



Paul Pucher, B.Sc.

# **NUTZUNGSERLEBNIS VON NACHGERÜSTETEN LÜFTUNGSSYSTEMEN IN NATÜRLICH BELÜFTETEN RÄUMEN**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium

Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

### **Betreuer**

Univ.-Prof. Dr. Christina Hopfe

Univ.-Prof. Ph.D CEng. Robert McLeod

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau

Graz, Oktober 2024



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

---

Datum, Unterschrift





## Danksagung

Rückblickend auf mein Studium kann ich sagen, dass der Weg nicht immer einfach war und oft Herausforderungen mit sich brachte. Doch gerade diese Hürden haben mich geprägt und weitergebracht. Umso mehr möchte ich nun all denjenigen danken, die mich auf diesem Weg begleitet, betreut und/oder unterstützt haben.

In erster Linie möchte ich mich höflichst bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christina Hopfe und Assoc. Prof. FHEA FIMEchE M.Sc. Ph.D. CEng. Robert McLeod bedanken. Der Austausch war stets auf Augenhöhe, und jederzeit wurden wertvolle Anregungen und Verbesserungsvorschläge eingebracht. Ihre freundliche und kommunikative Betreuung meiner Arbeit hat mir sehr geholfen, ebenso wie Ihre ständige Erreichbarkeit und Unterstützung, die ich außerordentlich schätze. Zusätzlich möchte ich Dipl.-Ing. Fatos Pollozhani, B.Sc., für seine Unterstützung und die stets sofortige Erreichbarkeit bei notwendigen Unterlagen danken.

Ein besonders wichtiger Teil meiner Studienzeit war und ist der Geotechnik-Zeichensaal und seine Mitglieder, mit denen ich nicht nur viele schöne Stunden, sondern auch wertvolle gemeinsame Erlebnisse teilen durfte. Auch bei diesen Personen möchte ich mich bedanken. Sei es, um für die nächste Prüfung zu lernen oder um das eine oder andere Getränk miteinander zu teilen – der Zeichensaal wurde so etwas wie eine zweite Heimat, und die Freundschaften, die ich dort geschlossen habe, möchte ich nicht missen. Ein herzliches Dankeschön geht an meine Weggefährten aus dieser Zeit und an die Freundschaften, die sich daraus ergeben haben.

Der größte Dank gebührt jedoch meiner großen Familie samt all ihren Angehörigen, die mich stets unterstützt und mir in jeder Phase des Studiums den Rücken gestärkt haben. Ohne ihre jahrelange Unterstützung in allen Lebensbereichen und ihr verständnisvolles Akzeptieren meiner Entscheidungen, hätte ich mein Studium nicht so absolvieren können, wie es für mich möglich war. Vor allem meinen Eltern danke ich dafür von Herzen. Ihre Unterstützung ist keineswegs selbstverständlich und stellt ein Privileg dar, das ich zutiefst schätze. Besonders im letzten Jahr ist mir das deutlich geworden, denn ohne sie wäre ich nicht hier mit einem erfolgreichen Abschluss.

Ein besonderer Dank gilt meinem Bruder Ralph, der mit seinem stets offenen Ohr für mich einen Weg aus persönlichen Schwierigkeiten geebnet hat. Darüber hinaus geht mein größtes Dankeschön an meinen Bruder Hannes, der sich wöchentlich aus seinem vollgepackten Arbeitsalltag die Zeit genommen hat, um mir zu helfen. Mit seiner strukturellen Unterstützung hat er mir unglaublich geholfen, eine Blockade in meinem Kopf zu lösen und diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch für die jahrzehntelange Freundschaft mit Baumi und Lily bedanken, die mir stets mit aufbauenden und unterstützenden Ratschlägen zur Seite standen. Ohne solche Freundschaften wäre alles nur halb so erfreulich.

Einen zusätzlichen Dank möchte ich an all meine Großeltern aussprechen. Sie haben mich während meines Studiums stets begleitet und immer an mich geglaubt. Ihre Unterstützung und ihr Vertrauen haben mir stets Kraft gegeben.

DANKE!



## Kurzfassung

Eine gute Raumlufthqualität hängt von Faktoren wie Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und CO<sub>2</sub>-Konzentration ab und gewinnt insbesondere in Schulen und Bildungseinrichtungen zunehmend an Bedeutung. Das Ziel dieser Schulstudie ist es, bestehende Standards und Richtlinien zur Raumlufthqualität sowie relevante Forschungsstudien hervorzuheben und das gesamte Nutzungserlebnis der Lernenden hinsichtlich thermischer und akustischer Behaglichkeit sowie der Sicherheit in Bezug auf das Infektionsrisiko während dreier verschiedener Lüftungsszenarien zu untersuchen. Der zentrale Punkt dieser Schulstudie ist der Vergleich des hybriden Lüftungssystems des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC) mit der natürlichen Belüftung und dem Ausgangszustand der Nichtbelüftung. Darüber hinaus werden mithilfe einer Umfrage in zwei Schulklassen, qualitative Daten in Verbindung mit quantitativen Messdaten und statistischen Tests gemeinsam analysiert. Mithilfe dieser Auswertung können die wichtigsten positiven und negativen Aspekte jedes Lüftungsszenarios eruiert werden, aus denen entsprechende Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Unter der Prämisse, dass das hybride Lüftungssystem eine verbesserte Raumlufthqualität schaffen und die Sicherheit in Bezug auf das Infektionsrisiko erhöhen kann, soll insbesondere durch die Analyse des ganzheitlichen Nutzungserlebnisses der Lernenden ermittelt werden, welche weiteren Schritte definiert werden können, um solche Systeme ganzjährig in Klassenräumen und Bildungseinrichtungen einzusetzen, ohne dass es zu einer möglichen Unzufriedenheit hinsichtlich der Behaglichkeit kommt.



## Abstract

Good indoor air quality depends on factors such as air temperature, relative humidity, air movement and CO<sub>2</sub>-concentration and is becoming increasingly important, especially in schools and educational institutions. The aim of this school study is to highlight existing standards and guidelines on indoor air quality as well as relevant research studies and to examine the overall user experience of students concerning thermal and acoustic comfort, as well as safety regarding infection risk during three different ventilation scenarios. The central point of this school study is the comparison of the hybrid ventilation system of the Max Planck Institute for Chemistry (MPIC) with natural ventilation and the baseline state of no ventilation. Furthermore, qualitative data collected through a survey conducted in two school classes will be analyzed alongside quantitative measurement data and statistical tests. This evaluation will help identify the main positive and negative aspects of each ventilation scenario, from which appropriate conclusions can be drawn.

Under the premise that the hybrid ventilation system can create improved indoor air quality and increase safety regarding the risk of infection, the aim is to determine, in particular by analyzing the holistic user experience of the students, which further steps can be defined in order to implement such systems all year round in classrooms and educational institutions without causing possible dissatisfaction regarding comfort.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung .....</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Ziel der Arbeit .....	2
1.3 Übersicht der Arbeit .....	3
<b>2 Stand der Wissenschaft.....</b>	<b>4</b>
2.1 Einleitung .....	4
2.2 Belüftung in Innenräumen .....	7
2.2.1 Natürliche Lüftung.....	7
2.2.2 Mechanische Lüftungssysteme .....	9
2.2.3 Hybride Lüftungssysteme .....	12
2.2.4 Lüftungssysteme im Vergleich.....	14
2.3 Raumluftqualität in geschlossenen Räumen .....	16
2.3.1 Temperatur .....	16
2.3.2 Behaglichkeitsindex und Interpretation der thermischen Behaglichkeit ..	21
2.3.3 CO <sub>2</sub> -Konzentration.....	25
2.3.4 Relative Luftfeuchtigkeit.....	32
2.3.5 Akustik .....	34
2.3.6 Zugluft.....	38
2.4 Überblick über relevante Studien .....	39
2.4.1 CovED-Projekt .....	39
2.4.2 Bedeutung von Erhebungen zur Innenraumqualität bei Renovierungen ..	40
2.4.3 Einfluss der Fenster- und Türbedienung auf die Schulinnenraumqualität	42
2.4.4 Selbstbeurteilung von Gesundheit und Wohlbefinden von Schulkindern ..	44
2.4.5 Test der Nutzungswahrnehmung von COVID-19 Lüftungssystemen .....	46
2.5 Zusammenfassung.....	49
<b>3 Methodik der Forschungsarbeit .....</b>	<b>52</b>
3.1 Einleitung .....	52
3.2 Schulstudie .....	54
3.2.1 Allgemein .....	54
3.2.2 Örtliche Gegebenheiten.....	55
3.2.3 Aufbau und Anlageplan der Lüftungssysteme .....	58
3.2.4 Ausführung der Forschung.....	63
3.2.4.1 Einleitung .....	63
3.2.4.2 Überblick .....	64
3.2.4.3 Ausführung .....	65
3.3 Fragebogen.....	66
3.3.1 Erhebung Kleidungsfaktor .....	66
3.3.2 Erhebung Temperatur .....	68
3.3.3 Erhebung Zugluft .....	70
3.3.4 Erhebung Akustik .....	72
3.3.5 Abfrage Sicherheit.....	73
3.3.6 Erhebung Konzentration .....	74
3.3.7 Offene Fragen .....	75

3.4	Messgeräte/Messstationen .....	76
3.4.1	Einleitung .....	76
3.4.2	Temperatur, CO <sub>2</sub> -Konzentration und relative Luftfeuchtigkeit .....	77
3.4.2.1	Kalibrierung .....	78
3.4.2.2	Wetterstation TU Graz .....	79
3.4.3	Akustik .....	80
3.4.3.1	Randbedingungen .....	81
3.5	Statistische Methodik .....	82
3.5.1	Friedman-Test in SPSS .....	82
3.5.1.1	Interpretation der Ergebnisse .....	86
3.5.2	Wilcoxon-Test .....	87
3.5.2.1	Interpretation der Ergebnisse .....	90
3.5.3	Stichprobengröße Kalkulation .....	92
3.5.3.1	Skalierung der Stichprobengröße .....	93
3.6	Zusammenfassung .....	94
3.7	Einschränkungen der Methodik .....	95
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Analysen .....</b>	<b>96</b>
4.1	Einleitung .....	96
4.2	Ergebnisse qualitativer Parameter mittels Fragebogen .....	98
4.2.1	Kleidungsfaktor .....	98
4.2.2	Temperatur .....	100
4.2.3	Luftzug .....	108
4.2.4	Akustik .....	116
4.2.5	Sicherheit .....	120
4.2.6	Konzentration .....	124
4.2.7	Präferenz: Ein- oder ausgeschaltetes Lüftungssystem .....	125
4.2.8	Offene Fragen .....	126
4.3	Ergebnisse quantitativer Parameter mittels Messgerät/Messstation .....	128
4.3.1	Temperatur .....	128
4.3.2	CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	131
4.3.3	Akustik .....	135
4.4	Ergebnisse statistischer Auswertungen mittels Excel & SPSS .....	137
4.4.1	Friedman-Test .....	137
4.4.2	Wilcoxon-Test .....	140
4.4.3	Stichprobengröße Kalkulation .....	142
4.5	Analyse .....	143
4.5.1	Kleidungsfaktor .....	143
4.5.2	Temperatur .....	145
4.5.3	Zugluft .....	147
4.5.4	Akustik .....	148
4.5.5	Sicherheit .....	150
4.5.6	Konzentration .....	152
4.5.7	Offene Fragen .....	153
4.6	Zusammenfassung .....	154
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Perspektiven .....</b>	<b>156</b>
5.1	Zusammenfassung .....	156
5.2	Schlussfolgerung .....	157
5.3	Limitierungen .....	158
5.4	Perspektiven für weiterführende Studien .....	160
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>165</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
	<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>171</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>172</b>





# 1 Einleitung

In Kapitel 1.1 bis 1.3 werden Ausgangssituation, Zielsetzungen und Übersicht behandelt.

## 1.1 Ausgangssituation

Die Luftqualität in Schulen in Österreich ist seit langem ein Problem, das durch die COVID-19-Pandemie verstärkt wurde, bzw. dieses erst wirklich hervorgehoben hat. Einige Schulgebäude sind in die Jahre gekommen, da diese um die 1950er und 1970er Jahre erbaut worden sind [75]. Damit einher geht, dass diese Schulen meist über keine mechanischen Lüftungssysteme verfügen und zumeist mit der natürlichen Lüftung (Fensterlüftung) nicht in der Lage sind, ausreichend frische Luft in die Klassenzimmer zu bringen. Eine schlechte Raumluftqualität, bei der die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Luft als Indikator für den Grad an „verbrauchter“ Luft dient, wenn die Anzahl der Insassen bekannt ist, kann zu Gesundheitsproblemen sowie Konzentrationsproblemen bei Lernenden und Lehrpersonen führen [1, 2].

Die COVID-19-Pandemie hat das Problem der schlechten Raumluftqualität in Schulen verschärft, da die Übertragung des Virus durch Aerosole erfolgen kann, die sich in der Luft befinden [3]. Eine schlechte Raumluftqualität kann also das Risiko einer Infektion in Schulen erhöhen. Es ist daher besonders wichtig, dass Schulen ausreichend belüftet werden, um das Risiko einer durch die Luft übertragenen Krankheit zu reduzieren [3].

In 90,8% der Schulen in Österreich gibt es keine mechanischen Lüftungssysteme, bzw. wird mittel natürlicher Lüftung oft nicht ausreichend gelüftet [1, 73]. Viele Schulen haben auch nicht genug Platz in den Klassenräumen, um Lernende die angemessene Luftqualität zu garantieren, was ebenfalls zu einem erhöhten Infektionsrisiko, wie zum Beispiel bei COVID-19, führt [4]. Durch den Einsatz von Lüftungssystemen, die den normgerechten Industriestandards entsprechen, wird das Vorkommen mikrobieller Bestandteilen, wie etwa Schimmelsporen, sowie Schadstoff- und Radonkonzentrationen in Innenräumen im Vergleich zu einer ausschließlichen Fensterlüftung erheblich reduziert [1].

Es ist wichtig die Raumluftqualität in den Klassenzimmern zu verbessern. Im Zuge des CovEd-Programms an der TU-Graz vom Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau (IBPSC) ausgehend, wurde in zwei natürlich gelüfteten Schulklassen ein nachgerüstetes hybrides Lüftungssystem eingebaut. Dieses hybride Lüftungssystem wurde vom Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC) entwickelt und soll mittels zusätzlichem Ampelsystem, welches sich auf die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Raumluft bezieht, eine hohe Luftqualität gewährleisten. Dieses Ampelsystem soll es den Nutzenden vereinfachen die Raumluftqualität einzuschätzen.

Ein zureichender Luftaustausch bzw. ein behagliches Raumklima in Form von Temperatur, Zugluft und Akustik im Klassenzimmer spielt eine entscheidende Rolle für die Gesundheit der Lernenden und die Effektivität der Lernumgebung. Eine angemessene Behaglichkeit beeinflusst nicht nur den Komfort, sondern auch die Konzentration, Produktivität und Gesundheit der Lernenden [2].

Die Behaglichkeit ist jedoch von den einzelnen Personen abhängig, wie diese wahrgenommen wird. Dies sollte eingehender untersucht werden, um die Zusammenhänge deutlicher hervorzuheben.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die Bedeutung von einem gesunden Raumklima und einer guten Raumlufthqualität, abhängig von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung im Raum, CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie der körperlichen Aktivität der Nutzenden, wird immer wichtiger, insbesondere in Gebäuden, in denen viel Zeit verbracht wird, wie z.B. Wohnhäusern, Büros oder Schulklassen. Eine Möglichkeit, die Raumlufthqualität in Lehrräumen zu verbessern ist es, indem ein Lüftungssystem nachgerüstet wird. Obwohl die Vorteile, wie der erhöhter Luftaustausch durch mechanischen Abtransport der Abluft und damit einhergehend niedrigeren CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft, eines solchen Systems offensichtlich sind, kann das Nutzungserlebnis von nachgerüsteten Lüftungssystemen von Person zu Person sehr unterschiedlich sein. In dieser Masterarbeit wird das Nutzungserlebnis von nachgerüsteten Lüftungssystemen untersucht, um zu verstehen, wie Personen diese Systeme wahrnehmen und warum diese Wahrnehmung das Verhalten der Nutzenden und letztendlich die Akzeptanz beeinflussen. Weiters wurde untersucht ob Unterschiede zu anderen Lüftungsmethoden erkennbar sind, dies wurde durch Testung von drei getrennten Lüftungsszenarien in zwei verschiedenen Schulklassen eruiert.

Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende Analyse des Nutzungserlebnisses von nachgerüsteten Lüftungssystemen in Bildungsgebäuden, vor dem Hintergrund strengerer Anforderungen an die Raumlufthqualität, genüge zu leisten und ein gesünderes Raumklima bereitzustellen.

Zielsetzung 1: Überprüfung bestehender Standards und Richtlinien zur Raumlufthqualität in Gebäuden sowie Forschungsfeldstudien in diesem Bereich.

Zielsetzung 2: Verstehen des Komforts der Lernenden (Lärm, Zugluft usw.), während verschiedener Lüftungsmethoden (natürliche Stoßlüftung, MPIC, keine Lüftung).

Zielsetzung 3: Analysieren der qualitativen Daten im Zusammenhang mit quantitativen Messdaten mit Hilfe von statistischen Methoden.

Zielsetzung 4: Schlussfolgerungen aus Ergebnissen ziehen, die auf der Literatur und den Ergebnissen dieser Schulstudie basieren.

### **1.3 Übersicht der Arbeit**

Um sich einen Überblick, hinsichtlich der ganzen Thematiken, welche in dieser Arbeit behandelt werden, zu verschaffen, wird eine kurze Gliederung dargelegt. In Kapitel 2, Stand der Wissenschaft, wird ein Überblick im Rahmen der Literaturrecherche abgesteckt, welche die geltenden Normen sowieso wissenschaftliche Publikationen der Thematiken hinsichtlich Raumklima, Behaglichkeit, Lüftungssysteme und Akustik berücksichtigen. Nachfolgende Kapitel beziehen sich auf die Grundlagen der Literaturrecherche, die für den weiteren Forschungsprozess dieser wissenschaftlichen Arbeit unerlässlich sind. Die Durchführung der Umfragen sowie der ganze Aufbau der Lüftungssysteme und Ermittlung der nachher benötigten Parameter wird in Kapitel 3 behandelt. Auch in diesem Abschnitt wird die Methodik bezüglich der Statistik und Herangehensweise der einzelnen Verfahren erläutert. Die Analyse und Ergebnisse gibt die Auswertung und Darstellung der in Kapitel 3 erläuterten Methoden an. Alle, in den vorherigen Kapitel eruierten, Verfahren werden in Kapitel 4 mit den ermittelten Parametern präsentiert. In Kapitel 5, dem letzten Kapitel, wird mittels Gegenüberstellung der Ergebnisse sowie eine Diskussion und Schlussfolgerung die Kernaussage der ganzen Arbeit vorgelegt. Abschließend wird die Limitationen sowie die Randbedingungen und auch Anregungen für weiterführenden Studien im Bereich Nutzungserlebnis und Behaglichkeit von nachgerüsteten Lüftungssystemen aufgegriffen.

## 2 Stand der Wissenschaft

Um die Zielsetzungen 1 aus Kapitel 1.2 zu beantworten, wird im Folgenden der Stand der Wissenschaft sowie relevante Studien erläutert.

### 2.1 Einleitung

Ein ausreichender Luftaustausch und ein behagliches Raumklima in Bezug auf Temperatur, Zugluft und Akustik sind entscheidende Faktoren für die Gesundheit und der Arbeitseffizienz der Personen in Innenräumen, insbesondere von Lernenden in Schulräumen. Ein angemessenes Raumklima beeinflusst Komfort, Konzentration, Produktivität und Gesundheit der Lernenden. Die Raumluftqualität in österreichischen Schulen ist seit Langem problematisch und oftmals nicht ausreichend. Viele Schulgebäude sind „alt“ (um die 1950er und 1970er Jahren erbaut) und verfügen nur über natürliche Lüftung [75].

Wichtige Aspekte sind außerdem die Berücksichtigung der Gebäudenutzenden und deren Bedürfnisse. Laut ÖNORM EN 16798-1 wird gefordert, dass Komfort, Gesundheit und Wohlbefinden der Gebäudenutzenden bei der Bewertung der Energieeffizienz eines Gebäudes ebenfalls berücksichtigt werden muss. Dazu gehören Aspekte wie Temperatur, Raumluftqualität, Luftfeuchtigkeit und akustische Bedingungen [5].

Die Anforderung an ein Gebäude wird immer mehr bestimmt durch die Nachhaltigkeit und den Energieverbrauch. Die Gestaltung und der Betrieb von Gebäuden, einschließlich ihrer Systeme, haben erhebliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch, wobei Innenraumklimafaktoren wie Heizung, Kühlung, Belüftung und Beleuchtung eine entscheidende Rolle spielen. Diese Innenraumbedingungen haben auch einen direkten Einfluss auf das Wohlbefinden, die Produktivität und den Komfort der Nutzenden. Daher ist es wichtig, Kriterien für die Innenraumqualität festzulegen. Die Norm 16798-1 stellt genauso einen Standard bezüglich Innenraumqualitätskriterien und steht in Beziehung zu mehreren anderen Normen. Die Norm verwendet thermische Kriterien basierend auf vordefinierten PMV- und PPD-Berechnungen (siehe Kapitel 2.3.2) aus Standards wie der ISO 7730, der sogenannten „Behaglichkeitsnorm“ [5, 6].

Mit einem adäquat, dimensionierten Lüftungssystem, das die CO<sub>2</sub>-Konzentration berücksichtigt, kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass die durch menschliche Aktivitäten verursachten Luftinhaltsstoffe und Gerüche sowie Schadstoffe aus Baumaterialien, Einrichtungsgegenständen und dem Erdreich wirksam abgeführt werden. Bei der sogenannten natürlichen Lüftung deuten Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen und Hörsälen sowie Modellrechnungen jedoch darauf hin, dass eine effiziente Abführung oft nicht möglich ist, da eventuelle auch bauliche Gegebenheiten eine ausreichende und effektive Fensterlüftung in (Grund-)schulen kaum ermöglicht, da Fensterflügel nicht geöffnet werden können oder durch Fensterbretter blockiert sind [7,14,16]. Saisonale Bedingungen, insbesondere in den Wintermonaten, können die Wirksamkeit der natürlichen Lüftung ebenfalls einschränken. Zudem kann es ohne Feuchterückgewinnung zu niedrigen relativen Feuchtwerten (< 30% rel. Luftfeuchte) kommen, zudem sind in der kalten Jahreszeit die Lüftungswärmeverluste erheblich [1].

An stark befahrenen Straßen kann durch die natürliche Lüftung auch der Außenlärm ins Gebäude dringen, da die Schalldämmung mittels des geöffneten Fensters aufgehoben ist.

Es kann somit schwierig sein, durch natürliche Lüftung eine für die Personen angenehme Raumluftqualität über die unterschiedlichen Jahreszeiten hinweg zu gewährleisten. Zusätzlich stellt diese Lüftungsart eine Herausforderung dar, um sowohl eine thermische Behaglichkeit als auch eine konstante Raumluftqualität aufrechtzuerhalten [1].

Die Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft (2024) sowie die Studie von Bluysen (2020) und auch das Bundesgesundheitsblatt (2018) haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Frischluftzufuhr sowohl die Arbeitseffizienz verbessern als auch die Zufriedenheit der im Raum befindlichen Personen deutlich steigern kann. Eine Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft, die als Indikator für verbrauchte Raumluft fungiert, korreliert mit einem verringerten Risiko für das Sick-Building-Syndrom sowie für virale und bakterielle Infektionen, einschließlich COVID-19. [7–9].

In den folgenden Kapiteln (siehe Kapitel 2.2 und 2.3) wird anhand des Standes der Wissenschaft detailliert untersucht, welche Parameter entscheidend für das Wohlbefinden der Nutzenden sind und wie diese optimal umgesetzt werden können. Im Fokus stehen dabei die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Temperatur und deren Einfluss auf den Behaglichkeitsindex (siehe Kapitel 2.3.2), sowie Aspekte wie Zugluft, Akustik und relative Luftfeuchtigkeit. Diese Parameter spielen eine wesentliche Rolle dabei, ein komfortables und gesundes Raumklima zu schaffen. Das Kapitel gibt umfassende Einblicke, wie diese Faktoren aufeinander abgestimmt werden müssen, um die bestmögliche Behaglichkeit und Funktionalität in den Räumen zu gewährleisten. Zudem werden verschiedene Lüftungsarten behandelt, einschließlich natürlicher, mechanischer und hybrider Lüftungssysteme.

In Kapitel 2.4 werden relevante Studien zusammengefasst, wobei das CovED-Projekt an der TU-Graz im Mittelpunkt steht. Ziel des Projekts ist es, Bildungsräume an Universitäten und Schulen schnell mit dem MPIC-Belüftungssystem auszustatten, um dessen Funktionalität zu demonstrieren.

Eine weitere Studie untersucht den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften von Klassenzimmern und der Gesundheit sowie dem Komfort von Schulkindern. Außerdem wurde eine umfassende Untersuchung zu den Einflussfaktoren auf das Öffnen und Schließen von Fenstern und Außentüren in Bezug auf die Innenraumqualität (IEQ), den thermischen Komfort und den Energieverbrauch durchgeführt.

Eine andere Studie zeigt die Auswirkungen von Renovierungen auf die IEQ in einem fünfstöckigen Forschungsinstitutsgebäude auf.

Die Pilotstudie von Eibinger (2022) beleuchtet zusätzlich den Einfluss unterschiedlicher Lüftungsstrategien auf das thermische und akustische Wohlbefinden sowie die Sicherheit der Nutzer in Bildungsgebäuden.

In Abbildung 1 wird die Übersicht dieses Kapitels und die Unterteilung in Lüftungssysteme, Raumluftqualität und Studien zusammengefasst.

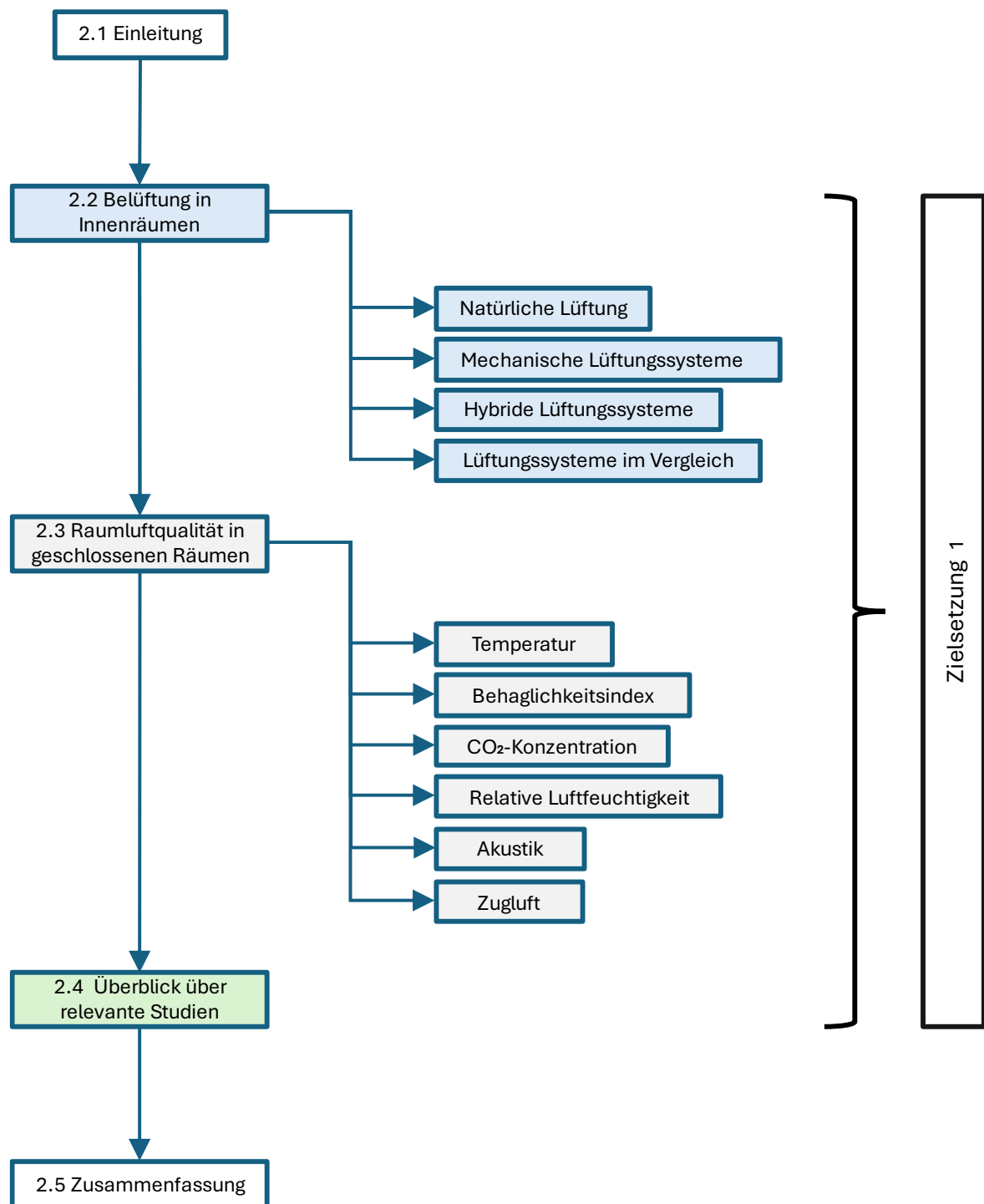


Abbildung 1: Flussdiagramm, Kapitel 2: Stand der Wissenschaft

## 2.2 Belüftung in Innenräumen

In Abschnitt 2.2 werden die verschiedenen Lüftungsarten und -systeme detailliert beschrieben und abschließend verglichen.

### 2.2.1 Natürliche Lüftung

Eine der üblichsten Arten der Lüftung ist die sogenannte freie oder natürliche Lüftung, nämlich die Fensterlüftung, welche auch eine der gängigsten Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität in bestehenden Gebäuden ist. In den meisten Fällen werden die Fenster je nachdem welche Art von Fenster zur Verfügung steht gekippt oder ganz geöffnet, um den Luftaustausch mit der Umgebung zu gewährleisten. Diese Lüftungsmethode trägt wesentlich zur Sicherstellung einer hygienisch einwandfreien Raumluft bei, was besonders in intensiv genutzten Innenräumen von großer Bedeutung ist. Die Fensterlüftung bietet zahlreiche Vorteile. Sie ermöglicht den Austausch von verbrauchter Innenluft gegen frische Außenluft, was zu einer Reduzierung von Schadstoffen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen führt. Durch das Öffnen der Fenster kann Feuchtigkeit effektiv abgeführt werden, wodurch die Gefahr von Schimmelbildung minimiert wird [1].

Die Effektivität der Fensterlüftung ist stark von den äußeren Wetterbedingungen abhängig. Bei extremen Temperaturen (sehr heiß oder sehr kalt) kann das Öffnen der Fenster zu einem erheblichen Verlust an thermischem Komfort führen. In städtischen Gebieten mit hoher Luftverschmutzung kann das Öffnen der Fenster dazu führen, dass Schadstoffe von außen in den Innenraum gelangen, was die Raumluftqualität verschlechtert. Darüber hinaus stellen offene Fenster, gerade in mehrstöckigen Bildungseinrichtungen, ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar. Fenster können oder dürfen aus Aufsichts-, Haftungs- und Sicherheitsgründen oftmals in den Pausen gar nicht geöffnet werden [1, 2]. Ein Konflikt zwischen Sicherheit und effektiver Belüftung kann auftreten, der wiederum die Luftqualität beeinträchtigt. Dies lässt sich durch eine sorgfältige Wahl der Fensteröffnungen oder durch die Trennung des Lüftungssystems vom Fenster abschwächen [10].

Bei einer natürlichen Lüftung werden Auftrieb und/oder Wind als natürliche Antriebskräfte für die Luftbewegung genutzt [11]. Die Luftwechselrate, auch als Lüftungsrate bekannt, misst, wie oft die gesamte Raumluft in einem bestimmten Zeitraum durch frische Luft ersetzt wird. Sie gibt an, wie viele Volumina des Raumes pro Stunde ausgetauscht werden und wird häufig in der Einheit [1/h] oder als Verhältnis angegeben. Diese Kennzahl ist entscheidend für die Raumklimaqualität, da sie beschreibt, wie oft die gesamte Luftmenge eines Raumes innerhalb einer Stunde erneuert werden muss, um eine gesunde und angenehme Raumluftqualität zu schaffen [12]. Die Berechnung bzw. Einordnung der Luftwechselrate ist notwendig, um sicherzustellen, dass die Lüftung ausreichend ist, um sowohl die Anforderungen hinsichtlich der Nutzung, als auch andere spezifische Lüftungsanforderungen zu erfüllen. Im Rahmen dieser Berechnungen werden Verfahren zur Dimensionierung von Öffnungen angewendet, um sicherzustellen, dass die Lüftungsanforderungen unter allen Wetterbedingungen erfüllt werden [13]. Die Luftwechselrate der natürlichen Lüftung hängen von mehreren Faktoren ab, darunter die Innen- und Außentemperaturen, die die thermische Auftriebswirkung beeinflussen. Auch die lokalen Windgeschwindigkeiten spielen eine entscheidende Rolle, da sie den Luftstrom durch Öffnungen verstärken können. Zusätzlich sind die Lage, Größe und Art der Öffnungen von Bedeutung, da diese die Menge und Richtung des Luftstroms bestimmen. Schließlich

beeinflusst auch die Art der Strömungswege innerhalb eines Raums, wie effizient die Luft zirkuliert und damit die Belüftung erfolgt [11].

Der Prozentsatz der Schulen in Österreich, die über eine natürliche oder mechanische Belüftung verfügen, kann mit einer Genauigkeit von 95 Prozent angegeben werden. Da die meisten Schulen bereits in die Jahre gekommen sind (siehe Kapitel 1.1), sind insgesamt 90,8% der Schulen natürlich belüftete und 9,2% mechanisch belüftete [73]. In Deutschland verfügen derzeit nur etwa 10 Prozent der Schulen über fest installierte mechanische Lüftungsanlagen. Umso mehr deutet dies darauf hin, dass die Situation in Österreich ähnlich sein kann [14].

In öffentlichen Gebäuden müssen Aufenthaltsräume und Sanitärräume entweder über Fenster, Türen oder ähnliche Öffnungen, die direkt ins Freie führen, ausreichend gelüftet werden können, wenn jedoch ein mechanisches Lüftungssystem installiert ist, welches für den jeweiligen Verwendungszweck eine ausreichende Luftwechselrate gewährleistet, kann ganz oder teilweise auf die natürliche Lüftung verzichtet werden. Für andere innen liegende Räume, mit Ausnahme von Gängen, muss ebenfalls eine ausreichende Lüftungsmöglichkeit entweder durch natürliche oder mechanische Lüftung sichergestellt sein [15].

Für eine optimale natürliche Lüftung wird die Querlüftung oftmals herangezogen, sprich die am weitest voneinander entfernten Fenster bzw. Türen werden geöffnet, um einen Luftzug durch den ganzen Raum gewährleisten zu können. Eine ausschlaggebende Rolle spielen auch die baulichen Gegebenheiten wie Gebäudedesign, Raumaufteilung und Struktur sowie die Umgebungsbedingungen wie Windrichtung, -geschwindigkeit, Temperaturunterschiede und Luftfeuchtigkeit. Saisonale Faktoren wie unterschiedliche Anforderungen im Sommer und Winter sowie klimatische Bedingungen spielen ebenfalls eine Rolle [13].

In Abbildung 2 ist ein Auszug aus einem Artikel des Umweltbundesamts dargestellt, welche das „Richtig lüften im Schulalltag“ grafisch beschreibt.

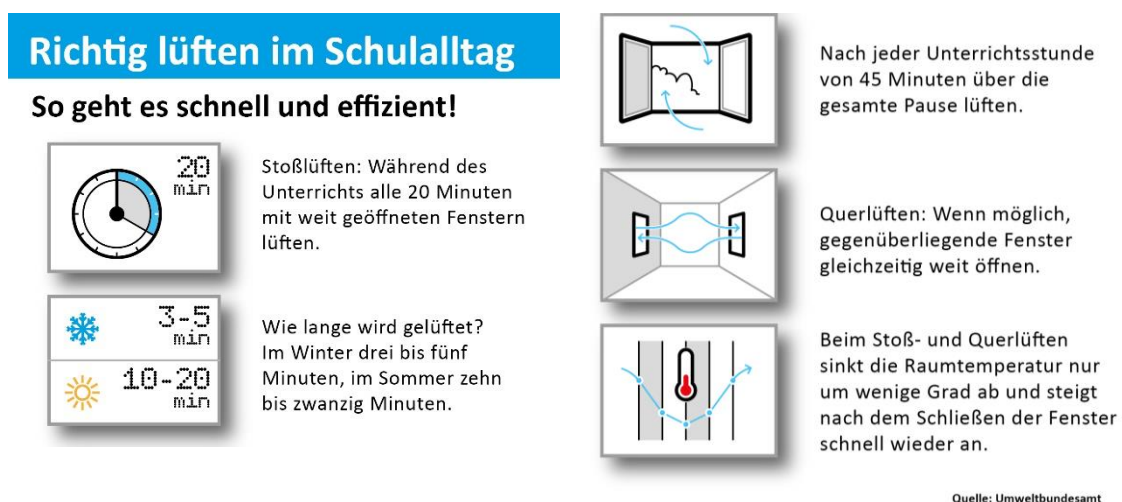


Abbildung 2: Richtig lüften im Schulalltag [16]

Allerdings stößt die Fensterlüftung in der Praxis oft an ihre Grenzen. In vielen Fällen ist es nicht möglich, ganzjährig durch einfache Fensterlüftung die gewünschten Bedingungen in Bezug auf thermische Behaglichkeit, Hygiene und Luftqualität zu gewährleisten. Insbesondere in dicht belegten und stark frequentierten Räumen ist der Luftaustausch durch Fensterlüftung allein meist nicht ausreichend [9].



## 2.2.2 Mechanische Lüftungssysteme

Ein mechanisches Lüftungssystem ist eine Vorrichtung, die gezielt den Luftaustausch in einem Gebäude oder Raum steuert, um die Raumluftqualität zu verbessern und ein gesundes Raumklima zu gewährleisten. Im Gegensatz zu natürlichen Lüftungsmethoden, die auf Fenster und Türen angewiesen sind, verwendet ein mechanisches Lüftungssystem, technische Komponenten, wie Ventilatoren und Filter, um die Luftzirkulation zu regulieren. Sowohl Zuluft als auch Abluft wird mechanisch geregelt [2, 17].

Man unterscheidet zwei Hauptarten von mechanischen Lüftungssystemen. Das dezentrale Lüftungssystem bestehen aus einzelnen, in den jeweiligen Räumen installierten Geräten, die unabhängig voneinander arbeiten, während zentrale Lüftungssysteme eine zentrale Einheit nutzen, die die Luft für das gesamte Gebäude aufbereitet und über ein Netzwerk von Kanälen verteilt. Dezentrale Systeme sind einfacher nachzurüsten und benötigen weniger Leitungen, während zentrale Systeme effizienter bei der Steuerung der Raumluftqualität für das gesamte Gebäude sind [2]. In Abbildung 3 sieht man eine schematische Darstellung einem mechanischen Lüftungssysteme mit den wichtigsten Hauptkomponenten [2].

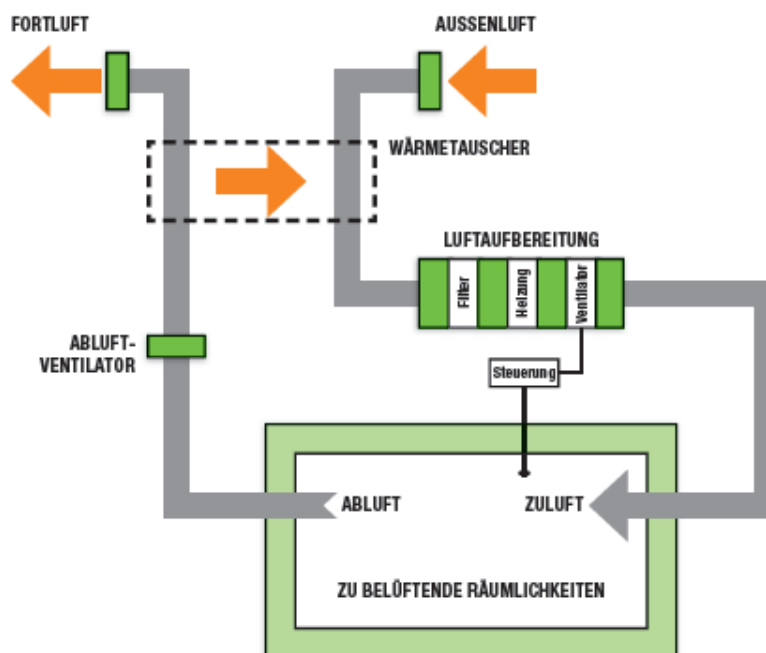


Abbildung 3: Schematische Struktur eines mechanischen Lüftungssystems [18]

Die mechanischen Lüftungssysteme in Bildungseinrichtungen, insbesondere in Klassenräumen, sind von entscheidender Bedeutung, um eine gesunde Raumluftqualität zu gewährleisten und Gesundheitsrisiken zu minimieren. Systeme zur mechanischen Lüftung, die mit Wärmerückgewinnung arbeiten, spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie das Risiko übermäßiger Wärmeverluste im Winter, durch den Einsatz von Wärmerückgewinnungslösungen in kalten Klimazonen, eindämmen können. Sie tragen nicht nur zur Energieeinsparung bei, sondern nutzen auch die Wärme der Abluft, um die frische Zuluft vorzuwärmen. Dies führt zu einer höheren Effizienz der Lüftungssysteme und hilft, die Betriebskosten zu senken [2, 18].

Einige Vorgaben verlangen eine bestimmte Luftwechselrate, um eine ausreichende Lüftung sicherzustellen und somit eine gesunde Lernumgebung zu schaffen. Eine grundlegende Strategie zur Lüftung sieht vor, konstanten Luftaustausch nach einem festen Zeitplan zu gewährleisten, der auf die maximale Belastung durch Luftschadstoffe ausgelegt ist. Dies kann jedoch zu Über- oder Unterbelüftung sowie Energieverschwendung führen. Eine bessere Methode ist die Steuerung auf Basis der CO<sub>2</sub>-Konzentration. So sorgen die zugeführten Luftvolumenströme dafür, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 1.000 ppm bleibt, was signifikante Leistungsgewinne ohne die Nachteile erhöhter Energie- oder Komfortverluste, wie bei der Fensterlüftung, ermöglicht. Die Lüftung wird aktiviert, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration einen festgelegten Schwellenwert überschreitet (meist 1000 ppm oder 1500 ppm), und gestoppt, wenn er darunter liegt. Standards wie die EN 16798-1 bewerten die Raumluftqualität (IAQ) anhand dieser CO<sub>2</sub>-Konzentration und klassifizieren den Komfort in verschiedene Kategorien [2, 17, 19].

In der Studie von Kremer aus dem Jahr 2021, wurde mit einem speziellen Berechnungsmodell für Schul- und Unterrichtsräume die energetischen und wirtschaftlichen Auswirkungen des Einsatzes von Wärmerückgewinnung in Klassenzimmern untersucht. Den Berechnungen zufolge kann der Endenergiebedarf für Wärme durch den Einsatz von Wärmerückgewinnung um etwa 80% gesenkt werden. Zudem reduziert die Wärmerückgewinnung die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 67% bei einer vollständigen Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung [20].

Geschlossene Fenster reduzieren den Außenlärm erheblich, und moderne Lüftungssysteme sind akustisch, in Bezug auf die Lautstärke, kaum wahrnehmbar. Zudem sinkt das Infektionsrisiko durch luftübertragene Keime erheblich bei ausreichend dimensionierten raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen), und der Volumenstrom kann bedarfsabhängig geregelt werden. Die Lüftungsfunktion ist unabhängig vom Verhalten der Nutzenden gewährleistet, da eine Fehlbedienung praktisch ausgeschlossen ist. Dezentrale Anlagen lassen sich einfach nachrüsten, benötigen wenig Platz und erfordern meist nur minimale bauliche Eingriffe. Weiters können normgerechte Zuluftfilter die Feinstaub-, Pilzsporen- und Pollenbelastung im Raum deutlich senken, während die temperierte Zuluft in der kalten Jahreszeit den thermischen Komfort erhöht. Als Mindestqualität für die Zuluftfilter für Schulen ist die Klasse ePM1 50% nach ÖNORM EN ISO 16890-1 anzusehen [2].

Die Nachteile eines mechanischen Lüftungssystems sind die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten, was für Bildungseinrichtungen eine erhebliche finanzielle Belastung darstellt. RLT-Anlagen sind komplexe technische Installationen, die höhere Anforderungen an Planung, Ausführung und Wartung stellen, was die Kosten erhöht. Zentrale Anlagen sind für den Nutzenden nicht direkt steuerbar, was die Akzeptanz mindern kann. Zudem sind sie oft nur mit größerem Aufwand nachrüstbar und benötigen in der Regel mehr Platz und Leitungslängen, was die Energieeffizienz beeinflusst. Die fachgerechte Errichtung und Wartung solcher Anlagen sind unerlässlich, um eine einwandfreie Funktion sicherzustellen [2].

Die Studie von Schwarzbauer (2022) zeigt, dass mechanische Lüftungssysteme zwar den Vorteil einer kontrollierten Luftqualität bieten, jedoch regelmäßige Wartung und technisches Know-how erfordern, um eine optimale Funktionsweise sicherzustellen. Bei fehlerhafter Installation oder technischen Störungen kann die Luftqualität jedoch sogar schlechter sein als bei natürlicher Fensterlüftung. Besonders hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können auftreten, wenn die Systeme nicht ausreichend dimensioniert sind, was sich

insbesondere bei wechselnder Raumnutzung, wie einer veränderten Klassengröße oder Belegung, nachteilig auswirken kann [76].

Zentrale und dezentrale, raumlufttechnische (RLT-) Systeme bergen ebenfalls das Risiko erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und eines gesteigerten Virusdosisfaktors (VDF), insbesondere bei unzureichender Kalibrierung oder Betriebsstörungen. Zentrale RLT-Systeme erzielen im Vergleich zur freien Fensterlüftung deutlich niedrigere CO<sub>2</sub>- und VDF-Werte. Als besonders wirksam erwies sich ein Kompromissansatz, bei dem sowohl niedrige VDF- als auch niedrige CO<sub>2</sub>-Werte erzielt wurden. Dieser konnte durch ventilatorgestützte Fensterlüftung oder dezentrale RLT-Systeme erreicht werden [76].

Die ventilatorgestützte Fensterlüftung stellte sich dabei als kostengünstigere Alternative heraus, die zudem eine flexible Anpassung der Luftwechselrate ermöglicht, abhängig von den aktuellen klimatischen Anforderungen im Raum [77]. Uhre (2022) zeigt, dass eine ventilatorgestützte Fensterlüftung bei niedriger Leistungsstufe eine Luftwechselrate von 5/h erzielen kann, ohne dabei signifikante Lärmemissionen zu verursachen. Darüber hinaus lassen die Berechnungen darauf schließen, dass bei Außentemperaturen über 10°C kein zusätzlicher Wärmetauscher erforderlich ist [77].

## 2.2.3 Hybride Lüftungssysteme

Eine weitere Variante der Lüftung ist die sogenannte hybride Lüftung. Eine hybride Lüftung kombiniert natürliche und mechanische Lüftungssysteme. Normalerweise wird die Abluft durch Ventilatoren aus dem Raum abgeführt, während frische Außenluft durch geöffnete- bzw. gekippte Fenster oder spezielle Nachströmöffnungen zugeführt wird. Dies führt zu einer effektiveren und energieeffizienteren Lüftung von Aufenthaltsräumen mit großer Personendichte. Vorteil der hybriden Lüftungssysteme ist, dass diese in Klassenräumen / Aufenthaltsräumen nachträglich einfach installiert werden können. Die Installation herkömmlicher mechanischer Lüftungssysteme in Klassenräumen oder Aufenthaltsräumen ist jedoch mit erheblichen Kosten und einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. In vielen Fällen ist dies zudem aufgrund der Raumgeometrie oder des Gebäudes gar nicht möglich bis nur schwer umsetzbar. Darüber hinaus ist im Gegenzug, die hybride Lüftungssysteme sehr kostengünstig und benötigt im Betrieb sehr wenig elektrische Energie für den Ablufttransport [2].

