

Einleitung

Das ist unsere Dokumentation über die faszinierende Frage, ob wir mithilfe der CO₂-Ampel und der Kenntnis des Raumvolumens herausfinden können, wie viele Menschen sich in einem Raum befinden. In einer Welt, die immer mehr auf umweltbewusstes Handeln setzt und in der die Kontrolle von Luftqualität und CO₂-Emissionen zunehmend wichtig wird, stellen wir uns die spannende Herausforderung, diese beiden Aspekte miteinander zu verknüpfen. Tauchen Sie mit uns ein in die Welt der CO₂-Messungen und entdecken Sie, ob es möglich ist, anhand des CO₂-Anstiegs Rückschlüsse auf die Anzahl der Personen in einem Raum zu ziehen.

Die Faszination, die hinter dieser Thematik liegt, reicht tief in die Kernfragen unserer globalen Umweltproblematik hinein. Die zunehmende Urbanisierung und die stetig wachsende Bevölkerungsdichte stellen uns vor die Herausforderung, ein Projekt mit dem oben genannten Thema durchzuführen, um den Weg für zukünftige Forschung in diesem Bereich zu ebnen. Mit einem immer schärferen Bewusstsein für die Notwendigkeit eines nachhaltigen Lebensstils und einer gesünderen Umwelt drängt sich die Frage auf, ob die Messung von CO₂-Werten nicht nur die Umweltbelastung, sondern auch die menschliche Präsenz in einem begrenzten Raum widerspiegeln kann. In dieser Dokumentation erkunden wir daher die Möglichkeiten, die sich aus der Verbindung zwischen CO₂-Messungen und der Anzahl der Personen ergeben, und untersuchen die potenziellen Auswirkungen auf die Gestaltung von nachhaltigen Innenräumen und effizientere Verwendung von Klimaanlage und Heizungen.

Vorbereitende Überlegungen

- Der Graph, der den CO₂ Gehalt im Klassenzimmer darstellt, wird mit $f(x)=m \cdot x+b$ beschrieben, wobei m die Steigung des CO₂ Gehaltes ist und b der CO₂ Gehalt beim Betreten des Raumes ist.
- Der Graph setzt den Verlauf des CO₂ Gehaltes ins Verhältnis zur zeitlichen Länge der Messung.
- Je mehr Schüler in einem Raum sind, umso größer ist die Steigung im Graphen (m wird größer)
- Der Graph steigt annähernd **linear**.
- Desto kleiner der Raum ist, desto höher ist die Steigung im Graphen -> **Raumvolumen**
- CO₂-Austoß pro Person hängt von **Körpergröße,-masse & Aktivität** dieser ab.

- CO₂-Gehalt pro Liter ausgeatmeter Luft ungefähr 4%; 4-50 Liter ausgeatmete Luft pro Minute
 - **Lüften** lässt den Graphen schlagartig abflachen und fallen.
 - $m = \text{CO}_2 \text{ in ppm pro Minute} \cdot \text{Anzahl Personen}$
-

Raumvolumen: Gemessene L*B*H:

$$8,45\text{m} \cdot 7,05\text{m} \cdot 3,15\text{m} = \sim 187,65\text{m}^3$$

Raumvolumen minus Möbel (Tische, Stühle, Spinde):

$$187,65\text{m}^3 - 4,35\text{m}^3 = 183,3\text{m}^3$$

Methodenteil

Der CO₂-Gehalt wird dabei in PPM (Parts per Million) gemessen. 400 PPM, was ungefähr der Normalwert in der Atmosphäre ist, bedeutet, dass von einer Millionen Luftteilchen 400 CO₂-Teilchen sind.

