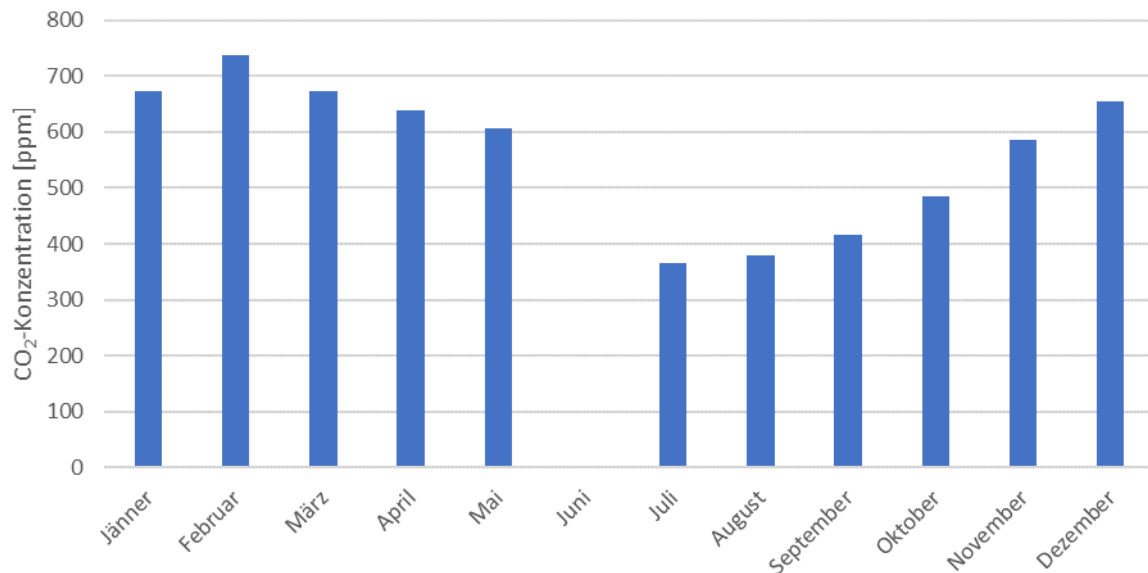


Abb. 47: Mittlere monatliche CO₂-Konzentration, UO4, 3. Messreihe

Die mittlere CO₂-Konzentration für die Wochentage (Abb. 48) zeigt niedrigere Werte für das Wochenende, was auch zu erwarten war, da der Raum als Heimbüro verwendet wird.

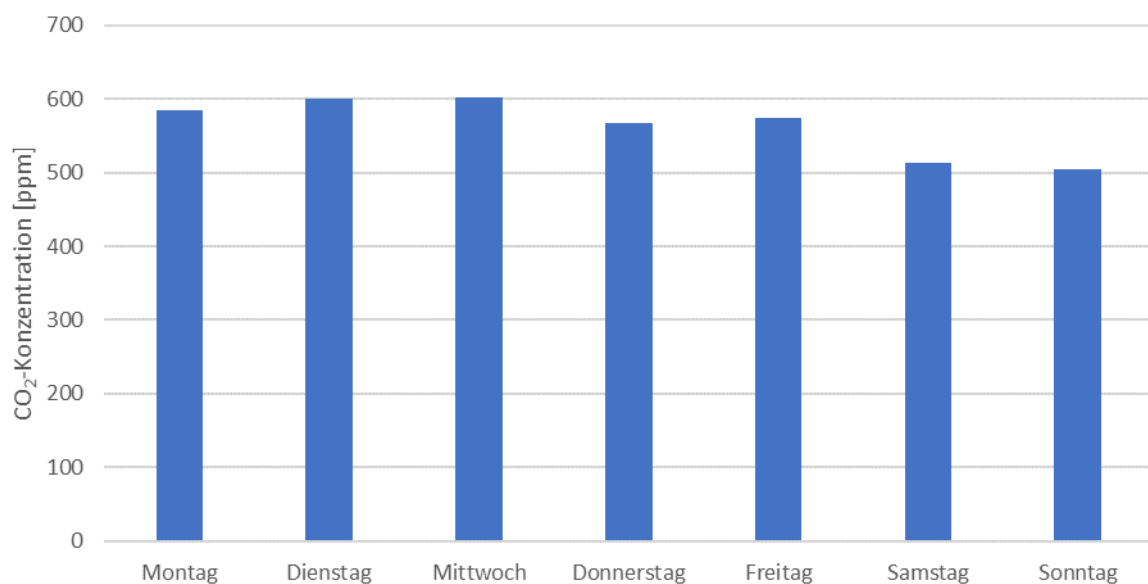


Abb. 48: Mittlere CO₂-Konzentration auf den Wochentag bezogen, UO4, 3. Messreihe

Der tageszeitliche Verlauf der durchschnittlichen CO₂-Konzentration ist in Abb. 44 zu sehen. Anders als bei UO2 und UO3, welche ebenfalls als Büro verwendet werden, ist das Minimum

am Abend erreicht und steigt über Nacht sogar leicht an. Der erste merkliche Anstieg ist zwischen 8 und 9 Uhr in der Früh erkennbar. Die Tagesspitze ist zwischen 10 und 11 Uhr am Vormittag erreicht. Über die Mittagszeit sinkt die CO₂-Konzentration wieder. Bis 16 Uhr bleibt sie dann relativ konstant und nimmt schließlich bis zum Tagesminimum am Abend ab.

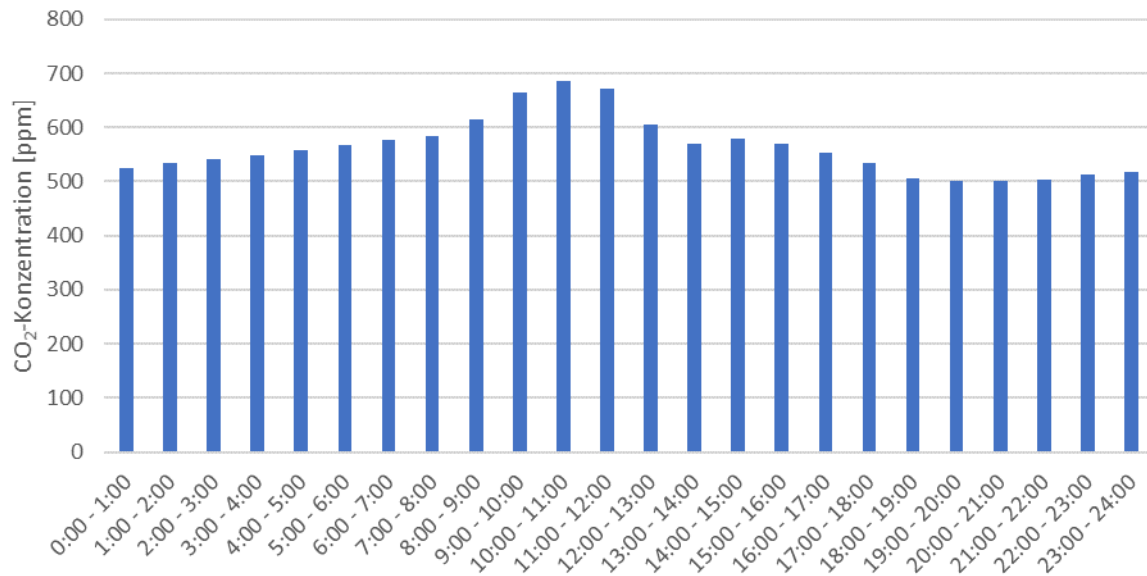


Abb. 49: Mittlere stündliche CO₂-Konzentration, UO4, 3. Messreihe

Das Gerät war so eingestellt, dass der selbstlernende Algorithmus mit dem 30. Tag einsetzt. Als Startwert für die untere und obere Grenze des PMV-Indexes wurde -0,5 bzw. +0,5 gewählt.

Das Heimbüro ist trotz seiner nordseitigen Ausrichtung von einer großen sommerlichen Überhitzung betroffen (vgl. dazu . Abb. 50). Im Juli und August 2021 wurde fast durchgängig ein PMV-Index der Raumluft über dem Grenzwert von +0,5 gemessen. Dies führte in dieser Zeit zu einer oftmaligen Ausgabe einer Lüftungsempfehlung, vor allem zu Nacht- und Morgenstunden - also zu Zeiten, in denen der PMV-Index der Außenluft unter dem der Raumluft lag. Die Lüftungsempfehlungen die darauf folgten, basierten fast ausschließlich auf einer CO₂-Konzentrations-Grenzwertüberschreitung. Im Sommer 2021 kam es gelegentlich auch zu Verschattungsempfehlungen. Ab Oktober mit Unterschreitung der Heizgrenztemperatur wurde die Empfehlung der Heizungsregulation häufig ausgegeben (vgl. dazu Abb. 51).