Hybride Lüftungssysteme basieren auf dem Prinzip der Quelllüftung (siehe Abbildung 4). Voraussetzung für die Einsetzbarkeit ist, dass die Zuluft kälter als die Raumluft sein muss, um eine hohe Lüftungseffektivität, d.h. hohe Raumluftqualität zu erreichen. Sobald die Zulufttemperatur die Temperatur der Raumluft jedoch übersteigt, kommt es zu einem rapiden Rückgang der Raumluftqualität und dem thermischen Auftrieb, welcher wesentlich für die Quelllüftung ist, fällt ab. Ferner ist ein bodennahes Fenster zu bevorzugen, da die kühle Luft in Bodennähe einströmt und sich gleichmäßig im Raum verteilt, bevor sie aufsteigt. Darüber hinaus wird die Effektivität der Lüftung dadurch verbessert. Die kalte Zuluft verteilt sich am Boden und wird dann an den Wärmequellen (Personen) entlang nach oben erwärmt und darüber abgesaugt und nach außen befördert. Ein Abluftventilator unterstützt die Nachströmung der Außenluft durch geöffnete oder gekippte Fenster [2, 21].

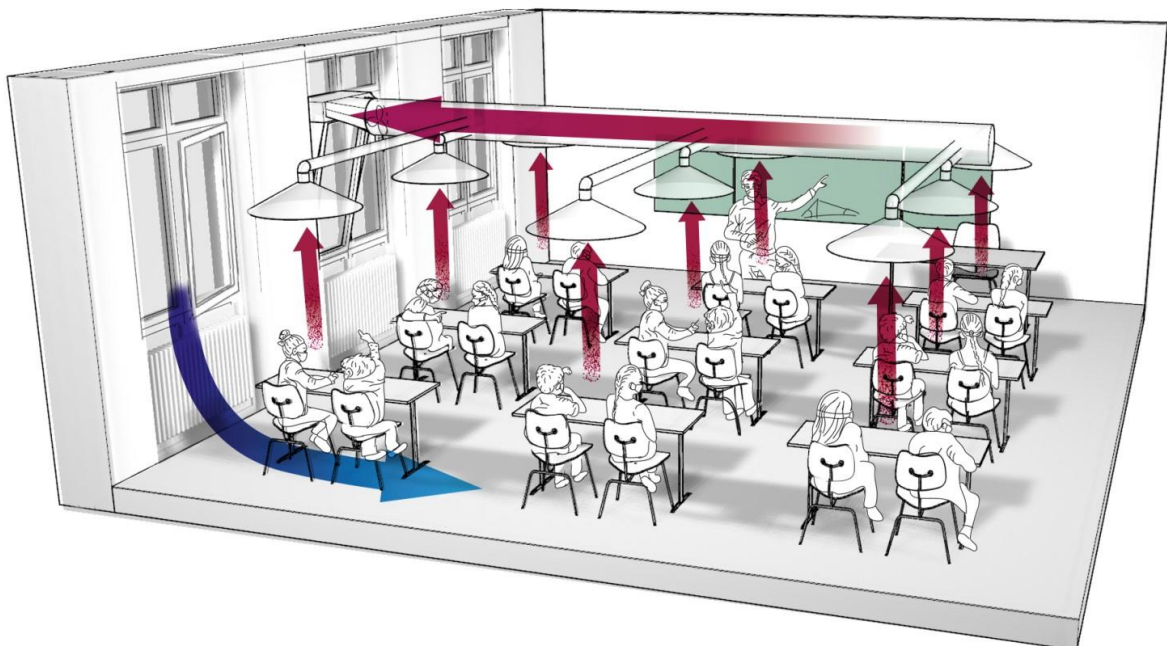


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines hybriden Lüftungssystems: Bodennahe Zuluft über Fenster mit mechanischen Lüftungssystemen mit verteilter Abluftabsaugung. (Graphik: A. Koppenborg) [22]

Das Ziel des hybriden, nachgerüsteten MPIC-Lüftungssystems besteht darin, mit einfachen technischen Mitteln wie Ventilatoren und Abzugshauben eine kostengünstige, leicht umsetzbare und besonders wirkungsvolle Lösung zur Luftreinhaltung bereitzustellen, die effektiv gegen die Aerosolübertragung von Infektionskrankheiten wie COVID-19 und Influenza wirkt. Es verwendet Abzugshauben, um den maximalen Direktabsaugungseffekt zu erreichen. Dafür ist jeweils eine Haube pro Tisch und eine Zuleitung zum Zentralrohr erforderlich (siehe Abbildung 4) [22].

Laut Helleis et al. (2023) ist es empfehlenswert, solche hybriden Systeme in allen Klassenräumen einzubauen, die nicht bereits mit ähnlich wirksamen Hilfsmitteln ausgestattet sind. Der Abluftventilator ist mit verteilten Abzugshauben kombiniert, um mögliche Infektionskrankheiten und Pandemien schnell und wirksam einzudämmen. Unabhängig von der verteilten Absaugung mittels Abzugshauben bieten nachgerüstete Lüftungssysteme zuverlässige Abhilfe für seit langem bestehende Innenraumluftqualitätsprobleme in Schulen und dies mit geringem zeitlichen und monetären Aufwand [22].

Die Max-Planck-Institute für Chemistry Mechanical-Extract-Ventilation (MPIC-MEV) Anlage besteht aus mehreren Komponenten. Ein axialer Ventilator entfernt die verbrauchte Innenluft durch Abzugshauben und Kanäle nach außen, während frische Luft durch ein gekipptes oder geöffnetes Fenster zugeführt wird, welches sich am weit entferntesten Punkt vom Ventilator befinden sollte, um die bestmöglichen Luftwechsel zu garantieren. Die Anlage besteht aus einem zentralen Hauptkanal, von dem kleinere Durchmesser abzweigen, die zu den Abzugshauben führen. Die Kanäle bestehen aus transparenten Polyethylenfolienröhren mit hochdichten Polyethylen-Stützgitter, um eine mögliche Verdunkelung des Lernraumes zu vermeiden [51].

Weitere Komponenten sind zylindrische Verteiler, die die Hauptkanäle mit den Abzugsrohren verbinden, sowie Rückstauklappen. Die Rückstauklappe fungiert als Verschluss, wenn das System ausgeschaltet ist, damit keine kalte Außenluft über das Abluftsystem eindringen kann und somit den Lernraum abkühlt [23].

In der Studie von Pollozhani (2024) werden die Auswirkungen von natürlichen, mechanischen und hybriden Lüftungssystemen in Bildungseinrichtungen im Hinblick auf Energieeffizienz, thermischen Komfort, Luftqualität und das Risiko der Übertragung von SARS-CoV-2. Die Ergebnisse zeigen, dass das beste Gleichgewicht zwischen diesen Parametern durch die Verwendung hybrider oder mechanischer Systeme erreicht wird, die an die spezifischen Anforderungen jedes Raumes angepasst sind. Allein auf natürliche Lüftung ohne automatisierte Steuerung zu setzen, erweist sich laut der Studie als unzureichend, da sie stark von äußeren Bedingungen und dem Verhalten der Nutzer abhängt. Hybride Lüftungssysteme erzielen mitunter die besten Resultate, da sie die Luftqualität verbessern, auch bei kälteren Temperaturen einen angemessenen thermischen Komfort bieten, das Infektionsrisiko senken und durch die Energieeffizienz langfristig Kosteneinsparungen ermöglichen, insbesondere in Schulen und anderen hoch ausgelastet Einrichtungen [19].

## 2.2.4 Lüftungssysteme im Vergleich

Es gibt wesentliche Unterschiede zwischen natürlicher, hybrider und mechanischer Lüftung, die sich in ihrer Funktionsweise, Effizienz und den damit verbundenen Vorteilen und Nachteilen zeigen [2].

Bei der natürlichen Lüftung erfolgt der Luftaustausch durch manuelles Öffnen der Fenster, was jedoch oft zu unzureichendem Luftaustausch führt. Diese Methode ist stark von den Wetterbedingungen abhängig, da die Effektivität von Temperaturdifferenzen und Windverhältnissen abhängt, was zu unregelmäßigen Luftwechseln führen kann. Zudem kann unregelmäßiges Lüften zu einer schlechten Raumlufthqualität führen, da CO<sub>2</sub>-Konzentration steigen können, was wiederum die Leistungsfähigkeit der Nutzenden beeinträchtigt. Ein weiteres Problem ist der Komfort: Offene Fenster können bei extremen Temperaturen unangenehm sein, und automatisierte Systeme sind häufig nicht zuverlässig, da sie an wechselnde Wetterbedingungen gebunden sind [1, 2].

Die hybride Lüftung kombiniert natürliche und mechanische Methoden. Hierbei wird die Abluft durch Ventilatoren unterstützt, was es ermöglicht, die Luftvolumenströme unabhängig von den Außentemperaturen gezielt einzustellen. Diese Systeme sind oft energieeffizienter als reine Fensterlüftung. Besonders in Pandemiezeiten bieten hybride Systeme hygienische Vorteile, indem sie die Luftzirkulation verbessern und so das Infektionsrisiko senken. Allerdings können bei der hybriden Lüftung, Lärmprobleme durch Außenquellen auftreten, da Fenster geöffnet bleiben [1, 2]. Basierend auf Erfahrungen aus der Ausstattung von über 600 Klassenräumen in Schulen der Stadt Mainz belaufen sich die Materialkosten für die Installation eines MPIC-Lüftungssystems auf zwischen 500 - 800 Euro (Ventilator und Abluftabsaugung) [22]. Eine Studie von Bluysen et al. (2021) zeigte, dass bei der niedrigsten Geschwindigkeitseinstellung (600 m<sup>3</sup>/h) von mobilen Luftreinigern mit HEPA-Filter 2/3 der Teilnehmenden mit dem Lärm (40 dB) unzufrieden waren. Bei höheren Einstellungen (1000 und 1500 m<sup>3</sup>/h) waren alle Probanden mit der Lautstärke unzufrieden (44 bzw. 51 dB). Die WHO empfiehlt, für Klassenzimmer, Hintergrundgeräusche von maximal 35 dB(A) und Nachhallzeiten von höchstens 0,6 Sekunden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das mobile HEPA-Filtersystem in der getesteten Klassenzimmerumgebung einen inakzeptablen Hintergrundgeräuschpegel verursachte [68].

Mechanische Lüftungssysteme bieten eine konstante und kontrollierte Luftzirkulation, die unabhängig von den Wetterbedingungen funktioniert. Viele dieser Systeme sind mit Wärmerückgewinnung ausgestattet, was zu geringeren Energieverlusten führt. Sie verwenden oft Luftfilter, die die Raumlufthqualität verbessern, indem sie Feinstaub und Allergene reduzieren. Außerdem funktioniert die mechanische Lüftung unabhängig von geöffneten Fenstern, was den Komfort erhöht und Zugluft vermeidet. Obwohl die Installationskosten höher sein können, lassen sich die Betriebskosten durch Energieeinsparungen reduzieren. Obwohl viele moderne mechanische Lüftungssysteme leise funktionieren, können einige dennoch Geräusche verursachen, die als störend wahrgenommen werden. Zudem kann es schwierig sein, die Luftfeuchtigkeit zu regulieren, wenn das System nicht über eine Feuchterückgewinnung verfügt, was zu unangenehmen Bedingungen führen kann [2, 22]. Insgesamt können die Gesamtkosten für ein mechanisches Lüftungssystem in einer Schulklasse zwischen 8.000 und 30.000 Euro liegen [22].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wahl zwischen natürlicher, hybrider und mechanischer Lüftung von verschiedenen Faktoren, wie den spezifischen Anforderungen an die Raumluftqualität, Energieeffizienz und den gewünschten Komfort, abhängt. Während natürliche Lüftung kostengünstig ist, bietet die mechanische Lüftung eine zuverlässigere und komfortablere Lösung. Hybride Lüftungssysteme stellen eine flexible Option dar, die beide Methoden kombiniert und so eine ausgewogene Lösung für unterschiedliche Bedürfnisse bieten kann [2, 22].



## 2.3 Raumlufthqualität in geschlossenen Räumen

In Abschnitt 2.3 werden alle Parameter zur Behaglichkeit und Raumlufthqualität behandelt.

### 2.3.1 Temperatur

Die Temperatur im Klassenzimmer spielt eine entscheidende Rolle für die Gesundheit der Lernenden und der Arbeitseffizienz der Lernenden. Eine angemessene Raumtemperatur beeinflusst nicht nur den Komfort, sondern auch die Konzentration, Produktivität und Gesundheit der Lernenden. Dabei ist es wichtig, Normen und Richtlinien wie die ÖNORM 16798-1 zu beachten. Die Norm bietet einen Rahmen für die Gestaltung und Implementierung von Heiz- und Kühlsystemen in Bildungseinrichtungen, indem sie klare Empfehlungen für die Raumtemperatur in Klassenzimmern unter Winter- und Sommerbedingungen gibt [5].

Die Auswahl der Kategorie I (IEQ<sub>I</sub>; Kategorie der Innenraumqualität (en: indoor environmental quality category)) in der ÖNORM 16798-1, um ein hohes Maß an Erwartung zu erfüllen, ist bedeutend, gerade wenn man Räume für Nutzende mit besonderen Bedürfnissen wie zum Beispiel Kinder einrichtet (siehe Tabelle 1). Kategorie I bezieht sich auf hohe Anforderungen, was darauf hindeutet, dass in Bezug auf Temperatur und thermischen Komfort in Klassenräumen ein besonders hoher Standard angestrebt wird [5].

**Tabelle 1: Kategorien für die Innenraumqualität (Tabelle 4 - ÖNORM 16798-1) [5]**

Kategorie	Maß an Erwartungen
IEQ <sub>I</sub>	hoch
IEQ <sub>II</sub>	mittel
IEQ <sub>III</sub>	moderat
IEQ <sub>IV</sub>	niedrig
ANMERKUNG In den Tabellen werden nur die Ziffern der Kategorien angegeben, ohne das IEQ <sub>x</sub> -Symbol.	

Standardkriterien für das thermische Raumklima in Abhängigkeit der Raumnutzung sind der ÖNORM 16798-1 zu entnehmen und in der Tabelle 2 dargestellt. Für ein hohes Maß der Erwartung im Winter ist ein optimaler Temperaturbereich von 21,0 °C bis 23,0 °C festgelegt und in den Sommermonaten somit ein Temperaturbereich von 23,5 °C bis 25,5 °C angestrebt [5].

**Tabelle 2: Ausschnitt Tabelle B.5 aus ÖNORM 16798-1 [5]**

Gebäude- bzw. Raumtyp	Kategorie	Temperaturbereich für Heizperioden, °C Bekleidung etwa 1,0 clo	Temperaturbereich für Kühlperioden, °C Bekleidung etwa 0,5 clo
Büros und ähnlich genutzte Räume (Einzel- und Großraumbüros, Konferenzräume, Hör- bzw. Zuschauersäle, Cafeterien, Restaurants, Klassenräume) Sitzende Tätigkeit ~ 1,2 met	I	21,0 – 23,0	23,5 – 25,5
	II	20,0 – 24,0	23,0 – 26,0
	III	19,0 – 25,0	22,0 – 27,0
	IV	17,0 – 25,0	21,0 – 28,0



Im Raumtyp, Klassenraum, mit der Kategorie I, mit einem Kleidungs-Faktor, im Winter, von 1,0 clo und im Sommer mit einem clo von 0,5 gerechnet. Wichtig hervorzuheben ist auch, dass die Norm von einer Aktivität einer sitzenden Person ausgeht, welche 1,2 met (Aktivitätsgrad) entspricht [5].

Die operative Raumtemperatur, auch als operative Temperatur bezeichnet, ist ein Maß für das thermische Komfortempfinden in einem Raum und wird durch die Kombination der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur der umgebenden Flächen bestimmt. Sie stellt die Temperatur dar, die eine Person als gleich warm empfinden würde, wenn die Lufttemperatur und die Strahlungstemperatur gleich wären. Diese Definition berücksichtigt sowohl die Konvektion (Wärmeübertragung durch die Luft) als auch die Strahlung (Wärmeübertragung durch Oberflächen) [24]. Die nachstehende Tabelle 3 zeigt eine Reihe an operative Raumtemperatur nach unterschiedlichen normativen Quellen an.

**Tabelle 3: Operative Raumtemperatur nach unterschiedlichen normativen Quellen**

<b>Art des Gebäudes / Raums</b>	<b>EN 12831</b>	<b>EN 16798-1</b>	<b>EN ISO 7730</b>	<b>CIBSE Guide A</b>
<b>Klassenraum</b>	20 °C	21-23 °C	22 °C	19-21 °C

Nachfolgend ist die genaue Berechnung der operativ (wirksamen) Raumtemperatur ( $t_o$ ) dargestellt: [24]

$$t_o = \frac{h_r * t_r + h_c * t_a}{h_r + h_c} \quad (1)$$

Mit:

$t_a$  = die Lufttemperatur

$t_r$  = die mittlere Strahlungstemperatur

$h_c$  = der Wärmeaustauschkoeffizient durch Konvektion

$h_r$  = der Wärmeaustauschkoeffizient durch Strahlung

Das Kälteempfinden einer Person hängt stark von nicht veränderbaren Faktoren ab, die auf die Funktion von Kälterezeptoren in der Haut zurückzuführen sind. Diese Rezeptoren messen ständig, ob die Umgebungstemperatur von der Körpertemperatur abweicht, die typischerweise bei etwa 36-37 °C liegt. Wenn die Hautrezeptoren eine Temperatur wahrnehmen, die deutlich niedriger ist als die Körpertemperatur, senden sie Signale an das Gehirn, die als Kälteempfinden interpretiert werden [25].

Die ÖNORM EN ISO 7730 gibt Empfehlungen für die empfundene Temperatur (operative Raumtemperatur) in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Im Heizfall sind bei Verwendung von Quellsystemen im bodennahen Bereich Temperaturen von 20 bis 22 °C zugelassen. Im Sommer sind Temperaturen von 25 bzw. 26 °C erlaubt, wobei bei hohen sommerlichen Außentemperaturen und kurzfristig auftretenden hohen inneren Wärmelasten höhere Werte der empfundenen Temperatur zulässig sind. Das Maximum der empfundenen Temperatur ist bei 27 °C festgelegt, wenn die Außentemperatur 32 °C beträgt (siehe Abbildung 5). Für höhere Außentemperaturen macht die ÖNORM keine weiteren Angaben. Demnach liegt der zulässige Bereich für die operative Temperatur in Räumen ohne Quellsystem zwischen 22 und 25 °C, während in Räumen mit Quellsystem auch Temperaturen unter 22 °C zulässig sind. Kurzzeitig sind auch Temperaturen über 25 °C erlaubt. In der Abbildung 5 sind Empfehlungen der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt [6, 26, 27].

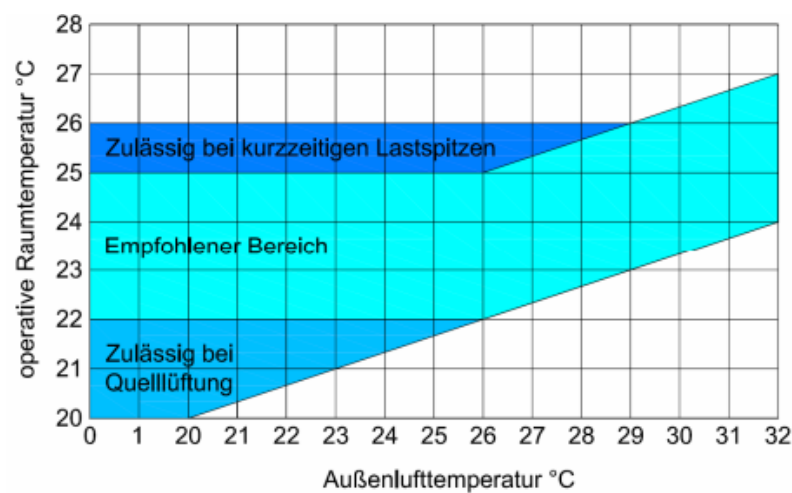


Abbildung 5: Empfohlener Bereiche; operativen Raumtemperatur zu Außenlufttemperatur [26]

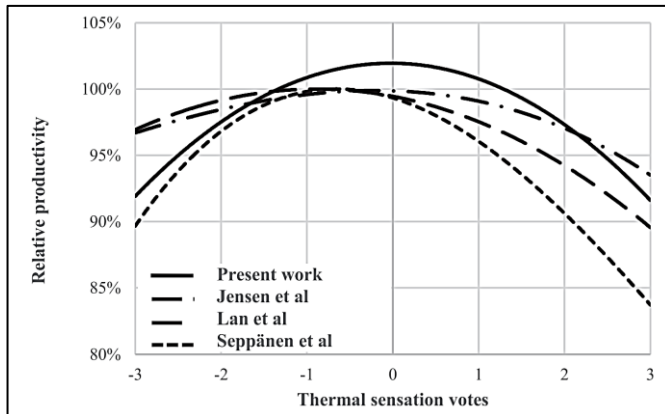


Abbildung 6: Vergleich des Zusammenhangs zwischen Produktivität und Klimabeurteilungsskala [28]

Tabelle 4: ÖNORM 7730  
Tabelle 1: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala [5]

+ 3	heiß
+ 2	warm
+ 1	etwas warm
0	neutral
- 1	etwas kühl
- 2	kühl
- 3	kalt

Die Untersuchungen von Geng et al. aus dem Jahr 2017 (siehe Abbildung 6) zeigten, dass die Beziehung zwischen Produktivität und Wärmeempfindungswerten ein ähnliches, aber variierendes Muster aufwies. Alle angeführten Studien stimmten darin überein, dass die höchste Produktivität bei einem Wärmeempfindungswert zwischen -1 und 0 erreicht wurde, sprich, wenn die Nutzenden die Temperatur als „leicht kühl“ oder „neutral“ empfunden haben. Jedoch gab es leichte Unterschiede hinsichtlich des genauen optimalen Wärmeempfindungswerts. Einige Studien legten nahe, dass dieser Wert näher bei 0 liegt (wie in der vorliegenden Arbeit dargestellt), während andere frühere Studien einen Wert näher bei -1 bevorzugten. Diese Diskrepanz könnte auf die unterschiedlichen Versuchspopulationen zurückzuführen sein, deren Produktivität durch Wärmeempfindungen unterschiedlich beeinflusst ist [28].

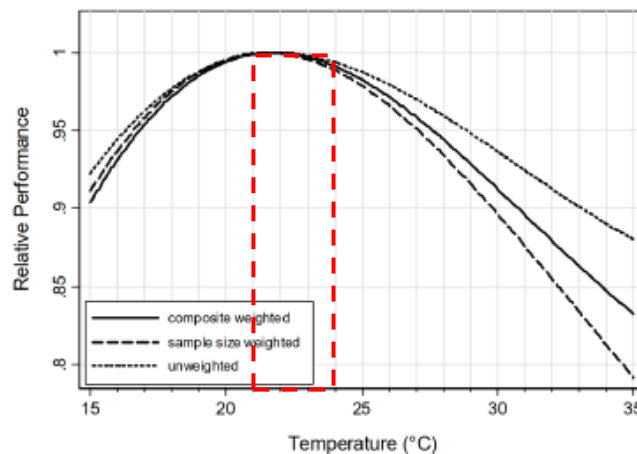


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Produktivität (in%; 1 = 100%) und Temperatur (in °C) [adaptiert von 29]

Im Artikel von Seppänen, Fisk und Lei (2006) wird die Beziehung zwischen Temperatur und Produktivität in Büroumgebungen gezeigt und dass die optimale Temperatur für maximale Produktivität zwischen 21 °C und 24 °C liegt (siehe Abbildung 7). Innerhalb dieses Bereichs gibt es keine signifikanten negativen Auswirkungen auf die Leistung. Bei Temperaturen über 24 °C beginnt die Produktivität jedoch signifikant zu sinken, mit einem Rückgang von etwa 2% pro °C in den Bereichen von 25 °C bis 32 °C. Es wird auch die Notwendigkeit betont, dass diese Erkenntnisse in die Planung und den Betrieb von Bürogebäuden zu integrieren sind, um die Gesundheit und Produktivität der Mitarbeiter zu fördern. Eine angemessene Temperaturkontrolle ist somit entscheidend, um die Leistung zu maximieren und negative Effekte zu vermeiden [29].

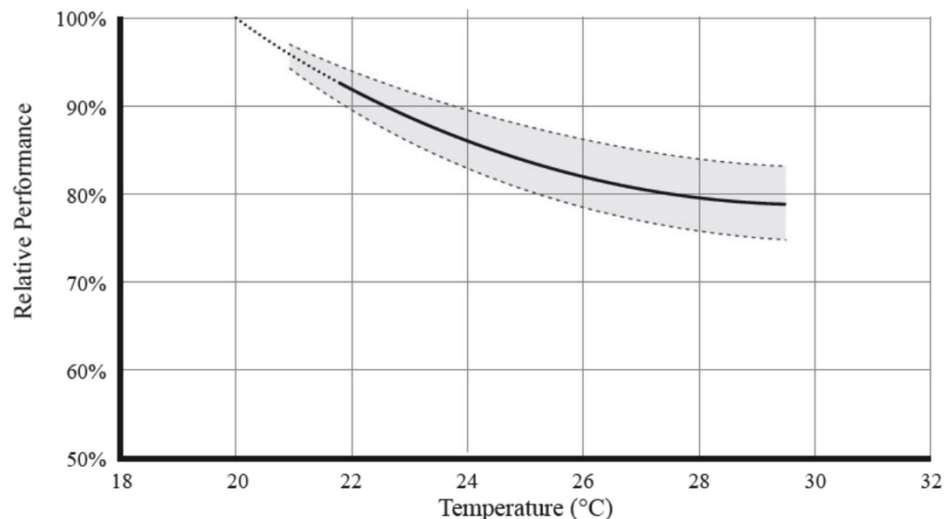


Abbildung 8: Leistung von Schularbeiten als Funktion der Klassenraumtemperatur [30]

Eine weitere Veröffentlichung von Wargocki et al. aus dem Jahr 2019 zeigt die Auswirkungen von Klassenzimmertemperaturen auf die schulische Leistung von Kindern, basierend auf einer Analyse von 18 verschiedenen Studien. Die aus der Veröffentlichung entnommen Abbildung (siehe Abbildung 8) zeigt, dass die Leistung von Lernenden in Abhängigkeit von der Klassenzimmertemperatur variiert. Die Abbildung stellt dar, dass die optimale Leistung bei 20 °C erreicht wird, wobei die Leistung bei höheren Temperaturen abnimmt. Die Kurve in der Abbildung verdeutlicht, dass die größte Leistungssteigerung beim Absenken der Temperatur von 30 °C auf 20 °C zu erwarten ist, was eine Verbesserung von etwa 20% bedeutet. Die Abbildung unterstreicht die Notwendigkeit, angemessene Temperaturen in Klassenzimmern zu gewährleisten, um die Lernbedingungen zu optimieren und die schulische Leistung der Lernenden zu fördern. Wichtig anzumerken ist, dass die Leistung bei einer Temperatur von 20 °C als Referenz verwendet wurde und dann die Leistungsänderung bei jeder anderen Temperatur über 20 °C anhand der Beziehung berechnet, welche die fraktionale Leistungsänderung pro 1 °C angibt [30].

### 2.3.2 Behaglichkeitsindex und Interpretation der thermischen Behaglichkeit

Thermische Behaglichkeit beschreibt einen Zustand, in dem eine Person mit seiner thermischen Umgebung zufrieden ist und keine störende lokale Abkühlung oder Erwärmung an irgendeiner Körperstelle verspürt. Die Erfüllung der Wärmebilanzgleichung ist die erste Bedingung für thermische Behaglichkeit. Dennoch kann eine Person trotz ausgeglichener Wärmebilanz die Umgebung als zu kalt oder zu warm empfinden [27].

Dieses Gleichgewicht wird beeinflusst von Faktoren wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, mittlere Strahlungswärme und Luftgeschwindigkeit. Um ein komfortables Wärmeempfinden für die Nutzenden zu gewährleisten, müssen die genannten Faktoren gemessen oder geschätzt werden. Diese Parameter werden dann verwendet, um den PMV (Predicted Mean Vote) zu berechnen. Der PMV-Wert hilft, das thermische Komfortempfinden der Nutzenden vorherzusagen und sicherzustellen, dass die Umgebungsbedingungen akzeptabel sind [6].

Zwei wichtige Begriffe werden in Bezug auf Behaglichkeit immer wieder verwendet.

Der **PMV-Index** (engl.: Predicted Mean Vote; deut.: vorausgesagtes mittleres Votum) ist eine Kennzahl, die die durchschnittliche Einschätzung der thermischen Behaglichkeit in einer Gruppe von Menschen angibt [6].

Der **PPD-Index** (engl.: Predicted Percentage of Dissatisfied; deut.: Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen) gibt den prozentualen Anteil der Menschen an, die voraussichtlich mit den thermischen Bedingungen unzufrieden sein werden [6].

Der PMV-Index gibt den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung einer großen Gruppe von Menschen an. Dieser wird aufgrund einer 7-stufigen Klimabeurteilungsskala (siehe Tabelle 5) vorhergesagt. Berechnet durch eine Gleichung (siehe Formel (2)), die Parameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, mittlerer Strahlungswärme, Aktivitätsgrad, Kleidung und Luftgeschwindigkeit einbezieht, kann der PMV-Index negativ, neutral oder positiv sein und spiegelt die allgemeine Zufriedenheit mit den thermischen Bedingungen wider [6].

Tabelle 5: ÖNORM 7730 Tabelle 1: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala [6]

+ 3	heiß
+ 2	warm
+ 1	etwas warm
0	neutral
– 1	etwas kühl
– 2	kühl
– 3	kalt

Der PPD-Index gibt an, welcher Prozentsatz der Menschen voraussichtlich mit den gegebenen thermischen Bedingungen unzufrieden sein wird. Dieser Faktor berücksichtigt individuelle Unterschiede in der Wahrnehmung von Temperatur [6].

Nachfolgend ist die Formel zu Berechnung der PMV laut ÖNORM EN ISO 7730 angeführt [6]:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] * \left( \begin{aligned} &(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5\,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ &- 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5\,867 - p_a) - 0,001\,4 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &- 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right) \quad (2)$$

Mit:

$M$  = Energieumsatz, in (W/m<sup>2</sup>);

$W$  = wirksame mechanische Leistung, in (W/m<sup>2</sup>);

$I_{cl}$  = Bekleidungsisolations, in (m<sup>2</sup> K/W);

$f_{cl}$  = der Bekleidungsflächenfaktor;

$t_a$  = Lufttemperatur, in (°C);

$t_r$  = mittlere Strahlungstemperatur, in (°C);

$v_{ar}$  = relative Luftgeschwindigkeit, in (m/s);

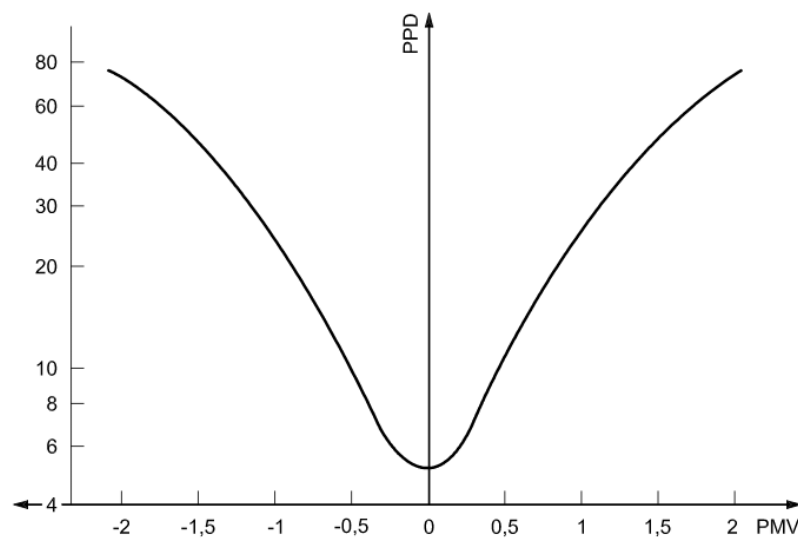
$p_a$  = Wasserdampfpartialdruck, in (Pa);

$h_c$  = konvektive Wärmeübergangskoeffizient, in [W/(m<sup>2</sup> K)];

$t_{cl}$  = Oberflächentemperatur der Bekleidung, in (°C).

Durch den Zusammenhang zwischen dem PMV-Index und dem PPD-Index kann mittels der PPD-Formel (3), der Prozentsatz der unzufriedenen Personen ermittelt werden [6].

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (3)$$



### Legende

PMV vorausgesagtes mittleres Votum

PPD vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen, in %

Abbildung 9: Bild 1 - PPD als Funktion des PMV [6]

Der PPD zeigt den Prozentsatz der Personen an, die mit der thermischen Umgebung unzufrieden sind. In der Abbildung 9 wird ersichtlich, dass bei einem PMV von 0 (neutral) der PPD am niedrigsten ist, was bedeutet, dass die meisten Menschen mit der Umgebung zufrieden sind. Je weiter der PMV-Index von 0 abweicht, desto höher ist der PPD, was auf eine höhere Unzufriedenheit hinweist [6].

Zusammenfassend zeigt Tabelle 6 die entsprechende Unzufriedenheit in Abhängigkeit vom PMV. Dies hilft bei der Bewertung und Gestaltung von Raumklimasystemen, um eine maximale Zufriedenheit der Raumnutzenden zu erreichen [6].

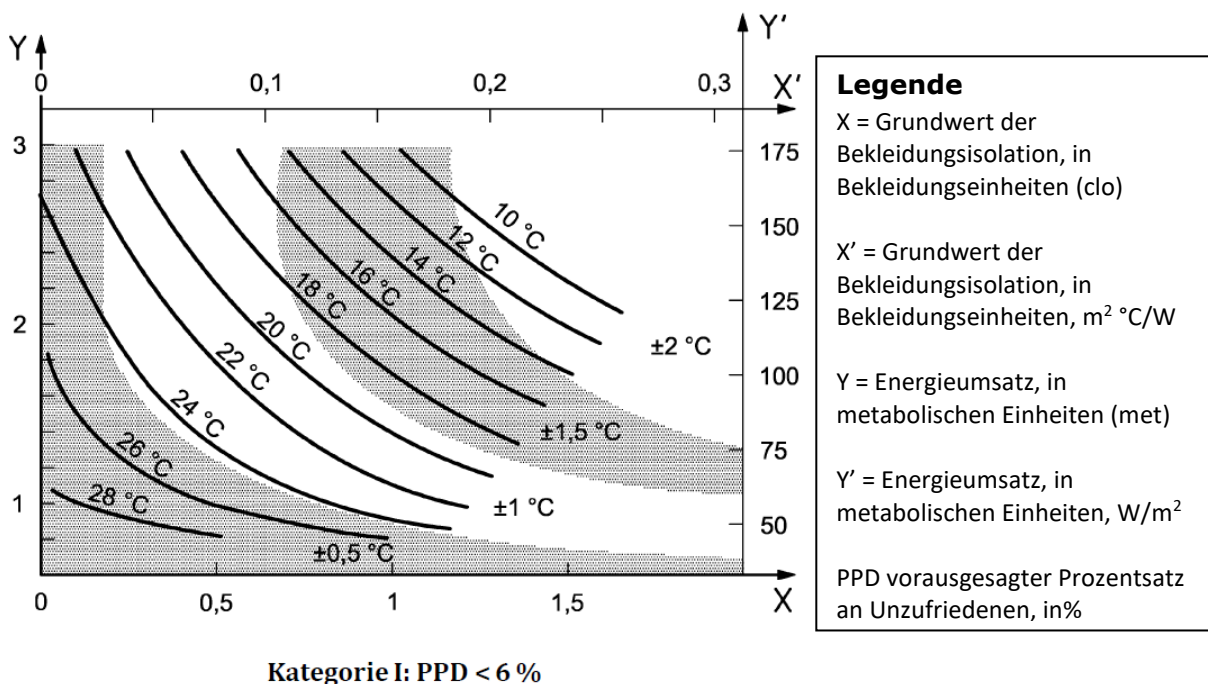
Tabelle 6: Verteilung der individuellen Klima urteile für verschiedene Werte des mittleren Votums [6]

PMV	PPD	Personen, die eine Beurteilung abgeben		
		%		
		0	– 1, 0 oder + 1	– 2, – 1, 0, + 1 oder + 2
+ 2	75	5	25	70
+ 1	25	30	75	95
+ 0,5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
– 0,5	10	55	90	98
– 1	25	30	75	95
– 2	75	5	25	70
<sup>a</sup> Basiert auf Experimente mit 1 300 Personen.				

### Tabelle 7: Beispiele für Energieumsätze [6]

Aktivität	Energieumsatz	
	Wm <sup>-2</sup>	met
Angelehnt	46	0,8
Sitzend, entspannt	58	1,0
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	70	1,2
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	93	1,6
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,0
Gehen auf der Ebene:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Die optimale operative Temperatur in einem Raum, die einem PMV-Wert von 0 entspricht, wird durch die Aktivität und die Bekleidung der Nutzenden bestimmt. Die Abbildung 10 zeigt für Kategorie I, die ideale operative Temperatur sowie den zulässigen Temperaturbereich, abhängig von Bekleidung und Aktivität. Um Schwankungen auszugleichen, sollte die operative Temperatur stets innerhalb der gekennzeichneten Bereiche liegen. Die Funktionen basieren auf einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% und einer angenommenen Luftgeschwindigkeit von weniger als 0,1 m/s im Raum [6].



**Abbildung 10: Bereiche um die optimale Temperatur in Abhängigkeit von Aktivität und Kleidung [6]**



### 2.3.3 CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die „Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft: Kohlendioxid als Lüftungsparameter“ (2017), befasst sich mit der Messung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in Innenräumen als Lüftungsparameter. Kohlendioxid ist ein natürlicher Bestandteil der Luft, die Menschen und Tiere beim Atmen abgeben. Wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum hoch ist, kann dies auf eine unzureichende Lüftung hindeuten. Die Einhaltung der Richtlinie kann dazu beitragen, die Gesundheit und das Wohlbefinden von Menschen in Innenräumen zu verbessern, indem sie sicherstellt, dass ausreichend frische Luft zur Verfügung steht und die Konzentration von Schadstoffen, einschließlich CO<sub>2</sub>, auf einem akzeptablen Niveau bleibt [7].

Die Richtlinien empfehlen maximale CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für verschiedene Arten von Innenräumen wie Büros, Schulen und Wohnungen. Diese bestimmt auch die Häufigkeit und den Zeitpunkt der Lüftung, um eine angemessene Raumluftqualität zu gewährleisten. Die Richtlinie empfiehlt außerdem die Verwendung von Kohlendioxidmessgeräten zur Überwachung des Kohlendioxidgehalts in Innenräumen und zur Bewertung der Wirksamkeit von Lüftungsmaßnahmen [7].

Die Pettenkofer-Zahl welche ein Richtwert von 1000 ppm (d.h. 0,1 Vol.-%) wurde vom deutschen Hygieniker Max von Pettenkofer als die angestrebte Obergrenze für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Raumluft in Aufenthaltsräumen bzw. Wohngebäuden festgelegt. Wird dieser Wert überstiegen muss das Lüftungskonzept je nach Belegung und Art der Nutzung des Raumes überdacht werden bzw. die Maßnahmen, welche getroffen wurden, noch weiter ausgebaut bzw. verstärkt werden [31].

Um eine grobe Abschätzung bzgl. der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu bekommen, gibt es für Schulklassen ein Rechenblatt von Tappler aus dem Jahr 2023. Dieses Rechenblatt zieht Raumgröße, Belegung, Anzahl der Personen in Betracht, um somit den geforderten Zustand in Bezug auf Lüftungssysteme gerecht zu werden [32].

Um eine gewisse Einschätzung bezüglich der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu bekommen, besagt der Richtwert von einer Innenluftkonzentration von 1000 ppm, (Außenluftkonzentration von ca. 400 ppm), dass rund 20% der Personen die Raumluft als unbefriedigend empfinden (siehe Formel (4)). Einen Zusammenhang zwischen der Konzentration und den Personen, welche sich mit der Raumluft nicht zufriedengestellt fühlen, ist in der Abbildung 11 gut veranschaulicht [31].

$$PD = 395 * e^{(-15,15 * C^{-0,25})} \quad (4)$$

Mit:

PD... Anteil der unzufriedenen Personen in%

C... Konzentration an CO<sub>2</sub> in ppm über der Außenluftkonzentration

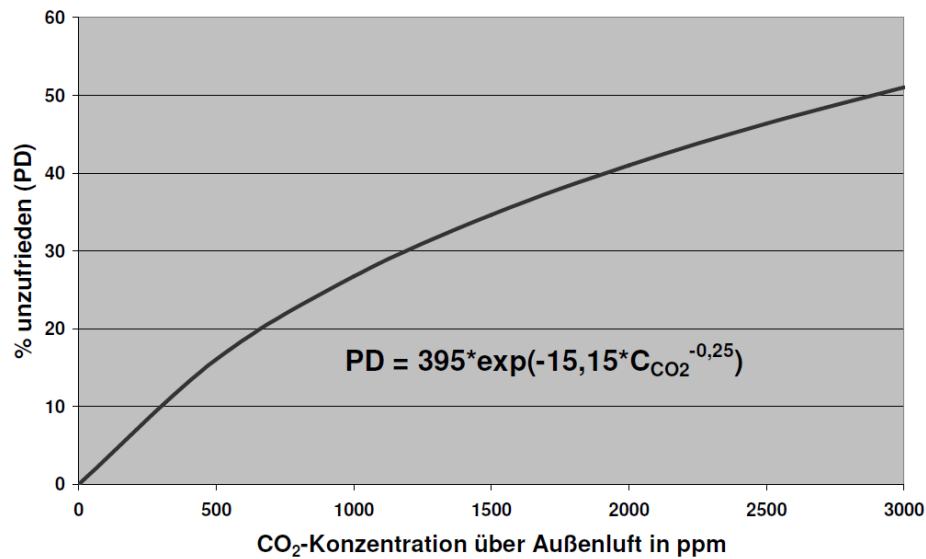


Abbildung 11: Zusammenhang CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] und unzufriedenen Personen [%] [7]

Obwohl die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den normalen Innenraumkonzentrationen in der Regel kein direktes Gesundheitsrisiko darstellt, können höhere Konzentrationen (über 1000 ppm) dazu führen, dass sich Menschen unwohl fühlen und Beeinträchtigungen ihren kognitiven Fähigkeiten erleben [7].

Konzentrationen über 1000 ppm können jedoch dazu führen, dass Menschen Symptome wie Kopfschmerzen, Müdigkeit und Konzentrationsprobleme erleben. Noch höhere Konzentrationen können auch zu einer weiteren Verschlechterung der Luftqualität und einer Erhöhung des Risikos von Atemwegserkrankungen führen [7].

Die durchschnittliche globale CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre hat im Jahr 2023 etwa 422 ppm erreicht [33]. Diese Werte werden kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet. In städtischen Gebieten, insbesondere in stark befahrenen und dicht besiedelten Stadtzentren, können die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufgrund lokaler Emissionen wie Verkehr, Industrie und Heizung höher sein als der globale Durchschnitt [33]. In Tabelle 8 wird die Raumluftqualität anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration klassifiziert. Dabei wird veranschaulicht, wie stark der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft erhöht sein darf.

Tabelle 8: Klassifizierung der Raumluftqualität nach ÖNORM EN 13779 [7]

Kategorie	Beschreibung der Raumluftqualität	CO <sub>2</sub> -Konzentration über Außenluftwert [ppm]	Außenlufrate pro Person und Stunde – Nichtraucher (m <sup>3</sup> *Person <sup>-1</sup> *h <sup>-1</sup> )
IDA 1	Hoch	≤ 400	> 54
IDA 2	Mittel	400 - 600	36 - 54
IDA 3	Mäßig	600 - 1000	22 - 36
IDA 4	Niedrig	> 1000	< 22

Laut dem Bundesgesundheitsblatt, Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen (2018), wird die Qualität der Innenraumlufth in Lehrräumen hauptsächlich durch die CO<sub>2</sub>-Konzentration bestimmt. Diese dient nicht nur als Hauptkriterium für eine gute oder angemessene Raumlufthqualität, sondern auch als Indikator für andere Luftqualitätsparameter, wie etwa flüchtige organische Verbindungen (VOC) und andere Substanzen. Für Bildungseinrichtungen jeglicher Art gilt ein Richtwert von durchschnittlich 1000 ppm CO<sub>2</sub> in der Raumlufth einzuhalten. Dieser Durchschnittswert bezieht sich auf eine Nutzungseinheit, was in Schulen typischerweise einer Unterrichtsstunde und an Universitäten einer Vorlesungseinheit entspricht. Kurzzeitige Überschreitungen dieses Wertes, beispielsweise Spitzenwerte von 1500 ppm, sind akzeptabel, jedoch keineswegs erstrebenswert, solange der Durchschnittswert von 1000 ppm über die gesamte Unterrichtseinheit eingehalten wird [9]. Anbei wird in Tabelle 9 eine Klassifizierung bzgl. der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen abgebildet.

**Tabelle 9: Klassifizierung und Richtwerte für Raumlufthqualität und der CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm [7]**

Klasse	Beschreibung	Arithmetischer Mittelwert der Momentanwerte für CO <sub>2</sub> [ppm]
Klasse 1	Ziel für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	$\leq 800$
Klasse 2	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen	$\leq 1000$
Klasse 3	Allgemeiner Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	$\leq 1400$
Klasse 4	Richtwert für Innenräume mit geringer Nutzungsdauer durch Personen	$\leq 5000$
Außerhalb der Klassen	Für die Nutzung durch Personen nicht akzeptabel	$> 5000$

Die internationale Norm ISO 16000-41 unterscheidet drei Qualitätsstufen für Innenräume (siehe Tabelle 10).

Für die Einstufung in die höchste Kategorie, Qualitätsklasse "A", legt die Norm in Tabelle A.2 einen spezifischen Grenzwert fest: Die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration, berechnet als arithmetisches Mittel über den gesamten Bewertungszeitraum, darf 1.000 ppm (parts per million) nicht übersteigen [34].

**Tabelle 10: Vorgeschlagene Qualitätsklassen für CO<sub>2</sub> laut Tab. A.2 in ISO 16000-41 (2023) [34]**

**Table A.2 — Example of quality classes for CO<sub>2</sub>**

Quality class	Arithmetic mean for class limits for CO <sub>2</sub> ppm absolute	Description of the quality classes
A	≤1 000	Requirements for indoor rooms for the continuous stay of persons in which intellectual activities are carried out or which are used for regeneration
B	1 001 to 1 400	General requirements for indoor rooms for the continuous stay of persons
C	1 401 to 5 000	Requirements for indoor rooms with brief use by persons
Outside the quality classes	>5 000	Not acceptable for use by persons

Laut der Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Innenraumluft eine Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe für Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (2008) wird das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) seit über 150 Jahren als Indikator für die Luftqualität in Innenräumen anerkannt. In Tabelle 11 kategorisieren aktuelle Richtlinien die CO<sub>2</sub>-Konzentration wie folgt: Unter 1000 ppm gilt als unbedenklich, 1000-2000 ppm als auffällig und über 2000 ppm als hygienisch inakzeptabel. Die Vorschläge der Ad-hoc-Arbeitsgruppe bieten eine wertvolle Orientierung für die Gestaltung effektiver Lüftungsstrategien in verschiedenen Innenräumen. Jedoch gibt sie keine konkreten Angaben wie ein Aufenthaltsraum/Klassenzimmer klassifiziert werden soll [35].

**Tabelle 11: Beurteilungswert CO<sub>2</sub>-Konzentration laut Ad-hoc Arbeitsgruppe [34]**

Hygienische Bewertung der Kohlendioxid-Konzentration in der Innenraumluft mithilfe von Leitwerten (bezogen auf die aktuell vorliegende Konzentration – Momentanwert). Die Empfehlungen mit kurzfristig durchzuführenden Maßnahmen bauen aufeinander auf. Die Kohlendioxid-Leitwerte können z. B. im Sinne einer Lüftungsampel (grün–gelb–rot) verwendet werden		
CO <sub>2</sub> -Konzentration (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfehlungen
<1000	Hygienisch unbedenklich	Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
>2000	Hygienisch inakzeptabel	Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen

In den letzten Jahrzehnten wurden die Wärmedämmung und Dichtheit der Gebäudehülle, insbesondere bei Fassaden und Fenstern, deutlich verbessert, wodurch eine mechanische Lüftung der Klassenräume unverzichtbar geworden ist. Ohne ausreichende Lüftung besteht nicht nur die Gefahr von Schimmelproblemen, sondern auch, dass sich die Luftqualität, in Klassenräume mit bis zu 30 Lernenden, stark verschlechtern kann [36].

Eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration wie oben bereits beschrieben kann zu Leistungseinbußen, Kopfschmerzen und Unwohlsein führen [7] [35] [9].

Untersuchungen zeigen, dass rein mit der natürlichen Lüftung, der sogenannten Fensterlüftung, die empfohlenen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte oft deutlich überschritten werden. Diese Werte können bis zum Achtfachen der empfohlenen CO<sub>2</sub>-Konzentration ausmachen. Daher empfehlen Experten den Schulen, mechanische Lüftungssysteme zu installieren, um die Luftqualität in den Klassenzimmern sicherzustellen [36]. Dies wird in Abbildung 12 grafisch dargestellt.