Raum 314

normalerweise 25 Personen

ca. 183,3m³ Raumvolumen Zur Messung des CO₂ Gehaltes im Raum haben wir die sogenannte CO₂-Ampel benutzt. Das ist ein CO₂-Messgerät der HFT Stuttgart, das den gemessenen CO₂-Gehalt in einem Raum über eine Zeit aufzeichnen kann. Man kann sich in einem Webbrowser mit der IP-Adresse des Gerätes einloggen und dort aktuelle Daten verfolgen. Das Gerät speichert im Minutentakt den aktuellen Zustand des Raumes (CO₂-Gehalt in PPM, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, wobei nur der CO₂ Gehalt für das Projekt relevant ist). Diesen kann man sich über die Benutzeroberfläche als CSV-Tabelle herunterladen (-> siehe Ergebnisse).

Gemessen wurde im Raum 314 des Humboldtgymnasiums Solingen. Dieser Raum befindet sich im obersten (dritten) Geschoss in diesem Gebäude der Schule.

Wie könnte man ohne Messergebnisse vorgehen? Wenn man von 5 Litern Luft pro Minute pro Schüler in einem Klassenraum und 4% CO₂-Gehalt in der Atemluft ausgeht, würde jeder Schüler (5 Liter * 0,04) 0,2 Liter CO₂ in den Raum atmen. In einem Raum mit 183,3m³, also 183.300 Liter, würden jede Minute pro Schüler 0,00109% oder 1,09PPM. Bei einer normalen Anzahl an Schülern, z.B. 25 und einer normalen 90-Minuten-Stunde, wären am das Ende der Stunde 1,09PPM * 25 Schüler * 90 Minuten = 2452,5PPM CO₂ mehr als am Anfang. Dies ist allerdings nur ein geschätzter Wert bei einem luftdicht

abgeschlossenen Raum. Die tatsächlichen Messwerte werden voraussichtlich abweichen und weniger anzeigen.

Ergebnisse

Gemessen wurde in einem Klassenraum mit einem Volumen von $183,3\text{m}^3$. Es befanden sich während den Messungen 24 Schüler und ein Lehrer in dem Klassenraum (25 Personen) und die Fenster waren geschlossen

Messergebnisse:

Nach 30 Minuten ist der CO_2 Gehalt von 1130 ppm auf 2135 ppm (also um insg. 1005 ppm) angestiegen. Der durchschnittliche CO_2 Anstieg pro Minute beträgt somit 34,65ppm ($1005 \div 29$)

Um eine Formel aufzustellen, die den Anstieg des CO_2 Gehalts in einem Raum annähernd vorhersagen kann, teilt man erst den durchschnittlichen CO_2 Anstieg in ppm durch die Personenanzahl im Raum, und multipliziert sie dann mit dem Raumvolumen in m^3 .

$$(34,65 \text{ ppm} \div 25 \text{ Personen} = 1,38, 1,38 \times 183,3 \text{ m}^3 = 254,09)$$

Dem Ergebnis von 254,09 entspricht der ungefähr zu erwartende Anstieg vom CO_2 Gehalt in einem 1m^3 großen Raum in dem eine Person die Luft ein und ausatmet in ppm.

Um den CO_2 Anstieg in einem Raum grob zu berechnen und vorherzusagen, von diesem das Volumen und die Anzahl der sich in ihm aufhaltenden Personen bekannt ist, kann man die Personenanzahl mit 254,09 multiplizieren, und durch das Raumvolumen teilen. Man erhält den ungefähren CO_2 Anstieg in der Luft des Raumes bei geschlossenem Fenster pro Minute.

$$(\text{Personen} \times 254,09 \div \text{Raumvolumen})$$

Diese Rechnung ist natürlich eher ungenau, weil viele äußere Faktoren hier nicht mit einbezogen werden können, wie z.B. die Abdichtung des Raumes oder die genau gemessene Körperliche Aktivität der sich im Raum befindenden Personen.

Man kann diese Rechnung jedoch z.B. nutzen, um herauszufinden nach wie vielen Minuten und für wie lange in einem Klassenraum gelüftet werden muss, damit sich nicht zu viel CO_2 im Raum ansammelt, dazu bräuchte man die Personenanzahl im Raum und das Volumen des Raums.