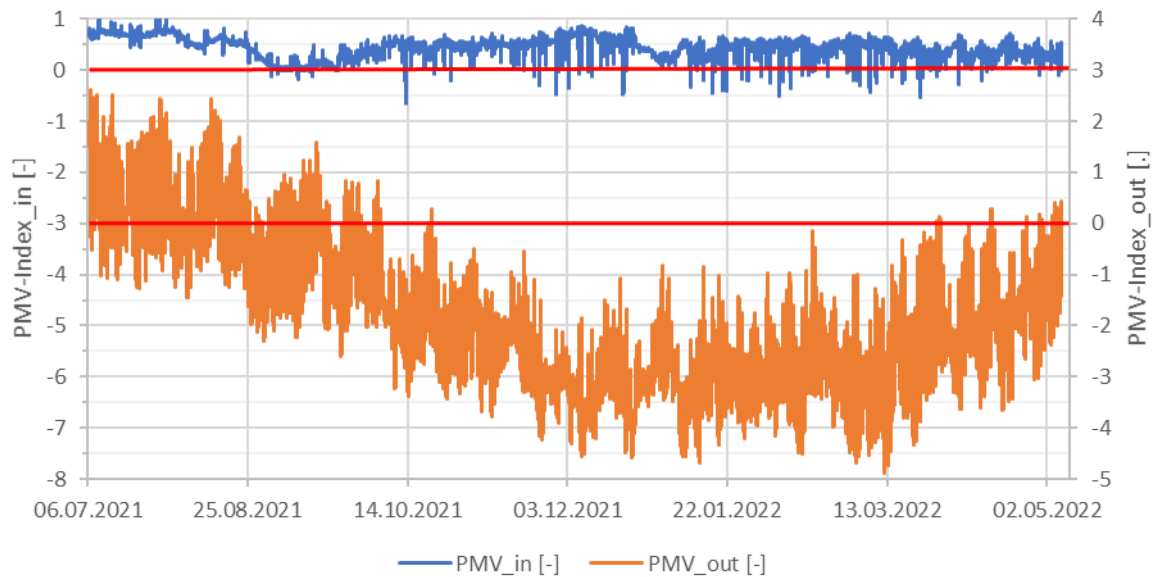


Abb. 50: PMV-Index, UO4, 3. Messreihe

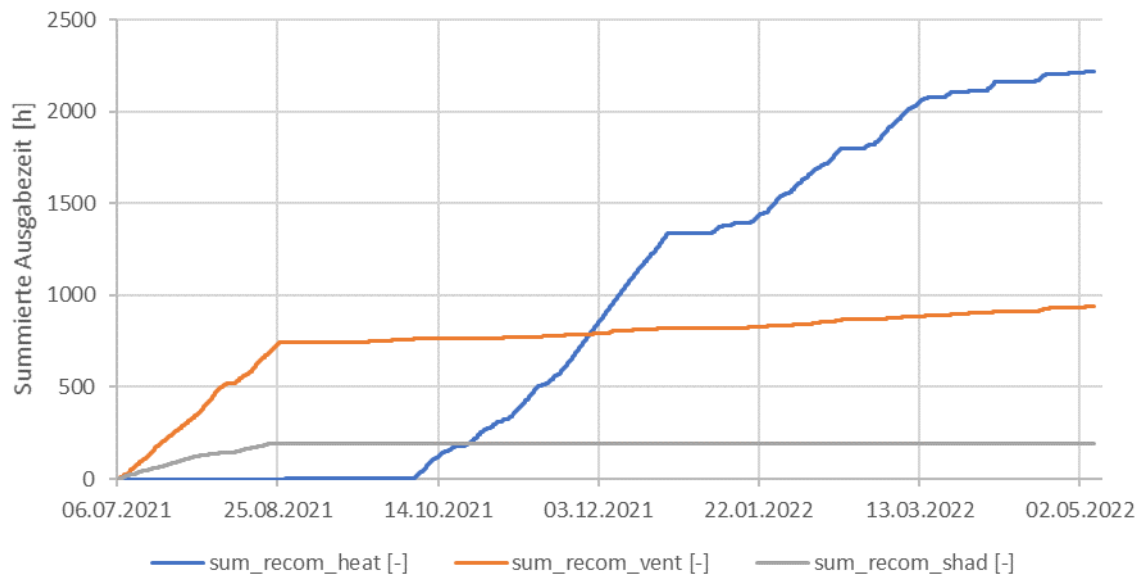


Abb. 51: Kumulierte Dauer der Empfehlungen, UO4, 3. Messreihe

Das selbstlernende System konnte eine Anwesenheitsmatrix generieren. In Abb. 52 ist diese Matrix bildlich dargestellt. Dabei wird zwischen den Wochentagen unterschieden. Steigt die Kurve in einem Zeitschritt, dann wird für diesen Zeitschritt eine Anwesenheit prognostiziert. Obwohl diese Matrix gebildet wurde, wurden keine Timeslots für vorgezogene Empfehlungen generiert. Der Grund war, dass man für die Bildung eines Timeslots vorgegeben hat, dass mindestens 45 min eine durchgehende Anwesenheit prognostiziert wird. Dies wurde jedoch im Untersuchungszeitraum mit einer maximalen prognostizierten durchgängigen Anwesenheit von 18 Minuten nicht erreicht.

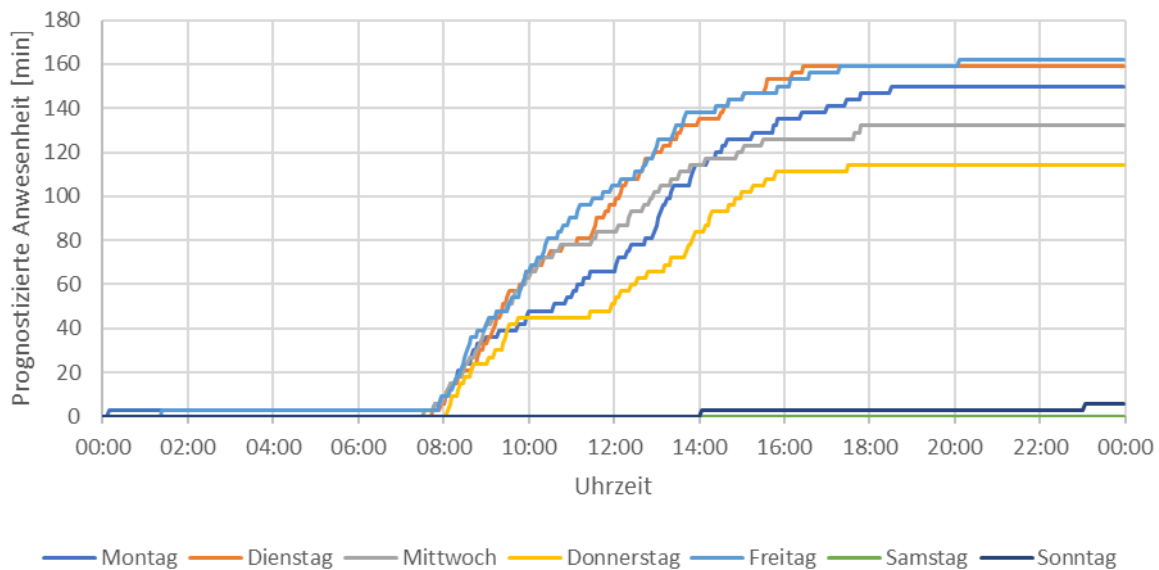


Abb. 52: Prognostizierte Anwesenheit, UO4, 3. Messreihe

Im Folgenden wird erklärt, warum in diesem Fall die Anwesenheitsmatrix zumindest teilweise befüllt wurde – in anderen Untersuchungsobjekten aber gar nicht. Im Programm wurde eingestellt, dass eine Fensteröffnung ab einer Reduktion der CO₂-Konzentration von 60 ppm pro Zeitschritt (3 Minuten) auch als solche erkannt wird. Die Messdaten zeigen, dass man die Differenz in den meisten Fällen kleiner hätte wählen sollen, da sich die Reduktion der CO₂-Konzentration oft eher im Bereich von 30 ppm pro Zeitschritt bewegt. Die Matlab/IDA ICE-Simulation war scheinbar optimistischer was die Geschwindigkeit der CO₂-Reduktion angeht. Es könnte aber auch daran liegen, das Fenster nur gekippt oder nicht ganz geöffnet wurden.