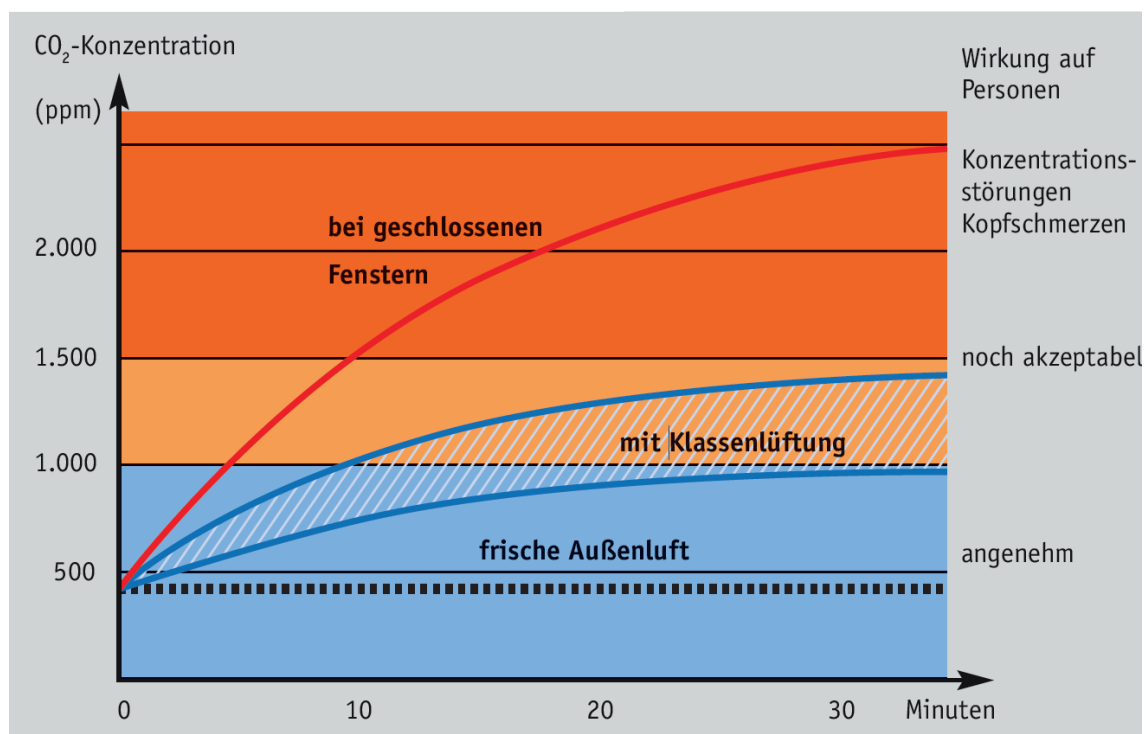


Abbildung 12: Lerngerechte CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] zu Zeit [min] [36]

Zusammenfassend ist also eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von unter 1000 ppm erstrebenswert, wenn es sich um eine unbedenkliche und „gute“ Raumluft handeln soll. Weiterführend wäre ein Wert von 800 ppm, laut den oben genannten Normen, für ein hohes Maß der Erwartung wünschenswert.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration steht in einem engen Zusammenhang mit dem Infektionsrisiko bei verschiedenen Erkrankungen, welche über Aerosole verbreitet werden. Ein interessanter Feldtest des Hermann-Rietschel-Instituts an der Technischen Universität Berlin aus dem Jahr 2022 hat gezeigt, dass bei den Corona-Maßnahmen vor allem die CO<sub>2</sub>-Konzentration entscheidend ist [70].

Eine infizierte Person im Raum gibt kontinuierlich virenhaltige Aerosole ab, die von den anwesenden Personen fortwährend eingeatmet werden. Daher wird empfohlen, laut dieser Untersuchungen in den Hörsälen, für die Risikobewertung nicht nur die CO<sub>2</sub>-Konzentration, sondern auch die Dauer der gefährdeten Personen gegenüber dieser Konzentration zu berücksichtigen. Die nachfolgende Abbildung 13 verdeutlicht diese Erkenntnisse. Diese zeigt, wie hoch die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei unterschiedlichen Lüftungsszenarien ist und wie lange man sich in diesen Bedingungen aufhalten kann, sowie in welche Risikokategorie man fällt [70].

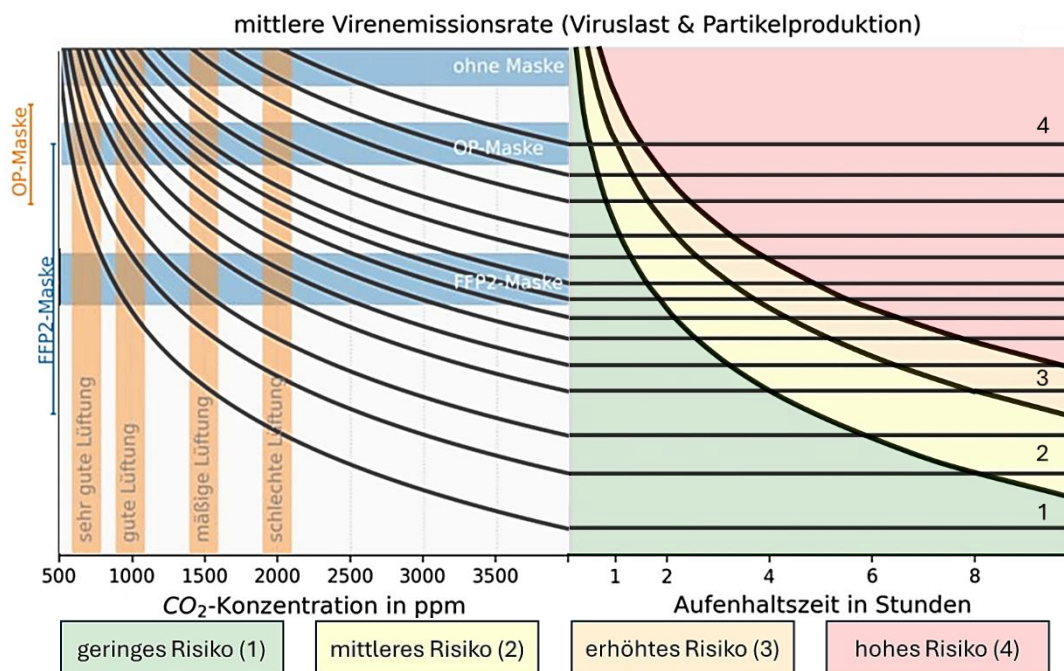


Abbildung 13: CO<sub>2</sub>-Konzentration: Diagramm zur Corona-Risikolosen Aufenthaltsdauer in Räumen [adaptiert von 70]

Eine weitere wichtige Erkenntnis von Rudnick und Milton aus dem Jahr 2003 ist, dass das Übertragungsrisiko von luftübertragenen Infektionen in Innenräumen anhand der  $\text{CO}_2$ -Konzentration abgeschätzt werden kann. Die nachstehende Abbildung 14 zeigt genau dies: Anhand der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und der Anzahl der Personen im Raum kann die Basisreproduktionszahl bestimmt werden [71].

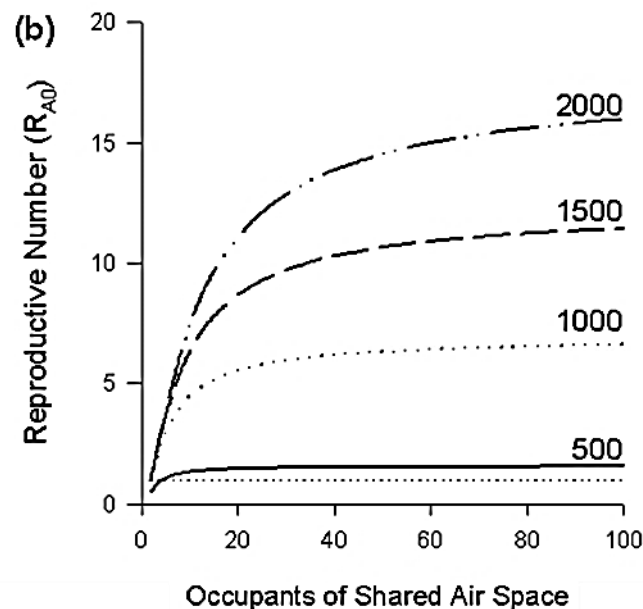


Fig. 2  $R_{A0}$  for (a) measles, (b) influenza, and (c) rhinovirus in a school or office as a function of number of occupants: each curve represents a different mean  $\text{CO}_2$  concentration. (a) We assumed  $q = 570$  quanta/h,  $t = 10$  h,  $C_o = 350$  p.p.m., and  $C_a = 37,500$  p.p.m. (b) We assumed  $q = 100$  quanta/h,  $t = 4$  h. (c) We assumed  $q =$  quanta/h,  $t = 24$  h.

Abbildung 14: Personen in Raum zu Reproduktionsrate, in Abhängigkeit der  $\text{CO}_2$ -Konzentration [ppm] [71]



### 2.3.4 Relative Luftfeuchtigkeit

Allgemein bezeichnet die Luftfeuchtigkeit den Anteil an Wasserdampf in der Luft. Sie wird als prozentuales Verhältnis der aktuellen Feuchtigkeitsmenge zur maximal möglichen Menge bei gleicher Temperatur und Druck ausgedrückt. Ein Wert von 0% bedeutet, dass die Luft völlig trocken wäre, während bei 100% vollständige Sättigung gegeben wäre, wodurch dann zusätzliche Feuchtigkeit kondensieren würde [37].

Üblicherweise werden zwei unterschiedliche Verhältnisse bzgl. der Luftfeuchtigkeit angegeben, die absolute und die relative Luftfeuchtigkeit. Die absolute Luftfeuchtigkeit misst die Menge an Wasserdampf in einem bestimmten Luftvolumen ( $\text{g/m}^3$ ). Die relative Luftfeuchtigkeit gibt das Verhältnis des aktuellen Wasserdampfgehalts zur maximal möglichen Menge bei derselben Temperatur an (%) [6, 13].

Daraus folgt, dass „warme“ Luft mehr Feuchtigkeit halten kann als „kalte“ Luft. Daher kann Feuchtigkeit kondensieren, wenn warme Luft abkühlt, wie etwa an kalten Fenstern im Winter. Wenn die Luft jedoch erwärmt wird, sinkt der relative Feuchtigkeitsgehalt.

Luftfeuchtigkeit beeinflusst das menschliche Wohlbefinden. Eine hohe Luftfeuchtigkeit kann die Temperatur wärmer erscheinen lassen, während niedrige Luftfeuchtigkeit die Haut und Atemwege austrocknen kann. Ohne den Einsatz von Luftbefeuchtern kann in natürlich oder mechanisch gelüfteten Gebäuden bei kalten und trockenen Winterbedingungen, die relative Luftfeuchtigkeit im Raum auf unzureichende Werte absinkt [13, 37].

Die Kriterien, die bei der Auslegung und Bemessung von Räumen und zentralen Lüftungssystemen verwendet werden, müssen auch bei Energieberechnungen berücksichtigt werden. Die Raumluft sollte nicht so stark entfeuchtet werden, dass die relative Luftfeuchtigkeit unter vorab festgelegten Werte fällt, und sie sollte auch nicht so stark befeuchtet werden, dass die relative Luftfeuchtigkeit die vorab festgelegten Werte überschreitet [5].

Die Luftfeuchtigkeit in Innenräumen kann direkte oder indirekte Auswirkungen auf die Nutzenden haben. Beispielsweise können hohe Luftfeuchtigkeit, Kondenswasser oder eindringende Feuchtigkeit die Schimmelbildung begünstigen, was zu Allergien und unangenehmen Gerüchen führen kann. Niedrige Luftfeuchtigkeit kann bei manchen Nutzenden zur Austrocknung bzw. zu Reizungen der Schleimhäute der oberen Atemwege und der Bindehäute der Augen führen und macht diese empfindlicher für chemische Luftschadstoffe, Stäube, Mikroorganismen und Viren, wie zum Beispiel COVID-19. Laut der Literatur treten in der Regel selten Probleme auf, wenn die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 30% und 70% liegt und keine Kondensation vorhanden ist [13, 25, 31].



Das Diagramm von Leusden und Freymark (1951) (siehe Abbildung 15) veranschaulicht die optimale Kombination von Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit für das menschliche Wohlbefinden und den Komfort. Es zeigt, dass eine Raumtemperatur im Allgemeinen zwischen 20 °C und 24 °C als optimal empfunden wird. Innerhalb dieses Temperaturbereichs fühlen sich die meisten Menschen wohl. Ebenso wird eine ideale relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 60% über alle Jahreszeiten angegeben. In diesem Feuchtigkeitsbereich werden gesundheitliche Beschwerden und Komfortprobleme minimiert [26, 38].

Weiters verdeutlicht die Abbildung 15 zudem die Wechselwirkung zwischen Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Beispielsweise wird bei höheren Temperaturen eine etwas niedrigere Luftfeuchtigkeit als angenehm empfunden, während bei niedrigeren Temperaturen eine höhere Luftfeuchtigkeit bevorzugt wird [26, 38].

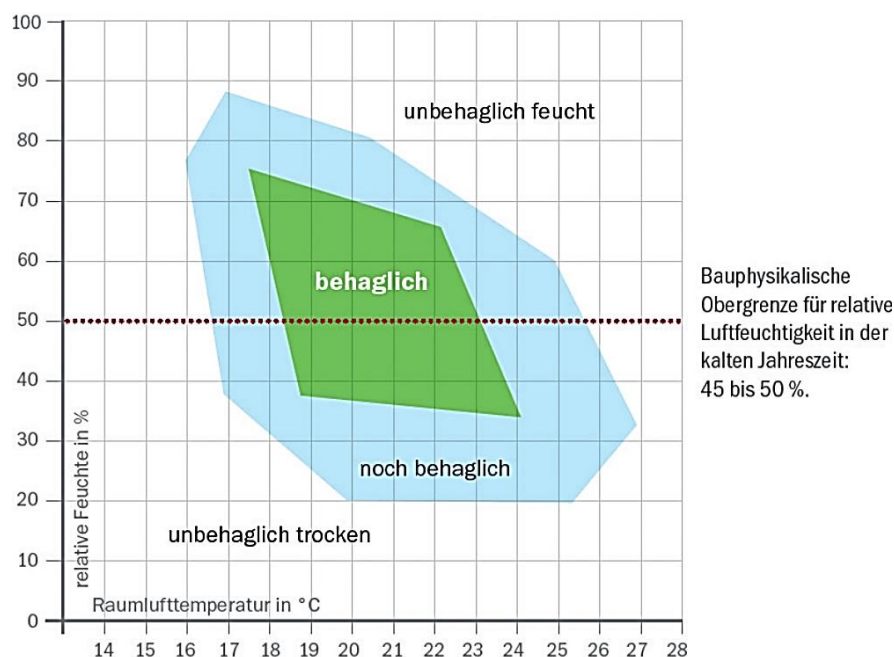


Abbildung 15: Relative Feuchte in [%] zu Raumlufttemperatur in [°C] [25]

In Bildungs- und Betreuungseinrichtungen ist die relative Luftfeuchtigkeit in der kalten Jahreszeit häufig zu niedrig, da keine relevanten Feuchtequellen außer den Nutzenden vorhanden sind. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit sollte idealerweise nicht unter 30% liegen. Bei sehr kalten Außentemperaturen kann kurzfristig ein Wert von 20% als untere Grenze akzeptabel sein. Die oberen Grenzen der Luftfeuchtigkeit sind durch bauliche Gegebenheiten bedingt und sollten ähnlich wie in Wohnräumen angesetzt werden [25].

Zur Kontrolle der Luftfeuchtigkeit kann der Einsatz von kalibrierten Thermo-Hygrometern hilfreich sein, diese helfen die Luftfeuchte zu regulieren. Mechanische Lüftungssysteme mit Feuchterückgewinnung können eingesetzt werden, um die Luftfeuchtigkeit in kalten Jahreszeiten zu erhöhen und zu verhindern, dass sie unter den Zielwert von 30% absinkt [25].

### 2.3.5 Akustik

Die Behaglichkeit in Bezug auf die Akustik, in Form von Nachhallzeit, Schalldruckpegel, Hintergrundgeräuschen und Signal-Rausch-Verhältnis, ist ebenfalls essenziell, wenn es um die individuelle Behaglichkeit des Einzelnen geht. Somit kann diese, zusätzlich zur thermischen Behaglichkeit, wie in den vorherigen Kapiteln schon erläutert, Erkenntnisse über die akustische Behaglichkeit geben.

Beim auditiven Lernen sind einerseits die Akustik und andererseits das Gehör des Nutzenden ausschlaggebend. Eine laute akustische Umgebung verringert den Unterrichtseffekt erheblich. In modernen Klassenzimmern verstehen Jugendliche aufgrund von Lärm und Nachhall 25 bis 30% dessen nicht, was die Lehrperson sagt. Es ist wichtig, die Faktoren zu verstehen, die über den Erfolg (oder Misserfolg) einer akustischen Umgebung entscheiden. Die Akustik besteht, wie oben bereits erwähnt, aus den Hauptkomponenten: Nachhallzeit, Schalldruckpegel, Hintergrundgeräuschen und Signal-Rausch-Verhältnis (SR/SRV; engl. signal-noise-ratio SNR) [39].

Die **Nachhallzeit** ist die Zeitspanne, die vergeht, bis der Schallpegel in einem Raum nach dem Abschalten der Schallquelle um 60 Dezibel (dB) abnimmt. Sie ist ein Maß für die akustische Qualität eines Raums und beeinflusst, wie lange Schall im Raum bleibt und wie klar oder verhallt er wahrgenommen wird [40].

Für Klassenräume, welche ein Raumvolumen bis ca. 250 m<sup>3</sup> aufweisen, ist ein Richtwert für die Nachhallzeiten von 0,5 bis 0,6 Sekunden einzuhalten. Weiters gib auch die Guideline von der WHO einen Richtwert von 0,6 Sekunden vor. Falls dies nicht der Fall ist, kann es dazu führen, dass das Stressniveau der Lernenden steigt und ein erhöhter Blutdruck als zwangsläufige Folge anhaltender Lärmbelastung auftritt. Ferner kann damit auch ein negativer Effekt auf die Schulleistung einhergehen [41, 42].

Die DIN 18041 „Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung“ legt die akustische Gestaltung von Räumen fest, um eine gute Sprachverständlichkeit und eine angenehme Raumakustik zu gewährleisten. Um eine gute Hörbarkeit in Räumen zu gewährleisten, müssen Geometrie, Größe und Ausstattung der Räume sowie der Gesamtschalldruckpegel akustisch aufeinander abgestimmt sein. Insbesondere bei der Konzentration auf Sprachkommunikation ist dies zu berücksichtigen [42].

Die DIN 18041 stellt folgende Anforderungen an Klassen- und Unterrichtsräume:

**Tabelle 12: Ausschnitt Beschreibung der Nutzungsarten der Räume der Gruppe A laut DIN 18041 [42]**

Nutzungsart	Kurzbezeichnung und Beschreibung der Nutzungsart	Subjektive Wahrnehmung	Beispiele
A3	Kurzbezeichnung: „Sprache/Vortrag inklusiv“  Räume der Nutzungsart A2 für Personen, die in besonderer Weise auf gutes Sprachverstehen angewiesen sind  Erforderlich für inklusive Nutzung <sup>a</sup>	Sprachliche Darbietungen einzelner Sprecher erzielen eine hohe Sprachverständlichkeit, auch für Personen mit Höreinschränkungen oder bei z. B. fremdsprachlicher Nutzung.	Gerichts- und Ratssaal Gemeindesaal Hörsaal Versammlungsraum Schulaula
	Kurzbezeichnung: „Unterricht/Kommunikation“  Kommunikationsintensive Nutzungen mit mehreren gleichzeitigen Sprechern verteilt im Raum	Sprachliche Kommunikation ist mit mehreren (teilweise gleichzeitigen) Sprechern möglich.	Unterrichtsraum Differenzierungsraum Tagungsraum Besprechungsraum Konferenzraum Seminarraum Gruppenraum in Kindertageseinrichtungen, Pflegeeinrichtungen und Seniorenheimen

Laut OIB-5 und DIN 18041 geht hervor, dass für Klassenräume (Nutzungsart A3, siehe Tabelle 12) mit einem Volumen ( $V$ ) von  $30 \text{ m}^3$  bis  $1.000 \text{ m}^3$  und Oktavbänder von  $250 \text{ Hz}$  bis  $2.000 \text{ Hz}$ , die Nachhallzeit wie folgt berechnet werden darf. Die Ermittlung der Nachhallzeit hat nach dem Stand der Technik, wie nachfolgend dargestellt, zu erfolgen [42, 43].

$$T = 0,32 \log V - 0,17 \quad (5)$$

Mit:

$T$  = Nachhallzeit im Raum in [s]

$V$  = Volumen des Raumes in [ $\text{m}^3$ ]

Laut ÖNORM 8115-3 aus dem Jahr 2023 wird die empfohlene Nachhallzeit für die Hörsamkeit gemäß Formel (6) berechnet. In besonders sensiblen Bereichen (z. B. Bildungsraum, Gruppenraum in Pflegeeinrichtung und Seniorenheim) kann auch die Zuordnung zur Klasse A („hohe Qualität“) erforderlich werden [44].

Kommunikation Klasse A:  $T = T_{ref} \cdot 0,8 \cdot 0,8$ ; Toleranzbereich  $\pm 10\%$  für Volumen  $V$  ab  $20 \text{ m}^3$   
 Sprachdarbietung Klasse A:  $T = T_{ref} \cdot 0,8$ ; Toleranzbereich  $\pm 10\%$  für Volumen  $V$  ab  $20 \text{ m}^3$

Mit:

$T$  = Nachhallzeit im Raum in [s]

$T_{ref}$  = Referenz-Nachhallzeit im Raum in [s]

$$T_{ref} = 0,37 \cdot \lg V - 0,14 \quad (6)$$

$V$  = Volumen des Raumes in [ $\text{m}^3$ ]

Der **Schalldruckpegel** gibt die Lautstärke im Raum an. Der empfohlene maximale Störschalldruckpegel für Klassen- und Unterrichtsräume sollte laut DIN 18041 gemäß Kategorie A3 ein Maximum von 35 Dezibel betragen. Die Auslegung folgt, dass die sprachliche Kommunikation mit mehreren (teilweise gleichzeitigen) Sprechern möglich ist [42].

Der Auslegungswert, auf Basis der ÖNORM EN 16798-1, des äquivalenten Dauerschallpegels, für dauerhafte Quellen, beträgt in Schulen bzw. Klassenräume mit einem hohen Maß an Erwartungen, laut Kategorie 1 (IEQ<sub>1</sub>) 30 Dezibel und für ein mittleres Maß der Erwartung für Kategorie 2 (IEQ<sub>2</sub>) 34 Dezibel [5].

Der CIBSE Guide A empfiehlt für den maximal zulässigen **Hintergrundgeräuschpegel**, der durch gebäudetechnische Anlagen verursacht wird, einen Wert von 25 NR (31dB) bis 35 NR (41dB). Die Lärmbewertung (Noise Rating; NR) entspricht dem in Dezibel gemessenen Wert minus 6 [13].

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die spezifischen Anforderungen je nach Raumgröße und Nutzung variieren können. Daher sollte die DIN 18041 bei der Planung und Gestaltung von Räumen immer individuell betrachtet werden. [42]

Einen weiteren Anhaltspunkt bezüglich der Behaglichkeit in Bezug auf Akustik, gibt uns die ÖIB-Richtlinie 5 welche vorgibt, falls eine mechanische Lüftungsanlage in der Nutzungseinheit vorhanden ist, dürfen für Aufenthaltsräume (z.B. Klassenräume) die Geräusche dieser Lüftung, einen äquivalenten Anlagengeräuschpegel von 30 dB nicht überschreiten. Es ist anzumerken, dass die lufthygienische, mindesterforderliche Betriebsart der Anlage eingehalten werden muss [43].

Eine weitgehend störungsfreie Verständlichkeit ist bei Signal-Geräuschabständen von 10 dB bis 20 dB zu erwarten [42].

Um die vollständige Verständlichkeit von Sprache für Zuhörer mit normalem Gehör zu gewährleisten, sollte das **Signal-Rausch-Verhältnis** also der Unterschied zwischen Sprachpegel und Hintergrundgeräuschpegel, mindestens 15 dB betragen. Da der Schalldruckpegel bei normaler Sprache etwa 50 dB beträgt, wird die Sprachverständlichkeit in kleineren Räumen durch Hintergrundgeräusche mit einem Pegel von 35 dB oder mehr, beeinträchtigt. Dies gilt vor allem, wenn man das Augenmerk auf die Schulen legt in welchen komplizierte Daten verarbeitet werden müssen und konzentriert gearbeitet werden sollte [41].

Das Signal-Rausch-Verhältnis beschreibt das Verhältnis zwischen der Lautstärke der Stimme eines Signals (Lehrperson) und dem Hintergrundgeräusch (Rauschen) in einem Klassenzimmer. Ein höheres SNR bedeutet, dass die Ansprache der Lehrperson klarer und verständlicher ist, während ein niedriges SNR die Sprachverständlichkeit beeinträchtigen kann. Für Kinder mit normalem Gehör wird ein SNR von mindestens +15 Dezibel (dB) benötigt, um die Sprache effektiv zu verstehen, während Erwachsene ein SNR von nur +4 bis +6 Dezibel (dB) benötigen [39].

Die Lautstärke des Signals (Stimme) nimmt mit der Entfernung ab. Nach dem Inverse Square Law sinkt der Schallpegel um 6 dB für jede Verdopplung der Distanz. Ein Signal (Stimme) mit 60 dB in 1 Meter Entfernung wird in 2 Metern auf 54 dB und in 4 Metern auf 48 dB reduziert (siehe Abbildung 16). Hintergrundgeräusche durch Lernenden, Geräte oder externe Quellen bleiben jedoch konstant. Wenn die Stimme leiser wird, verringert sich der Unterschied zwischen Stimme und Geräuschen, was zu einem niedrigeren SNR führt. Hohe Nachhallzeiten in Räumen mit hohen Decken und glatten Oberflächen beeinträchtigen die Sprachverständlichkeit, da sich Geräusche überlagern und die Klarheit der Stimme vermindern. Schulgebäude sind oft nicht akustisch optimiert. Geräusche von Heizungsanlagen, Lüftungssystemen und anderen Geräten erhöhen den Umgebungslärm, während die Stimme der Lehrperson mit der Distanz, sprich Klassenraumlänge, abnimmt. Im besetzten Klassenzimmer steigt der Hintergrundlärm durch die Aktivitäten der Lernenden. Dies verringert den SNR weiter, da die lehrende Person lauter sprechen muss, um gehört zu werden. Die Abnahme des SNR trotz konstanter Hintergrundgeräusche resultiert aus der verringerten Lautstärke der Stimme über Distanz und der konstanten Präsenz von Hintergrundgeräuschen, verstärkt durch akustische Herausforderungen im Raum [39].

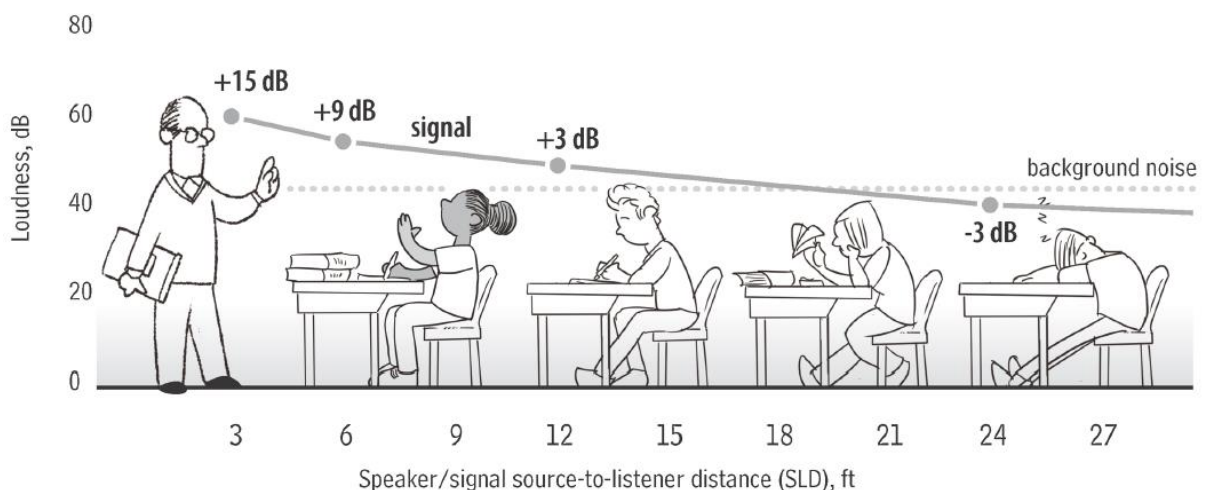


Abbildung 16: Loudness (dB) to speaker/signal source-to-listernes distance (ft) [39]

### 2.3.6 Zugluft

Um die Zugluftfreiheit ansatzweise zu garantieren, wird vorgeschlagen, in Unterrichtsräumen die Luftgeschwindigkeit 0,15 m/s nicht zu überschreiten. Es ist wichtig, dass die Zuluft der Lüftungssysteme mindestens 17 °C erreicht. Im Idealfall liegt die Temperaturdifferenz zwischen der einströmenden Luft und der Raumluft zwischen 2 °C und maximal 4 °C, abhängig von der Kategorie und dem Maß der Erwartung. Bei winterlichen Außentemperaturen können diese Anforderungen an Arbeits- bzw. übliche Aufenthaltsräume normalerweise nicht durch Fensterlüftung oder rein mechanische Lüftungsanlagen erfüllt werden [9].

Völlig stille Luft kann schnell stark „stickig“ wahrgenommen werden, aber auch Luft, die sich zu schnell bewegt, kann Unannehmlichkeiten hervorrufen. Eine schöne kühle Brise im Sommer kann im Winter zu einem lästigen kalten Luftzug werden. Somit ist auch die Luftbewegung in der Aufenthaltsbereichen für den Komfort ein wichtiges Indiz. Auf Grund des Luftzugs kann es auch zu lokaler thermischer Unbehaglichkeit einzelner Personen kommen. [6, 37]

Der Effekt der Luftbewegungen und seine kühlende Wirkung ist bekannt. Wenn die Zugluft jedoch zu stark ist, kann es zu Unannehmlichkeiten führen. Die Temperatur der bewegten Luft entspricht nicht unbedingt der Raumluft oder der einströmenden Lüftungsluft, sondern liegt im Allgemeinen zwischen diesen Werten. Ein Beispiel für eine sehr sensible Stelle des Körpers ist der Nackenbereich. Wird ein Luftstrom auf diesem Körperteil gerichtet, reduziert sich die maximal zulässige Luftgeschwindigkeit. Es sollte auch beachtet werden, dass Menschen auch toleranter reagieren, wenn die Richtungen der Luftbewegungen wechselt [13].

Die Zuglufttrate (DR, engl.: draught rate) wird mit einer speziellen Gleichung berechnet, welche auch als das Zugluftmodell bekannt und nachfolgend dargestellt ist. Das Zugluftmodell gibt einen vorhergesagten Prozentsatz der Personen an, die aufgrund des Luftzugs unzufrieden sind. Mit der Formel (7) kann somit die Behaglichkeit der Nutzenden in Bezug auf Zugluft berechnet werden [6].

$$DR = (34 - t_{a,l}) * (v_{a,l} - 0,05)^{0,62} * (0,37 * v_{a,l} * Tu + 3,14) \quad (7)$$

Mit:

$t_{a,l}$  = die lokale Lufttemperatur, in Grad Celsius, 20 °C bis 26 °C;

$v_{a,l}$  = die lokale mittlere Luftgeschwindigkeit, in Meter je Sekunde, < 0,5 m/s;

Tu = der lokale Turbulenzgrad, in Prozent, 10% bis 60% (falls der Wert nicht bekannt ist, darf 40% verwendet werden).

Das Zugluftmodell ist ein nützliches Werkzeug zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen, es kann angewendet werden bei Nutzenden, welche leichte, hauptsächlich sitzende Tätigkeiten ausüben. Es hilft, die Bedürfnisse der Nutzenden zu verstehen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um das Wohlbefinden zu verbessern [6].

## 2.4 Überblick über relevante Studien

In diesem Unterkapitel werden relevante Studien zu ähnlichen Themen im Hinblick auf diese Masterarbeit und deren Schulstudie herangezogen. Dabei finden eine Einordnung und Analyse dieser Vergleichsstudien statt.

### 2.4.1 CovED-Projekt

Ziel des CovEd-Projekts an der TU-Graz ist es, die Bildungsräume von Universitäten und Schulen schnell mit dem MPIC-Belüftungssystem zu erweitern und so die Funktionalität des Systems zu demonstrieren. Die Pilotprojekte sollen die Menschen über die Notwendigkeit einer angemessenen Belüftung während Pandemien aufklären und die Praktikabilität und niedrigen Kosten des Systems demonstrieren. Darüber hinaus werden relevante Informationen über die Umgebungsbedingungen des Raums und die Akzeptanz des Systems durch den Nutzenden gesammelt, um Vergleiche mit Räumen mit natürlicher Lüftung und alternative Lüftungskonzepte anstellen zu können. Diese Informationen sind für die umfassendere Implementierung dieser Systeme von entscheidender Bedeutung. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis sowie der thermische und akustische Komfort der Nutzenden sind beides wichtige Faktoren in diesem Prozess [74]. Im Zuge des CovEd-Projekts, durchgeführt vom Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau (IBPSC), wurden in mehreren Lehrräumen der TU-Graz sowie auch zwei weiteren Klassenräumen des Privatschulsystems der Sacré Coeur Schule, nachgerüstete Lüftungssysteme des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC) installiert. Zweck dieses Projekts ist die rasche Ausstattung universitärer und schulischer Lehrumgebungen mit MPIC-Abluftanlagen, um deren Funktionalität dazulegen und zu beurteilen [74].

Erstens geht es um die Prüfung der Gebrauchstauglichkeit, die kostengünstige Installation und den Betrieb sowie die Bewertung des Infektionsrisikos, die bereits in vorherigen Masterarbeiten behandelt wurden [48, 49]. Und zweitens, was mit dieser Masterarbeit erforscht wird, ist es essenzielle Daten über die Raumklimabedingungen und die Akzeptanz der Nutzenden zu sammeln, um sie mit natürlicher Lüftung und alternativen Lüftungsstrategien zu vergleichen. Diese Bewertungen sind entscheidend für die Implementierung solcher Systeme, da Kosteneffizienz wirtschaftlich wichtig ist. Für die Nutzenden stehen jedoch die akustische und thermische Behaglichkeit im Vordergrund



## 2.4.2 Bedeutung von Erhebungen zur Innenraumqualität bei Renovierungen

In der Studie von Lee et al. (2023) wurde der Effekt zur IEQ-Bewertung (Innenraumqualität (en: indoor environmental quality)) vor und nach Renovierungen in einem fünfstöckigen Forschungsinstitutsgebäude in Korea untersucht. Der Fokus lag auf der Renovierung des HLK-Systems (Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage) im fünften Stock, da dieses System veraltet war und die Innenraumqualität beeinträchtigte. Im Vergleich dazu wurden auch die Etagen eins bis vier untersucht, die als Vergleichsgruppe dienten, da sie nicht renoviert wurden. Die Renovierung des HLK-Systems sollte die Zufriedenheit und Produktivität der Mitarbeiter steigern. Insgesamt nahmen 86 Personen an der Studie teil, die vor und nach der Renovierung befragt wurden [45].

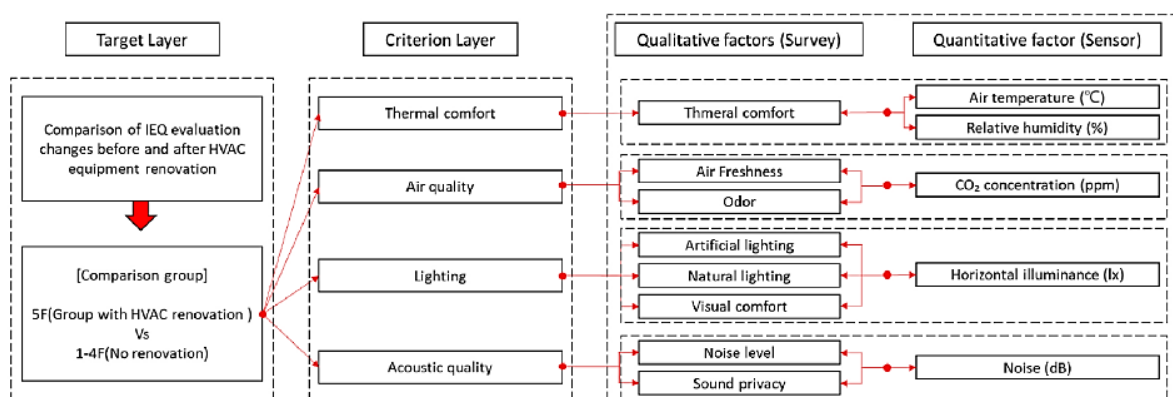


Abbildung 17: IEQ-Analyse Rahmen: Kriterienebene dient dem Vergleich und der Analyse der qualitativen Bewohnerumfragen mit den quantitativen Gebäudedaten [45]

Die qualitative Bewertung wurde mittels eines Fragebogens (siehe Abbildung 17) durchgeführt, der auf einer 7-Punkte-Likert-Skala beruhte, um die Zufriedenheit der Nutzenden hinsichtlich der vier Hauptparameter der Innenraumqualität (IEQ) thermischer Komfort, Luftqualität, Beleuchtung und akustische Umgebung zu messen. Die Analyse ergab, dass die Bewohner im 5. Stock nach der Renovierung, signifikant höhere Zufriedenheitswerte in Bezug auf thermischen Komfort, Luftqualität, Gesamtzufriedenheit und Produktivität angaben, im Gegensatz zu den Personen aus den Etagen 1 bis 4, welche als Kontrollgruppe diente [45].

Die quantitative Bewertung umfasste physikalische Messungen von IEQ-Parametern (siehe Abbildung 17), Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Beleuchtung. Nach der Renovierung zeigte sich eine signifikante Verbesserung der relativen Luftfeuchtigkeit, während bei der qualitativen Analyse auch andere Parameter wie Luftqualität und Gesamtzufriedenheit signifikant verbessert wurden.

Um zu gewährleisten, dass die Einheitlichkeit und Genauigkeit der Daten sicherzustellen sind, bewerteten dieselben Bewohner der Etagen 1–4 und Etage 5 die Innenraumqualität sowohl vor als auch nach der Renovierung in einer Umfrage. Zusätzlich, um den Renovierungseffekt noch genauer beurteilen zu können, wurde die Innenraumqualität zwischen den nicht renovierten Stockwerken 1–4 und dem im gleichen Zeitraum



renovierten 5. Stock verglichen. Die Stockwerke 1–4 dienten dabei speziell zur Kontrolle der Daten [45].

Vor der Renovierung gab es bei den Ergebnissen der quantitativen und qualitativen Analysen, die die Bereiche vor der Renovierung verglichen, keine signifikanten Unterschiede. Dies deutet darauf hin, dass eine gleichartige physische Umgebung vorliegt [45]. Die Analyse ergab, dass eine qualitative Umfrage der Nutzenden eine umfassendere Bewertung ermöglichte, während die quantitativen Messergebnisse durch die begrenzte Anzahl an Sensoren eingeschränkt ist. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Umfragen zusätzlich zu physischen Sensoren durchzuführen, um die Auswirkungen von Renovierungen auf die Zufriedenheit der Nutzenden besser zu verstehen [45].

Schlussendlich kann gesagt werden, dass die Renovierung des HLK-Systems zu einer signifikanten Verbesserung der IEQ und die Zufriedenheit der Nutzenden führte. Das Vorgehen, qualitative Umfragen mit quantitativen Messungen zu kombinieren, erwies sich als effektiv, um ein umfassenderes Bild der Renovierungseffekte zu erhalten. Zukünftige Studien sollten auch akustische Umgebungen berücksichtigen, um ein vollständigeres Verständnis der IEQ zu erlangen [45].

Diese Untersuchung weist mehrere Einschränkungen auf, die in zukünftigen Studien und Arbeiten möglicherweise berücksichtigt oder integriert werden sollten.

Die eingeschränkte Anzahl an Sensoren und die damit verbundenen Kosten waren begrenzend und könnten möglicherweise bei einer erneuten oder ähnlichen Durchführung einer solchen Studie erhöht werden [45].

Da die erste Umfrage, also die vor der Renovierung, im Winter und die zweite Umfrage nach der Renovierung im Sommer stattfand, müssen die Unterschiede in den Messwerten der Sensoren genauer analysiert werden. Außerdem könnte, obwohl eine einheitliche physische Umgebung vor der Renovierung (im Winter) gegeben war, die Jahreszeit danach einen anderen Trend zeigen, da möglicherweise im Winter andere Faktoren ausschlaggebend sind als im Sommer, wenn man nicht nur das HLK-System als Einflussfaktor betrachtet [45].

Ein wesentlicher Faktor für die Innenraumqualität ist die Raumakustik beziehungsweise die Lautstärke, welche in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurde und in zukünftige Studien einfließen sollte [45].

Der Zusammenhang zwischen den IEQ-Parametern, die in diesem Projekt aufgrund fehlender Proben nicht analysiert werden konnten, sollte weiter untersucht werden [45].

### 2.4.3 Einfluss der Fenster- und Türbedienung auf die Schulinnenraumqualität

In der Studie von Korsavi et al. (2022) wurden umfassende Untersuchungen bzgl. der Einflussfaktoren auf die Bedienung von Fenstern und Außentüren, sprich das Öffnen und Schließen, erhoben, sowie deren Einfluss auf die Innenraumqualität (IEQ), den thermischen Komfort und den Energieverbrauch. Diese Forschung wurde von Mitte Juni 2017 bis Ende Mai 2018 in 31 natürlich belüfteten Klassenzimmern im Vereinigten Königreich sowohl während der Heiz- als auch der Nichtheizperiode durchgeführt. In der Studie wurde untersucht, wie das adaptive Verhalten von Lernenden und Lehrpersonen in Grundschulen die Innenraumqualität (IEQ) beeinflusst [46].

Eine zentrale Methode war die visuelle Beobachtung, bei der das Verhalten der Lernenden in 10-Minuten-Intervallen dokumentiert wurde. Zur Validierung dieser Beobachtungen wurden zusätzlich Zeitraffer-Kameras eingesetzt, die den Zustand von Fenstern und Türen ebenfalls alle 10 Minuten aufzeichneten. Parallel dazu wurden in den Klassenräumen kontinuierlich Messungen durchgeführt. Hierbei wurden die Parameter wie Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration und relative Luftfeuchtigkeit während des gesamten Schultages erfasst. Unabhängige Temperatur- und Feuchtigkeitsdatenlogger, CO<sub>2</sub>-Messgeräte sowie multifunktionale SWEMA-Geräte wurden eingesetzt, um die Innenraumluftparameter alle 10 Minuten in einer Höhe von 1,1 m zu erfassen. Die Außenumgebungsparameter wurden von lokalen Wetterstationen erfasst, die sich höchstens 3 Meilen von den jeweiligen Untersuchungsorten entfernt befanden [46].

Statistische Modelle, insbesondere Regressionsanalysen, wurden genutzt, um den Zusammenhang zwischen der gemessenen Parametern, wie CO<sub>2</sub>-Konzentration, Innenraumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und dem Verhalten der Lernenden hinsichtlich des Öffnens von Fenstern, zu untersuchen. Dabei wurden auch verschiedene Einflussfaktoren wie die Anzahl bereits geöffneter Fenster, das Alter der Lernenden und die Anwesenheit von Aufsichtspersonen berücksichtigt [46].

Die Analyse zeigte, dass jüngere Lernende (6-9 Jahre alt) stärker auf Anweisungen der Lehrkräfte angewiesen sind, da ihnen die Auswirkungen ihrer Handlungen auf IEQ, Komfort und Energieverbrauch oft nicht bewusst sind. Ältere Lernende verfügen über mehr Autonomie und Selbstständigkeit bei der Bedienung der Fenster oder Türen, was es ihnen ermöglicht, ihre thermische Behaglichkeit besser anzupassen. Zudem passten die Lernenden ihr Verhalten, z. B. ihre Kleidung, an unangenehme thermische Bedingungen im Klassenraum an [46].

Die Studie zeigt, dass ungefähr 60% der Fensterbetätigungen aufgrund von Problemen des Innenraumklimas (z.B. warmes oder stickiges Klassenzimmer) vorgenommen werden. Der zweithäufigste Grund (28%) war das Öffnen bei der Ankunft der Lehrperson. Weitere Gründe für das Schließen der Fenster waren Wind, der Papiere bewegte, das Verlassen des Klassenzimmers, Lärm vom Spielplatz und Regen [46].

Wichtige Ergebnisse der Studie zeigen, dass während der Nicht-Heizperiode ein Anstieg der operativen und der Außentemperatur zu einem häufigeren Öffnen der Fenster führte. Während der Heizperiode bewirkte ein Anstieg der Innen- und Außenfeuchtigkeit ein verstärktes Schließen von Fenstern. Es wurde festgestellt, dass das Öffnen von mehr Fenstern die operative Temperatur um 34% und den CO<sub>2</sub>-Gehalt um 28%, während der Nicht-Heizperiode senken könnte. Die Studie legt nahe, dass durch die Senkung der Solltemperatur und eine erhöhte Energiebewusstheit der Schulanwesenden 67% des Energieverlusts, während der Heizperiode vermieden werden könnte [46].

Die Studie unterstreicht die Bedeutung der Sensibilisierung der Lernenden für den Energieverbrauch sowie die Notwendigkeit, Schulen so zu gestalten, dass adaptive Verhaltensweisen gefördert werden, welche die IEQ verbessern, den Komfort erhöhen und den Energieverbrauch reduzieren [46].

Die Untersuchungsergebnisse bieten mehrere Ansatzpunkte zur Optimierung der Steuerungsvorgänge hinsichtlich der Innenraumqualität, des thermischen Komforts und des Energieverbrauchs. Lehrkräfte und Lernenden sollten die Fenster während der Nicht-Heizsaison effektiver, sprich alle verfügbaren Fenster, nutzen, um die Belüftung zu erhöhen und angesammelte Wärme abzuleiten. Außerdem sollten Lernende ihre Mittagspause nicht im Klassenzimmer verbringen, um einen Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts zu vermeiden. Weiters sollten Lernende ermutigt werden, sich aktiv an der Fensterbedienung zu beteiligen und ihre Bedürfnisse zu äußern [46].

Lehrkräfte und Lernende sollten über die Auswirkungen der Bedienung von Fenstern und Außentüren auf den Energieverbrauch informiert werden. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, Grundschulen mit CO<sub>2</sub>-Warngeräten bzw. -ampeln auszustatten [46].

Kinder in der Grundschule bzw. Volksschulen haben oft eingeschränkte Möglichkeiten ihre Umgebung anzupassen und nehmen thermische Bedingungen oft anders wahr als Erwachsene. Daher sollten gezielt hybride oder mechanische Lüftungssysteme installiert werden, um auf die speziellen Bedürfnisse von Kindern einzugehen. Mit solchen Systemen kann ein konsistentes Innenraumklima über das ganze Jahr hinweg geschaffen werden, wodurch die natürliche Lüftung sowie die Bedienung von Fenstern und Türen obsolet werden. Andernfalls kann es in extremen Wetterbedingungen zu Unwohlsein bei den Kindern kommen, da die Bedienung von Fenstern bei starkem Wind oder Regen kaum bis gar nicht möglich ist.

In dieser Studie hätte auch die Akustik bzw. Lautstärke gemessen werden können, um mögliche Störfaktoren bei der Öffnung von Fenstern und Türen zu bewerten. Besonders in Klassenzimmern an stark befahrenen Straßen oder in der Nähe von Flughäfen wäre dies entscheidend gewesen. Zwar gab es eine Abfrage zu den Gründen für die Fensterbedienung, jedoch fehlten entsprechende messbare Daten. Eine umfassende Analyse der akustischen Umgebung könnte wertvolle Einblicke in die Auswirkungen von Lärm auf das Lernumfeld und die Konzentration der Lernenden geben. Zukünftige Studien sollten dies berücksichtigen, um ein vollständigeres Bild der Innenraumqualität zu erhalten.

Zusätzlich wurde die Studie in einer milden Klimazone (Maximaltemperatur von ca. 21 °C) durchgeführt, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Regionen mit extremeren klimatischen Bedingungen einschränken könnte. Die durchschnittliche Außentemperatur außerhalb der Heizperiode lag bei etwa 17,5 °C und während der Heizperiode bei 7,1 °C [46]. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere Außentemperatur in Graz während der Heizperiode etwa 4°C bis 5°C.