Wie man hier im Graphen der Messung erkennen kann, fällt der CO_2 Anteil in der Luft innerhalb von wenigen Minuten nach Öffnen der Fenster auf unter 1000 ppm und steigt dann über langsam 35 Minuten hinweg auf ca. 750 ppm bei gekipptem Fenster (am Ende 781 ppm) an.

Der CO_2 Anteil in der Luft verringert sich so nach vollständigem Öffnen der Fenster in 5 Minuten vom Höchstwert 2107 ppm auf 815 ppm und nach 10

2	Datum + Zeit	CO2 in ppm
3	2023-08-11 0	1130
4	2023-08-11 0	1151
5	2023-08-11 0	1174
6	2023-08-11 0	1248
7	2023-08-11 0	1299
8	2023-08-11 0	1328
9	2023-08-11 0	1359
10	2023-08-11 0	1372
11	2023-08-11 0	1385
12	2023-08-11 0	1405
13	2023-08-11 0	1469
14	2023-08-11 0	1525
15	2023-08-11 0	1576
16	2023-08-11 0	1595
17	2023-08-11 0	1614
18	2023-08-11 0	1645
19	2023-08-11 0	1682
20	2023-08-11 0	1725
21	2023-08-11 0	1762
22	2023-08-11 0	1785
23	2023-08-11 0	1825
24	2023-08-11 0	1883
25	2023-08-11 0	1921
26	2023-08-11 0	1938
27	2023-08-11 0	1948
28	2023-08-11 0	1984
29	2023-08-11 0	2002
30	2023-08-11 0	2031
31	2023-08-11 0	2104
32	2023-08-11 0	2135