Trotzdem ist das nicht der Hauptgrundgrund, warum keine Anwesenheitsmatrizen gebildet wurden. Die meisten Öffnungen werden nämlich dennoch erkannt, da die Differenz von 60 ppm trotzdem im Verlauf der Lüftungsvorgänge meistens von zumindest zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten überschritten wird. Damit stimmt zwar der Zeitpunkt nicht perfekt, aber es werden viele Lüftungsvorgänge detektiert, wie die „accept_day“-Matrizen zeigen. Zur Bestimmung der Anwesenheitsmatrizen werden danach für jeden Zeitschritt die detektierten angenommenen Befehle durch die Gesamtanzahl der ausgegebenen Befehle dividiert. Nur wenn dieses Verhältnis über einem eingestellten Grenzwert liegt (in diesem Fall sind das 7%) wird eine „1“ in die Anwesenheitsmatrix geschrieben. Jetzt könnte man meinen, dass dieser Wert noch immer zu hoch angenommen wurde, oder aber und das ist das ist die Vermutung, dass die Empfehlungen des *Easy Energy Saver* einfach zu selten und unregelmäßig umgesetzt wurden, um eine aussagekräftige Anwesenheitsmatrix zu generieren.

In UO4 sind alle Tage in der „accept_day“-Matrix gespeichert. Damit konnten die detektierten Fensterlüftungen mit den CO₂-Konzentration verglichen und gezeigt werden, dass diese

prinzipiell richtig aufgezeichnet wurden (auch wenn der Grenzwert im Optimalfall kleiner gewählt werden hätte sollen).

Bei der Auswertung des selbstlernenden Systems hat sich gezeigt, dass sich die Grenzwerte des PMV-Indexes sich nicht geändert haben. Es wurden auch keine Zeitfenster für die vorgezogenen Empfehlungen ausgegeben. Die Auswertung hat gezeigt, dass die Detektion der Stoßlüftens durch das Beobachten der CO₂-Konzentration schon zielführend ist, und hier mit einem geringen Fehleranteil richtig detektiert wird. Jedoch ist die Anzahl der angenommenen Empfehlungen im Vergleich zu der Anzahl der ausgegebenen Empfehlungen zu gering, als das man mit diesen Daten ein entsprechendes Anwesenheitsprofil generieren kann.

6.5 Messungen in UO5

Bei UO5 kam es während der 3. Messreihe zu einigen Messausfällen. Am 21. Juli 2021 verursachte ein längerer Stromausfall die Abschaltung des Geräts. Der Ausfall wurde genutzt, um die ersten Messungen in diesem UO auszuwerten. Daraufhin wurden ein paar Parameter angepasst. Die Messungen konnten am 8. Oktober 2021 neu gestartet werden. Am 15. Oktober 2021 kam es zu einem weiteren Messausfall, welcher aber innerhalb von 3 Stunden behoben werden konnte. Am 25. Oktober kam es schließlich zu einem weiteren Ausfall. Als problematisch hat sich hier die lange Kabelführung hin zur Wetterstation erwiesen. Durch diese lange Zuleitung wurden trotz des abgeschirmten Kabels einige Störsignale generiert. Eine Kürzung dieses Kabels

Aufgrund der langen Messausfälle konnte kein jahreszeitlicher Trend der CO₂-Konzentration abgeleitet werden. Zu erkennen ist aber, dass die mittlere CO₂-Konzentration im Juli (335 ppm) deutlich niedriger ist als die vom Oktober (753 ppm), was mit den Erkenntnissen aus den anderen Untersuchungsobjekten zusammenpasst. Demnach scheint das Fenster im Sommer über lange Zeitbereiche offen zu sein. Betrachtet man die mittlere CO₂-Konzentration über eine Woche (Abb. 53), dann ist kein klarer Trend, im Vergleich zu den als Büro genutzten Objekte UO2, UO3 und UO4 zu erkennen.

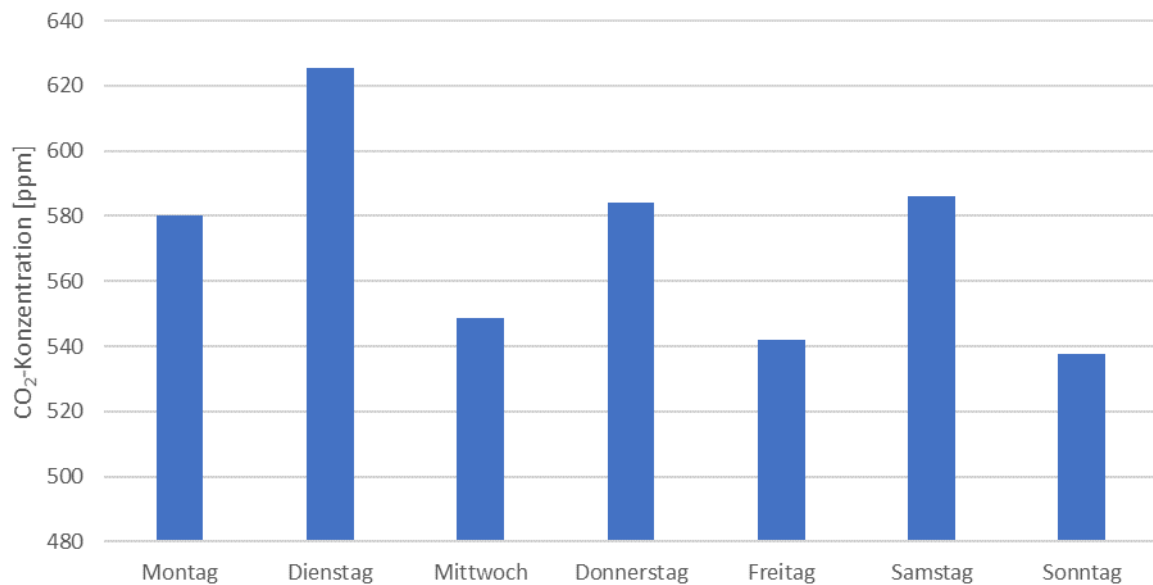


Abb. 53: Mittlere CO₂-Konzentration auf den Wochentag bezogen, UO5, 3. Messreihe

Der tageszeitliche Verlauf der CO₂-Konzentration ist in Abb. 54 zu sehen. Hierbei kommt es zu einer morgendlichen Spitze um etwa 7 Uhr. Der Maximalwert wird um etwa 20 Uhr erreicht.

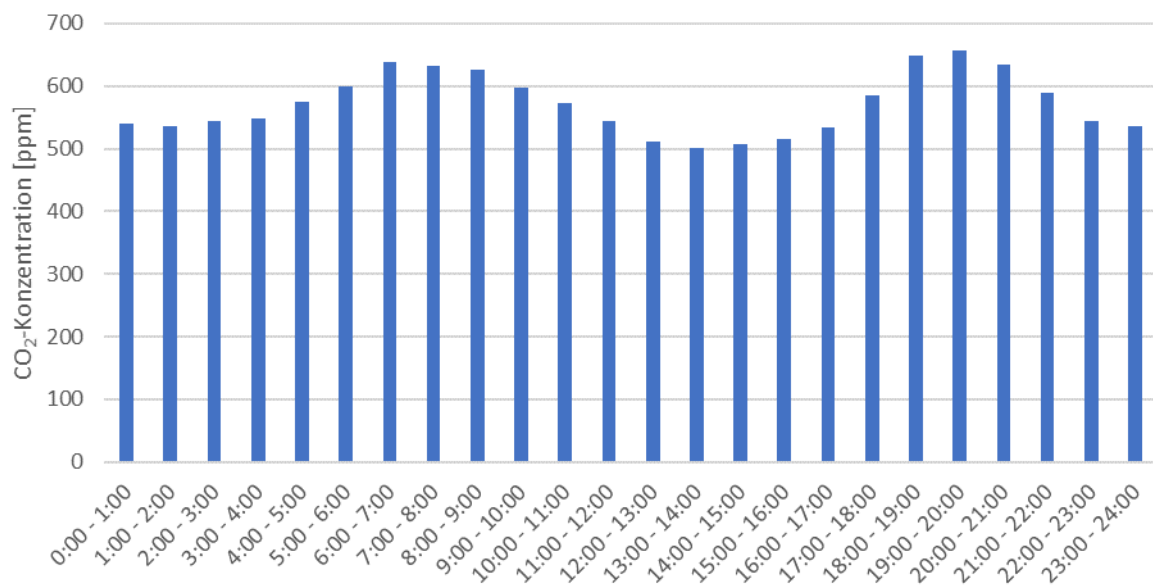


Abb. 54: Mittlere stündliche CO₂-Konzentration, UO5, 3. Messreihe

Das Gerät war so eingestellt, dass der selbstlernende Algorithmus mit dem 8. Tag einsetzt. Als Startwert für die unter und obere Grenze des PMV-Indexes wurde -0,5 bzw. +0,5 gewählt. Aufgrund der kurzen Dauer eines durchgängigen Betriebs konnten keine Erkenntnisse zum Selbstlernenden Prozess gewonnen werden.