## 2.4.4 Selbstbeurteilung von Gesundheit und Wohlbefinden von Schulkindern

Eine Studie von Bluysen et al. (2018) zielte darauf ab, die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften von Klassenzimmern und der Gesundheit, sowie dem Komfort von Schulkindern zu erforschen. Die Studie umfasst eine Felduntersuchung mit 54 Klassenräume in 21 Schule in den Niederlanden. Die erhobenen Daten basierten auf Fragebögen von 1311 Kindern und lieferten Informationen zur Anpassung von Temperatur, Licht und Geräuschpegel [47]. In dieser Studie wurden Lernende im Alter von 8 bis 12 Jahren mittels eines Fragebogens zu ihrer Gesundheit, der Raumgestaltung sowie ihrem allgemeinen Wohlbefinden befragt. Darüber hinaus wurden in 37 Klassenzimmern mithilfe von Messgeräten quantitative Parameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration erfasst. Alle gesammelten Daten wurden in das Statistikprogramm SPSS eingegeben und analysiert, um die Auswirkungen der Innenraumumgebung auf die Lernenden zu bewerten [47].

Eine erste Datenbank wurde in Bezug auf die Gesundheit und IEQ-Wahrnehmung von Kindern an Grundschulen in den Niederlanden sowie die Merkmale der untersuchten Klassenzimmer erstellt. Von den befragten Kindern (siehe Abbildung 18) waren 87% durch Lärm, 63% durch Gerüche und 42% durch Sonnenlicht gestört, 35% mochten die Temperatur im Klassenzimmer nicht (zu kalt oder zu warm) und 34% erlebten Temperaturschwankungen [47].

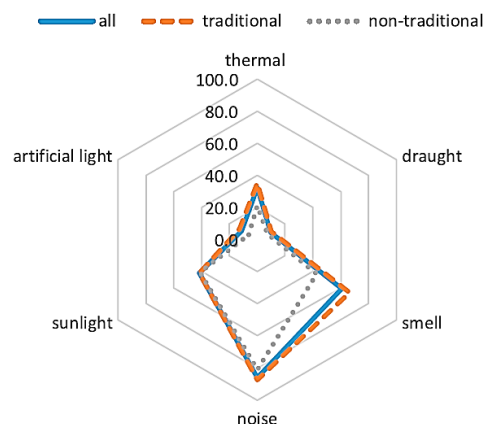


Abbildung 18: Prozentsatz des Unbehagens von Lernenden hinsichtlich der verschiedenen IEQ-Aspekte [47]

Die Lernenden beklagen sich vor allem über die akustischen Bedingungen im Klassenzimmer, weshalb dringend akustische Maßnahmen geprüft werden sollten. Zudem deuten Rückmeldungen und Analysen darauf hin, dass die thermische Umgebung im Klassenzimmer stark von der Innenraumluft, sowie dem Außenlicht abhängt. Zudem hängt die Temperaturregelung stark vom Verhalten der Anwesenden ab. Bei der Anwesenheit vieler Personen in einem Raum ist es stets eine Herausforderung, die Bedürfnisse aller zu erfüllen und ihre Zufriedenheit sicherzustellen [47].

Für künftige Studien wird empfohlen, den Fokus auf personalisierte Ansätze zu legen, die die individuellen Bedürfnisse der Lernenden berücksichtigen. Die Untersuchung soll weiter vertieft werden, um spezifische Zusammenhänge zwischen Klassenzimmerumgebungen und dem Wohlbefinden der Lernenden zu identifizieren [47].

Ein zentrales Problem, das diese Studie aufdeckt, ist, dass trotz der Einhaltung der Richtlinien, sei es bezüglich der Temperatur, der CO<sub>2</sub>-Konzentration oder der Luftzüge, weiterhin ein negatives Nutzungserlebnis bestehen. Erstens wird in den Richtlinien häufig der Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern nicht berücksichtigt. Zweitens sind diese Richtlinien oft nur für Erwachsene ausgelegt, während Kinder eine andere Wahrnehmung in Bezug auf ihren akustischen und thermischen Komfort haben [47].

Eine Einschränkung dieser Studie ist, dass keine Messungen zur Akustik durchgeführt wurden. Zwar wurden Fragen zur Lautstärke gestellt und eine Literaturrecherche durchgeführt, jedoch fehlten Messgeräte, die in der Lage gewesen wären, die Lautstärke oder akustischen Bedingungen zu erfassen. Zudem konnte nicht ermittelt werden, welche spezifischen Aspekte des Lärms als störend empfunden werden, ob es sich dabei um Hintergrundgeräusche oder die allgemeine Akustik des Raumes handelt, insbesondere in Bezug auf die Nachhallzeiten.

In dieser Studie wurden lediglich Schulen im Hinblick auf Gesundheit und Komfort verglichen und statistisch analysiert. Es wurden jedoch keine unterschiedlichen Ansätze hinsichtlich der Lüftungsstrategien oder -systeme berücksichtigt, was potenziell zu unterschiedlichen Ergebnissen in Bezug auf die Gesundheit und Zufriedenheit der Lernenden hätte führen können.

## 2.4.5 Test der Nutzungswahrnehmung von COVID-19 Lüftungssystemen

Die Studie von Eibinger et al. (2022) untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Lüftungsstrategien auf das thermische und akustische Wohlbefinden sowie die Wahrnehmung der Sicherheit bzgl. des Infektionsrisikos von Raumbenutzenden in einem Seminarraum an der TU-Graz. Ziel dieser Untersuchung war es, vier verschiedene Lüftungsstrategien unter realistischen Bedingungen zu vergleichen, um insbesondere die Innenraumluftqualität zu verbessern und das Infektionsrisiko, vor allem in Bezug auf COVID-19, zu minimieren [48].

Die Pilotstudie wurde im Februar 2022 an der TU-Graz durchgeführt, und unter Verwendung vorbereitete Fragebögen. Im Rahmen dieser Pilotstudie wurden verschiedene Szenarien untersucht. Für jedes Szenario der Umfrage waren etwa 10 Minuten erforderlich. An der Studie nahmen neun Studierende der TU-Graz, im Alter von 23 bis 30 Jahren, teil. Dabei wurden vier verschiedene Lüftungsszenarien miteinander verglichen:

- 1. Fenster geschlossen, System ausgeschaltet (keine Lüftung)
- 2. Fenster gekippt, System ausgeschaltet
- 3. Ein Fenster gekippt, und mechanisches Lüftungssystem, entwickelt vom Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC-MEV) eingeschaltet
- 4. Fenster geöffnet, System ausgeschaltet

Die Bewertung der Innenraumqualität erfolgte mithilfe eines Fragebogens, der eine siebenstufige Likert-Skala zur Erfassung der Wahrnehmungen der Teilnehmenden verwendete [48].

Die Pilotstudie konzentrierte sich auf mehrere zentralen Faktoren:

- thermischen Komfort,
- Luftbewegung, Beleuchtung,
- Akustik,
- wahrgenommenes Infektionsrisiko
- und allgemeines Wohlbefinden.

Die Teilnehmenden wurden zu ihrer Wahrnehmung von Raumtemperatur, Luftbewegung, Lichtverhältnissen und ihrem Sicherheitsgefühl in Bezug auf COVID-19 befragt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Mehrheit der Teilnehmenden es vorzog, die Lüftungssysteme ausgeschaltet zu lassen, da zunehmende Kälte in den verschiedenen Szenarien zu Unbehagen führte. Die meisten Teilnehmenden empfanden die Sicherheitsmaßnahmen, wie Abstandhalten und das Tragen von Masken, als ausreichend und fühlten sich sicher, bzw. bevorzugenden eben nicht das nachgerüstete Lüftungssystem [48].

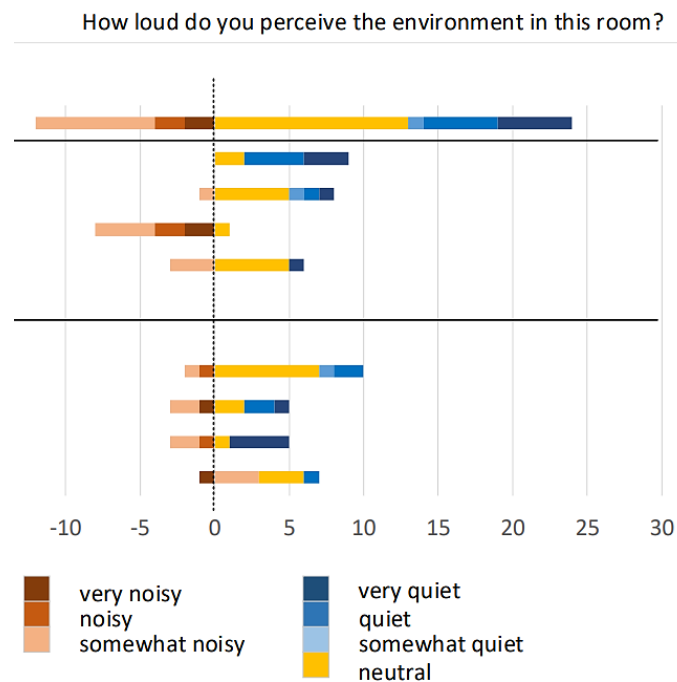


Abbildung 19: Ausschnitt Grafik: Empfinden der Umgebungslautstärke in Raum [48]

In Abbildung 19 ist klar zu erkennen, dass die Wahrnehmung der Lautstärke im Raum im Szenario 3, bei aktiviertem MPIC-MEV-System, im Vergleich zu den anderen untersuchten Szenarien deutlich negativer ist. Die Mehrheit der Personen berichtete, dass ihre Konzentration in den Szenarien 3 und 4 im Vergleich zu den Szenarien 1 und 2 abnahm. Zudem wurde kein Zusammenhang zwischen der Sitzposition und dem Sicherheitsempfinden oder dem Lärmpegel festgestellt [48].

Auch der akustische Komfort wurde bewertet, wobei die Wahrnehmung des Umgebungslärms eine entscheidende Rolle spielte. Die vorliegende Pilotstudie diente als Vorreiter für umfassendere Untersuchungen, die in Zukunft in Schulen durchgeführt werden sollten [48].

Nachfolgend werden die Einschränkungen und Optimierungen der Pilotstudie dargelegt.

Für die fortführenden Arbeiten der Pilotstudie wird empfohlen, die Umfragen auf eine größere Gruppe von Probanden auszuweiten, um repräsentativere Ergebnisse zu erzielen. In der bisherigen Studie nahmen lediglich neun Personen teil, was die Aussagekraft der Ergebnisse erheblich einschränkt [48].

Außerdem sollten die unterschiedlichen Lüftungsszenarien so strukturiert werden, dass Beeinflussungen durch vorherige Erfahrungen der Teilnehmenden minimiert werden. Schließlich wäre es sinnvoll, in zukünftigen Studien auch Geräuschpegelmessungen einzubeziehen, um ein umfassenderes Verständnis der akustischen Bedingungen zu erlangen [48].

Darüber hinaus wird vorgeschlagen, die einzelnen Fragen anzupassen, um Wiederholungen zu vermeiden und die Umfrage effizienter und verständlicher zu gestalten. Die Auswahlkriterien sollten auch vereinfacht bzw. gekürzt werden, um aussagekräftigere Trends zu erkennen [48].

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die Teilnehmenden in dieser Studie nicht mit dem System vertraut waren. Dies könnte dazu geführt haben, dass sie durch die Neuheit und mögliche Überforderung unterschiedliche Wahrnehmungen erlebten, im Vergleich zu Teilnehmenden, die bereits länger mit dem System vertraut sind und dessen Nutzen und Funktionen kennen. Erst bei einer späteren Befragung zu ihrer Wahrnehmung in Bezug auf thermische, akustische und allgemeine Aspekte könnte eine genauere Beurteilung erfolgen.

Außerdem wurden keine statistischen Tests und Auswertungen für die Analyse herangezogen. Dadurch basiert die Studie lediglich auf Literatur und Umfragen, was zu keiner fundierten Einschätzung der statistischen Signifikanz zwischen den einzelnen Szenarien führt.

Statistische Tests, die auf Messwiederholungen basieren, könnten präzisere Erkenntnisse darüber liefern, ob statistische Signifikanz vorliegt und zwischen welchen Szenarien Unterschiede bestehen. Solche Tests ermöglichen es, Daten über verschiedene Zeitpunkte oder Bedingungen hinweg zu vergleichen, um festzustellen, ob beobachtete Effekte tatsächlich signifikant sind oder nur durch Zufall entstanden sein könnten.



## 2.5 Zusammenfassung

In der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion über Lüftungssysteme und Raumluftqualität stehen verschiedene Ansätze und deren Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Nutzenden im Fokus. Die Lüftung kann grundsätzlich in drei Kategorien unterteilt werden: natürliche, mechanische und hybride Systeme (siehe Kapitel 2.2).

Natürliche Lüftung nutzt die Kräfte von Wind und Temperaturunterschieden, um Gebäude zu lüften. Diese Methode zeichnet sich durch geringe Betriebskosten und eine Reduzierung des Energieverbrauchs aus, hat jedoch den Nachteil, dass sie stark von äußeren Wetterbedingungen abhängt. Dadurch kann es schwierig sein, eine konstante Raumluftqualität aufrechtzuerhalten (siehe Kapitel 2.2.1).

Im Gegensatz dazu bietet mechanische Lüftung die Möglichkeit, den Luftaustausch gezielt zu steuern, unabhängig von den äußeren Bedingungen. Mechanische Systeme ermöglichen eine präzise Kontrolle der Raumluftqualität und sind oft effizient bei der Regulierung von Temperatur und Feuchtigkeit, bringen jedoch höhere Betriebskosten und einen erhöhten Energieverbrauch mit sich (siehe Kapitel 2.2.2).

Die mechanische Lüftung bietet mehrere Vorteile: Sie gewährleistet eine konstant niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentration und reduziert Infektionsrisiken durch einen kontinuierlichen Luftaustausch. Zudem ermöglicht sie eine automatische Steuerung, die die Effizienz der Luftqualität optimiert. Studien haben gezeigt, dass dezentrale Lüftungssysteme in der Regel bessere CO<sub>2</sub>- und Virusdosisfaktoren (VDF) erreichen als zentrale Systeme, die häufig schlechter abschneiden als hybride Lüftungssysteme [76]. Dennoch gibt es auch Nachteile der mechanischen Lüftung. Dazu gehört das Risiko von Lärmbelästigung, die technische Abhängigkeit von den Systemen sowie die Gefahr einer ineffizienten Dimensionierung. Bei zentralen oder dezentralen Raumlufttechnikanlagen (RLT) kann es zu hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Virusdosisfaktoren (VDF) kommen, insbesondere wenn die Systeme nicht korrekt eingestellt sind oder Betriebsstörungen auftreten. Zudem ist die schnelle Anpassung der Luftwechselrate oft nicht gut möglich [76].

Hybride Lüftungssysteme kombinieren natürliche und mechanische Methoden, um die Vorteile beider Ansätze zu vereinen. Diese Systeme bieten eine hohe Flexibilität und ermöglichen eine verbesserte Energieeffizienz durch den gezielten Einsatz mechanischer Unterstützung bei Bedarf (siehe Kapitel 2.2.3).

Ein hybrides Lüftungssystem bietet Vorteile wie eine effektive Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Gehalts, ein geringeres Risiko für Infektionen und eine verbesserte Luftzirkulation, insbesondere in den warmen Monaten. Außerdem ist sie kostengünstiger und einfacher zu bedienen als zentrale Lüftungssysteme, da die Luftwechselrate durch die Steigerung der Ventilatorleistung manuell angepasst werden kann [76]. Zu den Nachteilen zählen die Abhängigkeit vom Verhalten der Nutzer, mögliche Geräuschbelästigung, eine geringere Effektivität im Winter sowie der Bedarf an regelmäßiger Wartung. Eine falsche Handhabung oder unzureichende Platzierung des Ventilators kann die Luftqualität verschlechtern und das Risiko von Infektionen erhöhen [76].

Neben der Lüftung spielt die Raumluftqualität eine zentrale Rolle für das Wohlbefinden der Nutzenden. Zu den wichtigsten Faktoren gehören die Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration, relative Luftfeuchtigkeit, Akustik und Zugluft. Eine komfortable Raumtemperatur liegt im Allgemeinen zwischen 20 und 22 Grad Celsius. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration sollte idealerweise unter 1000 ppm bleiben, da höhere Werte Müdigkeit und Konzentrationsstörungen

verursachen können. Die relative Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 40 und 60% liegen, um gesundheitliche Probleme und Schimmelbildung zu vermeiden. Auch die Akustik trägt wesentlich zum Raumkomfort bei, da schlechte Akustik zu Stress und vermindertem Wohlbefinden führen kann. Zugluft sollte ebenfalls unbedingt vermieden werden und Lüftungssysteme sollten regelmäßig gewartet werden, um eine gleichmäßige Luftverteilung zu gewährleisten (siehe Kapitel 2.3).

Zusätzlich zu diesen technischen Aspekten werden in der Forschung auch qualitative Umfragen durchgeführt, um die Wahrnehmung der Nutzenden bezüglich der Raumlufthqualität und Lüftungssysteme zu erfassen. Durch Befragungen und Interviews werden subjektive Eindrücke gesammelt, die durch quantitative und qualitative Analysen ausgewertet werden. Diese Studien helfen dabei, Trends und Probleme zu identifizieren und die Erfahrungen der Nutzenden zu verstehen, um künftige Lüftungsstrategien und -systeme weiter zu verbessern (siehe Kapitel 2.4).

Insgesamt zeigt sich, dass eine umfassende Betrachtung der verschiedenen Lüftungsansätze und der Raumlufthqualität unerlässlich ist, um ein gesundes und komfortables Raumklima zu gewährleisten. Die Wahl des geeigneten Systems sollte stets auf den spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten des jeweiligen Gebäudes basieren. Gerade in Schulklassen ist die Behaglichkeit der Nutzenden entscheidend für den Lernerfolg. Regelmäßiges Feedback von Lernenden kann helfen, die Behaglichkeit der Nutzenden kontinuierlich zu verbessern.

Es lässt sich sowohl aus der aktuellen wissenschaftlichen Literatur als auch aus den bestehenden Richtlinien und Normen ableiten, dass in Bezug auf die Lüftungssituation häufig nach wie vor ein suboptimales thermisches und akustisches Nutzungserlebnis vorherrscht. Wie bereits in Kapitel 2.4.4 erläutert, zeigt die Studie auf, dass trotz der Einhaltung der Richtlinien hinsichtlich Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Luftzug negative Wahrnehmungen bestehen bleiben. Oft wird die Gesamtheit der Einflussfaktoren nicht berücksichtigt. Besonders in Schulen, in denen sich Kinder und Jugendliche aufhalten, sollten die Richtwerte angepasst werden, da die meisten bestehenden Richtlinien und Normen auf Erwachsene ausgelegt sind.

In den meisten der in Kapitel 2.4 erwähnten Studien wird häufig die akustische Behaglichkeit der Nutzenden vernachlässigt, während die thermische Behaglichkeit im Vordergrund steht. Wenn die akustische Behaglichkeit jedoch untersucht wird, stützen sich die Studien oft nur auf Literaturquellen und verzichten darauf, quantitative Messungen mit entsprechenden Messgeräten durchzuführen. Diese Messungen könnten wertvolle Daten liefern und in Kombination mit statistischen Tests zu fundierteren Aussagen führen.

Die Berücksichtigung beider Faktoren, thermische und akustische Behaglichkeit, ist entscheidend, um ein umfassendes Bild des Nutzungserlebnisses zu erhalten, insbesondere in Bildungseinrichtungen, wo die Gesamtheit einen signifikanten Einfluss auf das Lernen, die Konzentration und allgemeine Wohlbefinden der Lernenden hat.

Aus Kapitel 2.4.2 wird deutlich, dass häufig der Zusammenhang zwischen den IEQ-Parametern nicht ausreichend analysiert wird, obwohl statistische Daten und verschiedene Zeitpunkte über mehrere Räume hinweg vorliegen. In der Regel wird meist nur ein einzelner Parameter betrachtet, und es fehlt an einer umfassenden akustischen Bewertung sowie an entsprechenden Messungen. Eine solche Analyse könnte wertvolle Einblicke in die

Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Faktoren der Innenraumqualität liefern und die Grundlage für umfassendere Bewertungen schaffen.

In der Pilotstudie (siehe Kapitel 2.2.4), wurden lediglich neun erwachsene Studierende (23-30 Jahre alt) berücksichtigt, die mit dem Lüftungssystem nicht vertraut waren und erstmals mit dessen Funktionen und Wirksamkeit in Kontakt kamen. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen, sollte eine größere Stichprobe verwendet werden, die eine breitere Perspektive und validere Daten ermöglicht. Für zukünftige Studien sollten die Teilnehmenden bereits länger mit dem Lüftungssystem vertraut sein. Dies würde helfen, mögliche Abweichungen in der Behaglichkeit der Nutzenden zu vermeiden, die durch einen Erstkontakt mit solchen Systemen entstehen könnten. Ein längerer Kontakt könnte die Anpassung an das System erleichtern und zu einer realistischeren Bewertung des Komforts und der Effektivität führen.

In der Studie wurden keine statistischen Tests oder Auswertungen verwendet, obwohl solche Verfahren entscheidend sind, um Daten über verschiedene Zeitpunkte oder Bedingungen zu vergleichen. Dadurch kann ermittelt werden, ob die beobachteten Effekte tatsächlich signifikant sind.

Oft ist die Klimazone entscheidend für die Übertragbarkeit von Studien auf andere Länder. Besonders bei natürlicher Belüftung spielt die Außentemperatur eine zentrale Rolle, da extrem niedrige oder gemäßigte Temperaturen unterschiedliche Ergebnisse hervorrufen können. In einer milden Klimazone, in der die durchschnittliche Außentemperatur während der Heizperiode bei etwa 7,1 °C (siehe Kapitel 2.4.3) liegt, können die Ergebnisse einer Studie von denen in extremeren Klimazonen abweichen. Letztere erfordern möglicherweise die Einführung von mechanischen oder hybriden Lüftungssystemen, da diese eine über das Jahr hinweg zuverlässig homogene Innenraumluftqualität gewährleisten können.

In den letzten Jahren hat sich das Verständnis für die Interaktionen zwischen sozialen und technischen Systemen weiterentwickelt. Soziotechnische Studien, die qualitative, quantitative und statistische Methoden miteinander verknüpfen, bieten wertvolle Erkenntnisse und tragen zur Verbesserung von Prozessen bei. Der Austausch mit Schülerinnen und Schülern sowie Studierenden ist dabei entscheidend, um die Relevanz der Forschungsfragen zu betonen und praxisnahe Lösungen zu entwickeln.

Diese Arbeit untersucht die Wirkung von hybriden Lüftungssystemen im Vergleich zur natürlichen Lüftung in einem Realklassenzimmer und leistet einen bedeutenden Beitrag zum Forschungsstand, da bisherige Studien diese spezifische Kombination nicht ausreichend behandelt haben. Die Dringlichkeit dieser Forschung ergibt sich aus der Notwendigkeit, effektive Maßnahmen zur Verbesserung der Raumluftqualität sowie des Nutzungserlebnisses in Schulen zu identifizieren.

Das Kapitel zu den theoretischen Grundlagen führt in die Thematik ein und hebt sowohl die Relevanz als auch den Innovationsgehalt der Arbeit hervor. Ziel dieser Studie ist es, Neuland zu betreten und praktische Empfehlungen für die Gestaltung von Lernumgebungen zu entwickeln, indem soziotechnische Ansätze mit empirischen Daten kombiniert werden.

### **3 Methodik der Forschungsarbeit**

Um die Zielsetzungen 2 und 3 aus Kapitel 1.2 zu beantworten, wird im Folgenden die angewandte Methodik erläutert.

#### **3.1 Einleitung**

Die Methodik einer Forschungsarbeit ist entscheidend für die Qualität und Validität der Ergebnisse. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Methoden, Verfahren, Versuchsaufbauten sowie Messgeräte erläutert, die zur Durchführung der Forschungsarbeit eingesetzt wurden. Das Konzept ist zur besseren Übersicht visuell dargestellt (siehe Abbildung 20). Der Abschnitt 3.2, Schulstudie, beschreibt vorerst die örtlichen Gegebenheiten, um einen umfassenden Überblick über den Standort und die Umgebung zu bieten. Anschließend wird der Versuchsaufbau erläutert, der als Grundlage für die Datenerfassung und Umfragen dient. Hier werden die verschiedenen Schritte detailliert beschrieben, die zur Durchführung der Studie notwendig sind.

In Abschnitt 3.3 werden der Fragebogen und dessen Erhebungsparameter wie Bekleidungsfaktor, Temperatur, Zugluft, Akustik, Sicherheit, Konzentration sowie offene Fragen näher erörtert. Dabei werden die gestellten Fragen, deren Struktur, die dahinterstehenden Gründe und ihre Verbindung zu den Parametern des Komforts der Nutzenden beschrieben.

Den Messgeräten und -stationen, die zur Erfassung von Messdaten wie CO<sub>2</sub> (in ppm), Temperatur (in °C) und Lautstärke (in dB) verwendet werden und für die Durchführung der Analysen erforderlich sind, wird der Abschnitt 3.4 gewidmet. In diesem Zusammenhang wird auch erläutert, wo und wie die Messungen durchgeführt wurden. Die verwendeten Geräte werden in diesem Abschnitt ebenfalls detailliert beschrieben.

Schließlich wird in Abschnitt 3.5 die statistische Methodik behandelt, die eine systematische Auswertung der erhobenen Daten ermöglicht. Es werden unterschiedliche statistische Verfahren beschrieben, die zur Analyse der Daten eingesetzt wurden. Diese sollen die Grundlage für Vergleiche und Analysen bilden. Weiteres wird auch eine Stichproben-Kalkulation vorgenommen. Diese gibt an, wie groß eine Stichprobe sein muss, um verlässliche und repräsentative Ergebnisse zu erzielen.

In Kapitel 3.6 wird eine Zusammenfassung des gesamten Methodik-Kapitels präsentiert. Hier werden die wesentlichen Aspekte und Ansätze der verwendeten Methodik zusammengefasst, um die Forschungsstrategie und die Vorgehensweise klar darzulegen.

Abschließend wird im Kapitel 3.7 auf die Limitationen der Schulstudie sowie der angewandten Methodik dieser Arbeit eingegangen. In diesem Abschnitt werden die Einschränkungen der Forschungsansätze und deren potenzielle Auswirkungen auf die Ergebnisse kritisch reflektiert.

In Abbildung 20 ist die Übersicht des dritten Kapitels dieser Masterarbeit dargestellt sowie die Unterteilung der einzelnen Unterkapitel.

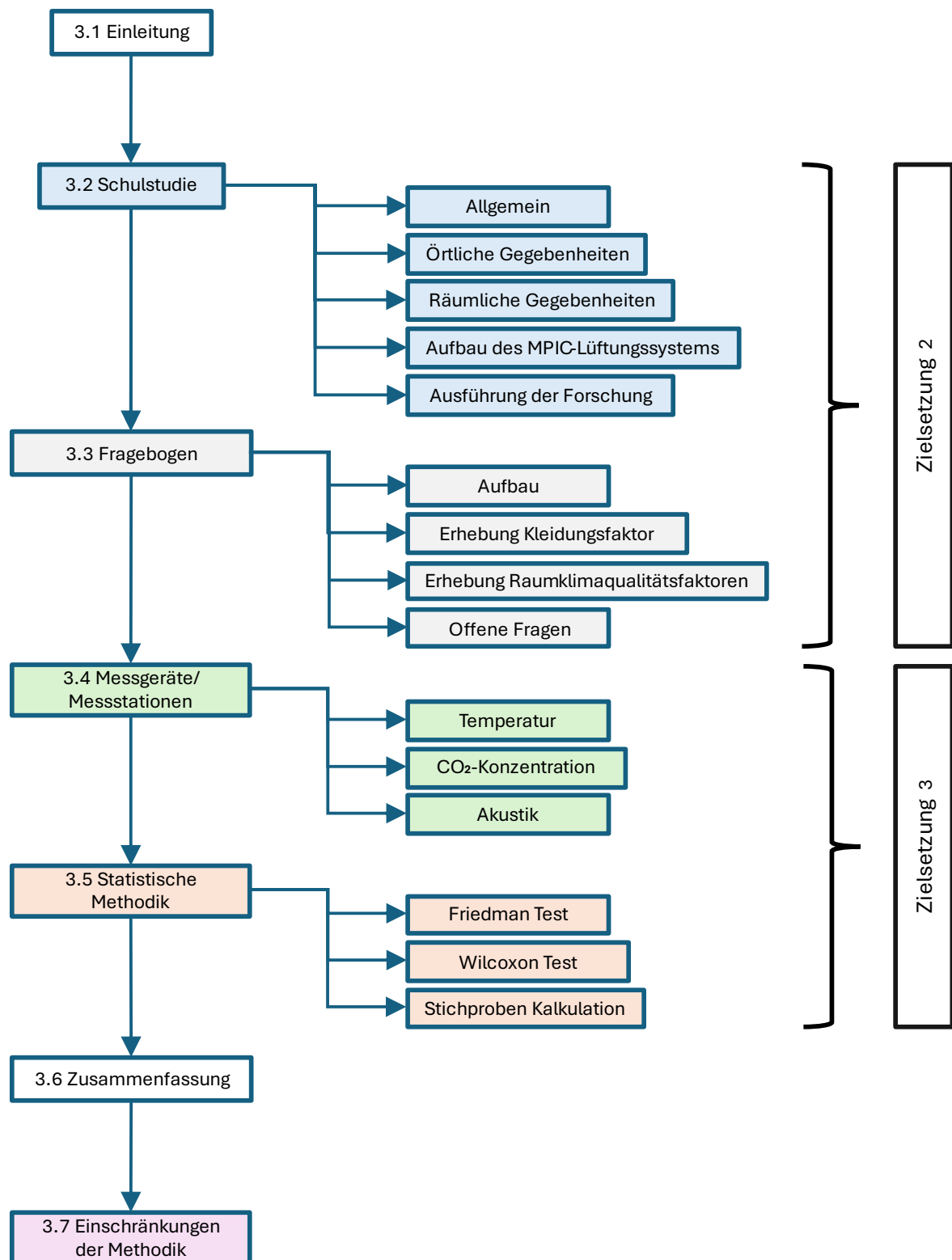


Abbildung 20: Flussdiagramm, Kapitel 3: Methodik der Forschungsarbeit

## 3.2 Schulstudie

Um die Zielsetzung 2 aus Kapitel 1.2 zu adressieren, wird im Folgenden der Versuchsaufbau näher erläutert.

### 3.2.1 Allgemein

In Zuge dieser Schulstudie wurde eine Umfrage durchgeführt, um das Nutzungserlebnis in zwei Klassenräumen bezüglich nachgerüsteter Lüftungssysteme zu analysieren. Der Fragebogen, welcher anonym ausgefüllt wurde, bestand aus 7 Fragen mit einer fünfstufigen Likert-Skala, pro (Lüftungs-)Szenario, welche sich auf

- Raumtemperatur,
- Luftzug,
- Raumakustik,
- Infektionsrisiko
- und Konzentration

bezogen haben.

Darüber hinaus wurden auch Messgeräte und -stationen miteinbezogen, die zur Erfassung von Messdaten ( $\text{CO}_2$  [ppm], Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] und Lautstärke [dB]) verwendet wurden.

Es wurden insgesamt drei Lüftungsszenarien durchgeführt:

- ein mechanisches Lüftungssystem, entwickelt vom Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC),
- keine Lüftung mit geschlossenen Fenstern,
- sowie natürliche Lüftung mit geöffneten Fenstern (gekippt oder vollständig geöffnet)

Anschließend zu jedem Szenario, wurde immer ein Fragebogen ausgefüllt. Es wurden am Schluss der Befragung noch offene Fragen bezüglich des Lüftungssystems gestellt welche dann individuell und anonym beantwortet werden konnten. Diese offenen Fragen behandeln möglicherweise Aspekte, die noch nicht erfragt wurden, und beziehen sich auf die Optik, das Design sowie die Licht- und Sichtverhältnisse, den thermischen und akustischen Komfort sowie das Sicherheitsempfinden im Hinblick auf das Infektionsrisiko.



### 3.2.2 Örtliche Gegebenheiten

Als Forschungsort wurde die Sacré Coeur Schule (siehe Abbildung 22 „[49]“) in der Petersgasse 1, 8010 Graz (siehe Abbildung 21) gewählt, da in zwei Klassenräumen dieser Schule ein Abluftsystem des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC) installiert wurde, dass zur Datenerhebung unterschiedlicher Lüftungsszenarien betragen sollte.

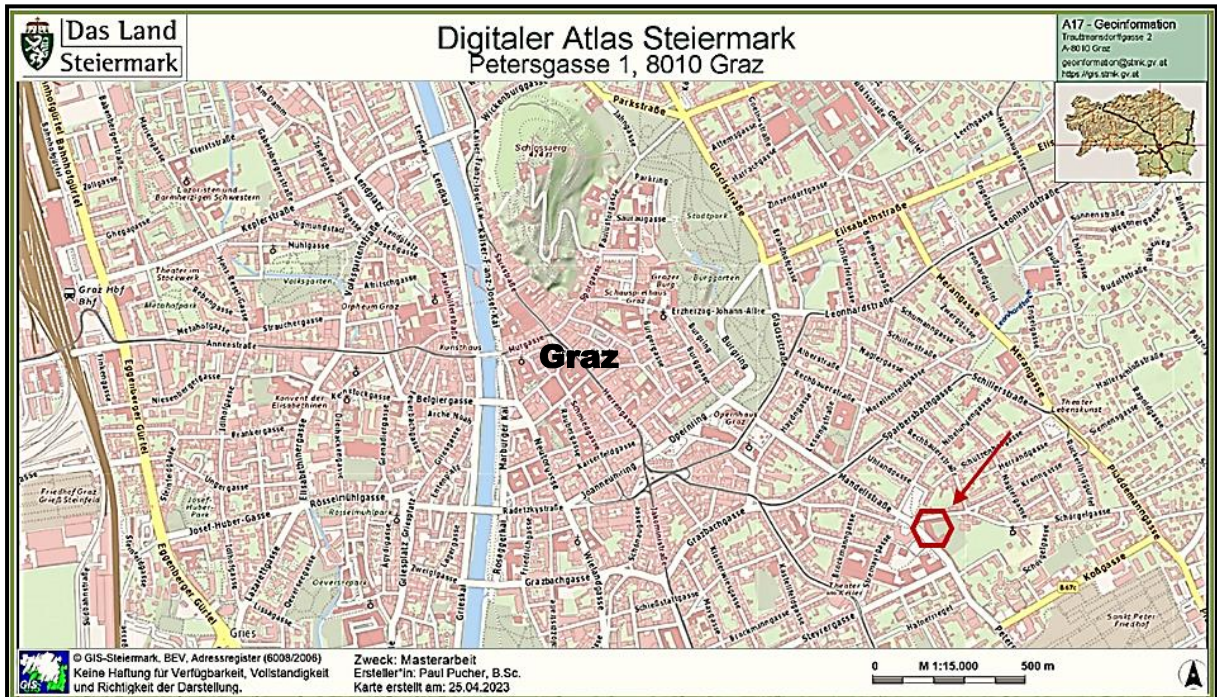


Abbildung 21: Ortsplan, Standort des Privatgymnasiums Sacré Coeur [adaptiert von 50]

Hier wurden am 6. April 2022 im Rahmen einer Umfrage wichtige Daten erhoben, die für die Analyse der Forschungsfrage von Bedeutung waren. In den folgenden Abschnitten werden die Methodik sowie der Aufbau der Studie vorgestellt.



Abbildung 22: Schrägluftbild Sacré Coeur Graz [49]



In Abbildung 23 ist das Schrägluftbild des Klassenraums der 8.B detailliert dargestellt. Dieses Bild von außen bietet eine gute Perspektive, um die Lage des Klassenraums in Bezug auf die Fensteranordnung und die äußeren Gegebenheiten des Gebäudes besser einschätzen zu können.



Abbildung 23: Schrägluftbild Klassenraum 8.B Außenansicht [adaptiert von 49]

Abbildung 24 zeigt ein Schrägluftbild des Klassenraums der 7.C, das von außen aufgenommen wurde. Diese Aufnahme ermöglicht es, die Position des Raums im Gebäude sowie die Anordnung der Fenster und die äußeren Gegebenheiten präzise zu beurteilen.

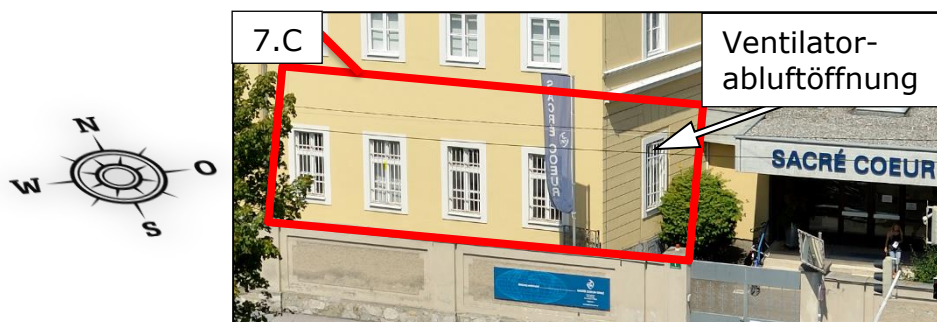


Abbildung 24: Schrägluftbild Klassenraum 7.C Außenansicht [adaptiert von 49]

Diese beiden Klassenräume wurden für die in dieser Masterarbeit durchgeführten Umfragen zur Bewertung der Behaglichkeit der Lernenden ausgewählt, da in diesen die nachgerüsteten Lüftungssysteme (MPIC) bereits seit mehreren Monaten in Verwendung sind und die Personen (Lernenden) mit diesen vertraut waren.

Da in beiden Klassenräumen dasselbe Lüftungssystem installiert ist, konnte eine größere Anzahl an Personen befragt werden, was zu einer größeren Probandengröße führte und somit aussagekräftigere Analysen ermöglichte.



Um einen Überblick über die Positionierung der Klassenräume zu erhalten, zeigt die folgende Abbildung 25 den Lageplan der Sacré Coeur Schule. Darin sind die Ausrichtung der Klassenräume sowie die Fensterorientierung dargestellt.

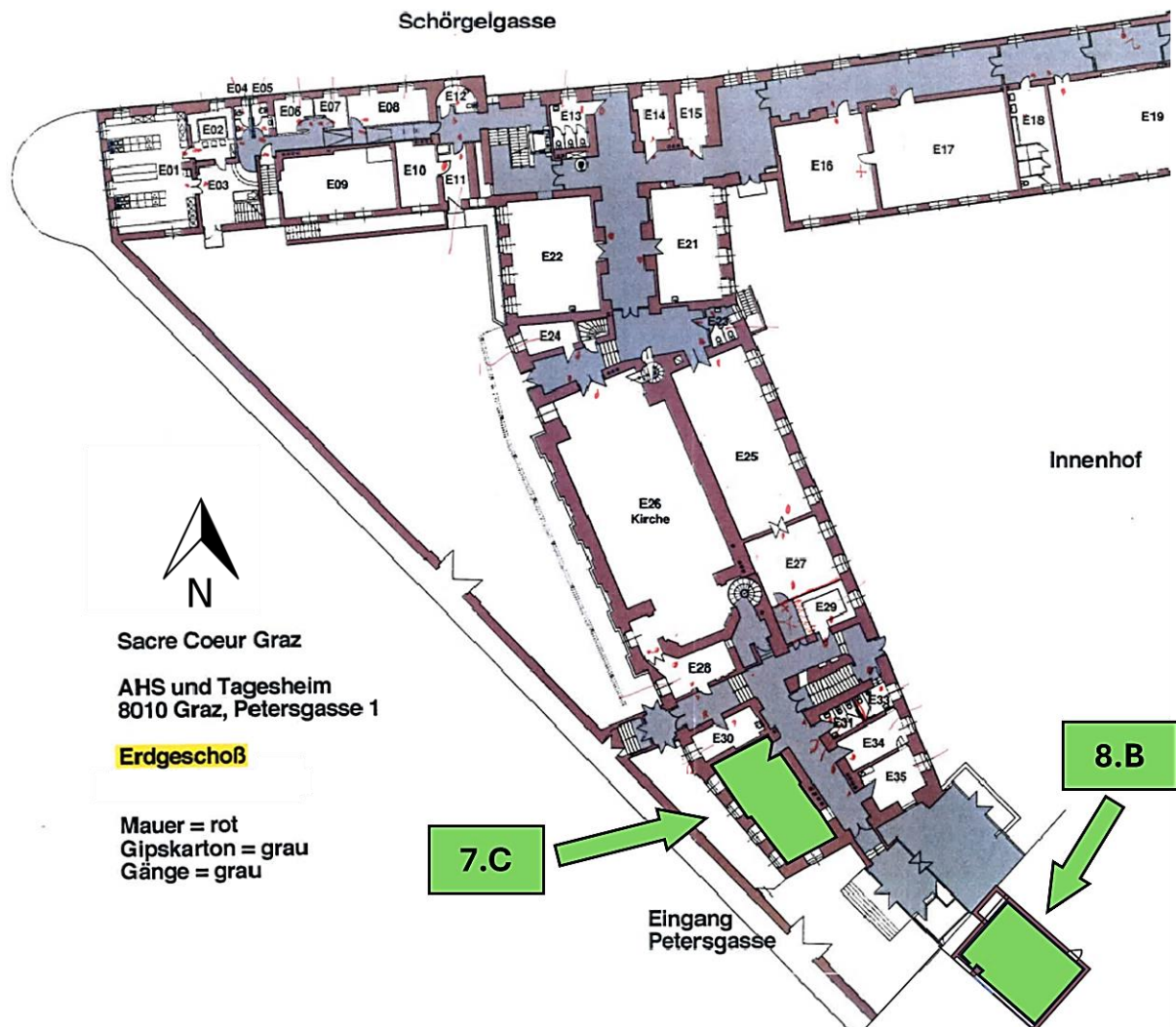


Abbildung 25: Lageplan der beiden Klassenräume 7.C und 8.B [adaptiert von 73]

### 3.2.3 Aufbau und Anlageplan der Lüftungssysteme

Der Klassenraum der 8.B, (siehe Abbildung 26), in dem ein Abluftsystem des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC) installiert ist, hat eine Fläche von etwa 40 Quadratmetern (siehe Abbildung 27). In diesem Raum wurden 13 Lernende mit einem Durchschnittsalter von 17,7 Jahren befragt. Laut der Klassensprecherin entsprach die Belegung nicht dem üblichen Stand, da vier Personen krank oder anderweitig verhindert waren.

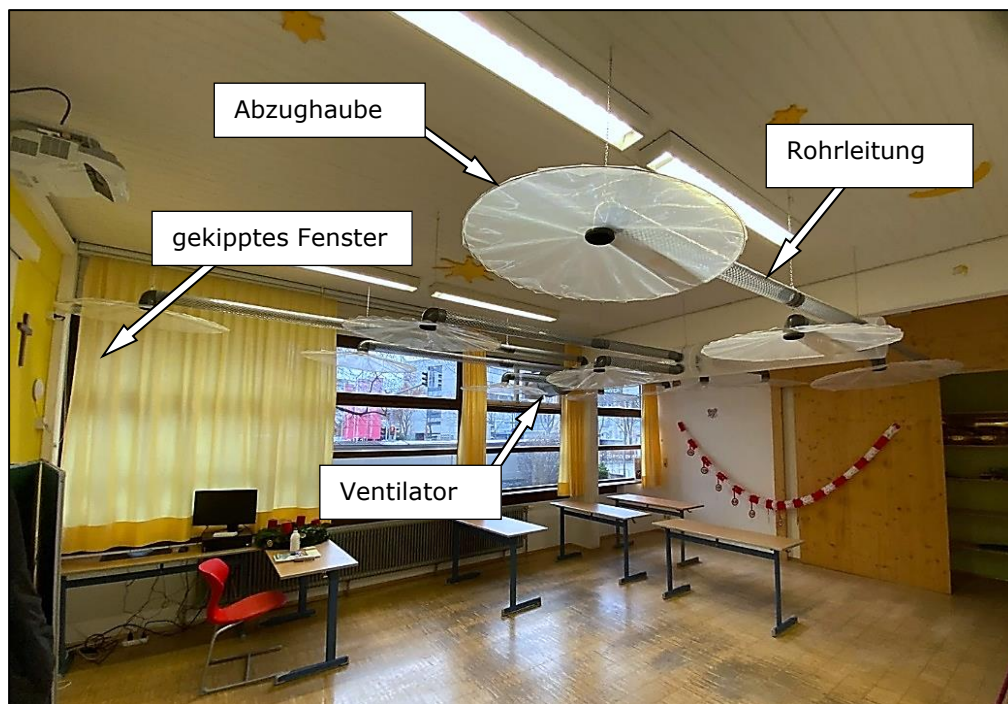


Abbildung 26: Klassenraum 8.B, MPIC-System Fotodokumentation, Innenraumansicht [73]

In Abbildung 27 ist der Grundriss des Klassenzimmers der 8.B dargestellt. Diese Abbildung zeigt auch die Positionen der Messgeräte im Raum, welche in Kapitel 3.4 von Interesse sind. Darüber hinaus ist auch die Sitzplatzverteilung ersichtlich, die für die Reihenanalyse in Kapitel 4 von Bedeutung ist.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Position der Lehrperson am Tisch vor dem Sitzplatz A1 liegt und sich die Lehrkraft beim Unterrichten an der Tafel vermutlich vor Sitzplatz A3 aufhält. Das Messgerät AIRCO2NTROL 5000 ist in einer Höhe von 1,2 Metern hinter dem Tisch der Lehrperson positioniert, links neben der Tafel, wenn man von der Tafel in Richtung Klasse schaut. Es befindet sich direkt unter dem einzigen kippbaren Fenster im Klassenraum.

Das Handy, das als Messgerät für die Akustik und Lautstärke diente, lag in einer Höhe von 75 cm und befand sich direkt rechts neben dem Sitzplatz C4, aus der Perspektive der Tafel betrachtet (siehe Abbildung 27).

Der Klassenraum der 8.B verfügte über vier Fenster, von denen sich nur eines kippen ließ, während die anderen fest verbaut oder aufgrund des Lüftungssystems nicht mehr kippbar waren. Die Fenster waren in Richtung Südwesten ausgerichtet.

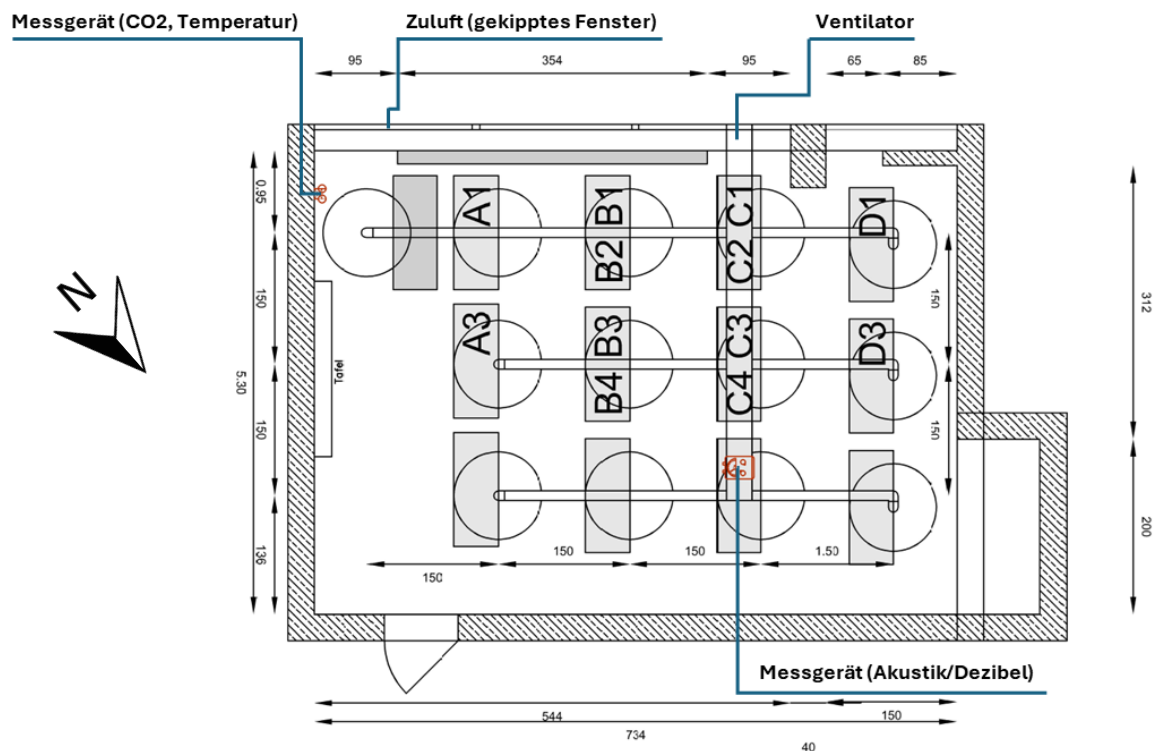


Abbildung 27: Klassenraum 8.B, Grundrissplan [adaptiert von 23]

Im Klassenzimmer der 8.B ist das System folgendermaßen aufgebaut. Es gibt vier Reihen, wobei jede Reihe mit drei Abluftabzugshauben ausgestattet ist. Über jedem Tisch, der für zwei Lernende vorgesehen ist, befindet sich eine Haube. Der Abstand zwischen den Hauben beträgt sowohl innerhalb der Reihen als auch zwischen den Reihen 1,5 Meter. Darüber hinaus ist am Tisch der Lehrperson ebenfalls eine Abzugshaube installiert. Das Hauptrohr verläuft über Reihe C, und der Ventilator befindet sich direkt rechts neben dem Sitzplatz C1 (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28).