Figure 1: Screenshot 2023-10-19 175342.png

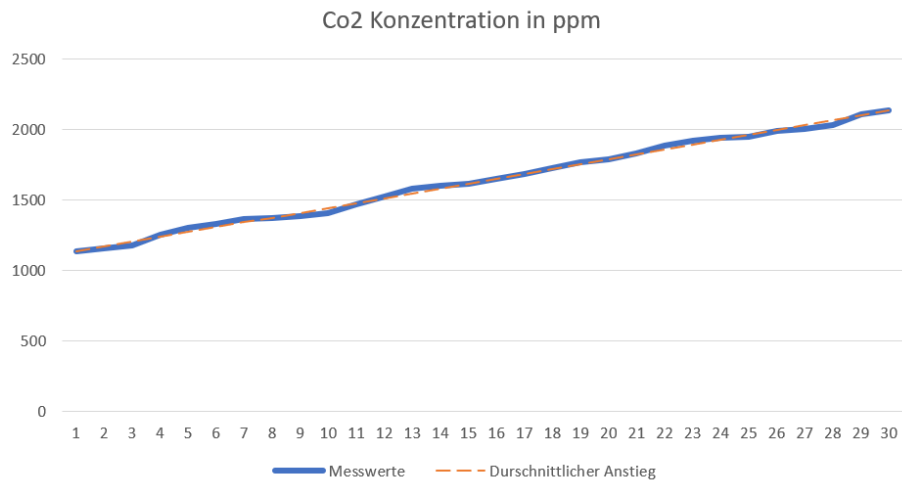


Figure 2: Screenshot 2023-10-17 191802.png

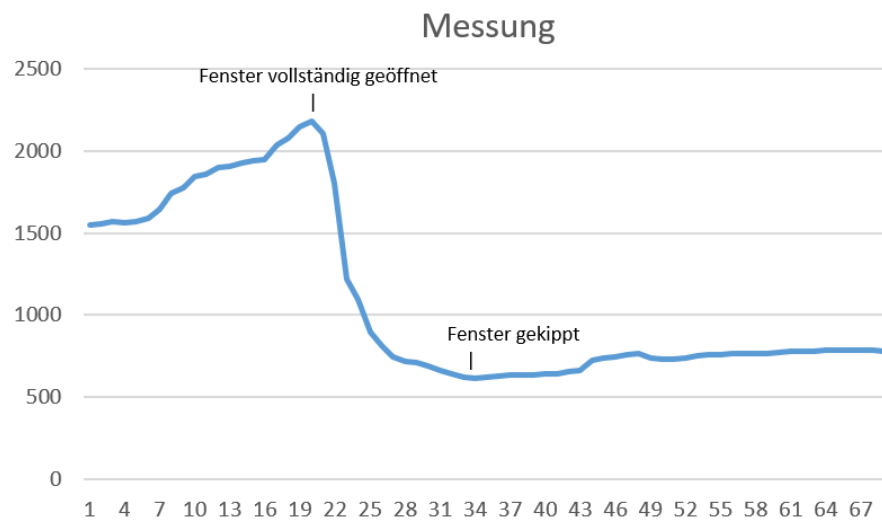


Figure 3: Screenshot 2023-10-18 130928.png

Minuten auf 664 ppm.

Laut Raumluft.org ist ein Maximalwert von 1000 ppm CO₂ in der Luft am besten nicht zu überschreiten, und ein Wert von 1400 ppm CO₂ die obere Grenze für akzeptable Raumluft. Dieses Limit wurde den Messungen sehr oft deutlich überschritten.

Theoretisch könnte man für das Beispiel dieses Klassenraums an Hand der Messung ein Intervall aufstellen in diesem die Fenster geöffnet und geschlossen werden müssen um die genannte CO₂-Grenze nicht zu überschreiten.

Wenn man davon ausgeht, dass der CO₂ Gehalt nach dem 5-minütigen Lüften am Anfang der Stunde bei etwa 600 ppm liegt müsste man die erste Formel zur Ermittlung des CO₂ Anstiegs anwenden um die Steigung zu erhalten und diese dann durch 1000 minus den Anfangsgehalt CO₂ in ppm teilen um die Anzahl von Minuten zu erhalten in denen jeweils das Fenster geöffnet werden muss um den CO₂ Gehalt in der Luft wieder auf den Anfangsgehalt von 600 zu senken.

Für dieses Beispiel gilt $(1000 - 600) \div 34,65 = 11,544$ Minuten

In den Messungen ist der CO₂ Gehalt bei offenem Fenster in 6 Minuten von 1093 ppm auf 692 ppm also um 400 ppm gesunken was für dieses Beispiel bedeuten würde, dass man die Fenster alle 11:30 Minuten für 6 Minuten vollständig öffnen müsste um die Grenze von 1000 ppm nicht zu überschreiten. Diese Rechnung ist aber sehr unrealistisch und es würde sich nicht sehr lohnen so zu lüften. Wenn man die Fenster auf Kipp stellt steigt der CO₂ Gehalt viel weniger stark an und man kommt so wahrscheinlich meistens die ganze Schulstunde über damit aus wenn man zu Beginn 5 Minuten vollständig durchlüftet und der CO₂ Anteil danach bei ca. 600 ppm liegt.

Die Steigung des CO₂ Gehalts bei halb geöffnetem oder gekipptem Fenster lässt sich wenn überhaupt nur schwer bestimmen, weil sie, wie in der Messung zu sehen, nicht linear verläuft.

Diskussion

Im folgenden Abschnitt schließt sich der Diskussionsteil dieser Arbeit an, welcher zusammenfassend zunächst Auskunft über die Tragfähigkeit und Bestätigung der Hypothese liefert, anschließend die Forschungsfrage analysiert und in die theoretischen Grundsätze einordnet, sowie eine Analyse des Ergebnisses bietet und weitere Anhaltspunkte zu daraus resultierenden Erkenntnissen liefert, die Forschungsfrage eingrenzt und abschließend noch Verweise auf potentielle weitere Forschungen aufzeigt. Hierbei ist zu vermerken, dass alle Ergebnisse auf dem derzeitigen Wissensstand beruhen und damit in zukünftigen Studien eventuell widerlegt, bzw. erweitert werden können, was allerdings noch genauer erläutert wird.