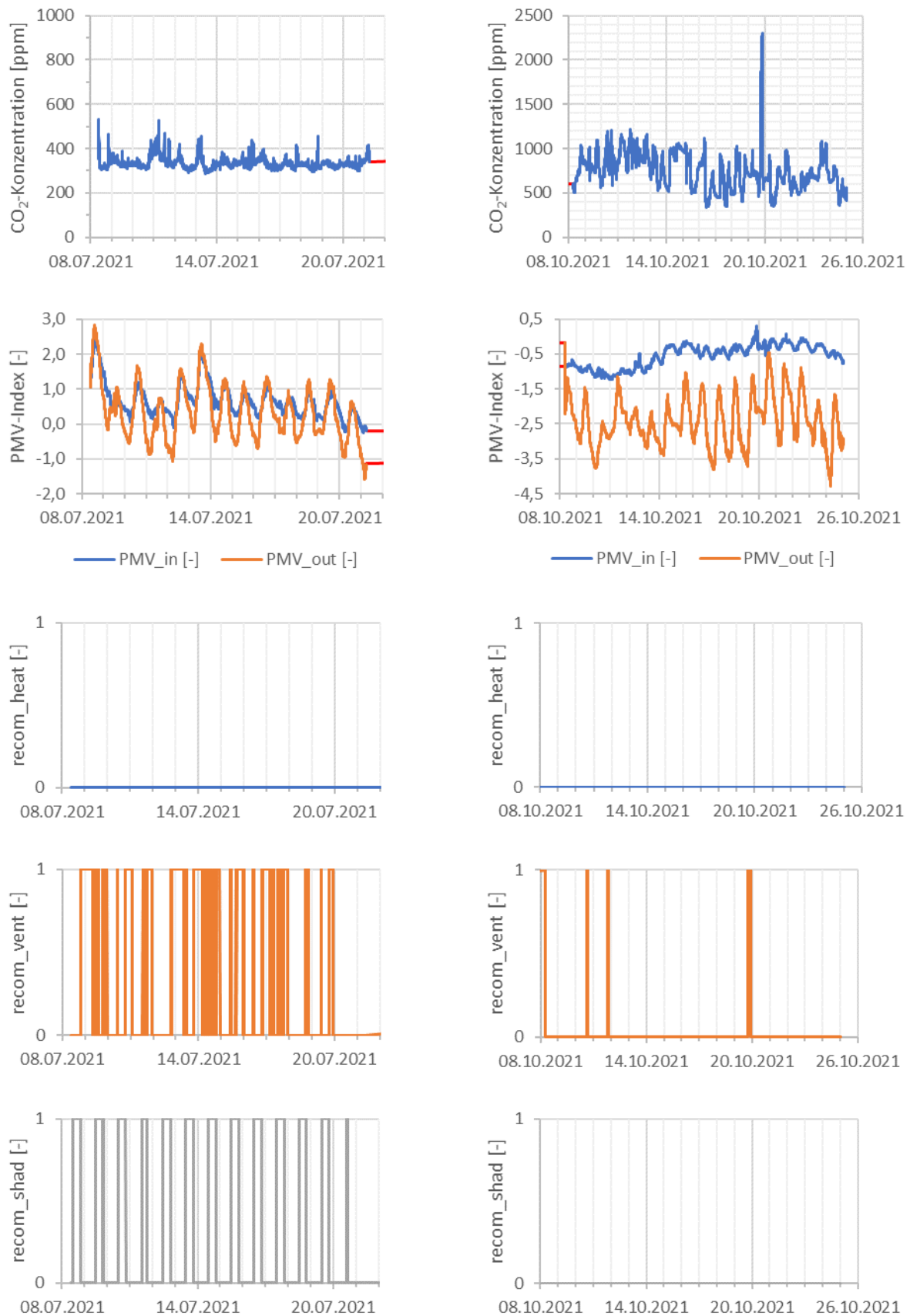


Abb. 55: Auswertung der Messergebnisse, UO5, 3. Messreihe

In Abb. 55 ist die Auswertung der gesamten Messergebnisse zu sehen. Empfehlungen zur Heizungsregulierung wurden nie ausgegeben. Grund dafür war das bei Unterschreiten der Heizgrenztemperatur (15°C) niemals die obere Grenze des PMV-Indexes (+0,5) überschritten wurde. Die Lüftungsempfehlungen, welche im Juli 2021 ausgegeben wurden, basieren alle auf der Annäherung des PMV-Indexes an Null. Dagegen wurden alle Lüftungsempfehlungen im Oktober 2021 aufgrund einer CO₂-Konzentrations-Grenzwertüberschreitung ausgegeben. Aufgrund der südwestseitigen Ausrichtung des Fensters wurden im Sommer, aufgrund der oftmaligen Überschreitung der Obergrenze des PMV-Indexes, die Verschattungsempfehlung dementsprechend oft ausgegeben.

6.6 CO₂-Ampel

Am 15. Februar 2021 wurden in zwei Wohnungen der Wienerstraße 11A (UO1) zwei CO₂-Ampeln in Betrieb genommen. Die Parameter wurden so eingestellt, dass eine Lüftungsempfehlung ab 1200 ppm ausgegeben wird. Wenn die CO₂-Konzentration unter 900 ppm fällt, dann wird die Empfehlung wieder gelöscht. Durch diese Einstellungen konnte ein oftmaliges wiederholtes Ausgeben von Lüftungsempfehlungen kurz nacheinander verhindert werden.

Aus unerklärlichen Gründen kam es bei einem Gerät bereits nach nicht einmal 24 Stunden zu einem Ausfall. Hierbei hat der Sensor SCD30 einen Fehler ausgegeben. Dieser führte auch zur Beendigung des Programmes. Hierbei kam der Nachteil des Offline-Monitorings zum Vorschein. Von außen ist eine Beendigung des Programmes kaum sichtbar. Einziges Indiz in diesem Fall war, dass sich die Messwerte nicht mehr änderten. Ein Grund für diesen Ausfall kann sein, dass die Kontakte hin zum Sensor getrennt wurden. Erhält das Gerät länger als drei Minuten keine Messwerte, dann führt das zum Ausfall. Für diese einen CO₂-Ampel konnte daher keine Auswertung gemacht werden.

Die zweite CO₂-Ampel war bis in der Nacht der Zeitumstellung (28.03.2021) in Betrieb. Die Person in dieser Wohnung hat während der Pilotphase immer in den Morgenstunden eine Stoßlüftung (um etwa 9 Uhr) durchgeführt. Dabei war die Messstelle etwa 2 Meter vom geöffneten Fenster entfernt. Die Stoßlüftung ist durch ein schlagartiges Absinken der CO₂-Konzentration erkennbar.

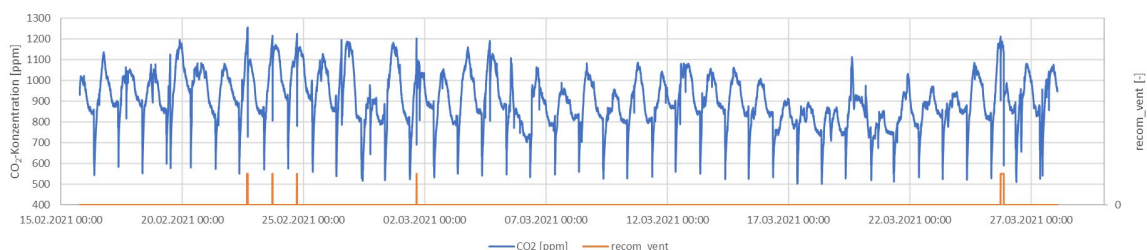


Abb. 56: Auswertung der Messergebnisse einer CO₂-Ampel

Über den Tag wurde nur wenig gelüftet. Trotzdem wurde nur 5-mal eine Empfehlung für das Stoßlüften ausgegeben (siehe „com_vent“ ≠ 0 in Abb. 56). Anscheinend wurde auch jedes Mal diese Empfehlung von der Person wahrgenommen und unmittelbar ausgeführt. Durch die Annahme dieser Empfehlungen konnten große CO₂-Spitzen vermieden werden.

Weiters haben die Versuche gezeigt, dass mit der Stoßlüftung und der damit verbundenen Messwerteänderung in der Wohnung auch teilweise Rückschlüsse auf das Wetter gemacht werden können. Diese Rückschlüsse konnten durch den Vergleich mit Messdaten aus einem vollwertigen EES mit Wetterstation, welcher zur gleichen Zeit am selben Ort in Betrieb war, gezogen werden. Inwiefern diese Informationen verarbeitet werden können, um z.B. eine Wetterstation ersetzen zu können, ist jedoch ungeklärt.

7 Erkenntnisse

Während im Projekt *Empower Citizens* im Wesentlichen die technischen Probleme des *Easy Energy Savers* gelöst wurden, konnte im gegenwertigen Projekt *Easy Energy Saver* das Gerät über einen längeren Zeitraum in mehreren Untersuchungsobjekten getestet werden.