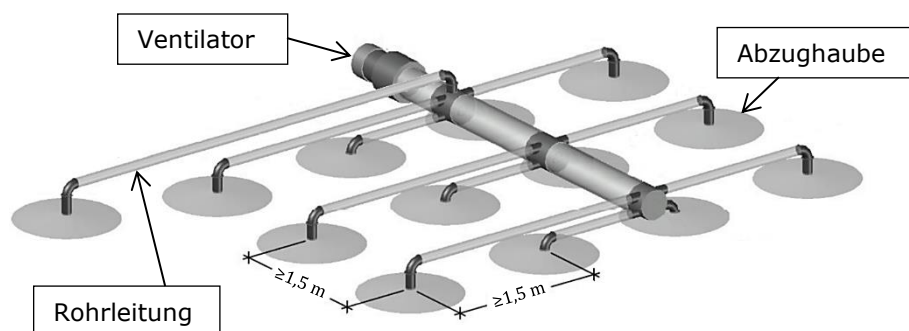


Abbildung 28: 3-D Darstellung des MPIC Lüftungssystems Klassenraum 8.B [adaptiert von 23]

Der Klassenraum der 7.C, (siehe Abbildung 29), in dem ein Abluftsystem des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC) installiert ist, hat eine Fläche von etwa 55 Quadratmetern (siehe Abbildung 31). In diesem Raum wurden 24 Personen mit einem Durchschnittsalter von 16,75 Jahren befragt. Das entspricht der normalen Belegung für diesen Klassenraum.



Abbildung 29: Klassenraum 7.C, MPIC-System Fotodokumentation, Innenraumansicht [73]

Die Hauptkanäle haben in diesem Klassenzimmer einen Durchmesser von 30 cm, während die Abzugsrohre, die vom Hauptkanal abzweigen, einen kleineren Durchmesser von 9 cm haben. Die Abzugshauben sind so konzipiert, dass sie über jedem Schreibtisch positioniert werden (siehe Abbildung 27, Abbildung 31), um Atemaerosole direkt zu erfassen und zu entfernen, bevor sie sich in der Umgebungsluft vermischen.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Position der Lehrperson am Tisch vor dem Sitzplatz A1 und A2 liegt und sich die Lehrkraft beim Unterrichten an der Tafel vermutlich vor Sitzplatz A3 und A4 aufhält. Das Messgerät AIRCO2NTROL 5000 ist in einer Höhe von 1,2 Metern hinter dem Tisch der Lehrperson positioniert, rechts neben der Tafel, wenn man von der Tafel in Richtung Klasse schaut.

Das Handy, das als Messgerät für die Akustik und Lautstärke diente, lag in einer Höhe von 75 cm und befand sich direkt links neben dem Sitzplatz E4, aus der Perspektive der Tafel betrachtet (siehe Abbildung 31).

Der Klassenraum der 7.C verfügte über fünf Fenster, von denen sich alle vollständig öffnen ließen. Vier dieser Fenster waren in Richtung Südwesten ausgerichtet, während ein Fenster an der Rückseite des Klassenraums nach Südosten ausgerichtet ist (siehe Abbildung 31).



Im Klassenzimmer der 7.C ist das System folgendermaßen aufgebaut. Es gibt fünf Reihen, wobei jede Reihe mit drei Abluftabzugshauben ausgestattet ist. Über jedem Tisch, der für zwei Lernende vorgesehen ist, befindet sich eine Haube. Der Abstand zwischen den Hauben beträgt sowohl innerhalb der Reihen als auch zwischen den Reihen 1,5 Meter. Darüber hinaus ist am Tisch der Lehrperson ebenfalls eine Abzugshaube installiert. Das Hauptrohr erstreckt sich durch den gesamten Raum, von der Tafel bis zur letzten Reihe, und verläuft dabei ungefähr immer über dem vierten Platz jeder Reihe. Der Ventilator befindet sich ungefähr 1,5 Meter hinter der Letzten Reihe (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31).

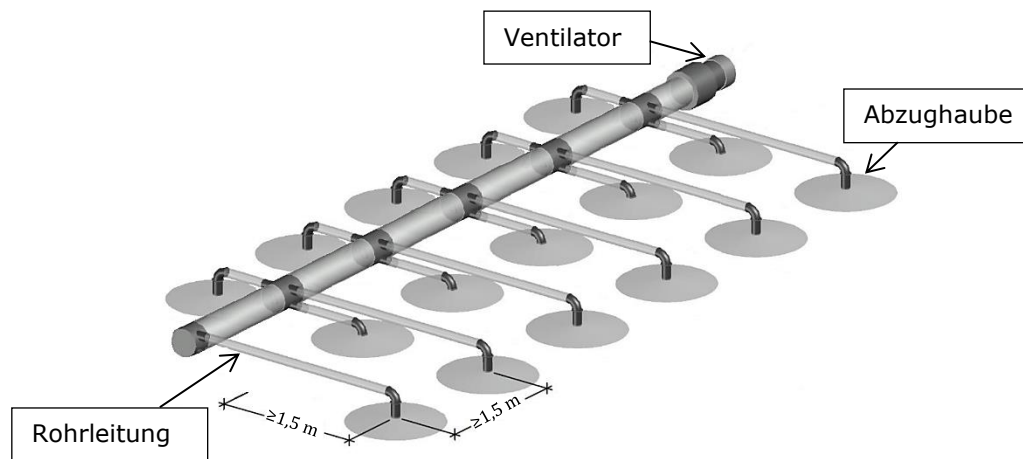


Abbildung 30: 3-D Darstellung des MPIC Lüftungssystems Klassenraum 7.C [adaptiert von 23]

Auf der nächsten Seite befindet sich Abbildung 31, der Grundriss des Klassenzimmers der 7.C. Dieser Plan ist wichtig, da er die räumliche Anordnung der Sitzplätze und die Positionierung der Messgeräte darstellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit immer wieder aufgegriffen werden.

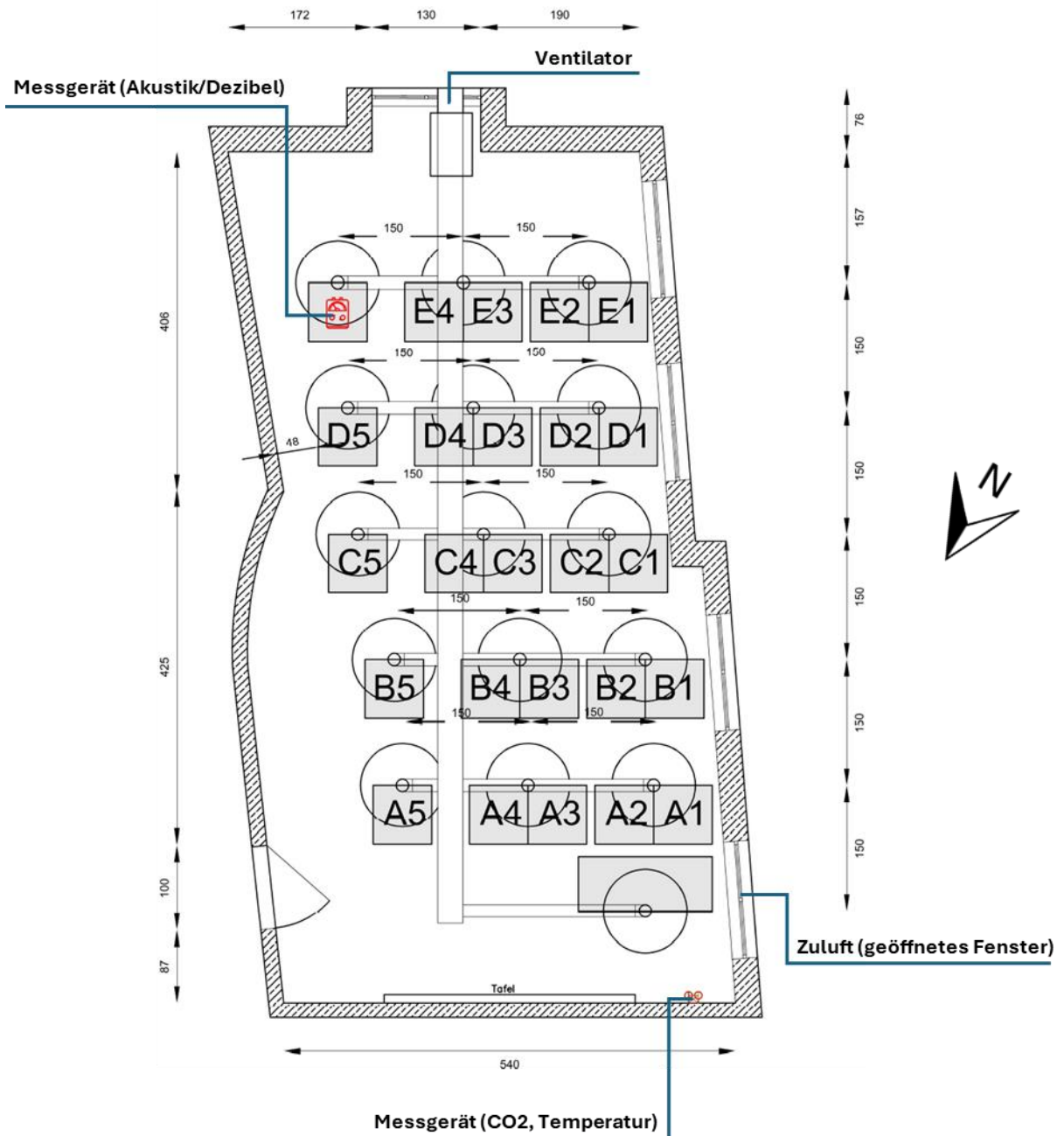


Abbildung 31: Klassenraum 7.C, Grundrissplan [adaptiert von 23]

### **3.2.4 Ausführung der Forschung**

In diesem Unterkapitel wird die Herangehensweise zur Durchführung der Schlussstudie sowie die zeitlichen Angaben zu jedem Szenario ausführlich erläutert. Zudem sind auch das Datum und die zeitlichen Informationen zur Durchführung in den jeweiligen Klassen Bestandteil dieses Kapitels.

#### **3.2.4.1 Einleitung**

Diese Schulstudie berücksichtigt eine breite Palette an qualitativen Parametern, um ein umfassendes Bild zu erhalten. Diese spielen eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung der Behaglichkeit der Teilnehmenden und umfassen eine Vielzahl von persönlichen Empfindungen und Präferenzen. Somit muss die Gesamtheit des Wohlbefindens der Probanden berücksichtigt werden. Dieser ganzheitliche Ansatz trägt dazu bei, die Komplexität der menschlichen Wahrnehmung von Komfort besser zu verstehen.

Qualitative Parameter können auch die individuellen Präferenzen der Teilnehmenden hervorheben. Beispielsweise könnten einige Personen eine Vorliebe für frische Luft durch Stoßlüften haben, während andere die Nutzung der Lüftungsanlage bevorzugen. Somit wurde nicht nur das Empfinden abgefragt, sondern auch die Präferenzen hinsichtlich Temperatur oder Luftzug erfasst.

Es ermöglicht zudem, Emotionen der Teilnehmenden zu erfassen, die nicht durch rein quantitative Daten dargestellt werden können. Dies ist besonders relevant, wenn es um Aspekte wie den Komfort in Bezug auf Design und Optik, die Lichtverhältnisse oder auch das Sicherheitsempfinden geht. Diese Themen wurden unter anderem in Frage 6 behandelt.

Zudem wurde den Teilnehmenden Raum für offene Kommentare eingeräumt, um ihre Gedanken frei zu äußern. Dies bietet die Möglichkeit, unerwartete oder unvorhergesehene Aspekte aufzugreifen. Diese Option wurde am Ende des Fragebogens bereitgestellt.

Die Studie wird unter Einhaltung der europäischen Datenschutzverordnung (DSGVO) durchgeführt. Dabei dürfen Ethik und Datenschutz nicht vernachlässigt werden. Es ist wichtig, ethische Standards einzuhalten, die Teilnehmenden über den Zweck der Messungen zu informieren, ihre Zustimmung einzuholen und die Sicherheit ihrer persönlichen Informationen zu gewährleisten. Dies wurde selbstverständlich zu Beginn der Studie sichergestellt und auch nochmals auf den Umfragebögen schriftlich hervorgehoben.

### 3.2.4.2 Überblick

Ein kurzer Überblick zur Durchführung der Umfrage, die sich auf qualitative Aspekte im Rahmen einer 50-minütigen Schulstunde konzentriert. Die Schulstunde wurde in 10-minütige Abschnitte unterteilt, wobei jedes Segment ein unterschiedliches Lüftungsszenario behandelte. Nachfolgend ist der Ablauf schematisch dargestellt.

- Minute 0-5: Begrüßung und Erklärung/Einweisung durch Paul Pucher
- Minute 5-15: Szenario 1: (Lüftungsanlage (MPIC) eingeschaltet und Fenster gekippt)
- Minute 15-20: Fragebogen zu Szenario 1 und Umbau des Szenarios
- Minute 20-30: Szenario 2: (Lüftungsanlage ausgeschaltet und Fenster geschlossen); (Ausgangszustand)
- Minute 30-35: Fragebogen zu Szenario 2 und Umbau des Szenarios
- Minute 35-45: Szenario 3: (Lüftungsanlage ausgeschaltet und gekipptes Fenster während Szenario 3 (8.B) bzw. Stoßlüften vor Szenario 3 (7.C))
- Minute 45-50: Fragebogen zu Szenario 3 sowie den offene Fragen  
Abschluss/Verabschiedung durch Paul Pucher

Um die 50-minütige Schulstunde optimal zu nutzen, wurde die oben angeführte, detaillierte Zeitplanung entwickelt. Diese gewährleistet ausreichend Zeit für jedes Lüftungsszenario, den Fragebogen sowie den notwendigen Umbau, um eine effiziente und umfassende Datenerfassung sicherzustellen. Durch diese Planung wird die maximale verfügbare Zeit pro Lüftungsszenario genutzt, sodass genügend Raum für die Beantwortung des Fragebogens und die Einführung am Anfang der Schulstunde bleibt. Zudem muss ein möglichst großer Abstand zwischen den Szenarien eingehalten werden, damit sich die Teilnehmenden auf die jeweiligen Bedingungen einstellen können und die Messgeräte eventuelle Unterschiede feststellen können. Aus diesem Grund wurde ein Zeitraum von ca. 5 Minuten für den Umbau und 10 Minuten pro Lüftungsszenario festgelegt.



### 3.2.4.3 Ausführung

Am Mittwoch, den 6. April 2022, wurde die Umfrage, siehe Kapitel 3.3, an der Sacré Coeur Schule in Graz durchgeführt. Damit sollte die Zielsetzung 2 aus Kapitel 1.2, die das Verstehen des Komforts der Lernenden (Temperatur, Zugluft, Akustik, Sicherheit und Konzentration) während verschiedener Lüftungsmethoden (MPIC, keine Lüftung, natürliche Stoßlüftung) betrifft, näher beleuchtet werden. Im Fokus steht die Behaglichkeit der Lernenden sowie deren Präferenzen mit den unterschiedlichen Lüftungsmethoden.

Vor Beginn der Umfrage wurde der Fragebogen (siehe Anhang, Abbildung 99 und Abbildung 100) zusammen mit der Sitzplatznummerierung verteilt. Dies ermöglicht es, später mithilfe des Grundrisses präzise Reihenanalysen durchzuführen. Gleichzeitig wurde ein Messgerät/Handy zur Messung der Lautstärke in Dezibel eingerichtet (siehe Kapitel 3.4.3). Zu Beginn der Schulstunde wurden die Lernenden begrüßt und kurz darüber informiert, worum es in der Umfrage geht und welche drei unterschiedlichen Lüftungsszenarien durchgeführt werden. Es wurde betont, dass die Teilnahme freiwillig ist und alle Daten anonym und vertraulich erhoben werden. Für die Umfrage wurde pro Klasse eine Schulstunde von 50 Minuten genutzt, um die Erhebungen durchzuführen. Die Umfrage im Klassenraum der 8.B, mit 13 Probanden, wurde von 9:40 bis 10:30 (dritte Schulstunde) durchgeführt. Die 24 Probanden der Klasse 7.C wurden in der fünften Schulstunde also von 11:45 bis 12:35 Uhr befragt. Es wurde jeweils mitprotokolliert zu welchem Zeitpunkt das jeweilige Lüftungsszenario gestartet bzw. geendet hat. Die Messwerte zu den angegebenen Zeitstempeln hinsichtlich der Außentemperatur und der CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden von einer Messstation an der TU-Graz entnommen (siehe Kapitel 3.4.2.2).

Nach der Einführung wurde der Fragebogen erläutert, insbesondere der erste Abschnitt, in dem es um die Bekleidung der Probanden ging, um Missverständnisse zu vermeiden. Anschließend begann das erste Szenario.

**Szenario 1:** Es wurden Fragen mit eingeschaltetem Lüftungssystem (MPIC-Lüftungsanlage) und einem gekippten Fenster behandelt. Im Klassenraum der 8.B war ein Fenster gekippt (siehe Abbildung 27), während im Klassenraum der 7.C ein Fenster leicht geöffnet war (siehe Abbildung 31). Nach zehn Minuten endete Szenario 1, und die Probanden hatten anschließend fünf Minuten Zeit, um den Fragebogen auszufüllen.

**Szenario 2:** Dieses Szenario stellt den Ausgangszustand der Masterarbeit dar, bei dem das MPIC-Lüftungssystem ausgeschaltet wurde und die Fenster geschlossen waren. Auch hier wurde das Szenario nach zehn Minuten gestoppt, und die Teilnehmenden hatten erneut 5 Minuten, um einen weiteren Fragebogen auszufüllen.

**Szenario 3:** In diesem Szenario wurde ein natürliches Lüftungsszenario in Form von stoßlüften simuliert. Im Klassenraum der 8.B konnte im Vorfeld nicht stoßgelüftet werden, da dieser Raum nur über ein kippbares Fenster verfügt. Daher wurde der Test angepasst, während des Umbaus des Szenarios wurde quergelüftet und während des dritten Lüftungsszenarios ein Fenster gekippt gelassen. Im Gegensatz dazu konnte im Klassenraum der 7.C gut stoßgelüftet werden, da dort ausreichend, vollständig zu öffnende Fenster vorhanden waren (siehe Kapitel 3.3.3). Nach dem Lüften startete das Szenario 3 und wurde erneut nach zehn Minuten gestoppt. In den letzten Minuten der Schulstunde füllten die Teilnehmenden den dritten Fragebogen aus und es wurden zusätzlich offene Fragen ermittelt (siehe Kapitel 3.3.7). Danach wurden die Klassen entlassen.

### 3.3 Fragebogen

Der Fragebogen besteht aus insgesamt sieben Seiten, wobei jeweils zwei Seiten pro Szenario verwendet wurden. Die letzte Seite war für offene Fragen reserviert. Insgesamt wurden in den drei unterschiedlichen Szenarien jeweils sechs Fragen gestellt, mit Ausnahme von Szenario 1, welches sieben Fragen enthielt. Alle Fragen wurden auf einer 5-Punkte-Likert-Skala beantwortet. Anschließend gab es pro Szenario je eine Abfrage, ob sich der Kleidungsstatus während des Szenarios geändert hat. Zusätzlich wurde in Szenario 1 auch gefragt, ob die Teilnehmenden eine Präferenz für die Nutzung eines eingeschalteten oder ausgeschalteten Lüftungssystems hatten.

#### 3.3.1 Erhebung Kleidungsfaktor

Auf dem ersten Umfrageblatt jedes Szenarios (siehe Abbildung 32) wurde der Bekleidungsstatus abgefragt, um mögliche Veränderungen im Verlauf der verschiedenen Szenarien zu untersuchen. Zwei Beispiele wurden auf der rechten Seite des Fragebogens angegeben, um mögliche Fragen im Voraus zu klären, da in diesem Fall Mehrfachantworten möglich waren. (Gesamter Fragebogen im Anhang siehe: Abbildung 99, Abbildung 100)

**Screening Fragen**


Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

**Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>2 3</sup> (Mehrfachauswahl)**


<p><b>Oberkörper:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Ärmellose Weste 0.06</li> <li><input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt 0.08</li> <li><input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt 0.25</li> <li><input type="checkbox"/> Pullover 0.28</li> <li><input type="checkbox"/> Kurzes Kleid 0.33</li> <li><input type="checkbox"/> Langes Kleid 0.47</li> <li><input type="checkbox"/> Jacke/Mantel 0.48</li> <li><input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl 0.20</li> </ul> <p><b>Sonstiges:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab 0,01</li> <li><input type="checkbox"/> Warme Wintermütze 0,03</li> <li><input type="checkbox"/> Schal 0,01</li> </ul>	<p><b>Unterkörper:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Kurze Hose 0.08</li> <li><input type="checkbox"/> Hose (dünn) 0.24</li> <li><input type="checkbox"/> Hose (dick) 0.28</li> <li><input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock 0.14</li> <li><input type="checkbox"/> Winterlicher Rock 0.23</li> <li><input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche 0.20</li> </ul> <p><b>Füße:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Socken 0.02</li> <li><input type="checkbox"/> Schuhe 0.04</li> <li><input type="checkbox"/> Stiefel 0.10</li> </ul>
---	--

**Beispiele:** ➔



Person A trägt z.B.:

- ☒ Langärmeliges T-Shirt
- ☒ Winterlicher Rock
- ☒ Lange Unterwäsche
- ☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:

- ☒ Kurzärmeliges T-Shirt
- ☒ Kurze Hose
- ☒ Socken
- ☒ Schuhe

**Abbildung 32: Abfrage bzgl. Bekleidungsstatus/Kleidungsfaktor (clo)**

Es wurde abgefragt, welche Kleidung die Probanden am Oberkörper, Unterkörper, an den Füßen sowie eventuell zusätzliche Bekleidungsstücke wie Kopfbedeckungen oder andere Körperabdeckungen tragen. Diese Abfrage dient dazu, den Bekleidungsfaktor (clo) der einzelnen Personen zu erfassen, der für die weiteren Analysen in Kapitel 4 von Bedeutung ist. Der Bekleidungsfaktor (clo) und seine Werte werden in Kapitel 2.3.1 erläutert.

Abschließend wurde nach jedem Szenario noch abgefragt, ob sich der Kleidungsstatus während eines Lüftungsszenarios geändert hat (siehe Abbildung 33).

<b>Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)</b>		
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Ja ..... ausgezogen	<input type="checkbox"/> Ja ..... angezogen

Abbildung 33: Abschlussfrage: Änderung des Kleidungsstatus

### 3.3.2 Erhebung Temperatur

In allen drei Szenarien wurde das subjektive Empfinden der Raumtemperatur abgefragt (siehe Abbildung 34). Im dritten Szenario unterschieden sich jedoch die beiden Klassenräume (siehe Kapitel 3.3.5.3). Im Klassenraum der 8.B konnte im Vorfeld nicht stoßgelüftet werden, Somit wurde ein Fenster gekippt gelassen. Im Klassenraum der 7.C konnte stoßgelüftet werden.

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei eingeschaltetem Lüftungssystem und einem gekippten Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und geschlossenen Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und gekippten Fenster?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und zuvor offenen Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

Abbildung 34: Frage 1: Empfindung Raumtemperatur Szenario 1/2/3

Die Erhebung des subjektiven Wohlbefindens gibt Aufschluss darüber, wie angenehm oder unangenehm die Raumtemperatur von den Personen empfunden wird, was für die Bewertung des allgemeinen Wohlbefindens in Umgebungen wie Klassenzimmern entscheidend ist. Zudem können die Ergebnisse dazu verwendet werden, die Effektivität von Lüftungs- und Klimatisierungssystemen zu bewerten, indem sie zeigen, welche Maßnahmen zur Temperaturregulierung in unterschiedlichen Szenarien, wie beispielsweise zwischen Stoßlüften und gekippten Fenstern, am effektivsten sind.

Es wurde ebenfalls die bevorzugte Raumtemperatur abgefragt, welche wertvolle Einblicke in die subjektiven Temperaturpräferenzen der Befragten bietet. Siehe hierzu Abbildung 35, welche zeigt, welche Temperaturen als angenehmer empfunden werden würde. Dies kann auf eine allgemeine Tendenz von zu kühler oder zu warmer Temperatur hinweisen.

Außerdem eröffnet diese Erhebung ein Optimierungspotenzial. Wenn eine bestimmte Temperatur von vielen Befragten bevorzugt wird, lassen sich daraus Empfehlungen zur Anpassung von Heizung, Klimatisierung oder Lüftungssystemen ableiten, um das Raumklima zu verbessern.

Darüber hinaus kann die Frage Unterschiede in den Temperaturvorlieben zwischen verschiedenen Gruppen, wie Sitzplatz im Raum, Altersgruppen oder Geschlecht, aufzeigen, was bei der Entwicklung gezielter Maßnahmen zur Anpassung des Raumklimas hilfreich sein kann.

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter      ☐ Ein bisschen kühler      ☐ Keine Änderung      ☐ Ein bisschen wärmer      ☐ Wärmer

**Abbildung 35: Frage 2: Präferenz Raumtemperatur Szenario 1/2/3**

### 3.3.3 Erhebung Zugluft

In Frage 3 der Umfrage wurde das Empfinden der Zugluft in allen drei Szenarien abgefragt (siehe Abbildung 36). Im dritten Szenario unterschieden sich jedoch die beiden Klassenräume (siehe Kapitel 3.3.5.3). Im Klassenraum der 8.B konnte im Vorfeld nicht stoßgelüftet werden, somit wurde ein Fenster gekippt gelassen. Im Klassenraum der 7.C konnte stoßgelüftet werden.

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar    ☐ Sehr schwach    ☐ schwach    ☐ stark    ☐ Sehr stark

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar    ☐ Sehr schwach    ☐ schwach    ☐ stark    ☐ Sehr stark

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und zuvor offenen Fenstern?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar    ☐ Sehr schwach    ☐ schwach    ☐ stark    ☐ Sehr stark

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und gekippten Fenster?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar    ☐ Sehr schwach    ☐ schwach    ☐ stark    ☐ Sehr stark

Abbildung 36: Frage 3: Empfindung der Zugluft Szenario 1/2/3

Die Frage 4 zielt darauf ab, die Präferenzen der Befragten hinsichtlich der Zugluft zu erfassen (siehe Abbildung 37). Die Antworten geben Aufschluss darüber, ob die Befragten eine starke, moderate oder geringe Zugluft bevorzugen. Diese Informationen sind wichtig, um die Lüftungssysteme so anzupassen, dass sie den individuellen Bedürfnissen und Vorlieben der Nutzenden entsprechen.

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer      ☐ Ein bisschen schwächer      ☐ Keine Änderung      ☐ Ein bisschen stärker      ☐ Stärker

Abbildung 37: Frage 4: Präferenz Zugluft Szenario 1/2/3

### 3.3.4 Erhebung Akustik

Die Frage 5 zur Raumakustik (Abbildung 38) erfasst, wie die Befragten die Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum unter den verschiedenen Lüftungsszenarien empfinden. Wie bereits bei Szenario 3, bei dem die beiden Klassenräume unterschiedlich betrachtet werden, wird auch hier die Akustik in Bezug auf die jeweilige Lüftungsweise differenziert bewertet (siehe Abbildung 38). Dies ermöglicht eine Analyse, wie sich verschiedene Lüftungstechniken auf die Geräuschkulisse auswirken und ob bestimmte Lüftungsszenarien zu einer angenehmeren oder störenden akustischen Umgebung führen, insbesondere in Bezug auf die Lautstärke des Ventilators oder durch Außenlärm, wie beispielsweise Straßenlärm.

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

☐ Sehr leise      ☐ Leise      ☐ Neutral      ☐ Laut      ☐ Sehr laut

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

☐ Sehr leise      ☐ Leise      ☐ Neutral      ☐ Laut      ☐ Sehr laut

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und gekippten Fenster?**

☐ Sehr leise      ☐ Leise      ☐ Neutral      ☐ Laut      ☐ Sehr laut

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und zuvor offenen Fenstern?**

☐ Sehr leise      ☐ Leise      ☐ Neutral      ☐ Laut      ☐ Sehr laut

Abbildung 38: Frage 5: Empfindung Raumakustik Szenario 1/2/3



### 3.3.5 Abfrage Sicherheit

Die Frage 6 (bzw. 7 in Szenario 1) behandelt die Sicherheit im Klassenraum im Hinblick auf Covid-19 und erfasst, wie sicher sich die Befragten in Bezug auf das Infektionsrisiko unter den unterschiedlichen Lüftungsszenarien fühlen (siehe Abbildung 39). Wie auch schon bei den vorherigen Fragen werden in Szenario 3 beide Klassenräumen unterschiedlich betrachtet aufgrund der abweichenden, räumlichen Gegebenheiten (siehe Abbildung 39). Dies ermöglicht eine differenzierte Einschätzung, wie sich unterschiedliche Lüftungsstrategien auf das subjektive Sicherheitsgefühl der Personen auswirken.

**7. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich des Infektionsrisikos) fühlen Sie sich im Klassenraum mit einem geöffneten Fenstern und bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher      ☐ Etwas unsicher      ☐ Neutral      ☐ Etwas sicher      ☐ Sicher

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit geschlossenen Fenstern und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher      ☐ Etwas unsicher      ☐ Neutral      ☐ Etwas sicher      ☐ Sicher

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit gekipptem Fenster und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher      ☐ Etwas unsicher      ☐ Neutral      ☐ Etwas sicher      ☐ Sicher

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ZUVOR offenen Fenstern und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher      ☐ Etwas unsicher      ☐ Neutral      ☐ Etwas sicher      ☐ Sicher

Abbildung 39: Frage 6: Sicherheit in Bezug auf Infektionsrisikos Szenario 1/2/3

### 3.3.6 Erhebung Konzentration

Diese Frage in Bezug auf die Konzentration (siehe Abbildung 40) wurde nur in Szenario 1 abgefragt, da sich diese Frage bzgl. der Konzentration nur auf das eingeschalteten Lüftungssystem fokussiert und nicht auf andere Parameter. Daher enthält eine Gegenfrage zur Konzentration bei ausgeschaltetem System keine zusätzliche Relevanz.

**6. Fühlen Sie sich weniger oder mehr konzentriert bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Viel weniger    ☐ Etwas weniger    ☐ Neutral    ☐ Etwas mehr    ☐ Mehr

Abbildung 40: Frage 6: Konzentration bzgl. eingeschaltetem Lüftungssystem Szenario 1

### 3.3.7 Offene Fragen

Am Ende der Umfrage wurden noch offene Frage, siehe dazu Abbildung 41, erhoben, um zusätzliche Einsichten zu erhalten, die in den geschlossenen Fragen möglicherweise nicht abgedeckt wurden. Sie ermöglicht es den Befragten, unerwartete Themen und Verbesserungsvorschläge zu äußern und ihre Antworten zu erläutern. Diese qualitative Rückmeldung ergänzt die quantitativen Daten und kann Muster oder Trends aufdecken, die bei der Auswertung der geschlossenen Fragen nicht sichtbar sind.

In diesem Fall wurden die offenen Fragen auf verschiedene Aspekte des Lüftungssystems fokussiert. Es wurde erfragt, wie die Befragten das System visuell wahrnehmen, insbesondere hinsichtlich der Optik und des Designs sowie der Auswirkungen auf Licht und Sichtverhältnisse im Raum.

Zudem wurden die abgefragten Bereiche, der thermische Komfort (Wohlbefinden), der akustische Komfort (Lautstärke) und das Sicherheitsempfinden im Kontext von Covid-19, angesprochen, jedoch sollte man nun frei hinzufügen können, was eventuell noch nicht durch den Fragebogen eruiert wurde. Diese offenen Fragen ermöglichen eine umfassende Erfassung aller relevanten Eindrücke und Bedürfnisse der Befragten.

Offene Fragen			
<p><b>Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Optik/Design)? (Mehrfachauswahl)</b></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input type="checkbox"/> Aufwertung für den Klassenraum  <input type="checkbox"/> Könnte mehr Farbe vertragen  <input type="checkbox"/> Futuristisch und modern  <input type="checkbox"/> Wirkt innovativ  <input type="checkbox"/> Fügt sich gut ins Klassenbild ein </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <input type="checkbox"/> Sehr auffallend bzw. ablenkend  <input type="checkbox"/> Nicht auffallend bzw. Neutral  <input type="checkbox"/> Wirkt bedrückend und trist  <input type="checkbox"/> Gefällt gut, weil.....  <input type="checkbox"/> Gefällt gar nicht, weil..... </td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/> Aufwertung für den Klassenraum <input type="checkbox"/> Könnte mehr Farbe vertragen <input type="checkbox"/> Futuristisch und modern <input type="checkbox"/> Wirkt innovativ <input type="checkbox"/> Fügt sich gut ins Klassenbild ein	<input type="checkbox"/> Sehr auffallend bzw. ablenkend <input type="checkbox"/> Nicht auffallend bzw. Neutral <input type="checkbox"/> Wirkt bedrückend und trist <input type="checkbox"/> Gefällt gut, weil..... <input type="checkbox"/> Gefällt gar nicht, weil.....
<input type="checkbox"/> Aufwertung für den Klassenraum <input type="checkbox"/> Könnte mehr Farbe vertragen <input type="checkbox"/> Futuristisch und modern <input type="checkbox"/> Wirkt innovativ <input type="checkbox"/> Fügt sich gut ins Klassenbild ein	<input type="checkbox"/> Sehr auffallend bzw. ablenkend <input type="checkbox"/> Nicht auffallend bzw. Neutral <input type="checkbox"/> Wirkt bedrückend und trist <input type="checkbox"/> Gefällt gut, weil..... <input type="checkbox"/> Gefällt gar nicht, weil.....		
<p><b>Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Licht- und Sichtverhältnisse)?</b></p> <p> <input type="checkbox"/> Positiv beeinflusst      <input type="checkbox"/> Neutral      <input type="checkbox"/> Störend, weil ..... </p>			
<p><b>Möchten Sie etwas hinzufügen, dass oben in Bezug auf Ihren thermischen Komfort (Wohlbefinden) noch nicht besprochen wurde?</b></p>			
<p><b>Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihren akustischen Komfort (Lautstärke) noch nicht besprochen wurde?</b></p>			
<p><b>Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihr Sicherheitsempfinden (in Bezug auf Covid-19) noch nicht besprochen wurde?</b></p>			

Abbildung 41: Fragebogen: Offene Fragen

## **3.4 Messgeräte/Messstationen**

In den folgenden Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.3 werden die Methoden der Messgeräte und Messstationen sowie deren Anwendung und Beschreibung erläutert.

### **3.4.1 Einleitung**

Bei der Messung von quantitativen Parametern sind mehrere entscheidende Aspekte zu berücksichtigen, um die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen.

Zunächst sollten standardisierte Verfahren und Protokolle verwendet werden, um Konsistenz und Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Alle Beteiligten sollten die gleichen Anweisungen und Methoden befolgen. Es ist ebenso wichtig sicherzustellen, dass die verwendeten Messinstrumente ordnungsgemäß kalibriert und angebracht sind.

Während der Messungen ist die Dokumentation aller relevanten Details von essenzieller Bedeutung. Dazu gehören Umgebungsbedingungen, Messzeitpunkt und mögliche Störquellen. Eine klare Protokollierung ermöglicht es, die Bedingungen der Messungen nachvollziehbar zu machen.

Die Messgenauigkeit (Übereinstimmung mit dem wahren Wert) und Präzision (Reproduzierbarkeit der Messungen) sind entscheidende Qualitätsmerkmale. Eine gute Genauigkeit und Präzision gewährleisten verlässliche Daten.

### 3.4.2 Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration und relative Luftfeuchtigkeit

Zur Messung der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und des CO<sub>2</sub>-Gehalts wurden in den zwei Klassenräumen, zwei gleiche NDIR-Sensoren (nondispersive infrared sensor) ; AIRCO2NTROL 5000 angebracht (siehe Abbildung 42).

Der AIRCO2NTROL 5000 ist ein CO<sub>2</sub>-Monitor, der auch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung erfasst und über Datum und Uhrzeit informiert. Das Gerät verfügt über eine Datenlogger-Funktion, die es ermöglicht, Messdaten auf einer SD-Karte zu speichern. Der maximale CO<sub>2</sub>-Messbereich des Sensors liegt bei 5000 ppm, während die Temperatur von 0 °C bis +50 °C und die relative Luftfeuchtigkeit von 5% bis 95% gemessen werden können. Weiters hat der Sensor auch eine farbcodierte Ampelanzeige integriert, welche es erleichtert die Interpretation der CO<sub>2</sub>-Werte zu beurteilen [52]. Die Genauigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration beträgt  $\pm 50$  ppm oder  $\pm 5\%$ , wobei der größere Wert zur Anwendung kommt. Bei Konzentrationen über 3000 ppm liegt die Abweichung bei  $\pm 7\%$ . Die Temperatur wird mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5$  °C gemessen, während die relative Luftfeuchtigkeit eine Genauigkeit von  $\pm 5\%$  aufweist [53].

Der ANSI/ASHRAE-Standard 55 empfiehlt eine Sensorhöhe von 1,1 m über dem Boden für sitzende Personen und eine Höhe von 1,7 m über dem Boden für stehende Personen. Dazu wurde der Sensor in den Klassenräumen in einer Höhe von 1,2 m montiert [23]. Der Sensor sollte idealerweise auf etwa 1,2 bis 1,5 Meter über dem Boden, sprich in Atemhöhe im Sitzen, montiert werden. Jedoch wichtig ist dabei zu erachten, dass dieser sich nicht direkt im Atemluftstrom von Personen befinden. Es ist wichtig, den Sensor nicht direkt in der Nähe (mindestens 1 Meter Abstand) von geöffneten Fenstern, Türen oder Zuluftöffnungen zu platzieren, da dies zu verfälschten Ergebnissen führen kann [54].

Um den Personen im Raum zu helfen, die Lüftungsanlage bedarfsgerecht zu steuern, wurde wie oben schon erwähnt eine Ampel integriert. Die Farbe der Ampeln ändern sich je nach individuellem CO<sub>2</sub>-Zielwert. Eine farbcodierte Ampelanzeige erleichtert die Interpretation der CO<sub>2</sub>-Werte: Grün steht für einen CO<sub>2</sub>-Gehalt unter 800 ppm (gute Luftqualität), Gelb signalisiert Werte zwischen 800 und 1000 ppm (akzeptable Luftqualität) und Rot weist auf eine Konzentration von über 1000 ppm hin (schlechte Luftqualität) [52]. Dies erinnert die Personen im Klassenraum daran, spätestens dann ihre Ventilatoren auf die höchste Stufe zu stellen. Dadurch wird einerseits sichergestellt, dass die Bedingungen für die Raumluftqualität eingehalten werden können, und andererseits wird nicht unnötigerweise das System immer auf maximaler Stufe eingeschaltet. Indem das System auf einem niedrigeren Niveau betrieben wird, wenn der ppm-Wert unter 800 ppm liegt, kann Energie gespart werden und auch die Nebeneffekte wie Zugluft und Lärmbelastung geringer gehalten werden [23].



Abbildung 42: NDIR - Sensor mit Datenlogger; AIRCO2NTROL 5000 [52]

### 3.4.2.1 Kalibrierung

Vor dem Einsatz von Sensoren muss deren Funktionsfähigkeit überprüft werden. Dazu wurde in der Masterarbeit von Pollozhani (2022), drei Sensoren für 6 Tage (also  $n = 845$  Messungen pro Sensor) gemeinsam in einem Raum auf gleicher Höhe platziert, um die Zeitreihen der Einzelmessungen zu vergleichen. Berechnen Sie den Durchschnitt und die Standardabweichung der Werte, die alle 10 Minuten erfasst wurden. Die Zwei-Sigma-Regel von Upton & Cook wird verwendet, um zu überprüfen, ob die Messwerte innerhalb von einer, zwei oder drei Standardabweichungen vom Durchschnitt liegen [23]. Dieser Vorgang ist in Abbildung 43 dargestellt. Für eine präzise Durchführung der Kalibrierung sowie deren Ergebnisse wird auf die Arbeit von Herrn Pollozhani (2022) verwiesen.

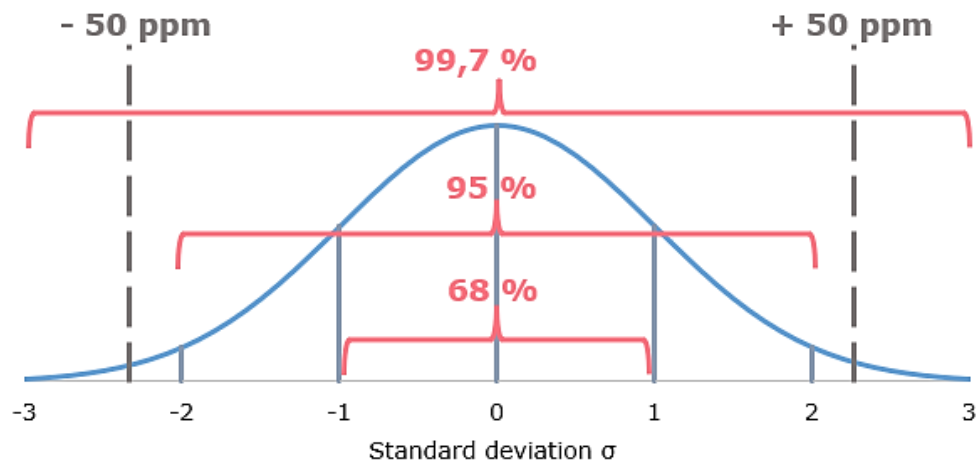


Abbildung 43: Kalibrierungsprozesses für die Sensoren [23]

### 3.4.2.2 Wetterstation TU Graz

Für die Außentemperaturen und die Luftfeuchtigkeit wird auf die Wetterstation am Gelände der TU-Graz zurückgegriffen. Diese befindet sich in der Mandellstraße 9 in 8010 Graz, etwa 500 Meter Luftlinie (siehe Abbildung 44) vom Untersuchungsstandort Petersgasse 1, 8010 Graz (Sacré Coeur Schule Graz) entfernt, und liefert daher repräsentative Daten für die Umgebung. Die Daten wurden über den gesamten Tag (6.April 2022) hinweg gesammelt und zur Zeit der Umfrage herausgefiltert.

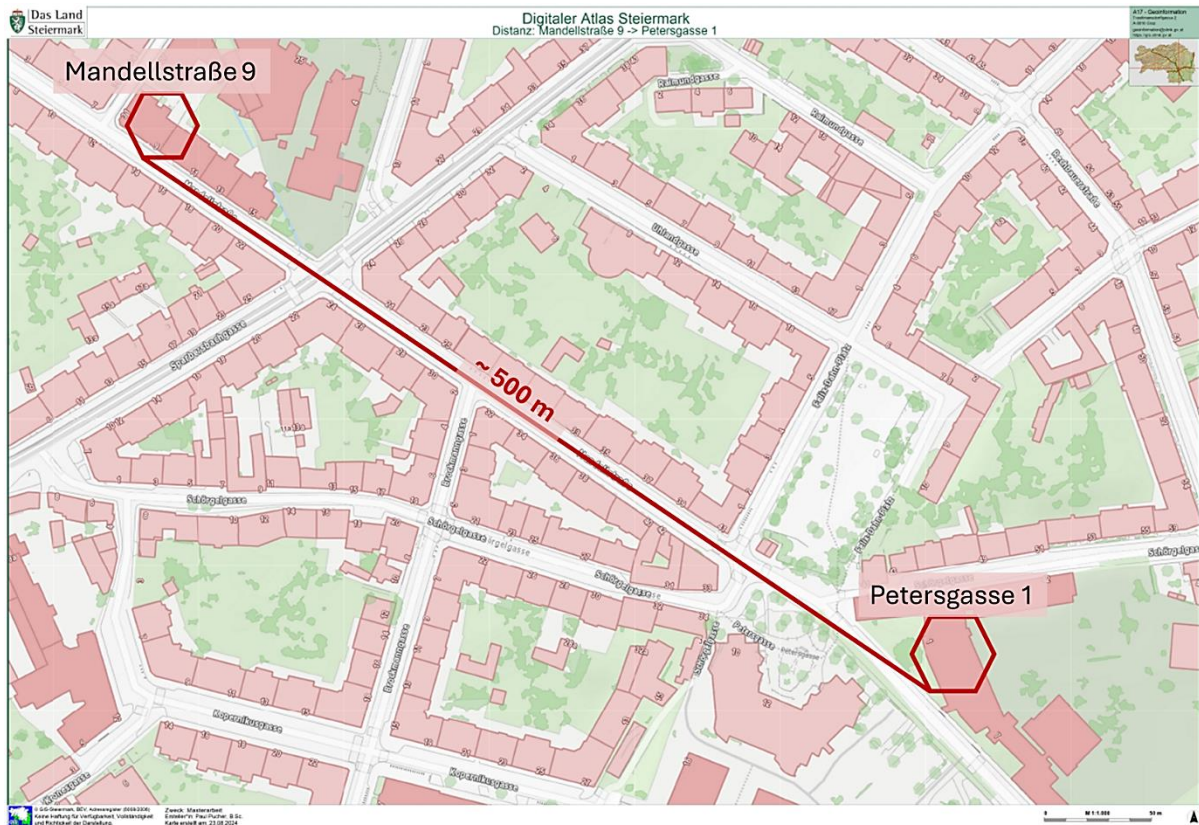


Abbildung 44: Ortsplan: Distanz Mandellstraße 9 zu Petersgasse 1 [adaptiert von 50]



### 3.4.3 Akustik

Für die Schallmessung und Lautstärkeanalyse der Klassenräume, sowohl hinsichtlich der Messdauer in den einzelnen Szenarien als auch der Spotmessungen zur Reihenanalyse der leeren Klassenräume, wurde die Schallmessung mit der Sound Meter App auf dem Handy durchgeführt. Die App bietet mehrere nützliche Funktionen. Sie zeigt die Dezibelwerte durch eine Spur an, gibt den aktuellen Rauschreferenzwert an und zeigt sowohl die minimalen, durchschnittlichen als auch maximalen Dezibelwerte an. Zudem wird der Schallpegel durch eine Kurve visualisiert (siehe Abbildung 45). Die App ermöglicht eine einfache Kalibrierung, was sie zu einem praktischen Werkzeug für grundlegende Schallmessungen macht [72].

Es ist wichtig zu erwähnen, dass mittels der Sound Meter App während jedes Szenarios durchgängig zehn Minuten lief, um Minimum-, Maximum- und Durchschnittswerte bei belegtem Klassenraum zu erfassen. Die Platzierung der Geräte erfolgte auf einer Höhe von 75 cm und wurde auf einem freien Sitzplatz in der Klasse positioniert. In der Klasse 8.B befand sich das Gerät direkt rechts neben dem Sitzplatz C4, aus der Perspektive der Tafel betrachtet. Für die Klasse 7.C wurde das Gerät in der letzten Reihe, direkt neben dem Sitzplatz E4, aus der Perspektive der Tafel betrachtet. Für eine genaue Darstellung der Platzierungen im Raum verweisen wir auf Abbildung 27 für die Klasse 8.B und auf Abbildung 31 für die Klasse 7.C.

Weiters wurde, in beiden unbelegten Klassenräumen, Spotmessungen (eine einmalige Aufnahme zu je drei Sekunden) am Anfang und Ende jeder Reihe durchgeführt, um die Lautstärke zu beurteilen.

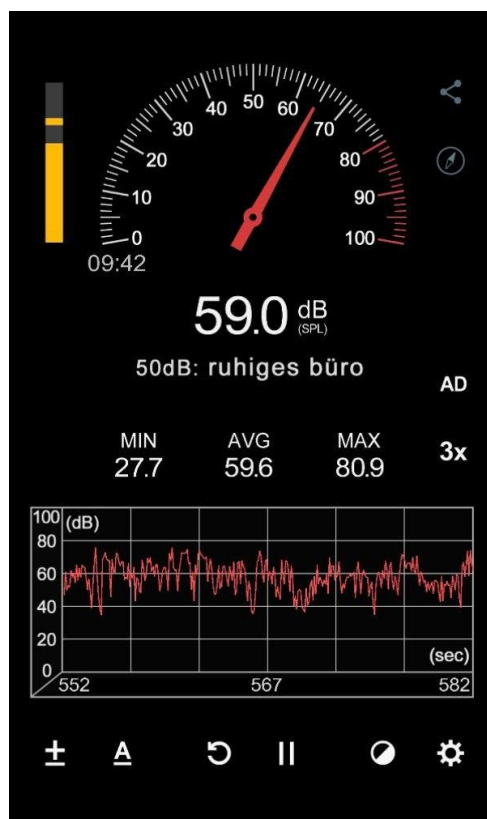


Abbildung 45: Sound Meter App [72]



### 3.4.3.1 Randbedingungen

Mit der Sound Meter App kann man den Umgebungslärm mit einem Smartphone-Mikrofon präzise in Dezibel messen und aufzeichnen. Obwohl die Software für viele gängige Modelle optimiert ist, stößt sie aufgrund der eingeschränkten akustischen Bandbreite der meisten Smartphone-Mikrofone an ihre Grenzen [72].