Wie vorher bereits erwähnt, beschäftigt sich dieses Projekt mit der allgemeinen Forschungsfrage:

Kann man vom CO₂-Gehalt auf die Anzahl der Personen in einem Raum schließen?

Diese Frage ist in jenem Kontext relevant, dass man mithilfe dieser Informationen auf die Belegung eines Raumes schließen kann und dementsprechend beispielsweise Heizungssysteme automatisch deaktivieren kann, sobald sich niemand mehr im Inneren befindet. Auch Lüften könnte man auf diese Weise optimieren, da man in etwa den Zeitpunkt abschätzen kann, ab dem der CO₂-Gehalt im Raum zu hoch ist und sich eventuell negativ auf den Körper auswirken könnte. Alle Messergebnisse wurden mit einer, wie im Methodenteil bereits beschriebener, CO₂-Ampel über einen Zeitraum von 30 Minuten erfasst und in einem Klassenraum mit einem Volumen von 183,3 m³ gemessen, wobei 24 Schüler und ein Lehrer anwesend waren. Die genauen Werte sind in den beiden Abbildungen oben zu sehen. Resultierend aus diesen Informationen ergab sich am Anfang dieses Projekts folgende Hypothese für den Ausgang des Experiments:

Man kann anhand der allgemeinen Formel zur Berechnung von linearen Funktionen ($f(x)=m \cdot x+b$) den annähernden Verlauf der CO₂-Entwicklung in einem Raum prognostizieren, wobei gilt:

- $m = (\text{Anzahl der anwesenden Personen}) \cdot (\text{Zu erwartender Anstieg an CO}_2 \text{ in ppm}) / \text{Raumvolumen}$
- $x = \text{Zeit in Minuten}$
- $b = \text{Ausgangsgehalt an CO}_2 \text{ in ppm}$

Diese Hypothese wurde allerdings von mehreren Faktoren eingegrenzt. So gelten die Ergebnisse nur für einen Temperaturbereich von 23°C bis 27°C und einen gleichen, sowie über den Zeitraum der Messung unveränderten Aktivitätszustand aller anwesenden Personen. Außerdem wurde kein Unterschied in Hinsicht auf verschiedene Altersgruppen oder Körpergrößen/-masse der Anwesenden gemacht und das Raumvolumen war über die Gesamtzeit konstant, sprich es wurden beispielsweise keine Teile des Mobiliars während der Messungen entfernt. Zuletzt wurden die Ergebnisse auch nur bei geschlossenen Fenstern und Türen notiert, was die Veränderung durch Luftzirkulationen ausschließt.

Wenn man Stellung zu der ursprünglichen Forschungsfrage bezieht, kann man durch die gesammelten Ergebnisse definitiv vermerken, dass die Hypothese weitreichend zutreffend ist und man damit einen Zusammenhang zwischen der Zunahme der CO₂-Konzentration in einem Raum und der sich dort befindlichen Personenanzahl erkennen kann. Natürlich muss hier jedoch vermerkt werden, dass die genaue Menge an produzierten Emissionen nie ganz exakt prognostiziert werden kann und die aufgestellte Rechnung nur zum Annähern der tatsächlichen Werte dient, wie man in Diagramm 1 anhand der beiden Graphen und in der zugehörigen Tabelle erkennen kann. Die Schwankungen zwischen Realität und Prognose sind jedoch nicht gravierend, weshalb man die Hypothese durchaus als zutreffend bestätigen kann. Dadurch