7.1 Technische Herausforderungen

Die Verbindung der Wetterstation mit der Hauptstation über Funk, ist im Aufbau wenig aufwendig, und im Betrieb sicher am wenigsten störend, da zwischen den Stationen keinerlei Leitungen verlegt werden müssen. Die Wetterstation hat einen hohen Strombedarf, so dass der Akku-Pack häufig gewechselt werden muss. Weiters kommt es beim Tausch des Akku-Packs zu einer Unterbrechung der Messwertübertragung, welche auch länger andauern kann, in Abhängigkeit der Wahrnehmung des leeren Akkus und der Motivation diesen Akku-Pack auch zu tauschen. Hauptgrund, warum auf eine kabellose Version verzichtet wurde, ist aber die Instabilität der Funkübertragung. Eine stabile Messwertübertragung ist aber für die Funktionalität des Geräts Voraussetzung. Aus diesem Grund wurden alle Tests im Zuge von *Easy Energy Saver* mit kabelgebundenen Geräten durchgeführt.

Durch die kabelgebundene Version ist ein Batterietausch nicht mehr notwendig, da die Wetterstation direkt über die Hauptstation mit Energie versorgt wird. Hierfür muss von der Hauptstation ein starres Telefonkabel in der Wohnung, im Gang, bis hin zu einem passenden Ort einer Wetterstation verlegt werden. Dieser Eingriff in die Privatsphäre in der Pilotphase war herausfordernd. Eine Funkverbindung würde hier von den Personen sicher besser akzeptiert werden, wobei es aber teilweise Bedenken über die „Strahlung“ gab. Durch eine verständliche professionelle Aufklärung konnten diese Bedenken aber beseitigt werden. Am vorteilhaftesten für die Akzeptierung des Gerätes, wäre sicher eine Kopplung per Funk mit einer kommerziellen Wetterstation. Kommerzielle Wetterstation haben an sich schon eine sehr lange Batterielaufzeit. Jedoch stellte sich heraus, dass eine Verbindung mit einer solchen Wetterstation sehr komplex ist. Aus diesem Grund wurde die selbstgebaute Wetterstation während der Pilotphase beibehalten.

Bei dem verwendeten Display der Hauptstation handelt es sich um ein vierzeiliges Display, welches aber in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung nur bedingt lesbar ist. Auch wurde bemerkt, dass, wenn LEDs leuchten, dieses Display aufgrund der großen Leuchtstärke der LEDs sogar noch schwerer zum Ablesen ist. Generell hat sich die Empfehlungsausgabe über die LEDs aber bewährt, da diese leicht sichtbar und verständlich ist. Für eine bessere Lesbarkeit müssten aber Display und LEDs noch besser aufeinander abgestimmt werden.

Der Offline-Betrieb der Geräte ist für ein Monitoring nicht optimal. Für die Inbetriebnahme muss ein Monitor per HDMI-Anschluss an das Gerät angeschlossen werden. Hierbei ist es wichtig, dass dieser HDMI-Anschluss als Plug & Play ausgeführt ist, ansonsten kann es sein, dass man keine Messwerte, während des Betriebes ablesen kann. Ein Online-Betrieb für die Pilotphase ist zielführender, welcher in den Untersuchungsobjekten Großteiles auch möglich war.

7.2 Mehrwert des Empfehlungssystems

Bereits die Ergebnisse von *Empower Citizen* zeigen, dass vor allem Empfehlungen zum Stoßlüften basierend auf einer Überschreitung eines CO₂-Grenzwertes von den BewohnerInnen angenommen und ausgeführt werden. Diese Erkenntnis wurde auch im gegenwärtigen Projekt gewonnen. Obwohl in UO2 bis UO5 keine Referenzmessungen durchgeführt wurden, wurde nach einer Befragung der Testpersonen klar, dass diese Empfehlung als hilfreich angesehen wird. Die Personen gaben an, diese Empfehlungen oft angenommen zu haben. Demnach können Spitzen der CO₂-Konzentration ohne Aktoren effektiv gesenkt werden. Weiters konnte auch das Bewusstsein, der Erhöhung der Raumluftqualität durch Stoßlüften gestärkt werden.

Empfehlungen zur Anpassung des PMV-Indexes der Raumluft werden aber als nicht zielführend angesehen. Erstens hat sich gezeigt, dass obwohl sehr viel Parameter bei der Berechnung des PMV-Index einfließen, sich dieser von Person zu Person stark unterscheidet. Vor allem die Ober- und Untergrenze des PMV-Indexes bestimmt die Häufigkeit, wie oft Empfehlungen ausgegeben werden. Leider hat sich gezeigt, dass in Abhängigkeit dieser beiden Parameter, Empfehlungen zu oft ausgegeben werden, so dass sich die Personen dadurch belästigt fühlen, oder zu selten, so dass kaum ein Effekt sichtbar war. Es konnte auch bewiesen werden, dass die Personen auch kaum bereit waren, diese Empfehlungen zur Annäherung des PMV-Indexes an Null, anzunehmen.

Das selbstlernende System hat sich ebenfalls als nicht zielführend erwiesen. Während in der Matlab/IDA ICE-Simulation sich noch klare Erkenntnisse aus dem selbstlernenden Prozess ergaben (z.B. Verschiebung der Grenzen des PMV-Indexes, Bildung von Zeitfenster für vorgezogene Empfehlungen), konnte der selbstlernende Algorithmus im Realbetrieb nur einen geringen Mehrwert bringen. Dies hat zwei Gründe. Der erste Grund ist die schwierige Festlegung von Parametern, welche dem selbstlernenden Prozess hinterlegt sind. Diese hängen von vielen Faktoren ab (z.B. Raumgröße, Durchlüftung, Nutzung, Lage des Sensors, ...). Die Parameter hat man im gegenwärtigen Projekt aus der Simulation übernommen. Das führte dazu, dass nicht jede Fensteröffnung ordnungsgemäß detektiert wurde, und somit auch das Anwesenheitsprofil nicht richtig erzeugt wurde. Der zweite Grund ist die geringe Motivation der Testpersonen, die Empfehlungen, welche auf der Annäherung des PMV-Index an Null basieren, auch anzupassen. Dies führte dazu, dass entsprechende Matrizen fast leer blieben. Der Algorithmus hat somit wenig Daten zum Lernen. Deshalb wurde nur in zwei Untersuchungsobjekten überhaupt eine Anwesenheitsmatrix erzeugt, jedoch waren die gewonnenen Daten noch immer zu wenig aussagekräftig, um Zeitfenster für vorgezogene Empfehlungen bilden zu können. Die Eingabe von fixen Zeitfenstern für vorgezogene Empfehlungen wird deshalb als zielführender angesehen.

Der Betrieb des *Easy Energy Savers* hat keine großen Auswirkungen auf den Energiebedarf (Heizung, aktive Kühlung), da gezeigt wurde, dass die Testpersonen das Gerät beinahe ausschließlich als reine CO₂-Ampel nutzen. Sofern die Fenster beim Stoßlüften nicht zu lange offen bleiben, hat das keine negativen Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf.

8 Programmcode

8.1 Beschreibung einzelner Funktionen

- **fct_meas(cntr, time, time_col, dt, cond, h, pi, lcd, met, counter, sensor, pin) | Zeile 727:**

Diese Funktion ermittelt die Messwerte der Wetterstation (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und der einzelnen Zonen (CO₂-Konzentration, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und entfernt bereits Messausreiser. Sofern keine Messwerte mehr empfangen werden, wird ein Fehlersignal ausgegeben.

- **fct_learn(dt_analy, zone, output_coll, accept_coll, PMV_u_start, PMV_o_start, PMV_u_SL, PMV_o_SL, PMV_sz) | Zeile 910:**

Diese Funktion ermittelt das bevorzugte Raumklima der Person bzw. Personen. Im Grunde wird von EES ein PMV-Index zwischen den unteren Toleranzgrenze PMV_u und der oberen Toleranzgrenze PMV_o angestrebt. Erkennt das System aber, dass die Person bzw. Personen ein anderes kühleres oder wärmeres Raumklima bevorzugen, werden diese Grenzen entsprechend verschoben und PMV_u_SL und PMV_o_SL ausgegeben. Weiters wird auch eine Matrix der Anwesenheit der Person bzw. Personen erzeugt. Die Anwesenheit wird durch das Erkennen angenommener Empfehlungen ermittelt.