Die Anzeige der Sound Meter App in Version 3.6.9, die am 6. April 2022 verwendet wurde, zeigt Schallpegelwerte im Bereich von 0 bis 120 Dezibel an. Diese Version war zum Zeitpunkt der Durchführung der Messungen im Einsatz. In der Tabelle 13 sind die Schallpegelgrenzen der Sound Meter App sowie deren Bedeutung dargestellt.

**Tabelle 13: Schallpegelgrenzen und deren Bedeutung [72]**

120dB:	Schmerzschwelle, Donner
110dB:	Rockmusik, Autohupen
100dB:	Föhn, Motorcycle
90dB:	Diesel-LKW, Elektrowerkzeuge
80dB:	Verkehrsreiche Straße, Wecker
70dB:	Regel Verkehr, Staubsauger
60dB:	Normales Gespräch bei 1m
50dB:	Ruhiges Büro, ruhige Straße
40dB:	Ruhige Bibliothek, Park
30dB:	Flüstern, Stiller Raum
20dB:	Moskito, Raschelnde Blätter
10dB:	Atmen, nahezu geräuschlos

Offizielle Messgenauigkeiten der Sound Meter App wurden vom Entwickler nicht angegeben. Laut McLennon et al. (2019) beträgt die durchschnittliche Abweichung der Messwerte nur 0.7 dB, was auf eine gute Genauigkeit hindeutet. Allerdings weist der Unsicherheitsbereich von  $\pm 6.4$  dB darauf hin, dass die Messwerte stark schwanken können. Dies zeigt, dass die Messungen im Mittel zwar genau sind, jedoch einzelne Werte deutlich abweichen können, was die Gesamtgenauigkeit beeinträchtigt [55].

### 3.5 Statistische Methodik

Die Statistiken wie der Friedman-Test und der Wilcoxon-Test werden verwendet, um Unterschiede zwischen Gruppen oder Bedingungen zu analysieren, insbesondere wenn die Daten nicht normalverteilt sind oder die Stichprobengröße klein ist, was in dieser Schulstudie der Fall ist. Der Friedman-Test prüft, ob es signifikante Unterschiede zwischen drei oder mehr verbundenen Gruppen gibt, und ist besonders nützlich bei wiederholten Messungen, wie etwa bei Umfragen zu verschiedenen Zeitpunkten. Der Wilcoxon-Test hingegen vergleicht zwei verbundene Gruppen und untersucht, ob deren Mediane signifikant unterschiedlich sind. Er eignet sich ideal für kleinere Stichproben oder ordinal skalierte Daten, beispielsweise bei Vorher-Nachher-Messungen in einer Umfrage [56, 57].

Die Bedeutung der Signifikanz liegt darin, dass signifikante Ergebnisse darauf hinweisen, dass die beobachteten Unterschiede nicht zufällig sind und somit eine echte Wirkung oder Beziehung vorliegt. Dies ist entscheidend, um Hypothesen zu testen und die Ergebnisse der Schulstudie zu validieren. In einem Fragebogen ist die Signifikanz besonders wichtig, um zu beurteilen, ob bestimmte Faktoren oder Interventionen tatsächlich einen Einfluss auf die Antworten der Teilnehmenden haben [58].

#### 3.5.1 Friedman-Test in SPSS

Bei dem Friedman-Test handelt es sich um einen nichtparametrischen Test, der dazu dient, Unterschiede zwischen verschiedenen Szenarien zu identifizieren. Er basiert auf der Rangordnung der Daten, anstatt deren exakte Werte zu verwenden [59].

Der Friedman-Test ist eine nichtparametrische Alternative, die für wiederholte Messungen verwendet wird, im Gegensatz zur einfachen ANOVA, die voraussetzt, dass die Gruppen unabhängig sind und die Daten normalverteilt sind. Der Friedman-Test kann verwendet werden, um auf Unterschiede zwischen Gruppen zu testen, wenn die gemessene abhängige Variable ordinal ist oder wenn es kontinuierliche Daten gibt, die gegen die Annahmen verstoßen, die erforderlich sind, um eine einfache ANOVA mit wiederholten Messungen durchzuführen. Ziel des Friedman-Tests ist es herauszufinden, ob es eine signifikante Abweichung zwischen mehr als zwei abhängigen Testgruppen gibt [57, 58].

Zwei mögliche Hypothesen werden bei diesem Test als eventuelles Ergebnis ausgegeben [60]:

Nullhypothese: Es gibt keine signifikante Differenz zwischen den Szenarien.

Alternativhypothese: Es gibt eine signifikante Differenz bezüglich mindestens zwei der Szenarien.

Die Alternativhypothese besagt, dass mindestens eine der Szenarien sich signifikant von einem anderen Szenario unterscheidet. Der Friedman-Test vergleicht nicht die tatsächlichen Werte der Szenarien, sondern erstellt Ränge. Es geht somit um die Rangordnungen der einzelnen Szenarien in Bezug auf die Verteilung der abhängigen Variable. Wenn es einen signifikanten Unterschied zwischen den Szenarien gibt, wird die Nullhypothese abgelehnt und es kann angenommen werden, dass es einen Unterschied zwischen den Szenarien gibt [58, 60].

Die vier Anforderungen an den Friedman-Test lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Anforderung 1: Messen Sie drei oder mehr Zeitpunkte: Ihre abhängige Variable muss mindestens dreimal gemessen werden, normalerweise über einen bestimmten Zeitraum, um zu untersuchen, wie sich die abhängige Variable im Laufe der Zeit ändert [57].

Anforderung 2: Zufallsstichprobe: Die Daten sollten eine Zufallsstichprobe aus der Allgemeinbevölkerung darstellen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Ergebnisse auf die allgemeine Bevölkerung verallgemeinert werden können [57].

Anforderung 3: Ordinale oder kontinuierliche Messung: Ihre abhängige Variable sollte auf einer ordinalen oder kontinuierlichen Ebene gemessen werden. Ordinale Variablen werden normalerweise auf einer Likert-Skala ausgedrückt, während kontinuierliche Variablen Dinge wie Gewicht, Intelligenz oder Zeit sein können [57].

Anforderung 4: Keine Normalverteilung erforderlich: Im Gegensatz zu parametrischen Tests wie ANOVA erfordert der Friedman-Test nicht, dass die Daten einer Normalverteilung folgen [57].

Nachdem der Datensatz die genannten Voraussetzungen erfüllt, stellt der Friedman-Test eine geeignete Methode dar, um Unterschiede zwischen den Testgruppen zu identifizieren [57].

Für die Durchführung des Friedman-Tests werden die Daten gesammelt und dann in SPSS eingegeben, um danach die gepaarten Daten der einzelnen Szenarien vergleichen zu können.

Danach bekommen die Daten einen Rang zugeordnet. Kommt es vor das zwei Messwerte den gleichen Wert aufweisen und somit nicht genau zugeordnet werden können kommt es zu einer Mittelung der Ränge. Ein Beispiel wären Werte 104, 90, 90. Somit wäre Rang 1 der Messwert von 104 und Rang 2 und 3 müssten gemittelt werden.  $(2+3)/2 = 2,5$  daraus folgt der Messwert 90 aus beiden Szenarien würden den Rang 2,5 erhalten [57, 59].

Durch die Addierung der Rangnummern für die jeweiligen Szenarien kann somit die Gesamtrangsumme gebildet werden. Die Gesamtrangsumme je Szenario dividiert durch die Anzahl der Probanden ergibt den mittleren Rang pro Szenario welcher auch in SPSS ausgegeben wird. Eine Differenz der Mittleren Ränge kann schon ein Indiz auf Unterschiede im jeweiligen Szenario sein [57, 58].

Anschließend wird im Friedman-Test eine Teststatistik entwickelt, welche mit dem kritischen Wert und der Chi-Quadrat-Verteilung verglichen wird [59].

$$\chi_r^2 = \frac{12}{n * k(k+1)} * \sum_{i=1}^k R_i^2 - 3 * n(k+1) \quad (8)$$

$$df = k - 1 \quad (9)$$

Mit

k = Anzahl der Messwiederholungen

n = Anzahl der Probanden

R<sub>i</sub> = Rangsumme von den Szenarien

Sind in der Rangierung verbundene Ränge aufzuweisen, dann muss der Chi-quadrat-Wert korrigiert werden [59].

$$\chi_{r(corr)}^2 = \frac{\chi_r^2}{1 - \frac{1}{n \cdot k(k^2 - 1)} \cdot \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)} \quad (10)$$

Mit

k = Anzahl der Messwiederholungen

n = Anzahl der Probanden

m = Anzahl der Fälle in denen verbunden Ränge auftreten

t<sub>j</sub> = Anzahl gleichen Ränge je Szenario, (Sz1=Sz2 => t=2) (Sz1=Sz2=Sz3 => t=3)

Um die Signifikanz der Teststatistik zu bewerten, muss diese mit dem kritischen Wert verglichen werden, welcher sich durch die Freiheitsgrade und dem Signifikanzniveau Alpha ergibt [59, 60] (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Chi-Quadrat Tabelle [57]

### Chi-Quadrat Tabelle

Signifikanzniveau Alpha	0,995	0,975	0,2	0,1	0,05	0,025	0,02	0,01
Freiheitsgrade								
1	0	0,001	1,642	2,706	3,841	5,024	5,412	6,635
2	0,01	0,051	3,219	4,605	5,991	7,378	7,824	9,21
3	0,072	0,216	4,642	6,251	7,815	9,348	9,837	11,345
4	0,207	0,484	5,989	7,779	9,488	11,143	11,668	13,277
5	0,412	0,831	7,289	9,236	11,07	12,833	13,388	15,086

Mit

Signifikanzniveau Alpha von 0,05 = 5%

df = k-1

k = Anzahl der Messwiederholungen

### 3.5.1.1 Interpretation der Ergebnisse

Um den Friedman-Test richtig zu interpretieren, muss der errechnete Chi-Quadrat-Wert mit dem kritischen Wert verglichen werden [57, 60].

Wie bereits in Kapitel 3.5.1 erläutert, gibt es zwei Hypothesen, die in Betracht gezogen werden. Die **Nullhypothese** besagt, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien gibt. Im Gegensatz dazu wird die **Alternativhypothese** angenommen, wenn die Nullhypothese verworfen wird, da dann eine Signifikanz zwischen mindestens zwei der Szenarien vorliegt.

Die Nullhypothese bleibt bestehen, wenn der berechnete Chi-Quadrat-Wert kleiner als der kritische Wert ist [57].

Überschreitet der berechnete Chi-Quadrat-Wert jedoch den kritischen Wert der Chi-Quadrat-Verteilung, muss die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden, da dann signifikante Unterschiede vorliegen [57].

Der Friedman-Test selbst zeigt jedoch nicht auf, zwischen welchen Szenarien genau die Unterschiede bestehen. Er weist lediglich darauf hin, dass es einen signifikanten Unterschied gibt. Um herauszufinden, welche Szenarien sich konkret voneinander unterscheiden, sind zusätzliche Tests erforderlich, die in der Regel paarweise durchgeführt werden, um die einzelnen Szenarien im direkten Vergleich zu analysieren [57–59].

### 3.5.2 Wilcoxon-Test

Der Wilcoxon-Test ist auch wie der Friedman-Test ein nicht parametrischer Test, in welchem die Daten nicht normalverteilt sein müssen, es muss jedoch eine Abhängigkeit der Stichproben vorhanden sein, in diesem Fall sind dies mehrere Messwiederholungen mit den gleichen Probanden. Der Test kann jedoch auch angewendet werden, wenn es sich um natürliche Paare handelt [56, 58].

Der Wilcoxon-Test wird herangezogen um Differenzen zwischen nur genau zwei Szenarien herauszufinden, indem diese miteinander verglichen werden und die Probanden dieselben bleiben [56].

Auch hier wird wie bei den Friedman-Test geschaut, welche Hypothese auf das Ergebnis zutreffen. Hierbei wird jedoch mit der zentralen Tendenz gearbeitet [56, 61].

Die Nullhypothese beim Wilcoxon-Test besagt, dass es keinen Unterschied in der zentralen Tendenz (Median) der beiden verglichenen Szenarien gibt. Das bedeutet, dass die Summe der Ränge in beiden Szenarien ähnlich ist und somit keine signifikanten Abweichungen zwischen den beiden Gruppen bestehen [56].

Die Alternativhypothese besagt, dass es einen signifikanten Unterschied in der zentralen Tendenz (Median) der beiden Szenarien gibt. Das bedeutet, dass die Ränge der beiden Szenarien in der Summe deutlich voneinander abweichen, was darauf hinweist, dass die Mediane der verglichenen Gruppen nicht gleich sind [56].

Die Voraussetzungen für die Anwendung des Wilcoxon-Tests lassen sich wie folgt beschreiben.

Der Wilcoxon-Test kann nur verwendet werden, wenn zwei Proben gepaart sind, d. h., wenn jeder Wert in einer Probe mit dem entsprechenden Wert in der anderen Probe verglichen werden kann [56, 61].

Der Wilcoxon-Test ist ein nichtparametrischer Test, der auf Ordnungs- oder Rangdaten basiert. Es kann auch auf nicht normalverteilte, metrische Daten angewendet werden [56, 61].

Gepaarte Stichproben müssen voneinander unabhängig sein, d. h. Werte in einer Stichprobe dürfen Werte in einer anderen Stichprobe nicht beeinflussen [56, 61].

Die Differenzen zwischen Beobachtungspaaren sollten symmetrisch um Null herum verteilt sein. Wenn die Verteilung nicht symmetrisch ist, kann der Test trotzdem angewendet werden, aber die Ergebnisse sind möglicherweise ungenauer [56, 61].

Der Wilcoxon-Test ist empfindlich gegenüber Ausreißern. Wenn die Daten Ausreißer enthalten, kann ein alternativer nichtparametrischer Test wie der Mann-Whitney-U-Test verwendet werden [56, 61].

Der Wilcoxon-Test funktioniert am besten mit Daten auf ordinal oder Intervallskalen. Sie kann auch auf Nominaldaten angewendet werden, jedoch muss in diesem Fall eine entsprechende Transformation angewendet werden.

Es ist wichtig, dass die Anforderungen erfüllt sind, bevor der Wilcoxon-Test angewendet wird, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse gültig und aussagekräftig sind [56, 61].

Um den Wilcoxon-Test durchzuführen, muss zuerst die Differenz der Werte aus den zwei zu vergleichenden Szenarien gebildet werden. Danach wird jedem Wert eine Rangnummer zugeordnet. Diese wird der Größe nach aufgelistet, das heißt der kleinste Wert bekommt den niedrigsten Rang und so weiter. Wichtig ist hierbei, dass das Vorzeichen mit dokumentiert wird. Dies ist später noch wichtig für die Berechnung [58].

Im nächsten Schritt werden die positiven und die negativen Ränge jeweils getrennt voneinander aufsummiert. Zwischen diesen Rangsummen besteht der folgende Zusammenhang [61]:

$$T^+ + T^- = \frac{n(n+1)}{2} \quad (11)$$

Mit

$T^+$  = Summe der Positiven Ränge

$T^-$  = Summe der negativen Ränge

$n$  = Anzahl der von Null verschiedenen Paardifferenzen

Danach kann die Teststatistik  $W$  berechnet werden, da sie das Minimum aus der Summe der negativen und der Summe der positiven Rangplätze darstellt.

$$W = \min (T^+; T^-) \quad (12)$$

Wenn der Unterschied der zentralen Tendenzen umso kleiner entfällt, sprich die Unterschiede umso kleiner sind, desto näher wird die Teststatistik am Wert liegen, wenn es keine Unterschiede geben würde. Dieser erwartete Wert wird berechnet, indem man die beiden Rangsummen addiert und durch zweiteilt. Dadurch ergibt sich ein Wert, den die Teststatistik annehmen würde, wenn kein Unterschied zwischen den Stichproben vorläge [61].

$$\mu_w = \frac{n * (n+1)}{4} \quad (13)$$

Mit

$n$  = Anzahl der von Null verschiedenen Paardifferenzen



Der berechnete Wert muss nun auf Signifikanz geprüft werden. Um eine Signifikanz bezüglich der beiden Szenarien statistisch zu belegen, muss die Teststatistik mit dem kritischen Wert verglichen werden, um eine widerlegbare Tendenz zu bezeugen [62].

$$z = \frac{W - \mu_w}{\sigma_w} \quad (14)$$

mit

$\sigma_w$  = Standardabweichung

$W$  = Teststatistik  $W$

$\mu_w$  = Erwartungswert von  $W$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{n * (n + 1) * (2 * n + 1) - \frac{\sum_{i=1}^k t_i^3 - t_i}{2}}{24}} \quad (15)$$

Mit

$k$  = Anzahl der verbundenen Ränge

$t_i$  = Anzahl der Probanden, die sich Rangplatz  $i$  teilen

Nachdem der Z-Wert ausgerechnet wurde, kann man mit der nachstehenden Tabelle 15 bezüglich der Verteilungsfunktion  $\Phi(z)$  mit dem errechneten z-Wert hineingehen. Den einseitigen p-Wert kann man sich dann mit der Formel  $1 - \Phi(z)$  errechnen. Da wir jedoch den zweiseitigen Wert brauchen, da sich die Glockenkurve auf beide Seiten abflacht (siehe Abbildung 46) und unsere Alternativhypothese ungerichtet ist, muss dieser noch mit dem Faktor zwei dupliziert werden [62].

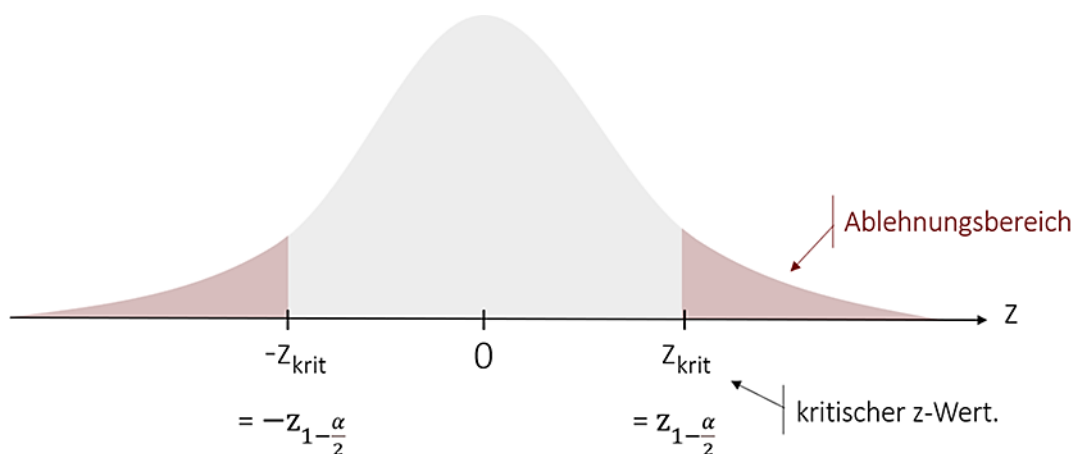


Abbildung 46: Glockenkurve z-Wert grafisch [62]

### 3.5.2.1 Interpretation der Ergebnisse

Zusätzlich muss noch die Bonferroni-Anpassung durchgeführt werden, da sich sonst womöglich statistisch signifikante Beziehung finden, welche nicht gegeben sind. Die Bonferroni-Anpassung behebt das Problem einer  $\alpha$ -Fehler Inflation. Normalerweise wird jeder Test mit einer 5-prozentigen Wahrscheinlichkeit gerechnet um signifikant zu werden und die Nullhypothese zu verwerfen. Werden nun aber mehrere Tests gemacht, summiert sich diese 5-prozentige Wahrscheinlichkeit. Um dem vorzubeugen, muss die 5-prozentige Wahrscheinlichkeit durch die Anzahl der durchgeführten Tests dividiert werden, um eine aussagekräftige Relevanz zu haben. In diesem Fall wurde die 5-prozentige Wahrscheinlichkeit durch die drei Szenarien dividiert um einen p-Wert von  $\leq 0.0167$  zu erreichen. Somit müssen alle signifikanten Unterschiede unter der neu festgelegten Grenze liegen [56, 61].

Um die Ergebnisse richtig zu interpretieren, vergleicht man die Teststatistik mit dem kritischen Wert. Wenn der errechnete p-Wert kleiner als der Wert von 0,0167 ist, wird die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese abgelehnt [56].

Der z-Wert für die 0,0167 Fraktile liegt bei 2,39 (siehe Tabelle 15).

Weiters kann noch die Effektstärke ermittelt werden. Wenn nun eine Signifikanz eruiert wurde, kann man überprüfen, wie groß jedoch der Einfluss auf das Ergebnis hat. Es gibt einige Arten die Effektstärke zu überprüfen. Ein Fall wäre es die Effektstärke von Cohen (d) und der Korrelationskoeffizient (r) von Pearson zu wählen. Die Effektstärke liegt dort immer zwischen 0 (kein Effekt) und 1 (maximaler Effekt) [59].

$$r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right| \quad (16)$$

Mit

r = Effektstärke

z = z-Wert errechnet

n = Anzahl der Probanden

Zur Bewertung der Effektgröße wird die Klassifikation nach Cohen (1988) herangezogen [63].

r = .10 entspricht einem schwachen Effekt

r = .30 entspricht einem mittleren Effekt

r = .50 entspricht einem starken Effekt

Tabelle 15: Werte der Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung [64]

**Anlage 4: Werte der Verteilungsfunktion  $\Phi(z)$  [der Standardnormalverteilung]**

$z$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-3,	0,0013	0,0010	0,0007	0,0005	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000
-2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
-2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
-2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
-2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
-2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
-2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
-2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
-2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
-2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
-2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
-1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
-1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
-1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
-1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
-1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
-1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
-1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
-1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
-1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
-1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
-0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
-0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
-0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
-0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
-0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
-0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
-0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
-0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
-0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
-0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,	0,9987	0,9990	0,9993	0,9995	0,9997	0,9998	0,9998	0,9999	0,9999	1,00000

### 3.5.3 Stichprobengröße Kalkulation

Die Stichprobengröße ist ein statistisches Konzept, bei dem die Anzahl der Beobachtungen oder Wiederholungen (die Wiederholung einer experimentellen Bedingung zur Abschätzung der Variabilität eines Phänomens) bestimmt wird, die in eine statistische Stichprobe einbezogen werden sollte. Es ist ein wichtiger Aspekt jeder empirischen Studie, der erfordert, dass auf der Grundlage einer Stichprobe Rückschlüsse auf eine Population gezogen werden und um sicherzustellen, dass die Ergebnisse repräsentativ und aussagekräftig sind. Im Wesentlichen werden Stichprobengrößen verwendet, um Teile einer Population darzustellen, die für eine bestimmte Umfrage oder ein bestimmtes Experiment ausgewählt werden [65–67].

Die genaue Berechnung der Stichprobengröße hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse, des Konfidenzniveaus und der Standardabweichung. Im Folgenden sind die grundlegenden Schritte zur Berechnung der Stichprobengröße beschrieben.

Vorab wird die gewünschte Genauigkeit bestimmt, dies bezieht sich auf die gewünschte Präzision oder den gewünschten maximalen Fehler, den man haben möchte. In diesem Fall wurde ein maximaler Fehler von  $\pm 5\%$  gewählt [66, 68].

Als weiteren Punkt wählt man das Konfidenzniveau. Häufig verwendete Konfidenzniveaus sind 95% oder 99%. Je höher das Konfidenzniveau, desto größer muss die Stichprobe sein. In dieser Berechnung bezüglich der benötigten Stichprobengröße, um die Parameter einhalten zu können, wurde ein Konfidenzniveau von 95% gewählt [66, 68].

Überdies benötigt man noch die Standardabweichung oder Varianz des zu untersuchenden Merkmals in der Zielgesamtheit. Falls keine vorherige Schätzung verfügbar ist, kann eine Pilotstudie oder eine ähnliche Untersuchung hilfreich sein, um eine grobe Schätzung zu erhalten. Die Standardabweichung ermöglicht es, die Streuung der Datenpunkte um den Durchschnitt herum zu quantifizieren. Eine hohe Standardabweichung deutet auf eine größere Streuung hin, während eine niedrige Standardabweichung auf eine geringere Streuung hinweist [66].

Es gibt verschiedene Formeln zur Berechnung der Stichprobengröße, abhängig von der Art der Stichprobe und des gewünschten Analyseverfahrens. Unter Verwendung der Standardformel zur Berechnung der Stichprobengröße, mit sehr großer oder unbekannter Population, ist eine häufig verwendete Formel für Schätzungen des Anteils in einer Stichprobe die folgende [66]:

$$n = \frac{(Z^2 * p * (1 - p))}{E^2} \quad (17)$$

mit:

N = die Stichprobengröße,

Z = der Z-Wert für das gewünschte Konfidenzniveau

P = die Standardabweichung

E = der gewünschte maximale Fehler (Präzision).

Nach Berechnung der Stichprobengröße sollte man beachten, dass die berechnete Stichprobengröße möglicherweise eine Dezimalzahl ergibt. In solchen Fällen wird üblicherweise auf die nächste ganze Zahl aufgerundet, da die Anzahl der Elemente in einer Stichprobe ganzzahlig sein muss, da die meisten Umfragen mit genauen Personenanzahlen arbeiten. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass die Berechnung der Stichprobengröße auf Annahmen basiert und die tatsächliche Stichprobengröße von anderen Faktoren beeinflusst werden kann [65, 66].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Berechnung der Stichprobengröße die Berücksichtigung der gewünschten Genauigkeit, des Konfidenzniveaus und der Standardabweichung erfordert. Es gibt verschiedene Formeln, um die Stichprobengröße zu berechnen, abhängig von der Art der Stichprobe und des Analyseverfahrens. Die berechnete Stichprobengröße bietet eine Schätzung, um repräsentative und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen [66].

### 3.5.3.1 Skalierung der Stichprobengröße

Bei der Skalierung der Stichprobengröße geht es darum, die Anzahl der Elemente in einer Stichprobe oder einen bestimmten Bedarf beziehungsweise bestimmte Bedingung anzupassen. Dieser Prozess kann erforderlich sein, um die Repräsentativität der Stichprobe sicherzustellen, die statistische Aussagekraft zu erhöhen oder die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern. Die Skalierung der Stichprobengröße kann durch verschiedene Faktoren wie erforderliche Genauigkeit, Konfidenzniveau, Variabilität der Daten oder verfügbare Ressourcen beeinflusst werden. Durch sorgfältige Skalierung der Stichprobengröße kann eine ausreichende und aussagekräftige Stichprobe gewonnen werden, um aus den gesammelten Daten gültige Schlussfolgerungen zu ziehen [65, 66].

Im Anschluss daran wird eine Berechnung mit der Formel (18) durchgeführt, um eine notwendige Stichprobengröße zu erhalten, welche die exakten Werte einhält um somit die gewünschte Genauigkeit von  $\pm 5\%$ , das Konfidenzniveau von 95% und die Standardabweichung von 50% einzuhalten.

$$E = \sqrt{\frac{(Z^2 * p * (1 - p))}{n}} \quad (18)$$

### 3.6 Zusammenfassung

Die Methodik der Arbeit stellt das Bindeglied zwischen dem Kapitel 2 „Stand der Technik“ und dem Kapitel 4 „Ergebnisse und Analyse“ dar.

In Kapitel 3.2 der Schulstudie werden die allgemeinen örtlichen Gegebenheiten sowie der Aufbau und Lageplan der Lüftungssysteme und Szenarien beschrieben. In der Klasse 8.B befinden sich 13 Lernende in vier Reihen auf einer Fläche von ungefähr 40 m<sup>2</sup>. Der Klassenraum der 7.C beherbergt 24 Lernende in fünf Reihen auf 55 m<sup>2</sup>. In der Ausführung der Forschung wird ein schematischer Ablauf zur Einteilung der Szenarien sowie deren Umbauzeiten vorgestellt. Außerdem werden die drei Lüftungsszenarien erläutert:

- Szenario 1: Eingeschaltetes Lüftungssystem (MPIC-Lüftungsanlage) bei einem geöffnetem/gekippten Fenster.
- Szenario 2: Ausgeschaltetes Lüftungssystem mit geschlossenen Fenstern, was dem Ausgangszustand der Arbeit entspricht. (keine Lüftung)
- Szenario 3: (Lüftungsanlage ausgeschaltet und gekipptes Fenster während Szenario 3 (8.B) bzw. Stoßlüften vor Szenario 3 (7.C))

In Kapitel 3.3 wird der Fragebogen im Detail erläutert. Es geht um die Erhebungsparameter, wie den Kleidungsfaktor, der mit einer genauen Erklärung und Beispielen versehen ist, um mögliche Unklarheiten auszuräumen. Darüber hinaus werden die Aspekte Temperatur, Zugluft, Akustik, Sicherheit und Konzentration behandelt, die alle mit einer 5-Punkte-Likert-Skala beantwortet werden sollen.

Das Kapitel 3.4 befasst sich mit den Messgeräten und Messstationen und beschreibt, wo die Messungen durchgeführt wurden, wie die Geräte positioniert waren und welche Geräte verwendet wurden. Zur Ermittlung der Innentemperatur und der CO<sub>2</sub>-Konzentration kam das AIRCO<sub>2</sub>NTROL 5000-Messgerät zum Einsatz. Dieses war auf einer Höhe von 1,2 Metern montiert.

Die Außentemperatur für den Tag wurde von der Messstation an der TU-Graz in der Mandellstraße 9 entnommen, da diese nur 500 Meter von der Schule entfernt ist.

Die Schallmessung im Innenraum wurde mithilfe einer Sound Meter-App auf dem Handy durchgeführt. Während der drei Szenarien wurde jeweils über einen Zeitraum von 10 Minuten kontinuierlich gemessen. Zusätzlich wurden Spotmessungen in der leeren Klasse durchgeführt. Das Gerät erfasst dabei Minimum-, Maximum- und Durchschnittswerte während des Aufenthalts im belegten Klassenraum. Die Platzierung der Geräte erfolgte in einer Höhe von 75 cm und wurde auf einem freien Sitzplatz positioniert.

In Kapitel 3.5 werden die statistischen Tests behandelt und deren Anforderungen.

Der Friedman-Test ist ein nichtparametrischer Test, der Unterschiede zwischen **drei oder mehr** Szenarien identifiziert, indem er auf der Rangordnung der Daten basiert. Der Wilcoxon-Test hingegen prüft Unterschiede zwischen **zwei** verbundenen oder gepaarten Stichproben, indem er die Ränge der Unterschiede zwischen den Paaren analysiert. Beide Tests verwenden eine Nullhypothese und eine Alternativhypothese, um die Signifikanz der Ergebnisse zu bestimmen und festzustellen, ob ein statistisch relevanter Unterschied vorliegt. Diese Tests sind besonders bei kleinen Stichproben wichtig und entscheidend, um zu beurteilen, ob bestimmte Faktoren oder Interventionen einen Einfluss auf die Antworten der Teilnehmenden in einem Fragebogen haben.



### 3.7 Einschränkungen der Methodik

Die Messungen wurden nur über einen Schultag durchgeführt, da die Umfrage nur einmal realisiert wurde. Eine parallele Durchführung in derselben Schulstunde war nicht möglich, da nur eine Person für die Durchführung verantwortlich war. Die Schulleitung hatte die Vorgaben bezüglich des Termins sowie der Schulstunde festgelegt.

Für die gesamte Durchführung pro Klasse stand nur eine Zeitspanne von je 50 Minuten zur Verfügung. Ein längerer Zeitraum wäre vorteilhaft gewesen, um die Szenarien ausgedehnter zu betreiben und zu analysieren sowie die Pausen zwischen den Szenarien zu verlängern, um mögliche Beeinflussungen zu minimieren. Trotzdem wurde die verfügbare Zeit optimal genutzt, sowohl für jedes Szenario als auch für die Pausen dazwischen, die für den Umbau und das Ausfüllen des Fragebogens vorgesehen waren. Um die Lernenden nicht zu strapazieren, wurde die Anzahl der Fragen auf sechs beschränkt, um die Mitarbeit zu fördern und Zeitdruck zu vermeiden.

Mit einer Stichprobengröße von zwei Klassen und insgesamt 37 Lernenden sind die Daten nicht ausreichend, um dezidierte, verlässliche Aussagen zu treffen. Es können jedoch wissenschaftlich, aufgearbeitete Empfehlungen und Anpassungen ausgesprochen werden.

In der Klasse 8.B konnte kein Stoßlüften durchgeführt werden, da nur ein kippbares Fenster zur Verfügung stand. Daher konnte nur durch Querlüften vor dem Szenario gearbeitet werden, zusammen mit einem angepassten Szenario 3, das ein gekipptes Fenster und ein ausgeschaltetes System berücksichtigte.

Um ein besseres Raumverständnis in Bezug auf die Akustik zu erhalten, könnten Lautstärkemessungen an mehreren Stellen mit geeigneten Schallmessgeräten durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Studie wurde die Akustik gemessen, was in anderen Studien häufig nicht berücksichtigt wurde. Zudem konnten Daten, die mit einer Soundmeter-App erfasst werden, wertvolle Einblicke in die Lautstärke im Raum geben. Besonders in leeren Klassenräumen, ohne zusätzliche Lärmquelle ist dies recht genau.

Zudem wären Anemometer hilfreich, um die Luftgeschwindigkeit im Raum zu bestimmen und eventuelle lokale Zugluftstellen zu identifizieren. Dies wäre gerade bei Szenario 1 (MPIC-Lüftungssystem eingeschaltet) interessant. Der Fragebogen liefert qualitative Ergebnisse, jedoch fehlen quantitative Messwerte.

Zusätzlich wären weitergehende Fragen zum Nutzungserlebnis hinsichtlich der Lichtverhältnisse oder ähnlicher Aspekte im Fragebogen mittels Likert-Skala möglicherweise hilfreich gewesen. Allerdings fehlte hierfür die notwendige Zeit, weshalb dies durch die offenen Fragen abgedeckt wurde.

Der Friedman-Test hat einige Limitierungen, darunter die Tatsache, dass er nur Unterschiede zwischen Gruppen identifizieren kann, jedoch keine spezifischen Informationen über die Natur dieser Unterschiede liefert. Zudem ist der Test weniger robust, wenn die Daten stark von der Normalverteilung abweichen oder viele Ausreißer enthalten sind.

Der Wilcoxon-Test ist ausschließlich für gepaarte Daten geeignet und kann daher nicht für unabhängige Stichproben verwendet werden. Der Test untersucht nur Unterschiede in der zentralen Tendenz (Median) der Gruppen und berücksichtigt nicht die Variabilität der Daten.

Bei kleinen Stichproben ist die Aussagekraft beider Tests eingeschränkt, da sie anfälliger für Verzerrungen sind und die Verallgemeinerung der Ergebnisse erschwert wird.

## 4 Ergebnisse und Analysen

Dieses Kapitel inkludiert die Ergebnisse und Analysen der Arbeitspakete die in Abschnitt 3 erklärt wurden. Die Ergebnisse der qualitativen Parameter, die mittels Fragebogen ermittelt wurden, zielen auf die Zielsetzung 2 aus Kapitel 1.2 ab. Die Ergebnisse der quantitativen Parameter, die durch Messgeräte und Messstationen erfasst wurden, sowie die Ergebnisse der statistischen Auswertung mit Excel und SPSS beziehen sich auf die Zielsetzung 3. Die Analyse befasst sich mit der Zielsetzung 4 (siehe Kapitel 1.2). Im Folgenden werden die Ergebnisse und Analysen erläutert.

### 4.1 Einleitung

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die Ergebnisse der erfassten und ausgewerteten Parameter, wie Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration, Luftbewegung, Akustik, Sicherheit und Konzentration, präsentiert.

Zudem wird eine Analyse dieser Ergebnisse durchgeführt, um die Zusammenhänge der einzelnen Parameter zu verstehen und sie miteinander zu verknüpfen.

Kapitel 4.2 befasst sich mit dem Fragebogen und dessen Ergebnissen zu den erhobenen qualitativen Parametern. Der Fragebogen wird dabei systematisch durchgegangen, wobei die jeweiligen Ergebnisse zu den einzelnen Aspekten wie Bekleidungsfaktor, Temperaturempfinden und -präferenzen, Zuglufteffahrungen sowie Empfindungen und Präferenzen im Hinblick auf Zugluft dargestellt werden. Weitere Themen sind die Akustik, das Sicherheitsgefühl im Hinblick auf Infektionsrisiken, die Konzentration und offene Fragen, durch die zusätzliche Informationen erfasst wurden. Zudem wird abgefragt, ob die Befragten den Tag lieber mit eingeschaltetem oder ausgeschaltetem Lüftungssystem verbringen.

In Kapitel 4.3, welches an die Methodik anschließt, werden die Messergebnisse von Messgeräten oder -stationen präsentiert. Die erfassten quantitativen Parameter, wie Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Akustik, werden dabei detailliert beschrieben und in Tabellenform übersichtlich dargestellt.

In Kapitel 4.4 wird die statistische Auswertung der Umfrage behandelt, wobei überprüft wird, ob die in Kapitel 3.5 gewählten Methoden zu aussagekräftigen Ergebnissen führen. Die Auswertungen erfolgen mithilfe des Friedman- und Wilcoxon-Tests, die Signifikanzen in Bezug auf die erhobenen Fragen sowie die verschiedenen Lüftungsszenarien ermitteln.

Kapitel 4.5 widmet sich der Analyse der zuvor dargestellten Ergebnisse. Diese Analyse soll einen umfassenden Einblick in die Zusammenhänge der erhobenen Daten geben und auch den Bezug zur in Kapitel 2 behandelten wissenschaftlichen Literatur herstellen. Ziel ist es, zu verstehen, wie sich das Wohlbefinden der Lernenden in den verschiedenen Szenarien verändert und welche Probleme oder Unannehmlichkeiten in den jeweiligen Klassen aufgetreten sind. Dabei soll dargestellt werden, wodurch diese Probleme möglicherweise entstanden sind und wie sie miteinander in Verbindung stehen.

Abschließend wird in Kapitel 4.6 eine kurze Zusammenfassung präsentiert, die die einzelnen Behaglichkeitsfaktoren und deren Präferenzen erneut zusammenfasst und eine umfassende Analyse dieser miteinander verknüpften Aspekte liefert.



Die Abbildung 47 stellt die einzelnen Abschnitte des Kapitels 4 grafisch als Flussdiagramm dar. Sie bietet einen klaren Überblick über den Aufbau des Kapitels und dessen Bezug zu den Zielsetzungen aus Kapitel 1, wodurch das Verständnis für die nachfolgenden Abschnitte erleichtert wird.

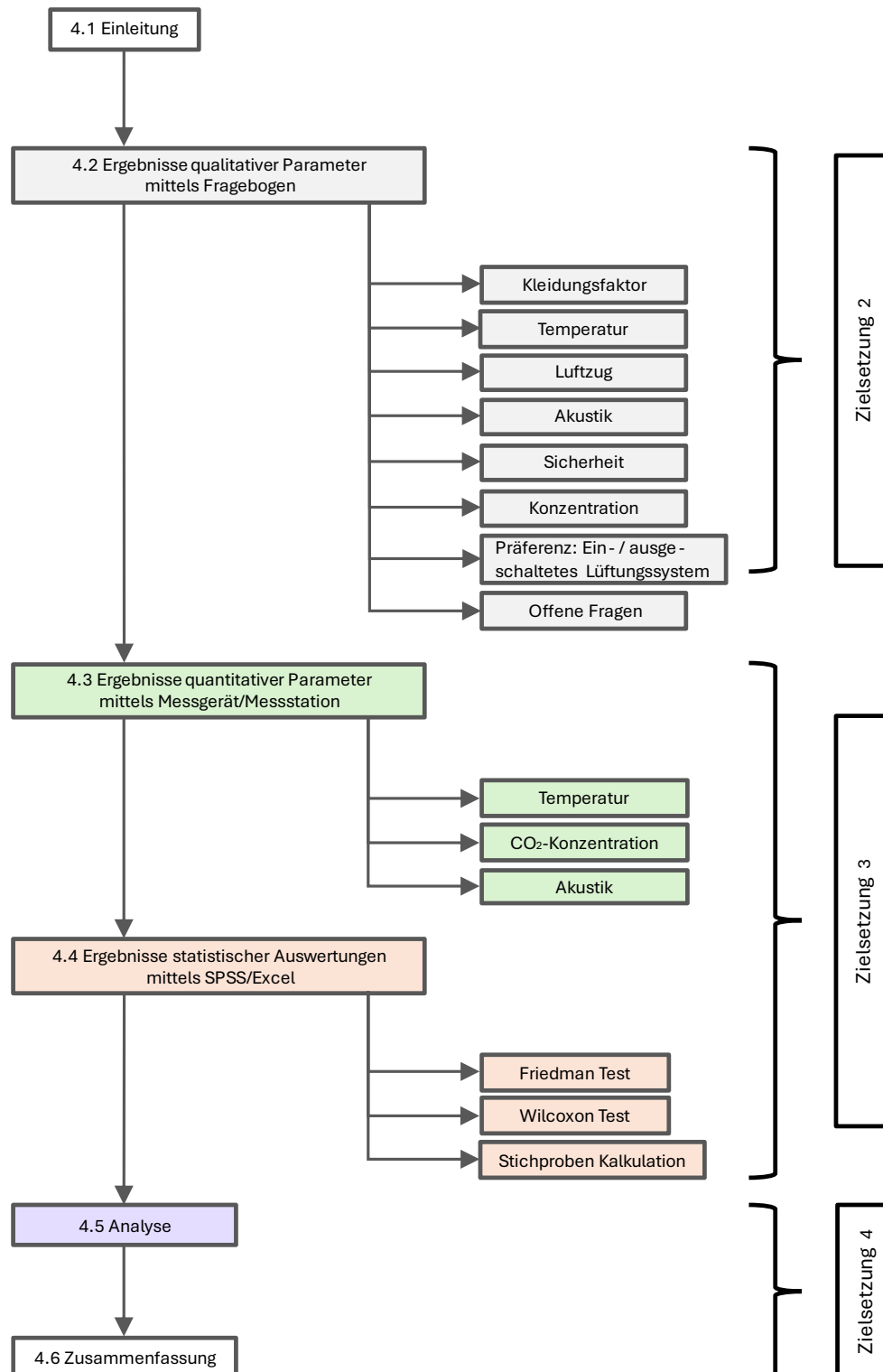


Abbildung 47: Flussdiagramm, Kapitel 4 Ergebnisse und Analyse

## 4.2 Ergebnisse qualitativer Parameter mittels Fragebogen

In Kapitel 3.3 der Methodik wurden die Durchführung und Erhebung des Frageborgens erläutert. Dieses Kapitel präsentiert nun systematisch die Ergebnisse dieser Fragen. Die einzelnen Szenarienbeschreibungen sind in Kapitel 3.2.4.3 zu finden.

### 4.2.1 Kleidungsfaktor

Zu Beginn der Schulstudie wurde die Kleidung der Lernenden erfasst, um den individuellen Kleidungsfaktor zu dem jeweiligen Sitzplatz zuzuordnen. In der Klasse 8.B wurden 13 Lernende befragt, davon waren 9 weiblich und 4 männlich. Die Tabelle 16 zeigt, dass im Klassenraum der 8.B im Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) Änderungen vorgenommen wurden. Vier weibliche Lernende wiesen nach dem 10-minütigen Messzeitraum einen erhöhten Kleidungsfaktor auf. Im Sommer wird ein Wert von 0,5 clo bei sitzender Tätigkeit mit 1,2 met angenommen, im Winter rechnet man mit 1,0 clo und ebenfalls 1,2 met (siehe Kapitel 2.3.2).

In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gab es nur zwei Veränderungen. Zwei weibliche Lernende zogen ein Kleidungsstück aus, was den allgemeinen Mittelwert des Kleidungsfaktors senkte. Im Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) wurden keine Änderungen in Bezug auf die Kleidung festgestellt. Der durchschnittliche Kleidungsfaktor der weiblichen Lernenden lag in jedem Szenario über dem Mittelwert, mit Werten zwischen 0,72 und 0,91 clo. Der männliche Anteil der Lernenden blieb stets unter dem Mittelwert, mit einem Kleidungsfaktor von 0,67 bis 0,69 clo.

**Tabelle 16:** Klasse 8.B; Abfrage des Kleidungsfaktor [clo] am 06.04.2022;  
Die durchschnittliche Raumtemperatur / Außentemperatur betrug  
bei Szenario 1: 22,4°C / 12,3°C | bei Szenario 2: 22,3°C / 12,6°C | bei Szenario 3: 22,5°C / 12,8°C  
für die Szenarienbeschreibung siehe Kapitel 3.2.4.3

Klassenraum 8.B				Kleidungsfaktor					
Uhrzeit von/bis				9:46 - 9:56 Uhr		9:59 - 10:09 Uhr		10:13 - 10:23 Uhr	
Person	Sitzplatz	Alter	Geschlecht	Szenario 1 (MPIC)	Änderung	Szenario 2 (keine Lüftung)	Änderung	Szenario 3 (Stoßlüften)	Änderung
1	A1	17	W	0,59	↑ 0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
2	A3	17	W	0,66	↑ 1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
3	B1	17	W	1,18	1,18	1,18	↓ 0,70	0,70	0,70
4	B2	18	W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
5	B3	17	W	0,70	↑ 1,18	0,70	0,70	0,70	0,70
6	B4	18	W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
7	C1	20	M	0,66	0,66	0,66	0,66	0,70	0,70
8	C2	17	M	0,66	0,66	0,66	0,66	0,70	0,70
9	C3	17	M	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
10	C4	18	M	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
11	C5	17	W	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
12	D1	19	W	0,38	↑ 0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
13	D3	18	W	0,72	0,72	0,72	↓ 0,44	0,72	0,72
Mittelwert =				0,71	0,84	0,80	0,74	0,77	0,77
Mittelwert W =				0,72	0,91	0,86	0,78	0,81	0,81
Mittelwert M =				0,67	0,67	0,67	0,67	0,69	0,69
Mittelwert NB =									

In der Klasse 7.C wurden am 06.04.2022 insgesamt 24 Lernende befragt, darunter 5 männliche, 16 weibliche und 3 nicht-binäre Personen. Im Klassenraum der 7.C wurde ein durchschnittlicher Kleidungsfaktor von 0,69-0,70 clo ermittelt. Bei einer Durchschnittsraumtemperatur von 22,7 bis 23,0 °C liegt der Kleidungsfaktor in Kategorie 1 bei 0,7 clo. Es wurden nur zwei Veränderungen des Kleidungsfaktors festgestellt, beide findet man im Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3). Dabei handelt es sich jeweils um weibliche Lernende. In einem Fall wurde ein Kleidungsstück ausgezogen, wodurch der Kleidungsfaktor der Person sank, im anderen Fall wurde ein Kleidungsstück angezogen, was zu einem Anstieg des Faktors führte. Zudem zeigt Tabelle 17, dass der Mittelwert der weiblichen Lernenden in jedem Szenario über dem gesamten Mittelwert aller Lernenden liegt, während der Mittelwert der männlichen Lernenden mit 0,68 clo immer darunter liegt. Der durchschnittliche Kleidungsfaktor der nicht-binären Lernenden ist mit 0,59 clo deutlich niedriger als der der weiblichen, männlichen und auch des gesamten Mittelwerts.