kann man auch Parallelen zu anderen Studien in diesem Themenbereich ziehen, wie beispielsweise zu den Resultaten des Papers “The concentration of carbon dioxide in conference rooms: a simplified model and experimental verification”, verfasst von Tomasz Janusz Teleszewski (Bialystok University of Technology) und Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk (Warsaw University of Life Sciences (https://www.researchgate.net/publication/333408844_The_concentration_of_carbon_dioxide_in_conference_rooms)). Die hier zu sehenden Ergebnisse sind vergleichbar mit jenen aus dieser Arbeit, auch wenn diese um einiges weitreichender sind und zudem ein Konzept in Hinsicht auf die Luftzirkulation im Raum enthalten. Dennoch sind die Erkenntnisse aus dieser Untersuchung durchaus nützlich, wenn es um das allgemeine Thema der Optimierung der Heizungssysteme im Humboldtgymnasium geht. Denn durch die Bestätigung der Forschungsfrage und Hypothese, lässt sich dieses Wissen in zukünftigen Projekten potentiell als allgemeines Programm umsetzen, welches mit CO₂-Messgeräten in verschiedenen Räumen verbunden wäre und dadurch zentral die Heizung so steuern könnte, dass bei keiner Benutzung des Raumes nicht geheizt wird, oder auch bei vielen Personen im Inneren die Leistung etwas dezimiert wird, weil durch viele Menschen sich die allgemeine Temperatur in einem geschlossenen Zimmer erhöht. Hierbei kann man vermerken, dass die Forschungsfrage im Falle der alleinigen Umsetzung dieses effizienteren Heizungssystems, was lediglich die Daten der Personenanzahl benötigt, durchaus dem Umfang angemessen gestellt wurde und dadurch keine weiteren Aussagen über beispielsweise Temperatur oder die Veränderungen des Kohlenstoffdioxidgehalts nach dem Lüften getroffen werden müssen.

Wie gerade schon angedeutet, erwiesen sich die zuvor getroffenen Limitationen im Sachkontext durchaus als sinnvoll, da, wie bereits erwähnt, keine weiteren Daten nötig sind um das übergeordnete Ziel zu erreichen. Die durchgeführten Untersuchungen mit ihren Ergebnissen wurden jedoch in sehr allgemeiner Sicht festgehalten, was jegliche Aspekte der vorherigen Eingrenzungen wie beispielsweise Differenzierung verschiedener Altersgruppen oder Körperstaturen außer Acht lässt. Auch der Aktivitätsstatus der Personen im Inneren, welcher ausschlaggebend für die Atmung und damit das ausgestoßene CO₂ eines Einzelnen ist, wurde nicht berücksichtigt. Wohingegen diese Limitation durchaus plausibel erscheint, da im Klassenraum eine allgemeine Lernatmosphäre herrscht, wobei alle Anwesenden die ganze Zeit über auf ihren Plätzen sitzen, was einer geringen Aktivität entspricht und die Annahme der im Schnitt ausgeatmeten fünf Liter Luft pro Minute und Person durchaus legitimiert. Nichtsdestotrotz spielt Gehirnaktivität dabei auch eine Rolle und kann sich möglicherweise auf die Atmung auswirken, was hier aber nicht relevant war. Zu den vorher genannten Altersgruppen und daraus im allgemeinen annehmbaren Körperbeschaffungen, also dass eine erwachsene Person zum Beispiel über ein größeres Lungenvolumen verfügt als ein Kind oder Jugendlicher, könnten durchaus noch weitere Forschungen folgen, um vielleicht einen Unterschied zwischen verschiedenen Menschen in Hinsicht auf ihre CO₂-Emissionen festzustellen, wobei diese Erkenntnisse zukünftig natürlich als Grundlage für genauere Ergebnisse von Untersuchungen wie diesen aus dieser Arbeit dienen können. Ob diese Forschungsergebnisse folglich