- **fct_data_accept_coll(cntr, time_cor, dt, dt_analy, accept_day, accept_coll, cond, PMV, PMV_out, recom_vent_CO2, PMV_sz) | Zeile 1208:**

Diese Funktion untersucht in jedem Zeitschritt, ob eine Fensteröffnung stattgefunden hat. Zunächst wird die Matrix "accept_day" (Dim: Zeitschritt (dt) am Tag x PMV x Zone) bei jedem Zeitschritt erweitert. Diese Matrix gibt aus wann in einer Zone am aktuellen Tag eine Fensteröffnung detektiert wurde. Dabei kann es vorkommen, dass eine Fensteröffnung über mehrere Zeitschritte detektiert wurde. In der Funktion "fct_data_accept_sum" wird die Matrix "accept_day" am letzten Zeitschritt des Tages überarbeitet, indem die zu spät detektierten Fensteröffnungen aus "accept_day" eliminiert werden. Diese Matrix dient als Grundlage für die Matrix "accept_coll". Danach wird, am letzten Zeitschritt des Tages "accept_day" wieder zurückgesetzt, und somit für den nächsten Tag vorbereitet. Weiters wird in der Matrix "accept" (Dim: Zonen x 1) für die einzelnen Zonen für jeden Zeitschritt "0" oder "1" ausgegeben. "1" bedeutet, dass im aktuellen Zeitschritt eine Fensteröffnung detektiert wurde.

- **fct_data_accept_sum(cntr, time_cor, dt, dt_analy, accept_day, accept_coll) | Zeile 1341:**

Diese Funktion erstellt die Matrix "accept_coll" (Dim: Zeitschritt (dt) am Tag x PMV x Wochentag x Zone x Monat), welche die detektierten Fensteröffnungen aufsummiert. Die Matrix "accept_day" (Dim: Zeitschritt (dt) am Tag x PMV x Zone) summiert die detektierten Fensteröffnungen zu einem bestimmten Zeitpunkt bei einem bestimmten PMV-Index in den einzelnen Zonen über einen Tag auf.

- **fct_data_output_coll(cntr, time_cor, output_day, dt, dt_analy, PMV, accept_day, output_coll, accept, recom_vent, recom_vent_CO2, recom_vent_SL, PMV_sz) | Zeile 1405:**

Diese Funktion erstellt gemeinsam mit der Funktion "fct_data_output_sum" Matrizen zur Berücksichtigung, wann Empfehlungen ausgegeben wurden.

- **fct_data_output_sum(cntr, time_cor, dt, dt_analy, output_day, output_coll, accept_day) | Zeile 1512:**

Diese Funktion erstellt gemeinsam mit der Funktion "fct_data_output_coll" Matrizen zur Berücksichtigung, wann Empfehlungen ausgegeben wurden.

- **fct_time (time) | Zeile 1636:**

Diese Funktion berechnet den aktuellen Tag im Jahr und die Anzahl der Tage im aktuellen Jahr.

- **fct_PMV(cntr, time, dt, loc, res, met, zone, cond, PMV, PPD, t_a_opt, PMV_out) | Zeile 1706:**

Diese Funktion berechnet anhand der Daten der Person bzw. Personen (Alter, Geschlecht, ...) und der Umgebungsbedingungen den PMV-Index und die optimale Temperatur.

- **fct_PMV_calc(cntr, MET, CLO, t_a, v_ar, W, RH, res) | Zeile 1848:**

Diese Funktion berechnet den PMV-Index.

- **fct_recom(cntr, time, time_cor, time_start, dt, met, zone, cond, sun, insol, recom_heat, recom_vent, recom_vent_CO2, recom_shad, PMV, PMV_out, PMV_u_start, PMV_o_start, PMV_u_SL, PMV_o_SL, accept_day) | Zeile 1978:**

Diese Funktion gibt auf Grundlage aktueller und vergangener Messdaten eine Empfehlung aus.

- **fct_recom_pref_SL(cntr, time, time_cor, dt, loc, met, time_slots_short, zone) | Zeile 2214:**

Diese Funktion gibt vorgezogene Verschattungsbefehle aus.

- **fct_angle(sun, w) | Zeile 2393:**

Diese Funktion berechnet den Einfallswinkel des Sonnenlichts auf ein Fenster.

- **fct_solar_altitude(time, loc) | Zeile 2407:**

Diese Funktion berechnet den aktuellen Sonnenstand.

- **fct_sun_zone(cntr, sun, zone, insol) | Zeile 2454:**

Diese Funktion berechnet den Sonnenertrag in den einzelnen Zonen durch direkte Strahlung durch die unverschatteten Fenster.

- **fct_time_change(time) | Zeile 2497:**

Diese Funktion gibt bei der Eingabe der Normalzeit die wirkliche Zeit aus (Normal- oder Sommerzeit).

- **fct_timeslot(pres_matrix) | Zeile 2561:**

Diese Funktion erstellt aus der Anwesenheitsmatrix eine Reihe von Zeitfenstern (Wochentag und Uhrzeit), in denen die Person bzw. Personen mit hoher Wahrscheinlichkeit anwesend und für die Ausführung einer Empfehlung motiviert ist/sind.

- **fct_timeslot_short(time_slots) | Zeile 2717:**

Diese Funktion verkürzt die Dauer der gebildeten Zeitfenster der Funktion „fct_timeslot“ auf eine bestimmte Zeit. Dabei bleibt die Endzeit der einzelnen Zeitfenster gleich. Dadurch soll die Empfehlung des Verschattens erst kurz vor der Abwesenheit ausgegeben werden, so dass die Zeit verschatteter Fenster verkürzt werden kann und die Lebensqualität steigt.

8.2 Konfigurationsfile

```
#####
# GLOBALE VARIABLEN #####
#####
```

```
[section a]
```

```
# Bestimmung des ersten Tages, an dem das SL-System in Betrieb geht. Dieser
# Wert hat keine Auswirkungen auf das System, wenn "SL_status" gleich "0"
# ist. [Tage] (Dim: 1x1)
```

```
d_SL_first = 29
```

```
# Bestimmung, ob das SL-System eingesetzt werden soll
# 0...Nein
# 1...Ja
# Wenn das SL-System eingesetzt wird, dann wird ab dem d_SL_first-Tag das
# selbstlernende System angewendet. Wenn das SL-System nicht eingesetzt
# wird, dann werden keine vorgezogenen Verschattungsempfehlungen
# ausgegeben. Weiters wird auch keine Auswertung des selbstlernenden
# Systems durchgeführt. Die Datensammlung der angenommenen und ausgegebenen
# Empfehlungen wird aber trotzdem durchgeführt. [-] (Dim: 1x1)
```

```
SL_status = 1
```

```
# Bestimmung ob bereits Daten fuer das SL-System vorhanden sind
# 0...Nein, keine Daten vorhanden
# 1...Ja, Daten bereits vorhanden
# Im Fall eines Systemausfalls muss das System neu gestartet werden. Dafuer
# muss zunaechst die aktuelle Systemzeit mit dem Befehl
# "sudo date --set 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss'" eingegeben werden. Wenn nun
```

```
# "data_status" in der Initialisierungsdatei auf "1" gestellt wird, dann
# laed das Programm die Arrays "accept_coll", "output_col", und
# "time_slots_short", sofern diese vor dem Systemausfall gespeichert
# wurden. Im Fall, dass bereits bei Betriebsstart gewuenschte Timeslots
# zum Eingeben sind, muss "data_status" ebenfalls auf "1" gestellt werden.
# Die Datei "time_slots_short.npy" muss dann manuell erzeugt werden. Wenn
# "SL_status" gleich "0" ist und "data_status" gleich "1", dann aendern
# sich die Timeslots nicht mehr. [-] (Dim: 1x1)
data_status = 0

# Schrittweite des Programms [s] (Dim: 1x1)
dt = 180

# Zeitschrittweite der Auswertung [s] (Dim: 1x1)
dt_analy = 180

# Unterteilungsgenauigkeit des PMV-Indexes [-] (Dim: 1x1)
PMV_sz = 0.5

# Startwert für die untere Grenze des PMV-Indexes [-] (Dim: 1x1)
PMV_u_start = -0.5

# Startwert für die obere Grenze des PMV-Indexes [-] (Dim: 1x1)
PMV_o_start = 1

#####
# OERTLICHKEITE #####
#####

[section b]
# Geografische Breite der Wohnung [°] (Dim: 1x1)
loc_width = 47.374235

# Geografische Länge der Wohnung [°] (Dim: 1x1)
loc_length = 16.124673

#####
# BEWOHNER #####
#####
```

[section c]

```
# Geschlecht der Bewohner [-] (Dim: 1x1)
# 1...Ein weiblicher Bewohner
# 2...Ein männlicher Bewohner
# 3...Sowohl männliche als auch weibliche Bewohner
res_0 = 1
```

```
# Durchschnittliches Körpergewicht der Bewohner [kg] (Dim: 1x1)
res_1 = 60
```

```
# Durchschnittliche Körpergröße der Bewohner [m] (Dim: 1x1)
res_2 = 1.7
```

```
# Durchschnittsalter der Bewohner [Jahre] (Dim: 1x1)
res_3 = 30
```

```
#####
# ZONEN #####
#####
```