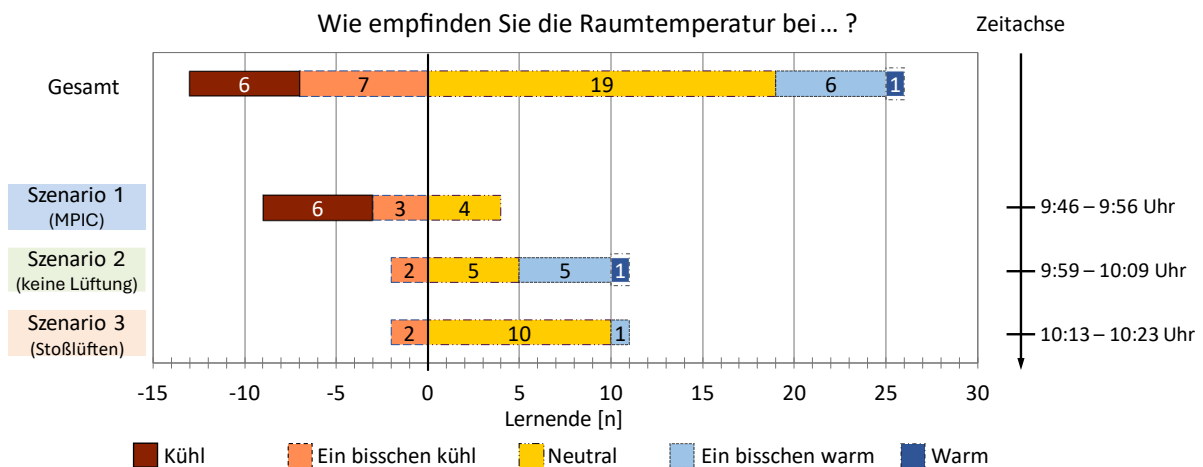
**Tabelle 17:** Klasse 7.C; Abfrage des Kleidungsfaktor [clo] am 06.04.2022;  
Die durchschnittliche Raumtemperatur / Außentemperatur betrug  
bei Szenario 1: 22,8°C / 15,5°C | bei Szenario 2: 23,0°C / 15,9°C | bei Szenario 3: 22,8°C / 16,3°C  
für die Szenarienbeschreibung siehe Kapitel 3.2.4.3

Klassenraum 7.C				Kleidungsfaktor					
Uhrzeit von/bis				11:52 - 12:02 Uhr		12:05 - 12:15 Uhr		12: 19 - 12:29 Uhr	
Person	Sitzplatz	Alter	Geschlecht	Szenario 1 (MPIC)	Änderung	Szenario 2 (keine Lüftung)	Änderung	Szenario 3 (Stoßlüften)	Änderung
1	A1	16	W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
2	A2	16	W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
3	A3	17	W	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
4	A4	17	W	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
5	A5	16	W	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
6	B1	16	M	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
7	B2	17	M	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
8	B3	17	W	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
9	B4	17	M	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
10	B5	17	W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
11	C1	17	W	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
12	C2	17	W	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	↓ 0,59
13	C3	16	W	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
14	C4	17	W	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
15	C5	17	W	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	↑ 1,12
16	D1	17	W	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
17	D2	17	W	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
18	D3	16	NB	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
19	D4	17	NB	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
20	D5	18	W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
21	E1	17	M	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
22	E2	17	NB	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
23	E3	16	M	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
24	E4	17	W	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Mittelwert=				0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,70
Mittelwert W =				0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,73
Mittelwert M =				0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Mittelwert NB =				0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59

## 4.2.2 Temperatur

In Abbildung 48 wird das Raumtemperaturempfinden der 13 Lernenden aus dem Klassenraum 8.B anschaulich dargestellt, sowohl im Gesamten als auch in den einzelnen Szenarien. Es zeigt sich deutlich, dass in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3), in dem das Lüftungssystem (MPIC) eingeschaltet ist, die empfundene Temperatur deutlich kühler ausfällt im Gegensatz zu den anderen Szenarien. Drei der Lernenden empfanden die Temperatur als „ein bisschen kühl“, während weitere sechs diese als „kühl“ beurteilten. In Szenario 1 sind dies 9 von 13 Lernenden und das entspricht 69%. Insgesamt, also über alle drei Szenarien, stammen 69% der Lernenden, die die Temperatur als „ein bisschen kühl“ und „kühl“ empfanden, aus Szenario 1. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) empfanden nur noch 2 Lernende die Raumtemperatur als „ein bisschen kühl“, während 6 Lernende sie als „ein bisschen warm“ bzw. „warm“ beschrieben. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) stuften 77 % der Befragten ihr Raumtemperaturempfinden als „neutral“ ein.

### Klassenraum 8.B



**Abbildung 48: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:**  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt die Reihenaufteilung im Klassenraum der 8.B und man kann sehen, dass die ersten zwei Reihen in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) einmal zu 100% in Reihe A und 50% in Reihe B als „kühl“ empfangenden. Die weiteren 50% aus Reihe B empfanden es ebenfalls als „ein bisschen kühl“. Im Vergleich dazu kann man in Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) erkennen, dass es 6 von 13 Lernende die es als „ein bisschen warm“ und „warm“ empfanden. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) empfanden 10 von 13 Lernenden die Raumtemperatur als neutral.

### Klassenraum 8.B

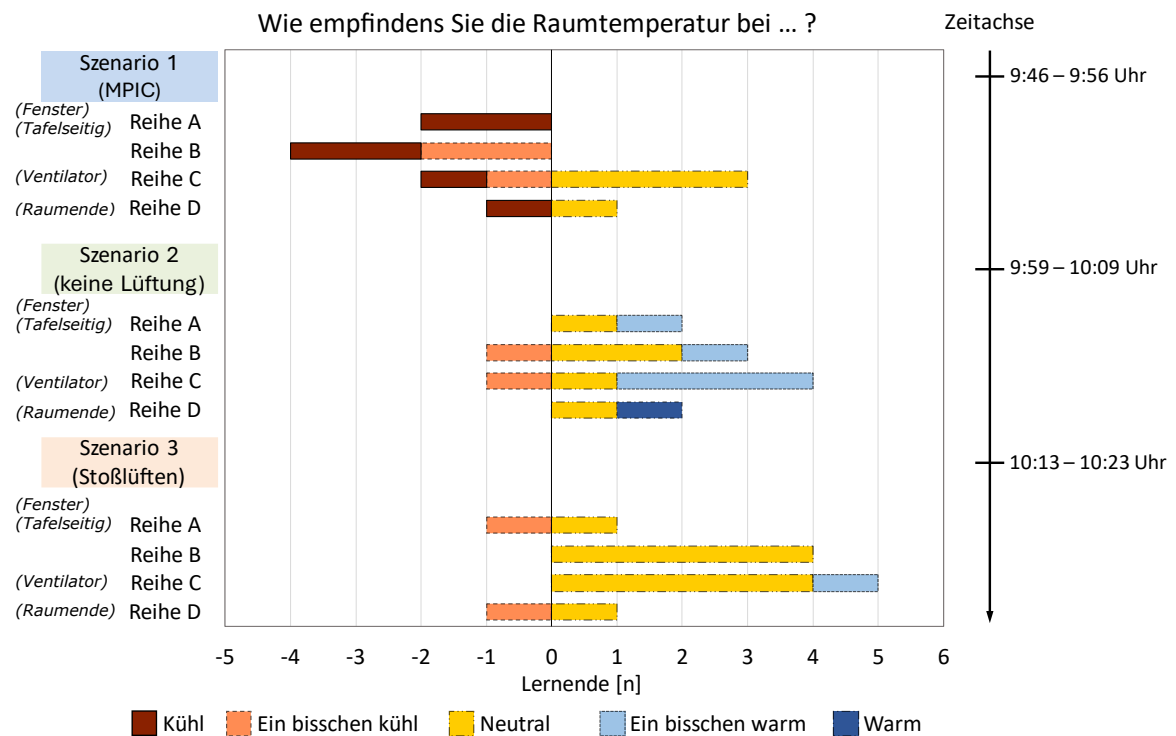


Abbildung 49: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Die nachfolgende Abbildung 50 zeigt die gewichteten Empfindungen in allen drei Szenarien sowie deren Trendlinien. Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) wird in allen Reihen als am kältesten empfunden danach kommt Szenario 3 welches recht neutral aufgefasst wurde und danach Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) welches am wärmsten in allen vier Reihen empfunden wurde. Die Trendlinien zeigen an, dass von Reihe A bis Reihe D (siehe Kapitel 3.2.3) die empfundene Raumtemperatur ansteigt in allen 3 Szenarien.

### Klassenraum 8.B

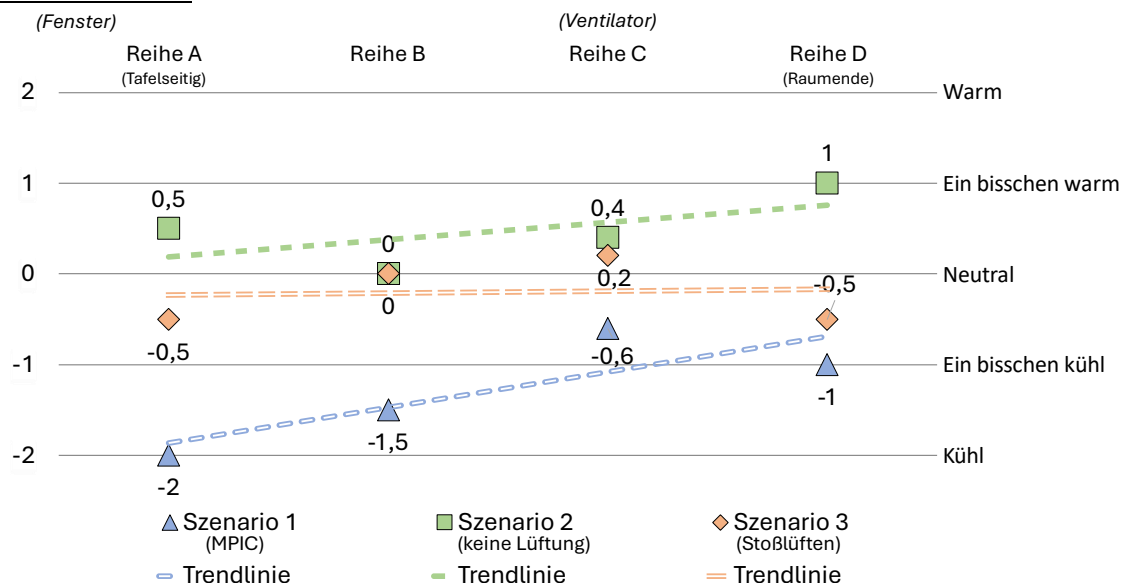


Abbildung 50: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenspezifisches Trendliniendiagramm je Szenario

Im Klassenraum der 7.C in welchen der Zeitraum der Schulstudie um 11:45 bis 12:35 Uhr stattfand, kann man in Abbildung 51 erkennen, dass insgesamt nur zwei Lernende die Temperatur als „kühl“ und auch nur fünf es als „ein bisschen kühl“ empfanden. Ein Viertel der Lernenden in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) empfanden es als „kühl bzw. „ein bisschen kühl“. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) erkennt man, dass 12 von 24 die Raumtemperatur als „neutral“ auffassten, jedoch 10 von 24 es als „ein bisschen warm“ und zwei sogar als „warm“ empfanden. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) waren dreiviertel der Lernenden der Temperatur neutral eingestellt.

#### Klassenraum 7.C

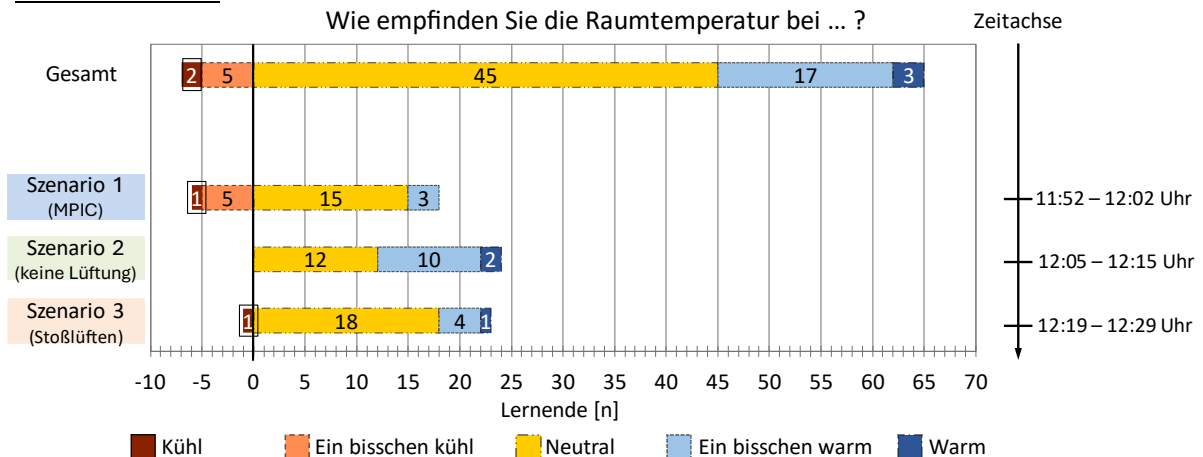


Abbildung 51: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Der Reihenaufschlüsselung in Abbildung 52 nach ist gut zu sehen, dass der Großteil der Lernenden in jedem Szenario die Temperatur als neutral empfand. Ein warmes Temperaturempfinden in allen Reihen kann man in Szenario 2 (siehe 3.2.4.3) erkennen.

#### Klassenraum 7.C

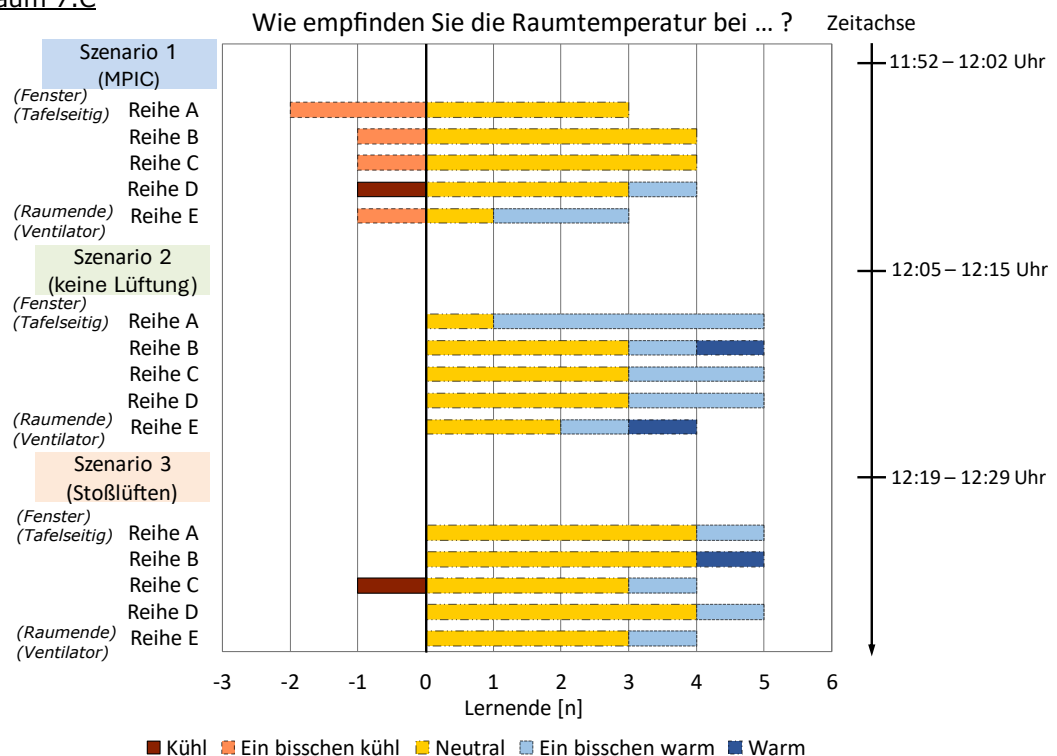
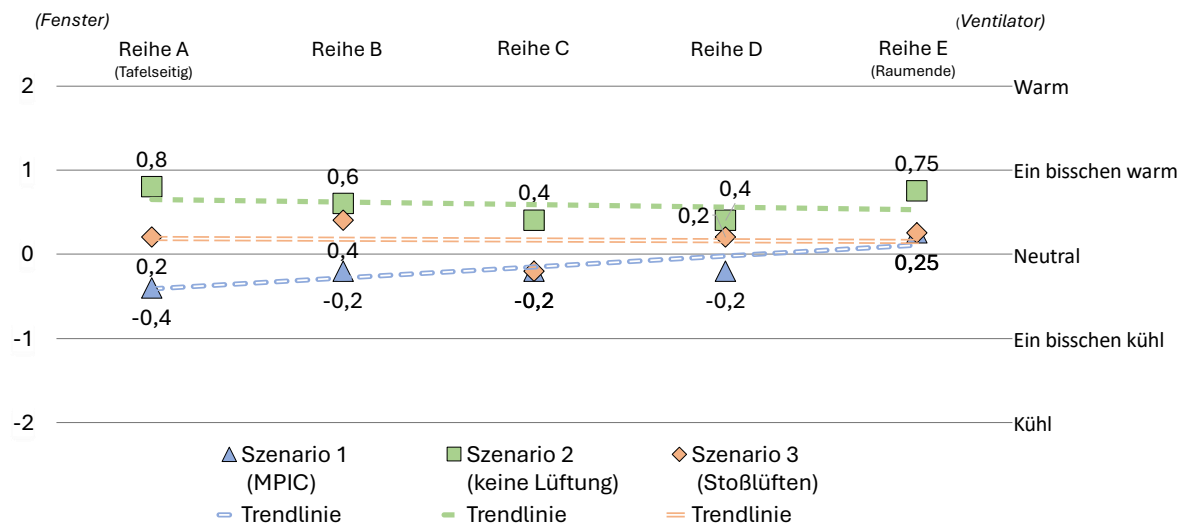


Abbildung 52: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Abbildung 53 welche das gewichtete Raumtemperaturempfinden darstellt, verdeutlicht, dass in jeder Reihe Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als das kälteste empfunden wird, gefolgt von Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) und schließlich Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als das wärmste. Auffällig ist auch, dass in Reihe E (siehe Kapitel 3.2.3) in allen drei Szenarien das Temperaturempfinden im positiven Bereich liegt, also von „neutral“ in Richtung „warm“ tendiert.



**Abbildung 53: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)**  
**Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario**

Im zweiten Teil des Fragebogens wurde die bevorzugte Temperatur abgefragt. Abbildung 54 zeigt, dass nur in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) die Lernenden es „wärmer“ haben wollten. 6 von 13 wollten es „wärmer“ und 3 von 13 wollten es „ein bisschen wärmer“. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) waren es 8 von 13 welche keine Änderung bevorzugten jedoch zwei Lernende wollten es „kälter“. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) waren es 9 von 13 welche keine Änderung bevorzugten.

#### Klassenraum 8.B

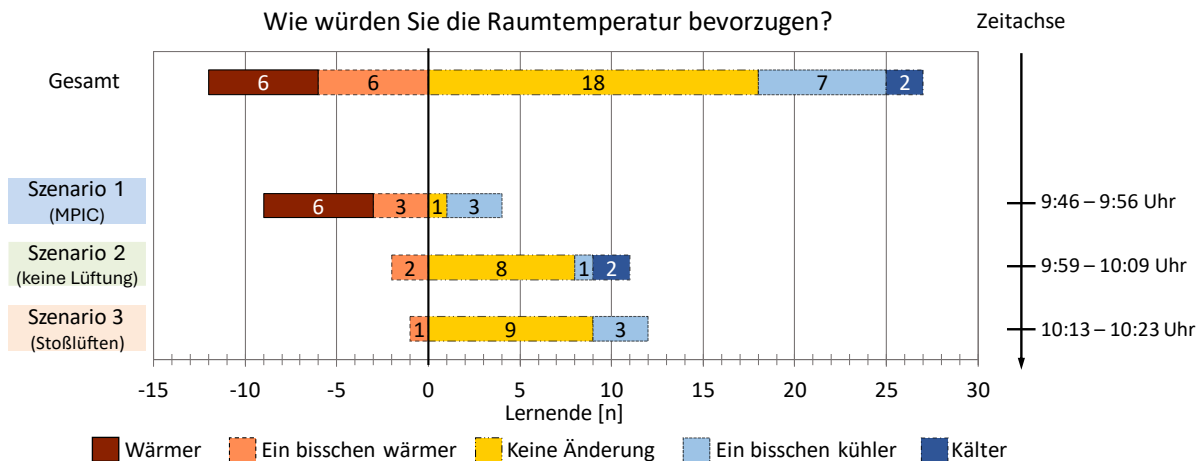


Abbildung 54: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die Reihenaufschlüsselung in Abbildung 55 zeigt deutlich, dass alle Lernenden, die eine wärmere Umgebung bevorzugten, aus Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) stammen. Alle sechs Lernenden, die es „wärmer“ haben wollten, kamen aus den Reihen A und B (siehe Kapitel 3.2.3). Insgesamt wird ersichtlich, dass 100% der Lernenden, die eine wärmere Umgebung bevorzugten, aus Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) kommen.

#### Klassenraum 8.B

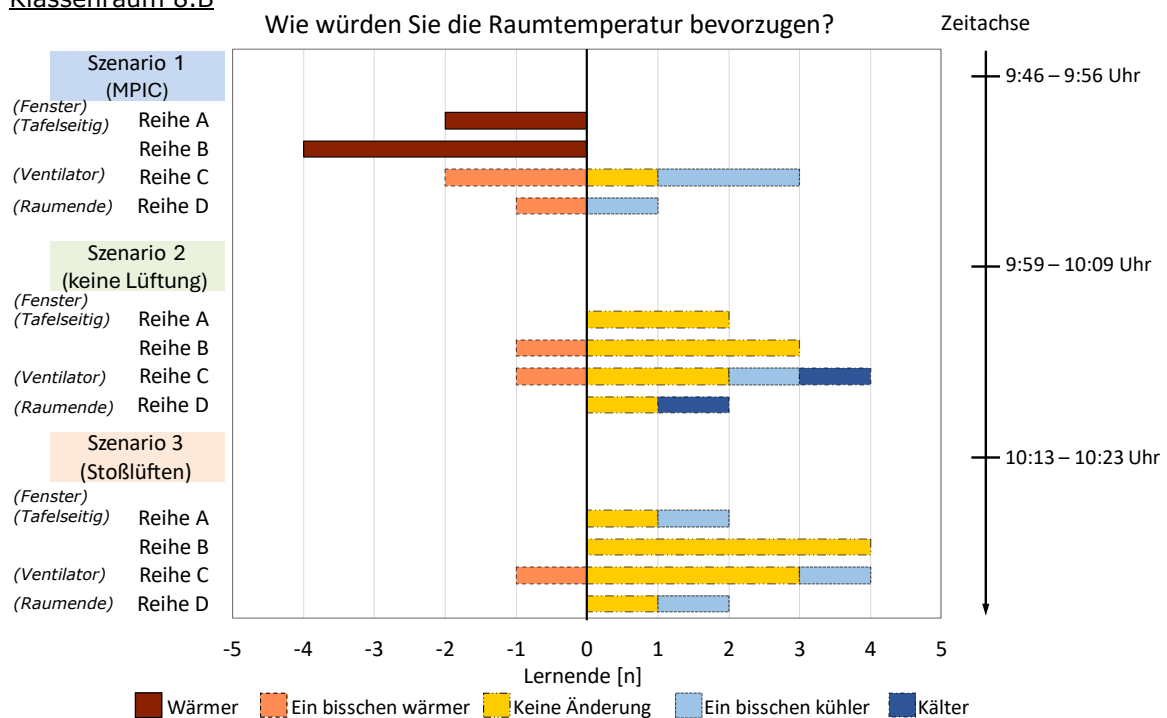
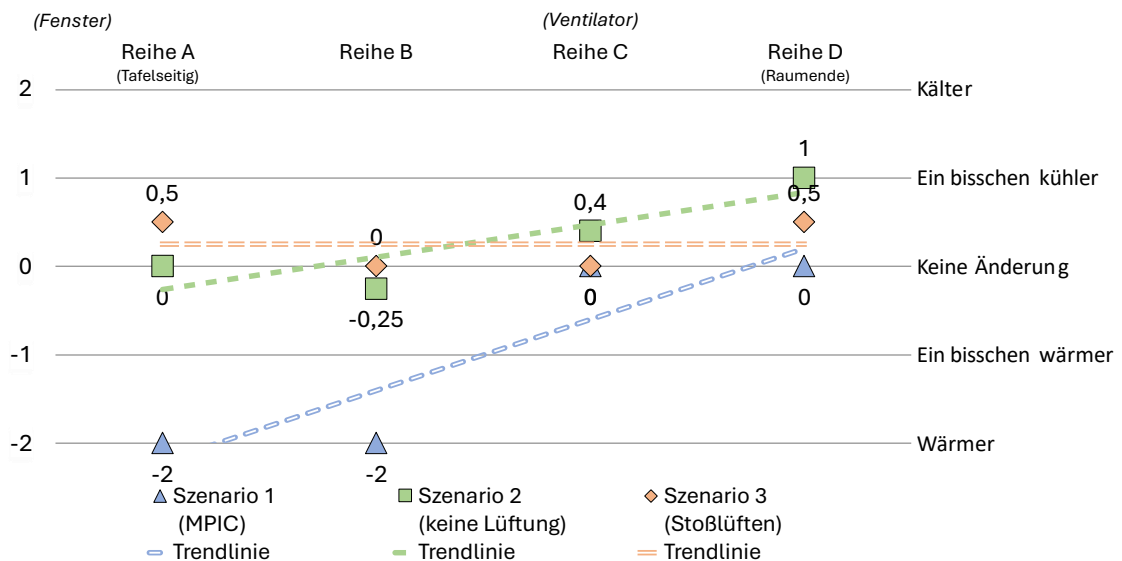


Abbildung 55: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario



Das Ergebnis der bevorzugten Raumtemperatur, dargestellt im Trendliniendiagramm in Abbildung 56, zeigt deutlich, dass in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine wärmere Temperatur bevorzugt wird, wobei die Reihen A und B (siehe Kapitel 3.2.3) den größten Ausschlag aufweisen. Der Trend der wärmeren bevorzugten Temperatur flacht jedoch mit den hinteren Reihen ab. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) steigt die Trendlinie in den hinteren Reihen an, und in der letzten Reihe D wird sogar eine „ein bisschen kühlere“ Temperatur bevorzugt. Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) bleibt in allen Reihen nahe der „keine Änderung“-Marke, was auf eine gleichbleibende Temperaturbevorzugung hindeutet.

#### Klassenraum 8.B



**Abbildung 56: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 8.B (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)**  
**Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario**

Insgesamt wünschen 39 Lernende in der Klasse 7.C über alle Szenarien hinweg, dass es keine Änderung bezüglich der Raumtemperatur gibt, was 54 % entspricht. 29 Lernende bevorzugen eine kühlere Raumtemperatur, das sind 40%. Im Detail zeigt sich, dass 16 von 24 Personen in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) mit der aktuellen Temperatur zufrieden sind und keine Änderung möchten. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) sinkt dieser Anteil auf 10 Lernende, während die Anzahl derjenigen, die eine kühlere Temperatur bevorzugen, auf 14 ansteigt. Auch in Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) wollen nur 13 Personen keine Änderung der Temperatur (siehe Abbildung 57).

#### Klassenraum 7.C

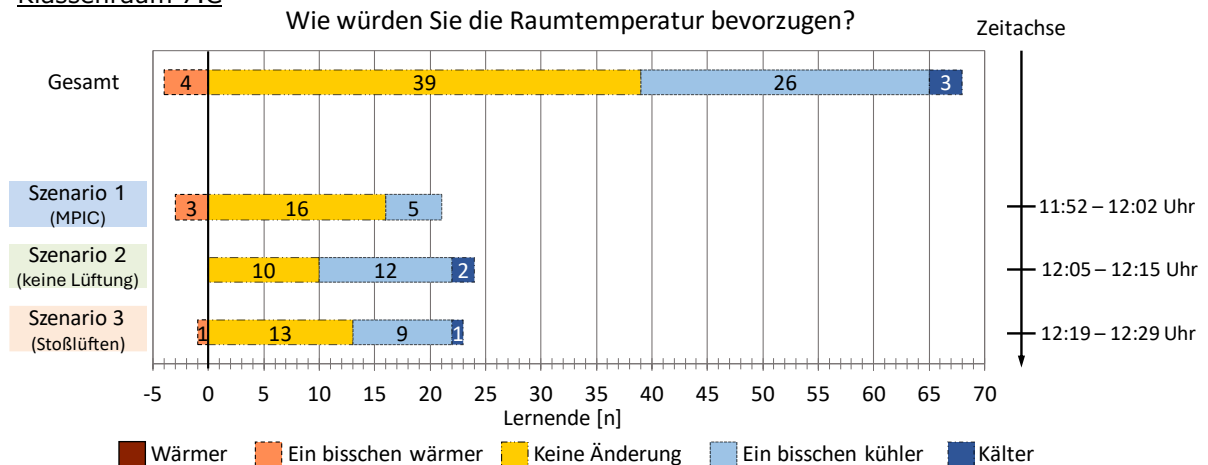


Abbildung 57: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die Reihenaufschlüsselung in der Klasse 7.C, in Abbildung 58, liefert im Gegensatz zu Klasse 8.B keine aufschlussreichen Erkenntnisse über die einzelnen Reihen hinweg.

#### Klassenraum 7.C

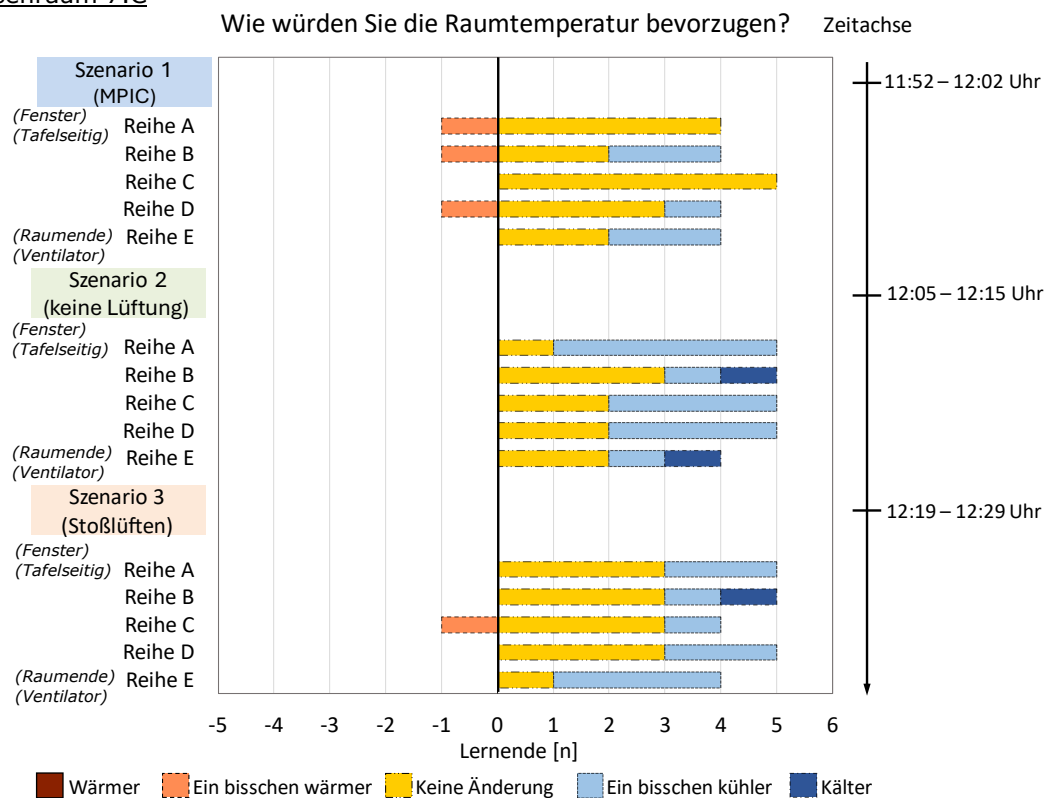
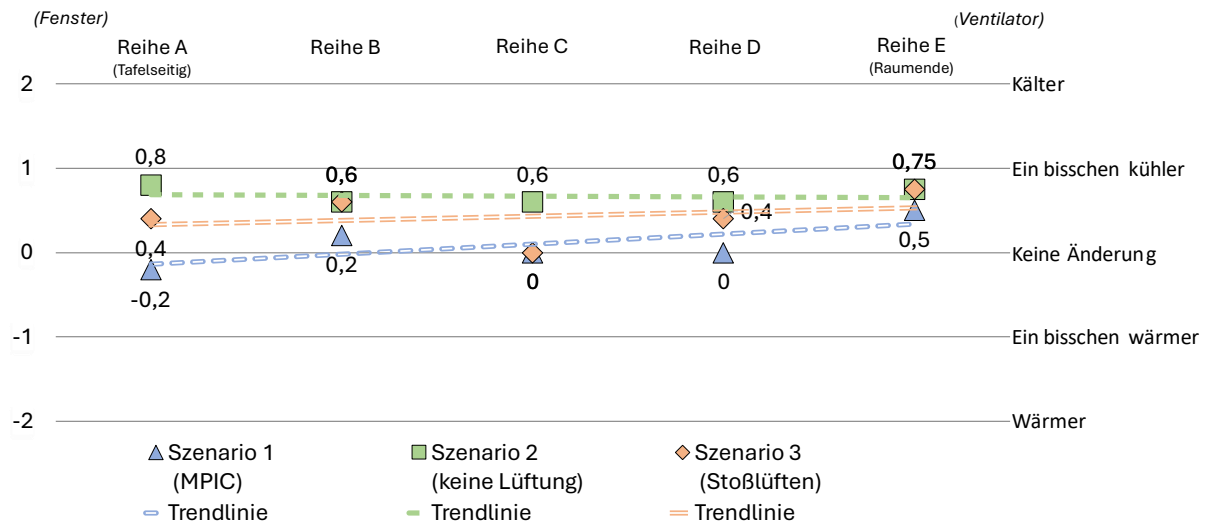


Abbildung 58: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Die Abbildung 59 zeigt, dass im Klassenraum der 7.C Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) am nächsten an der 0-Marke liegt, was bedeutet, dass in diesem Szenario die Temperatur am ehesten als „keine Änderung“ bevorzugt wird. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) wird in allen Reihen eine „ein bisschen kühlere“ Temperatur bevorzugt. Es lassen sich jedoch kaum klare Trends erkennen, wobei der größte Unterschied in Reihe A (siehe Kapitel 3.2.3) sichtbar ist, wo zwischen Szenario 1 (-0,2) und Szenario 2 (+0,8) eine Abweichung von insgesamt eins besteht. Das bedeutet, dass in der Reihe A, die sich am nächsten zum gekippten Fenster befand, die größte Schwankung in der bevorzugten Raumtemperatur in den verschiedenen Szenarien auftrat.



**Abbildung 59: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 7.C (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)**  
**Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario**

### 4.2.3 Luftzug

Die nachstehende Abbildung 60 verdeutlicht, für die Klasse 8.B, dass nur in Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) die Zugluft größtenteils als „nicht wahrnehmbar“ empfunden wurde, was auf 9 von 13 Lernenden zutrifft. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) hingegen empfanden 5 von 13 Lernenden die Zugluft als stark. Insgesamt gab es keinen Lernenden, der die Zugluft als „sehr stark“ bewertete.

#### Klassenraum 8.B

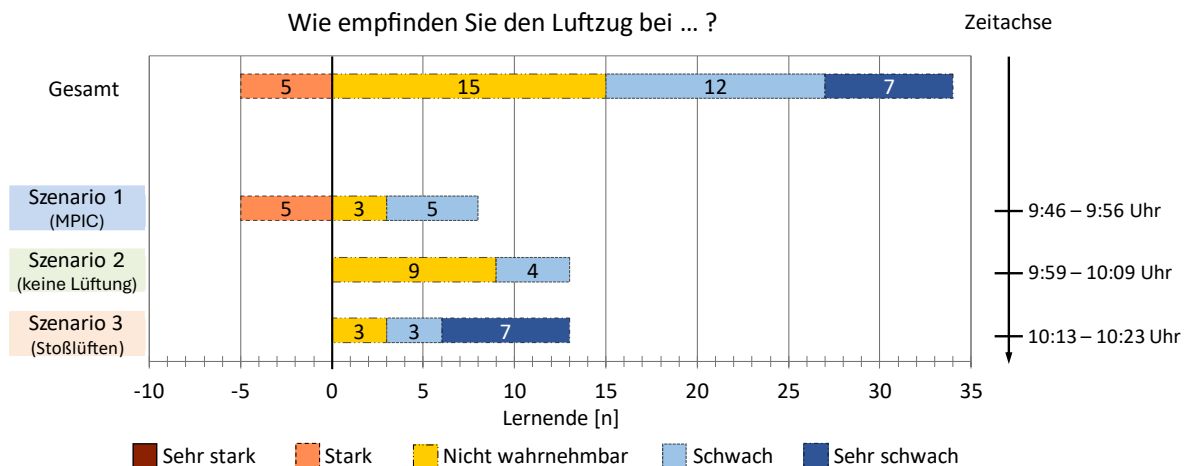


Abbildung 60: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die Abbildung 61 zeigt, dass in Reihe C über alle Szenarien hinweg nur eine Person keinen Luftzug wahrnahm. In Reihe D (siehe Kapitel 3.2.3) hingegen wurde lediglich einmal ein "schwacher" Luftzug registriert, ansonsten wurde er durchgehend als "nicht wahrnehmbar" eingestuft.

#### Klassenraum 8.B

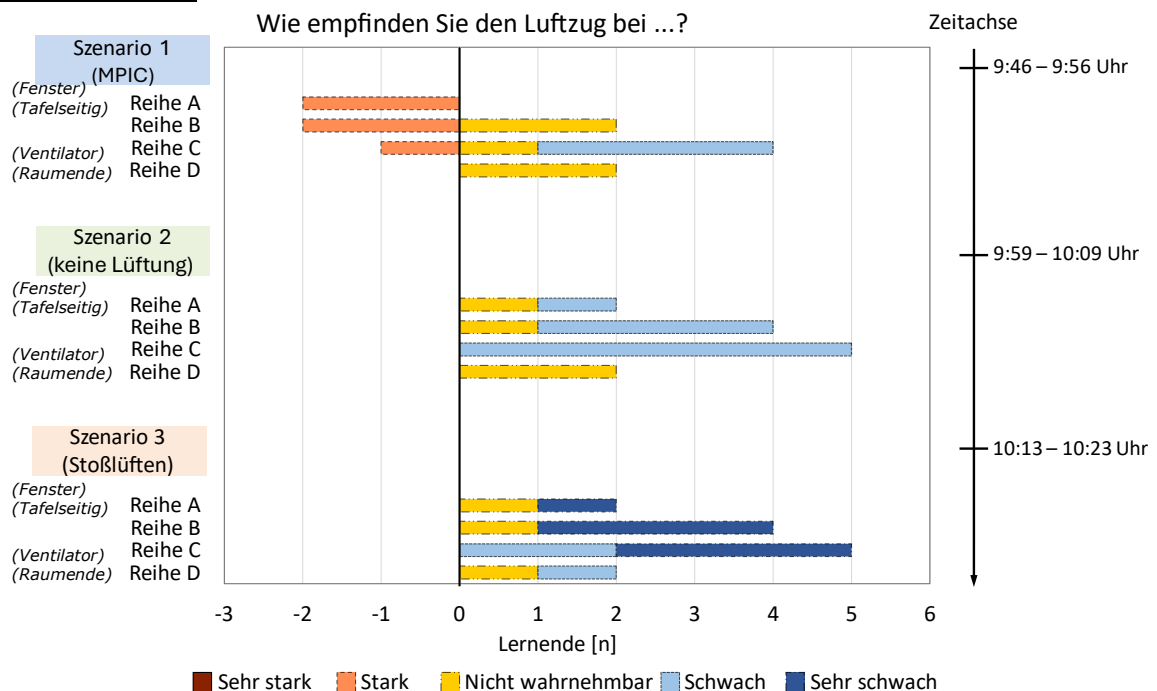
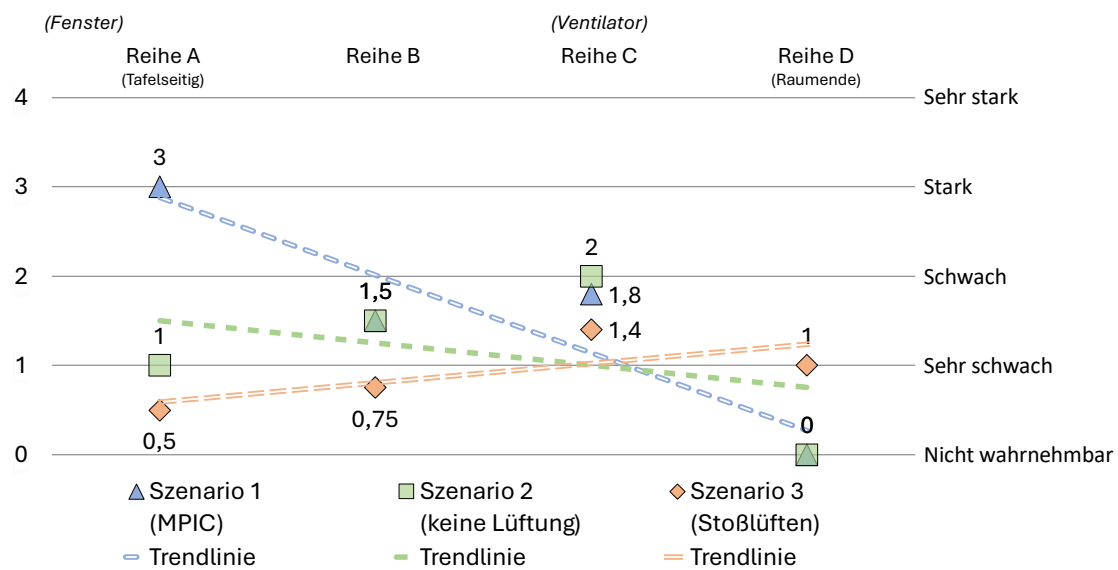


Abbildung 61: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Das Ergebnis des Trendliniendiagramms der Klasse 8.B in Abbildung 62 zeigt, dass in Reihe A (siehe Kapitel 3.2.3) die Szenarien 2 (+1,0) und 3 (+0,5) deutlich von Szenario 1 (+3,0) abweichen. (Szenarienbeschreibung siehe Kapitel 3.2.4.3) Allerdings lässt sich anhand des Trends der einzelnen Szenarien erkennen, dass Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine positive Steigung aufweist, was darauf hinweist, dass die Zugluft in diesem Szenario in den hinteren Reihen stärker wahrgenommen wird. Der Trend von Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) hingegen sinkt deutlich und ist in Reihe D, die sich am Ende des Raumes befindet, als „nicht wahrnehmbar“ erkennbar. Interessant ist auch, dass in Reihe C, die sich direkt unter dem Ventilator befindet, die geringsten Abweichungen in Bezug auf die wahrgenommene Zugluft zu beobachten sind. Der Unterschied zwischen den drei Szenarien beträgt hier nur 0,6, was darauf hindeutet, dass in dieser Reihe stets eine eher „schwache“ Zugluft wahrgenommen wird.



**Abbildung 62: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)**  
Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario

Insgesamt haben, in der Klasse 7.C, 50% der Lernenden den Luftzug „nicht wahrgenommen“, während weitere 44% eine „schwache“ oder „sehr schwache“ Zugluft empfanden. Der größte Anteil an nicht wahrgenommener Zugluft wurde in Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) verzeichnet, wo 17 von 24 Lernenden keine Zugluft spürten. Von den insgesamt vier Lernenden, die einen starken Luftzug wahrgenommen haben, stammen drei aus Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) (siehe Abbildung 63).

#### Klassenraum 7.C

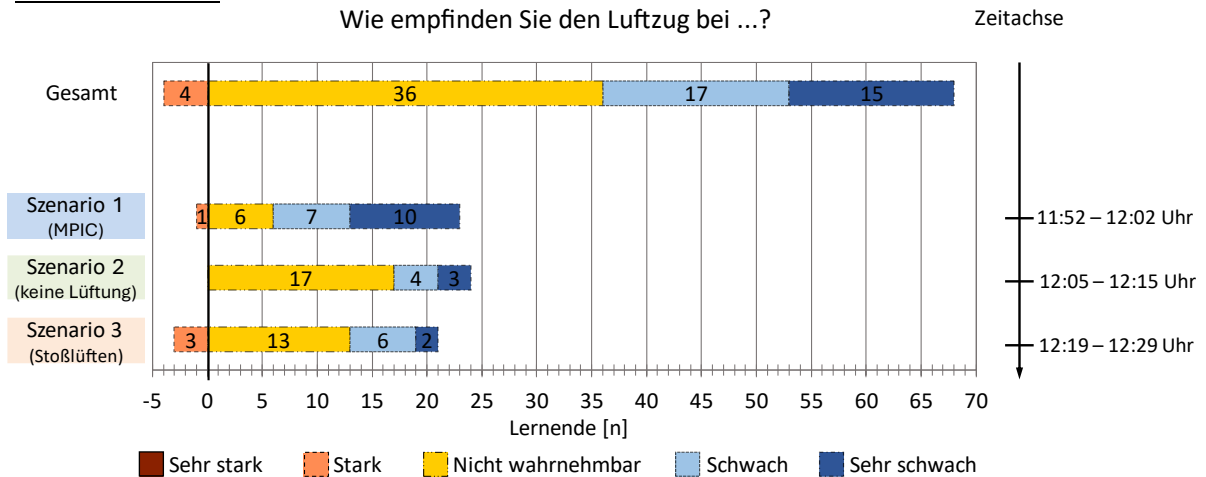


Abbildung 63: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Interessanterweise konnte laut Abbildung 64, in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) in den Reihen A und B (siehe Kapitel 3.2.3) auf allen Sitzplätzen ein Luftzug festgestellt werden. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) hingegen zeigte sich, dass in den hinteren Reihen C, D und E jeweils eine lernende Person eine „starke“ Zugluft wahrnahm.

#### Klassenraum 7.C

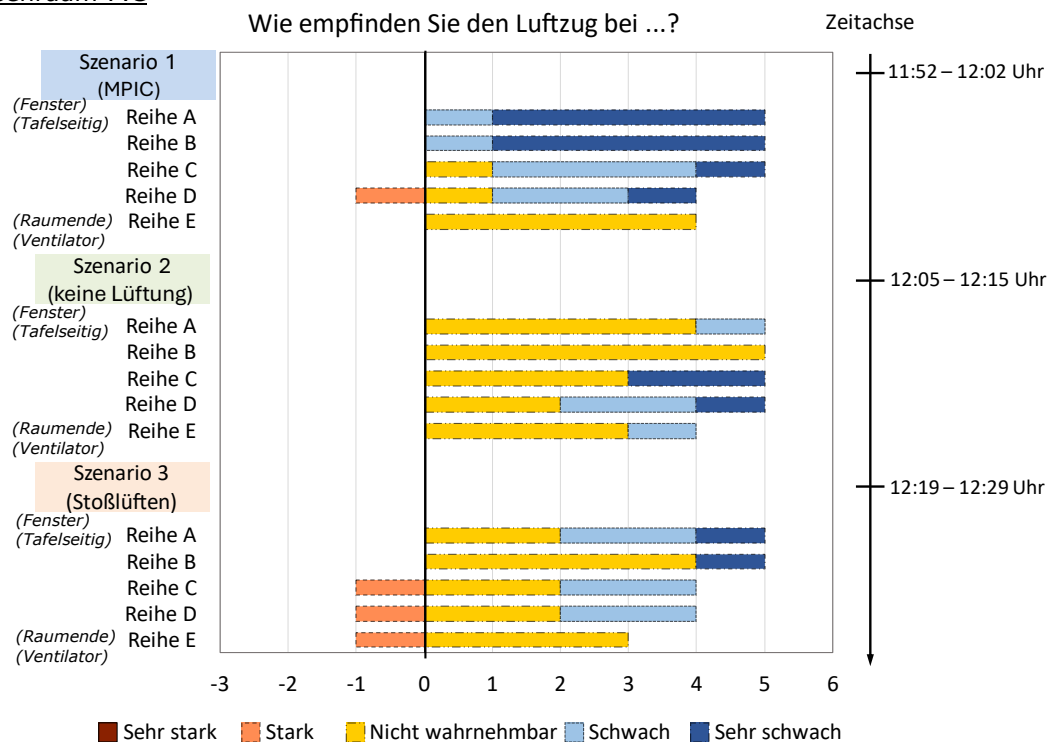
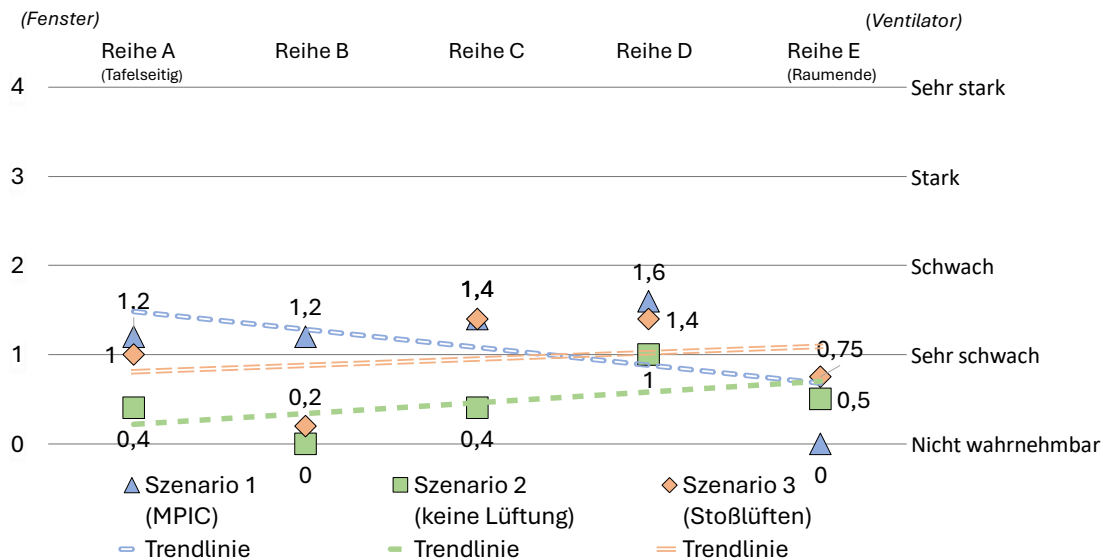


Abbildung 64: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Die gewichtete Reihenaufstellung zeigt, dass der höchste Wert über alle Szenarien hinweg bei 1,6 liegt, was immer noch zwischen „sehr schwacher“ und „schwacher“ Zugluft einzuordnen ist. Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) weist in allen Reihen die geringste empfundene Zugluft auf. Die Trendlinie von Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) zeigt mit zunehmender Reihenfolge nach hinten einen abnehmenden Verlauf, wohingegen der Trend bei Szenario 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) mit fortschreitender Reihenfolge leicht zunimmt (siehe Abbildung 65).