auch auf weiterführende Untersuchungen wie diese anwendbar sind, lässt sich gegenwärtig noch nicht feststellen. Doch der wohl relevanteste noch verbleibende Aspekt, der auch bei diesem Thema sehr hilfreich sein könnte und zur Entwicklung neuer Konzepte grundlegend wäre, ist das vorher bereits erwähnte und referierte Verhalten des CO₂-Gehalts bei jeglicher Form der Luftzirkulation. Die erwähnte Arbeit könnte daher in diesem Kontext ausgeweitet und auf das Humboldt-gymnasium übertragen werden, wobei vielleicht auch andere Aspekte wie potentiell andere Ergebnisse bei beispielsweise deutlich niedrigeren oder höheren Temperaturen untersucht werden können. Die Einflussnahme von Lüften auf den CO₂-Gehalt war zwar nicht Thema der Arbeit, hat sich aber als signifikant erwiesen, da ein starker Abfall der Werte in anderen Stichproben zu sehen war, welche jedoch nicht Teil dieses Papers sind. Eine detaillierte Ausarbeitung dieses Aspekts ist jedoch dennoch zukünftig sinnvoll. Auch die Position der CO₂-Ampel war in diesen Experimenten auf einen Ort limitiert, welcher sich am hinteren Ende der Klasse, sprich weit weg von der Tür und nur bei wenigen Menschen befand. Die Messergebnisse an anderen Stellen wären vielleicht auf Grund des direkten Einflusses von der Atmung von mehr Personen im unmittelbaren Umfeld andere gewesen, was sich vermutlich aber dennoch nicht auf den Gesamtgehalt ausgewirkt hätte. Dies ist aber nur durch weitere Versuchsreihen überprüfbar und könnte daher ebenfalls Teil von noch kommenden Forschungen sein. All diese Faktoren können sich als durchaus interessant und essentiell für weitere Forschungsprojekte erweisen, welche sich auch mit Fragen abseits der hier getätigten Rahmenbedingungen beschäftigen.

Fazit

In diesem Abschnitt haben wir die Arbeit zusammengefasst, die die Tragfähigkeit und Bestätigung unserer Hypothese, die Analyse der ursprünglichen Frage und deren Einordnung in theoretische Grundsätze sowie eine umfassende Analyse der Ergebnisse umfasst. Wir haben gezeigt, dass die Frage, ob man vom CO₂-Gehalt auf die Anzahl der Personen in einem Raum schließen kann, im Kontext der Raumbelugung und der Optimierung von Heizungs- und Belüftungssystemen von großer Relevanz ist.

Unsere Hypothese, die besagt, dass der CO₂-Verlauf in einem Raum mithilfe einer linearen Funktion prognostiziert werden kann, wurde weitgehend bestätigt, jedoch unter bestimmten Limitationen, die in dieser Arbeit berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse dieser Studie könnten in zukünftigen Projekten genutzt werden, um Heizungssysteme effizienter zu steuern und Energie zu sparen.

Die Limitationen, die wir in Bezug auf Temperaturbereich, Aktivitätszustand der Personen, Altersgruppen und Körpergrößen festgelegt haben, erwiesen sich im Rahmen dieses Projekts als angemessen, da sie das Hauptziel nicht beeinflussten. Dennoch bieten sie Raum für weitere Forschungen, um Unterschiede zwischen

verschiedenen Personengruppen und weitere Aspekte der Raumbedingungen zu untersuchen.

Ein besonders vielversprechender Bereich für zukünftige Untersuchungen ist das Verhalten des CO₂-Gehalts in Räumen in Bezug auf verschiedene Arten von Luftzirkulationen. Auch die Position von CO₂-Messgeräten im Raum und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse könnten genauer erforscht werden, um ein umfassenderes Verständnis dieser Thematik zu erlangen.

Insgesamt können wir feststellen, dass unsere Hypothese im Rahmen dieser Arbeit bestätigt werden konnte, und die gewonnenen Erkenntnisse von großer Bedeutung sind. Diese Forschung kann als Grundlage für die Entwicklung von effizienten Heizungs- und Belüftungssystemen dienen, die auf CO₂-Messungen basieren, und somit zur Energieeinsparung und zur Verbesserung der Raumluftqualität beitragen. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich könnten dazu beitragen, unser Verständnis zu vertiefen und die Anwendbarkeit dieser Erkenntnisse auf verschiedene Kontexte zu erweitern.