[section d]

```
# Anzahl der Zonen [-] (Dim: 1x1)
n_zone = 1
```

```
# zone.....{ID, SPEC, U, A_out, A_area, h, C, w}
#           ID.....Identifikationsnummer der Zone (beginnend bei 1 und
#                   fortlaufend +1) [-]
#           SPEC....Kategorie der Zone [-]
#                   1...Wohnzimmer, Kinderzimmer, Heimbüro
#                   2...Badezimmer, Wellnessraum
#                   3...Schlafzimmer, Küche, Arbeitszimmer
#           U.....Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)der
#                   Außenwände und Fenster der Zone [W/(m²K)]
#           A_out...Fläche der Außenwände (incl. Fenster) der Zone [m²]
#           A_zone..Grundfläche der Zone [m²]
#           h.....Raumhöhe der Zone [m]
#           C.....Wärmespeicherkapazität der Wände und der
#                   Einrichtung in der Zone [kJ/K]
#           w.....Informationen über die Fenster [w_ID, w_h_angle,
#                   w_a_angle, w_area]
```

```
# w_ID.....Identifikationsnummer des Fensters in der
# Zone [-]
# w_h_ang.....Winkel der Glasfläche zur Horizontalen [°]
# w_a_ang.....Azimut der Glasfläche [°]
# 0.....Fenster ausgerichtet nach Süden
# 90....Fenster ausgerichtet nach Westen
# 180...Fenster ausgerichtet nach Norden
# 270...Fenster ausgerichtet nach Osten
# w_area.....Glasfläche [m²] (hat auf die gesamte
# Berechnung keinen Einfluss)

#####
# Zone 1
ID_1 = 1
SPEC_1 = 1

# Anzahl der Fenster in Zone 1 [-] (Dim: 1x1)
n_z_1_w = 1

# Fenster 1.1
w_ID_11 = 1
w_h_angle_11 = 90
w_a_angle_11 = 343
w_area_11 = 3

# Fenster 1.2 (nicht benoetigt)
w_ID_12 = 2
w_h_angle_12 = 90
w_a_angle_12 = 0
w_area_12 = 1

# Fenster 1.3 (nicht benoetigt)
w_ID_13 = 2
w_h_angle_13 = 90
w_a_angle_13 = 0
w_area_13 = 1

#####
# Zone 2 (nicht benoetigt)
ID_2 = 2
```

```
SPEC_2 = 3
```

```
# Anzahl der Fenster in Zone 2 [-] (Dim: 1x1)
```

```
n_z_2_w = 1
```

```
# Fenster 2.1 (nicht benoetigt)
```

```
w_ID_21 = 1
```

```
w_h_angle_21 = 90
```

```
w_a_angle_21 = 180
```

```
w_area_21 = 1
```

```
# Fenster 2.2 (nicht benoetigt)
```

```
w_ID_22 = 2
```

```
w_h_angle_22 = 90
```

```
w_a_angle_22 = 47
```

```
w_area_22 = 3
```

```
# Fenster 2.3 (nicht benoetigt)
```

```
w_ID_23 = 2
```

```
w_h_angle_23 = 90
```

```
w_a_angle_23 = 47
```

```
w_area_23 = 3
```

```
#####
```

```
# Zone 3 (nicht benoetigt)
```

```
ID_3 = 3
```

```
SPEC_3 = 3
```

```
# Anzahl der Fenster in Zone 3 [-] (Dim: 1x1)
```

```
n_z_3_w = 1
```

```
# Fenster 3.1 (nicht benoetigt)
```

```
w_ID_31 = 1
```

```
w_h_angle_31 = 90
```

```
w_a_angle_31 = 180
```

```
w_area_31 = 1
```

```
# Fenster 3.2 (nicht benoetigt)
```

```
w_ID_32 = 2
```

```
w_h_angle_32 = 90
```

```
w_a_angle_32 = 47
```

```
w_area_32 = 3
```

```
# Fenster 3.3 (nicht benoetigt)
```

```
w_ID_33 = 2
```

```
w_h_angle_33 = 90
```

```
w_a_angle_33 = 47
```

```
w_area_33 = 3
```

Literaturverzeichnis

- Lundqvist G., Revsbech P., 1986. Ventilation in flats. Measurement of carbon dioxide and air exchange in retrofitted flats. Ugeskr Laeger 148, 3475–3479
- Fehlmann J., Wanner H., 1993. Indoor climate and indoor air quality in residential buildings. Indoor Air 3, 41–50

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Schematischer Aufbau des EES.....	5
Abb. 2:	Beispielhafter Aufbau des Empfehlungssystems in einer 2-Zonen-Wohnung	6
Abb. 3:	Schematische Darstellung des Empfehlungssystem in der Simulationsumgebung	9
Abb. 4:	Heizbedarf (a) und durchschnittliche CO ₂ -Konzentration (b) in den einzelnen Zonen	11
Abb. 5:	PMV-Index (Ø, min, max) für das Wohn- (a) und Schlafzimmer (b)	12
Abb. 6:	Auswertung der Empfehlungsannahme für das Wohnzimmer	12
Abb. 7:	Raspberry Pi 3 Model B+.....	17
Abb. 8:	LCD-Display mit I2C-Adapter	18
Abb. 9:	Blinklichtschaltung	18
Abb. 10:	StromPi 3 + Battery Pack	19
Abb. 11:	Modi des StromPi 3 (Quelle).....	19
Abb. 12:	Arduino MKR1000 WiFi	20
Abb. 13:	DHT11-Sensor	20
Abb. 14:	CCS811-Sensor	21
Abb. 15:	Vergleich der gemessenen CO ₂ -Konzentration	21
Abb. 16:	SCD30-Sensor	22
Abb. 17:	BME280-Sensor	23
Abb. 18:	DHT22-Sensor	23
Abb. 19:	NRF24L01+ Funkmodul ohne und mit Antenne'	24
Abb. 20:	Sendeprinzip Funkmodule Base-Children.....	24
Abb. 21:	Gebäudesimulation in <i>IDA ICE</i> (a) und Luftbild (b) Wienerstraße 11/11a	27
Abb. 22:	Außenansicht Wienerstraße 11 von Nordwesten.....	27
Abb. 23:	Außenansicht <i>Smart Business Centers</i>	28
Abb. 24:	Kabelverlegung am Boden eines Ganges (Wienerstraße 11a)	30
Abb. 25:	Schematischer Aufbau der CO ₂ -Ampel.....	30
Abb. 26:	Installierter <i>Easy Energy Saver</i> im Großraumbüro der <i>4ward Energy Research GmbH</i>	31
Abb. 27:	PMV-Index, UO1 – WHG1, 2. Messreihe.....	33

Abb. 28:	Empfehlungen, UO1 – WHG1, 2. Messreihe	33
Abb. 29:	Kumulierte Dauer der Empfehlungen, UO1 – WHG1, 2. Messreihe.....	34
Abb. 30:	CO ₂ -Konzentration, UO1 – WHG1, 2. Messreihe	34
Abb. 31:	PMV-Index, UO2, 2. Messreihe	35
Abb. 32:	Empfehlungen, UO2, 2. Messreihe.....	36
Abb. 33:	Kumulierte Dauer der Empfehlungen, UO2, 2. Messreihe	37
Abb. 34:	CO ₂ -Konzentration, UO2, 2. Messreihe	37
Abb. 35:	CO ₂ -Konzentration, UO2, 3. Messreihe	39
Abb. 36:	Mittlere monatliche CO ₂ -Konzentration, UO2, 3. Messreihe	40
Abb. 37:	Mittlere stündliche CO ₂ -Konzentration an Werktagen (MO-FR), UO2, 3. Messreihe	41
Abb. 38:	CO ₂ -Konzentration – UO2 – November 2021 bis April 2022	42
Abb. 39:	CO ₂ -Konzentration – UO2 – Freitag, 4. März 2022	43
Abb. 40:	PMV-Index – UO2 – November 2021 bis April 2022	44
Abb. 41:	CO ₂ -Konzentration, UO3, 3. Messreihe	47
Abb. 42:	Mittlere monatliche CO ₂ -Konzentration, UO3, 3. Messreihe	48
Abb. 43:	Mittlere CO ₂ -Konzentration auf den Wochentag bezogen, UO3, 3. Messreihe	48
Abb. 44:	Mittlere stündliche CO ₂ -Konzentration, UO3, 3. Messreihe.....	49
Abb. 45:	PMV-Index, UO3, 3. Messreihe	50
Abb. 46:	CO ₂ -Konzentration, UO4, 3. Messreihe	51
Abb. 47:	Mittlere monatliche CO ₂ -Konzentration, UO4, 3. Messreihe	52
Abb. 48:	Mittlere CO ₂ -Konzentration auf den Wochentag bezogen, UO4, 3. Messreihe	52
Abb. 49:	Mittlere stündliche CO ₂ -Konzentration, UO4, 3. Messreihe.....	53
Abb. 50:	PMV-Index, UO4, 3. Messreihe	54
Abb. 51:	Kumulierte Dauer der Empfehlungen, UO4, 3. Messreihe	54
Abb. 52:	Prognostizierte Anwesenheit, UO4, 3. Messreihe	55
Abb. 53:	Mittlere CO ₂ -Konzentration auf den Wochentag bezogen, UO5, 3. Messreihe	57
Abb. 54:	Mittlere stündliche CO ₂ -Konzentration, UO5, 3. Messreihe.....	57
Abb. 55:	Auswertung der Messergebnisse, UO5, 3. Messreihe	58

Abb. 56:	Auswertung der Messergebnisse einer CO ₂ -Ampel	59
----------	--	----

IMPRESSUM

Verfasser:in:

Markus Rabensteiner
4ward Energy Research GmbH
Reininghausstraße 13A, 8020 Graz
Telefon: 0664 88500338
E-Mail: markus.rabensteiner@4wardenergy.at

Patricia Jasek
Forschung Burgenland GmbH
Campus 1, A-7000 Eisenstadt
Telefon: +43 5 7705
E-Mail: patricia.jasek@forschung-burgenland.at

Projekt- und Kooperationspartner:

4ward Energy Research GmbH
Forschung Burgenland GmbH

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:

Klima- und Energiefonds
Leopold-Ungar-Platz 2/ Stiege 1/ Top 142
1190 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer:

Die Autor:innen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes:

ZS communication + art GmbH

Smart Cities Demo – Ausschreibung 2020

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Projekt:

Easy Energy Saver

Monitoring eines Empfehlungssystems zur Behaglichkeitssteigerung in Wohnräumen

DELIVERABLE 4.1

Verwertungsplan

Erstellt am 16. September 2022

Erstellt von:

Markus Rabensteiner (4ward Energy Research GmbH)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Disseminationsplan	4
3	Verwertungsplan.....	5
	3.1 Zusammenarbeit mit Cool-down Güssing	5
	3.2 Potential des Easy Energy Savers.....	5
	Literaturverzeichnis	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Abbildungsverzeichnis.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Einleitung

Ziel dieses Deliverables ist die Zusammenfassung der wissenschaftlichen Dissemination (Kapitel 2), welche in Arbeitspaket 4 durchgeführt wurde. Weiters wird aufbauend auf den Messergebnissen ein Verwertungsplan vorgestellt (Kapitel 3). Hierbei wird auch die Verwendung des *Easy Energy Saver* im Forschungsprojekt *Cool-down Güssing* (FFG-Nr. 877625) angesprochen.

2 Disseminationsplan

Im Zuge von *Easy Energy Saver* wurde eine wissenschaftliche Publikation durchgeführt. Die Messergebnisse wurden bei der e-nova 2021 präsentiert. Diese wissenschaftliche Konferenz hätte normalerweise im November 2021 in Pinkafeld stattfinden sollen, wurde aber aufgrund der COVID-19-Pandemie auf den 1. und 2. Juni 2022 verschoben. Auf den folgenden 6 Seiten wird der Artikel im Tagungsband gezeigt.

3 Verwertungsplan

3.1 Zusammenarbeit mit Cool-down Güssing

Die Stadtgemeinde Güssing ist stark von sommerlicher Überhitzung betroffen, die laut aktuellen Prognosen in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird. Im Gebäudebestand sind nachträgliche Kühl-Maßnahmen, die nicht auf Basis herkömmlicher Retrofit-Klimageräte beruhen, jedoch schwierig zu realisieren. Für innovative und klimaschutzorientierte Kühlsysteme sind einerseits neue Technologien notwendig, andererseits müssen auch eine Kälte­dämmung, die Fassadengestaltung, das Mikroklima rund um das Gebäude, das Nutzer-Innenverhalten, eine vorausschauende Steuerung sowie das übergeordneten Energiesystems berücksichtigt werden.

Im Rahmen von *Cool-down-Güssing* (FFG-Nr. 877625) werden innovative, energie-effiziente Kühlsysteme in Gewerbebetriebe, Wohnbauten und öffentlichen Gebäude umgesetzt sowie entsprechenden Geschäfts- und Betriebsmodelle entwickelt. Diese Kühlsysteme bieten Flexibilitätspotenziale und verringern Probleme von Lastspitzen. Der Anteil erneuerbarer Energieträger kann erhöht und die städtische Lebensqualität gesteigert werden.

Im Zuge des Projekts wurde auch ein *Easy Energy Saver* in einem Kindergarten in Güssing eingebaut, um deren Auswirkungen auf die sommerliche Überhitzung untersuchen zu können. Die Messungen sind noch im Gange.

3.2 Potential des Easy Energy Savers

Wie in der Zusammenfassung der Messungen (Deliverable 4.1, Kapitel 7) bereits geschrieben ist, sind einige Funktionsweisen des *Easy Energy Savers* zu überdenken. Zum einen ist hier einmal die Sinnhaftigkeit des selbstständigen Lernens zu hinterfragen. Um ein System selbstlernend zu machen, ist es zwingend notwendig zu erkennen, wann die Personen die Empfehlungen auch annehmen und ausführen. Von der technischen Seite ist das sehr schwierig, da anders als in der Simulation, in der Praxis, die Festlegung der Parameter zur Feststellung ob Empfehlungen angenommen wurden, äußerst komplex ist. Die automatische Bildung von Zeitfenstern hat sich im Projekt als nicht zielführend herausgestellt. Es wird daher eine manuelle Eingabe von Zeitfenstern, in denen vorgezogene Empfehlungen (insbesondere Empfehlungen zum Verschatten von Fenstern) ausgegeben werden, empfohlen.

Auch die automatische Verschiebung von Ober- und Untergrenzen des PMV-Indexes ist bei genauerer Betrachtung etwas kontrovers. Durch die Messung des PMV-Indexes und dessen, durch Stoßlüften, Verschatten und Heizungsregulierung, versuchte Beeinflussung, werden zwei Ziele gleichzeitig verfolgt.

Erstens wird die Annäherung des PMV-Indexes an Null forciert, jedoch mit der Tolerierung der Verschiebung der Grenzwerte, sofern stets höhere oder niedrigere Werte gemessen werden. Durch diese Tolerierung will man zu häufige Empfehlungsausgaben vermeiden. Das zweite Ziel ist die Minimierung der für Heizen und aktiven Kühlung notwendigen Energie. Diese Ziele sind in der Praxis aber nur schwer kombinierbar. Für eine markreifes Produkt müsste hier die Zielsetzung konkreter sein.

Mit dem *Easy Energy Saver* wurde ein Low-Cost-Produkt designt. Es funktioniert als eingeständiges Gerät. Hier sieht das Projektkonsortium großes Verbesserungspotential, indem das Gerät nicht mehr eingeständig arbeitet, sondern mit den anderen Geräten im Haushalt agiert. Besonders die Wahrnehmung der Empfehlungen hat sich im Projekt als problematisch herausgestellt. Es spricht vieles dafür, dass man den Regelalgorithmus in der Praxis als App anbietet und den Algorithmus auf einem externen Server rechnen lässt, als auf einem eigenen Gerät. Die Ausgabe der Empfehlungen wäre über das Smartphone einfach zu bewerkstelligen.

Hierbei wurde mit *Kager Fenster GmbH* über die Möglichkeit der Integration des Regelalgorithmus des *Easy Energy Savers* in deren Produkte diskutiert. Hierbei geht der Trend dazu, dass man die bereits vorhandene interne Messinfrastruktur, mitsamt der Wetterstation verwendet, um an die notwendigen Daten zu gelangen. Die Empfehlungsausgabe könnte direkt am Fenster erfolgen. Die Gespräche mit diesem Hersteller sind gerade a

IMPRESSUM

Verfasser:in:

Markus Rabensteiner
4ward Energy Research GmbH
Reininghausstraße 13A, 8020 Graz
Telefon: 0664 88500338
E-Mail: markus.rabensteiner@4wardenergy.at

Patricia Jasek
Forschung Burgenland GmbH
Campus 1, A-7000 Eisenstadt
Telefon: +43 5 7705
E-Mail: patricia.jasek@forschung-burgenland.at

Projekt- und Kooperationspartner:

4ward Energy Research GmbH
Forschung Burgenland GmbH

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:

Klima- und Energiefonds
Leopold-Ungar-Platz 2/ Stiege 1/ Top 142
1190 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer:

Die Autor:innen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes:

ZS communication + art GmbH