**Abbildung 65: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)**  
Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario

In der Klasse 8.B sieht man in Abbildung 66 insgesamt, dass alle vier Lernenden, die eine „schwächere“ Zugluft bevorzugten, sowie die vier Lernenden, die eine „ein bisschen schwächere“ Zugluft bevorzugten, aus Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) stammen. Von den insgesamt 23 Lernenden, die „keine Veränderung“ der Zugluft bevorzugten, kommen 18 aus Szenario 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3). In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) bevorzugen 46% der Lernenden eine „etwas stärkere“ oder „stärkere“ Zugluft.

#### Klassenraum 8.B

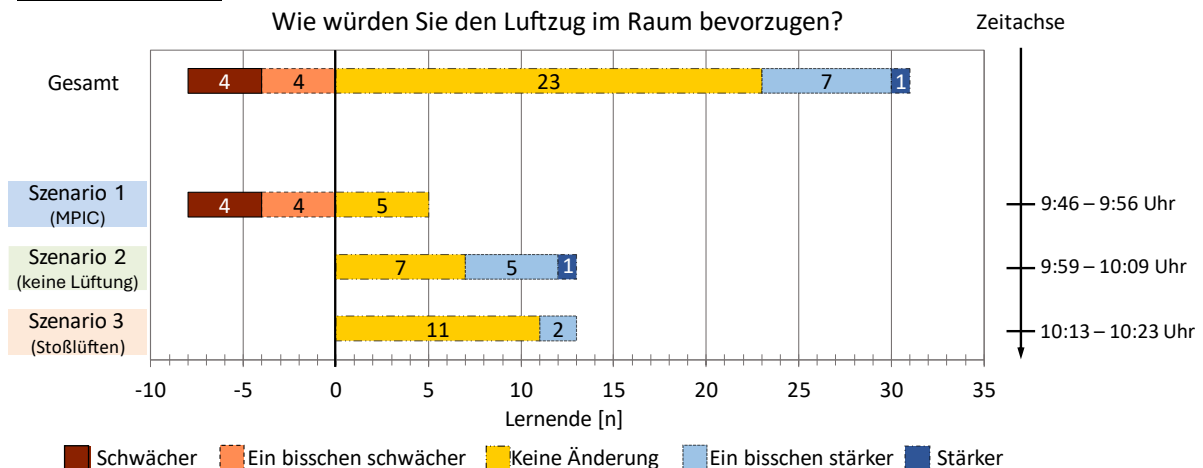


Abbildung 66: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

In Abbildung 67 zeigt sich, dass in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) in allen Reihen eine geringere Zugluft gewünscht wird. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) wird insbesondere in den hinteren Reihen C und D eine stärkere Zugluft bevorzugt. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) bevorzugen 85% der Lernenden keine Änderung der Zugluft.

#### Klassenraum 8.B

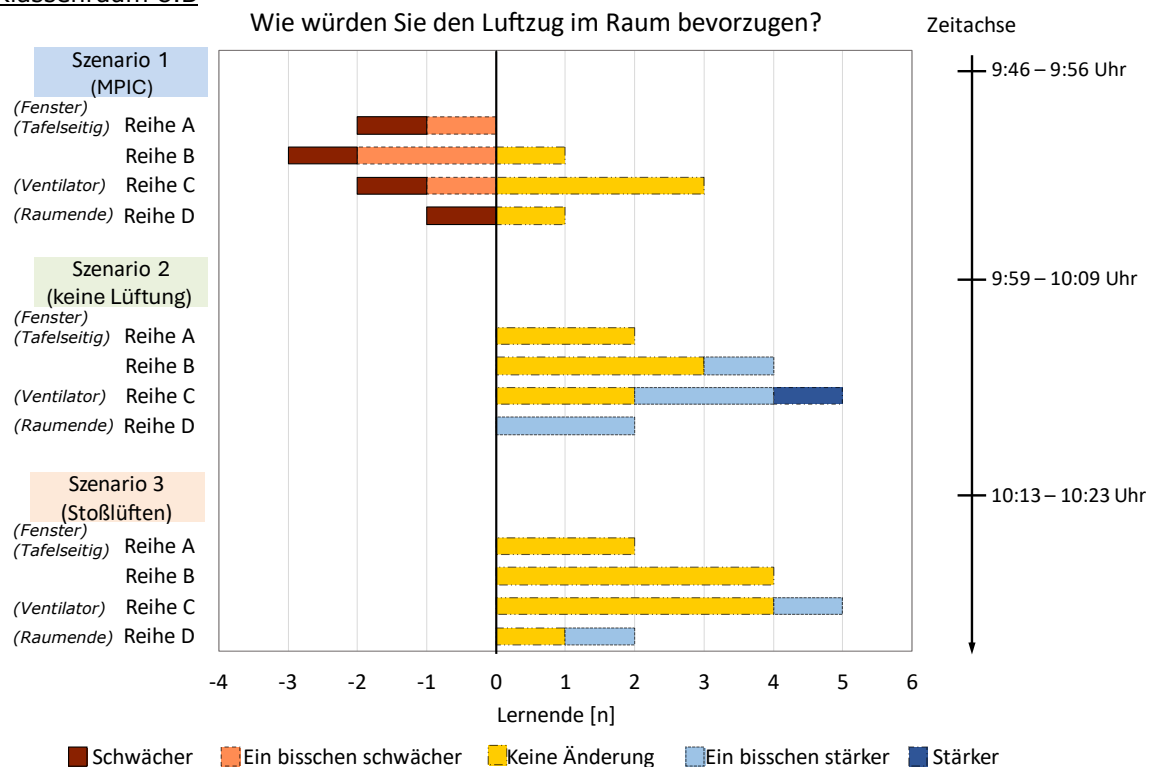
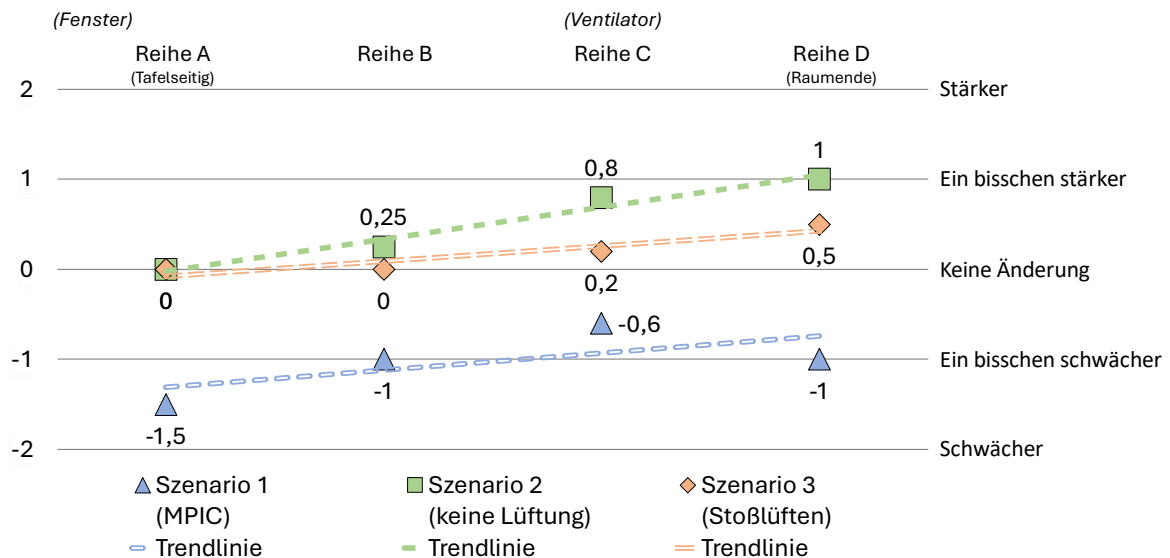


Abbildung 67: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario



Das nachfolgende Diagramm zeigt, für die Klasse 8.B, dass Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) über alle Reihen hinweg im negativen Bereich liegt, was auf eine Bevorzugung einer schwächeren Zugluft hinweist. Szenario 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) liegen in allen Bereichen im positiven Bereich. Das Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) erreicht in Reihe D mit einem Höchstwert von lediglich +0,5 eine Präferenz zwischen „keine Änderung“ und „ein bisschen stärkerer“ Zugluft. Dieses Szenario liegt in allen Reihen am nächsten an der 0-Marke. Insgesamt zeigt der Trend, dass die bevorzugte Zugluft in allen Szenarien in den hinteren Reihen ansteigt (siehe Abbildung 68).



**Abbildung 68: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)**  
**Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario**

Für die Klasse 7.C dokumentiert die Abbildung 69, dass über alle Szenarien hinweg 61% der Lernenden „keine Änderung“ der Zugluft bevorzugen. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) wollen 16 von 24 Lernenden „keine Änderung“, vier bevorzugen eine schwächere Zugluft und vier eine „ein bisschen stärkere“ Zugluft. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gibt es keine Lernenden, die eine schwächere Zugluft bevorzugen; stattdessen möchten vier eine sogar „stärkere“ Zugluft. Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) ähnelt Szenario 2, zeigt jedoch eine Verschiebung, dass drei Lernenden eine schwächere Zugluft bevorzugen.

#### Klassenraum 7.C

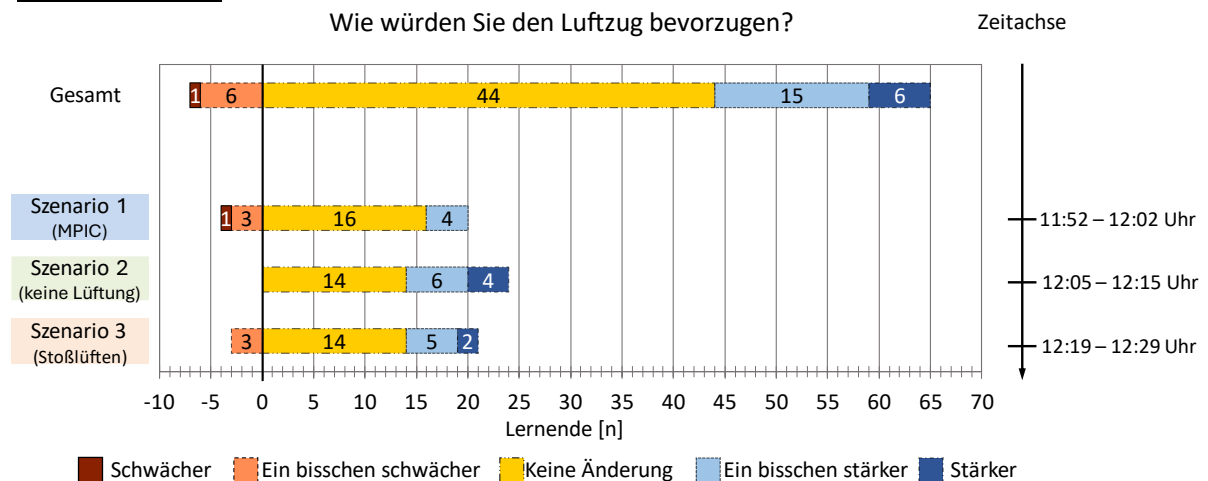


Abbildung 69: Bevorzogter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die Reihenanalyse der Klasse 7.C in Abbildung 70 liefert keine wichtigen Erkenntnisse, im Gegensatz zur Klasse 8.B mit aufschlussreichen Einblicken.

#### Klassenraum 7.C

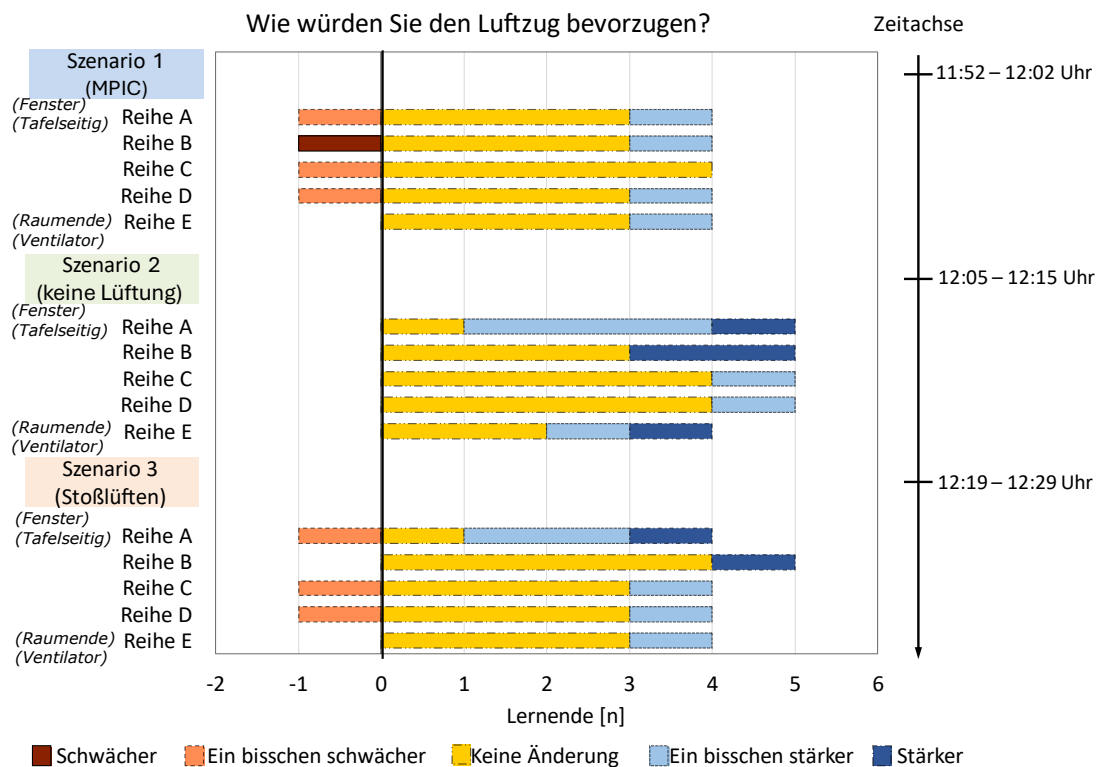


Abbildung 70: Bevorzogter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Die größten Unterschiede zwischen den Szenarien sind in Abbildung 71 in den Reihen A und B zu erkennen, mit einem maximalen Unterschied von insgesamt 1. In Szenario 1 wird über alle Reihen hinweg am ehesten „keine Änderung“ in Bezug auf die Zugluft bevorzugt. Szenario 2 liegt in allen Szenarien am höchsten. Betrachtet man die Reihen C, D und E, sind dort nur geringe Unterschiede zwischen den Szenarien zu beobachten, mit Abweichungen zwischen 0,2 bis 0,5.

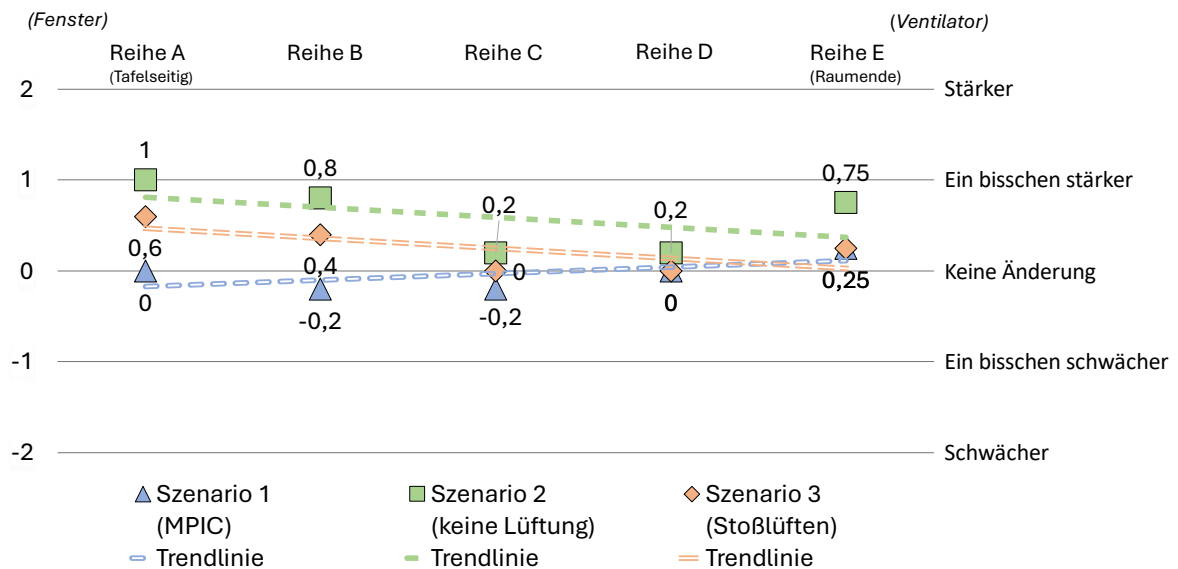
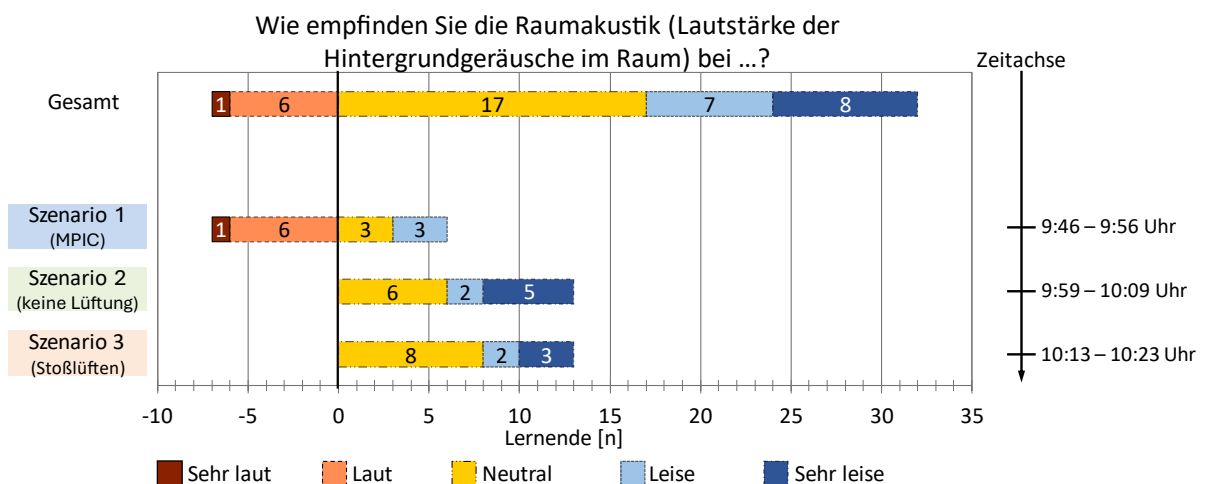


Abbildung 71: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3)  
Reihenbasiertes Trendliniendiagramm in Szenario

#### 4.2.4 Akustik

Insgesamt zeigt sich, im Klassenraum der 8.B, in allen drei Szenarien, dass alle sieben Lernenden, welche die Akustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche als „laut“ oder „sehr laut“ empfinden, aus Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) kommen. Weiterhin lässt sich feststellen, dass nur etwa 44% die Akustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche als „neutral“ bewerten und weitere 38% beurteilten diese als „leise“ bzw. „sehr leise“. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) beschreibt eine lernende Person die Akustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche als „sehr laut“, während sechs weitere diese als „laut“ empfinden, was in diesem Szenario insgesamt 54% entspricht. In den Szenarien 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) konnten jeweils zwei Lernende eine „leise“ Raumakustik wahrnehmen (siehe Abbildung 72).

##### Klassenraum 8.B



**Abbildung 72: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:**  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die Abbildung 73 zeigt, dass in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) die Reihe A (siehe Kapitel 3.2.3) als die lauteste beurteilt wird, während die Reihen B und D (siehe Kapitel 3.2.3) ebenfalls eine laute Auffassung hinsichtlich der Raumakustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche haben. Interessant ist auch, dass Reihe C in jedem Szenario als die leiseste wahrgenommen wird. Dies wird besonders deutlich in Szenario 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3), wo Reihe C im Vergleich zu den anderen Reihen deutlich leiser erscheint. Vor allem ist Reihe C direkt unter dem Ventilator positioniert. In Bezug auf Szenario 3 ist es überraschend, dass Reihe D sogar noch eine Reihe weiter vom Fenster entfernt ist, was den Außenlärm betrifft. Es ist anzumerken, dass vier von fünf Lernenden in Reihe C männlich waren, was 100 % des männlichen Anteils im Klassenraum entspricht.

### Klassenraum 8.B

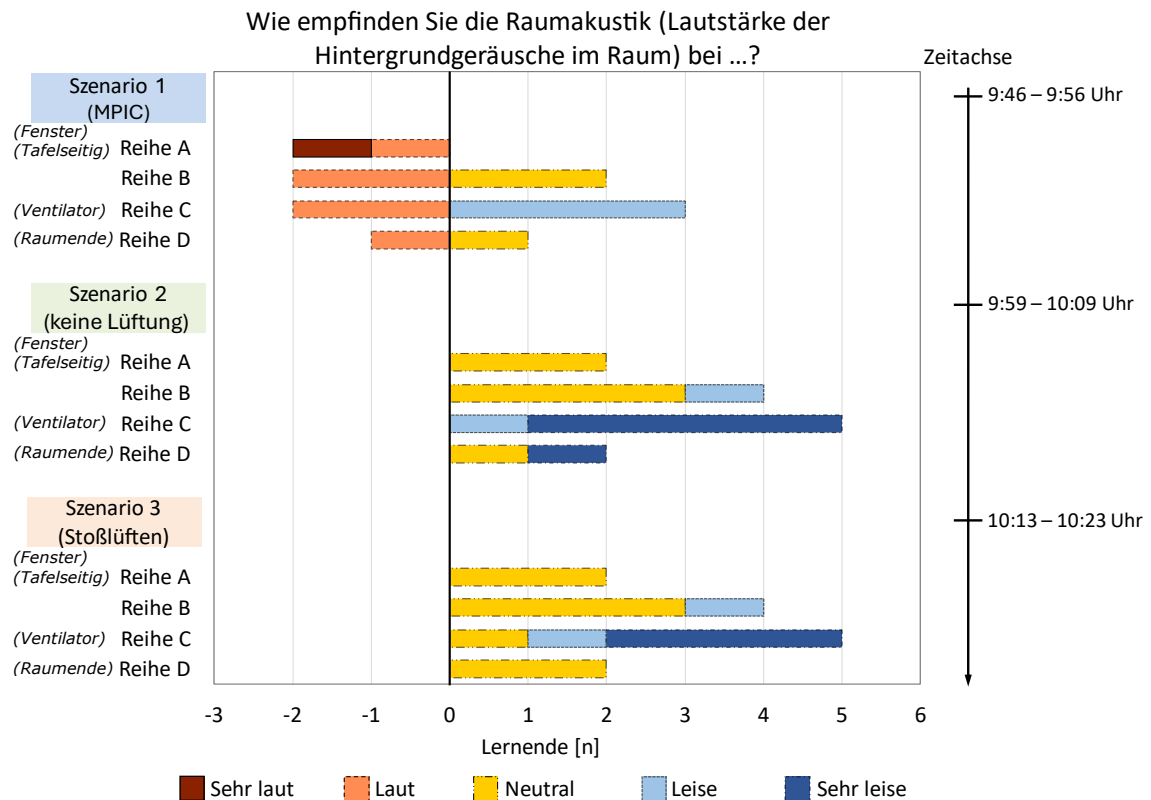


Abbildung 73: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Das Trendliniendiagramm für die Klasse 8.B (Abbildung 74) verdeutlicht, dass Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) stets als am lautesten angesehen wird. Die Trends der einzelnen Szenarien steigen ins positive an, wodurch sich das Empfinden der Raumakustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche mit den hinteren Reihen verbessert.

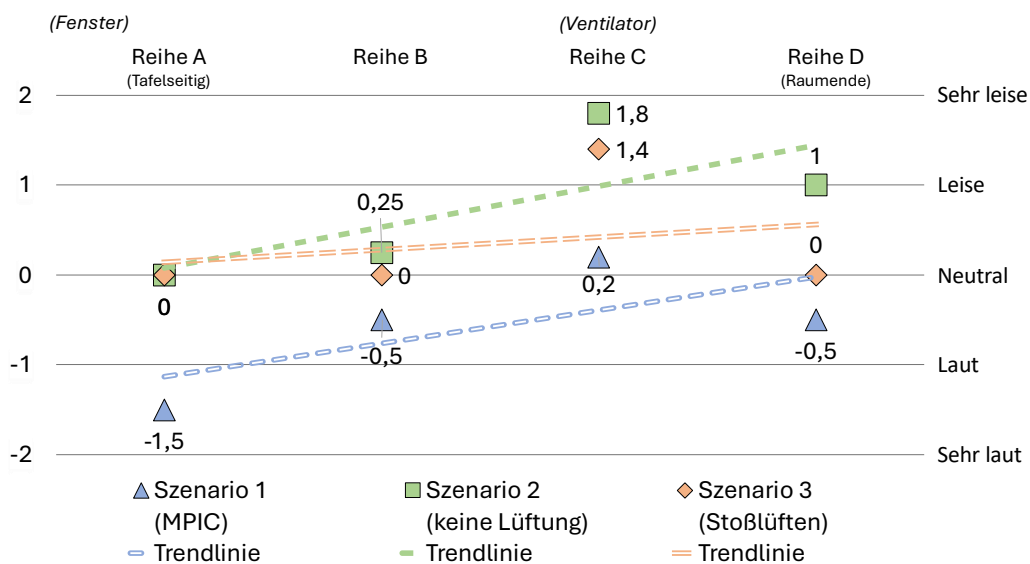
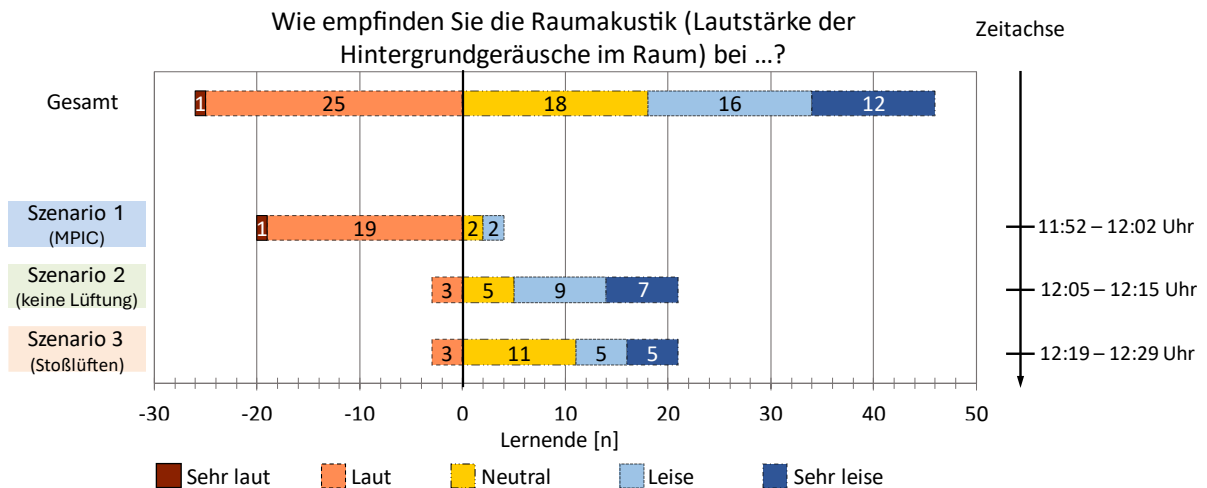


Abbildung 74: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenspezifisches Trendliniendiagramm je Szenario

Das Diagramm (siehe Abbildung 75) für die jeweiligen Szenarien zeigt, dass 36% der Lernenden die Akustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche, in der Klasse 7.C, als „laut“ bzw. „sehr laut“ empfinden. Von insgesamt 26 Lernenden, die diese Einschätzung über alle Szenarien hinweg abgegeben haben, stammen 20 aus Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3). Das wiederum entspricht 83% der Lernenden in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3). Weiterhin lässt sich feststellen, dass 91% der Lernenden, die die Akustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche als „neutral“, „leise“ oder „sehr leise“ beurteilen, aus den Szenarien 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) kommen.

#### Klassenraum 7.C



**Abbildung 75: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:**  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

Die Aufschlüsselung der Reihen, siehe die nachfolgenden Abbildung 76, hinsichtlich der empfundenen Raumakustik in Bezug auf die Lautstärke der Hintergrundgeräusche zeigt, dass in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) nur die Reihen B und D nicht gänzlich im Bereich „laut“ bzw. „sehr laut“ eingestuft werden. Dennoch empfinden die Lernenden in allen Reihen das Szenario 1, das von 11:52 bis 12:02 Uhr getestet wurde, insgesamt als zu laut, selbst während der leisen Selbstbeschäftigung. In den Szenarien 2 und 3 ist zu beobachten, dass die Reihe A in jedem Szenario am empfindlichsten auf die Raumakustik reagiert. Auch in diesen Szenarien wird die Reihe A häufig als „laut“ empfunden.

### Klassenraum 7.C

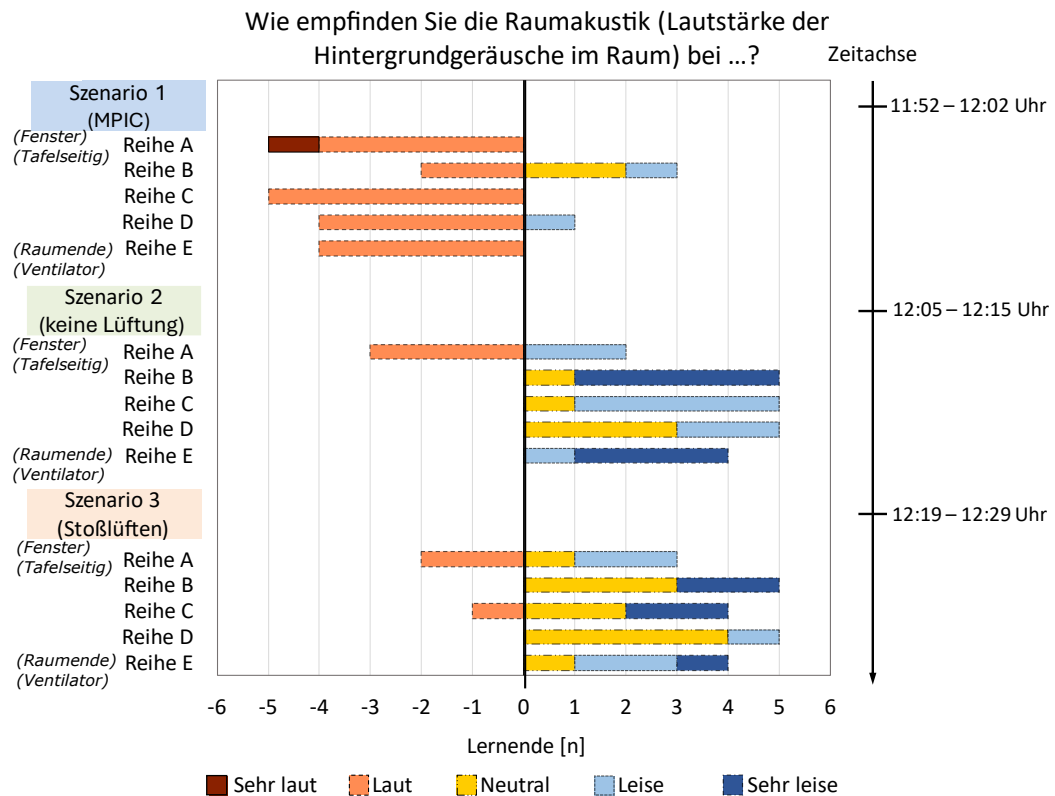


Abbildung 76: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Im Klassenraum der 7.C zeigt sich mittels Abbildung 77, dass in Szenario 1 alle Plätze im „lauten“ akustischen Bereich liegen. Der Trend in diesem Szenario ist allerdings nicht aussagekräftig, da keine Steigung erkennbar ist. In Szenario 2 und 3 hingegen wird es nach hinten hinzunehmend leiser empfunden. In beiden Szenarien gibt es keine negativen Auffälligkeiten in den Reihen. Die größte Differenz besteht zwischen Szenario 1 (-1,0) und Szenario 2 (+1,75) in Reihe E. Die Reihe B wird in Szenario 2 „sehr leise“ empfunden.

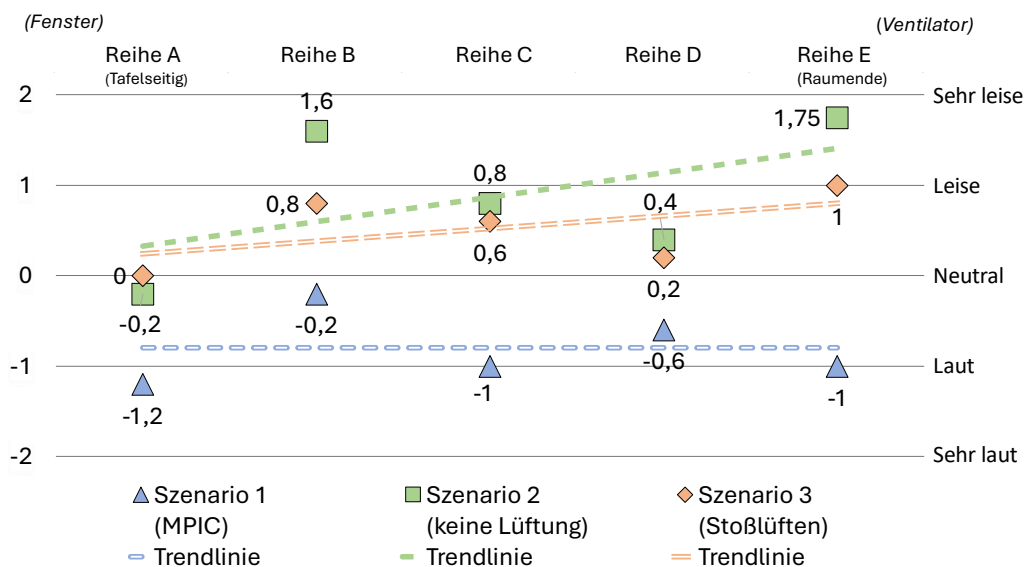
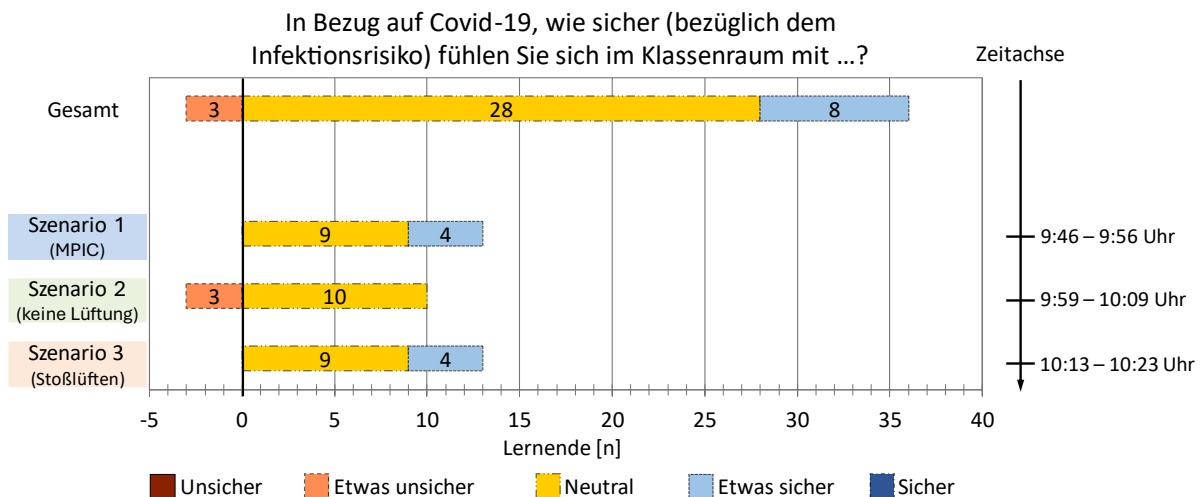


Abbildung 77: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario

## 4.2.5 Sicherheit

Die Abbildung 78 zeigt, für den Klassenraum der 8.B, dass sich insgesamt nur 7,69% der Lernenden über alle drei Szenarien hinweg „etwas unsicher“ fühlten. In Szenario 1 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gaben jeweils 9 von 13 Lernenden an, sich „neutral“ bezüglich ihrer Sicherheit zu fühlen, während 4 sich „etwas sicherer“ fühlten. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) fühlten sich 3 von 13 Lernenden „etwas unsicher“, der Rest fühlte sich „neutral“.

### Klassenraum 8.B



**Abbildung 78: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:**  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien



Die Aufschlüsselung der Reihen, in der Klasse 8.B, in Abbildung 79 zeigt, dass sich Lernende in den Reihen A (fensterseitig) und D (Raumende) in den einzelnen Szenarien am unsichersten fühlten. In Reihe C (unter dem Ventilator) hingegen empfinden sie über alle Szenarien hinweg die größte Sicherheit; selbst in Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gibt es hier keine Unsicherheiten, im Gegensatz zu den anderen Reihen.

#### Klassenraum 8.B

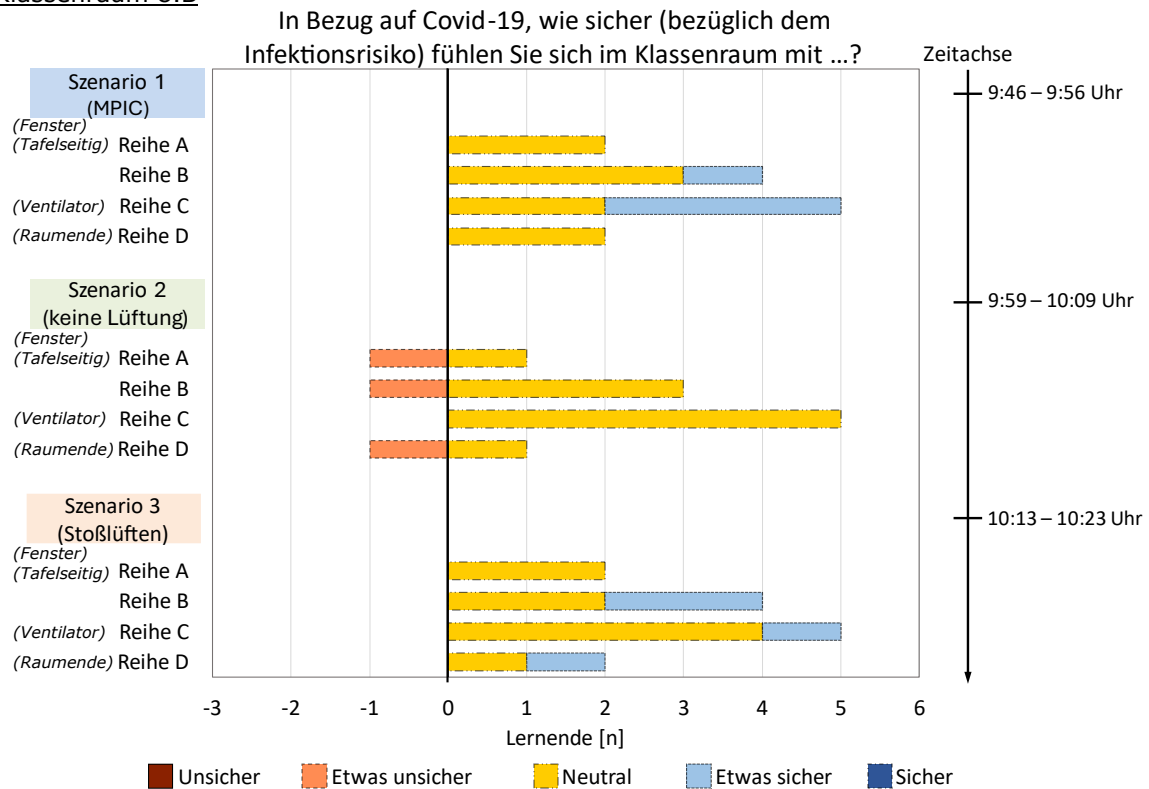


Abbildung 79: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Die Abbildung 80 zeigt kaum Ergebnisse in Bezug auf den Trend, und auch die Szenarien selbst liegen alle nahe am neutralen Wert. Die größte Differenz ist in Reihe D mit 1,0.

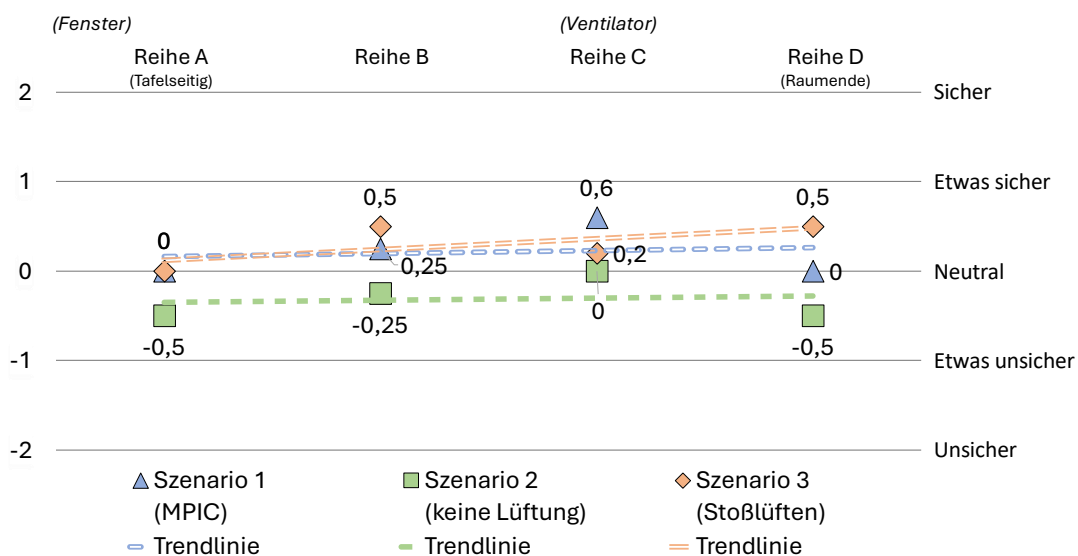
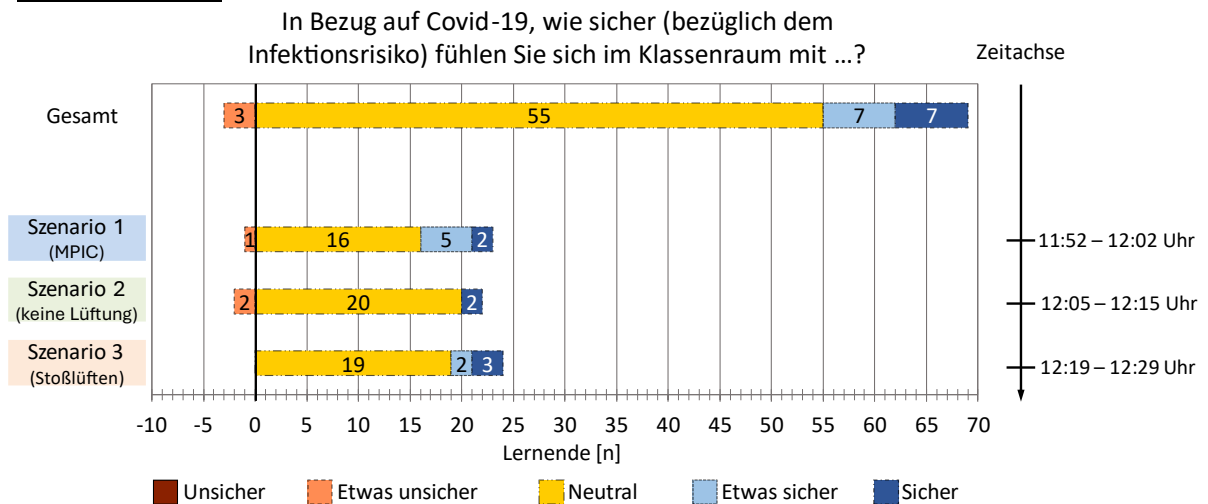


Abbildung 80: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario

Für den Klassenraum der 7.C zeigt die Abbildung 81, dass insgesamt nur 4,17% der Lernenden über alle drei Szenarien hinweg sich „etwas unsicher“ fühlten. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) fühlten sich zwei Drittel der Lernenden „neutral“ in Bezug auf ein Infektionsrisiko, während 5 von 24 Lernenden sich „etwas sicher“ und zwei sich „sicher“ fühlten. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gab es zwei Lernende, die sich „etwas unsicher“, sowie zwei, die sich als „sicher“ fühlten. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) fühlte sich niemand „unsicher“ oder „etwas unsicher“.

#### Klassenraum 7.C



**Abbildung 81: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:**  
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien

In Reihe E fühlten sich in jedem Szenario jeweils zwei Lernende „sicher“. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gab es in jeder Reihe eine Person, die sich „etwas sicher“ fühlte, was auf eine ausgeglichene Verteilung schließt (siehe Abbildung 82).

### Klassenraum 7.C

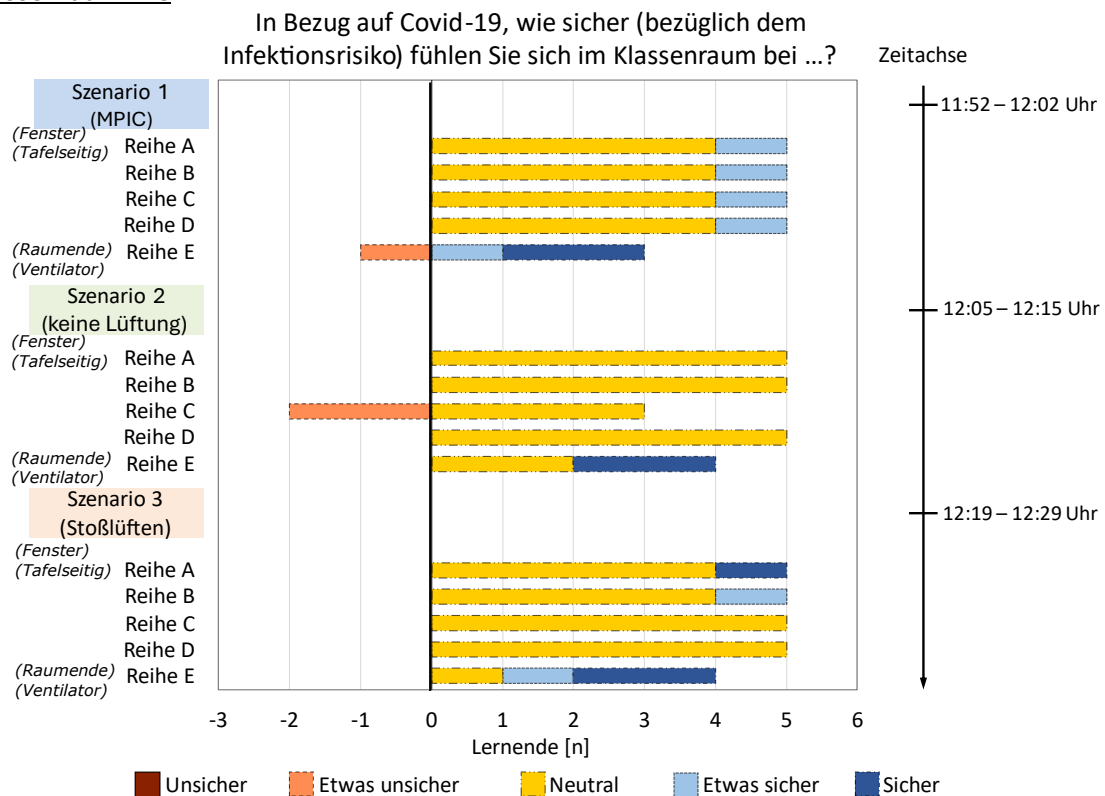


Abbildung 82: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario

Das gewichtete Sicherheitsempfinden in Bezug auf das Infektionsrisiko zeigt deutlich, dass sich die Lernenden in Reihe E, die am weitesten vom Fenster und am nächsten zum Ventilator sitzen, am sichersten fühlen. In Szenario 1 und 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) liegt der Wert bei +1,0, und in Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) steigt er sogar auf +1,25. Die Reihen A bis D bewegen sich hingegen im neutralen Bereich, mit Werten zwischen maximal +0,4 und minimal -0,4. Ein leichter positiver Trend ist erkennbar, da die hinteren Reihen zunehmend höhere Werte bzgl. des Sicherheitsempfindens aufweisen (siehe Abbildung 83).

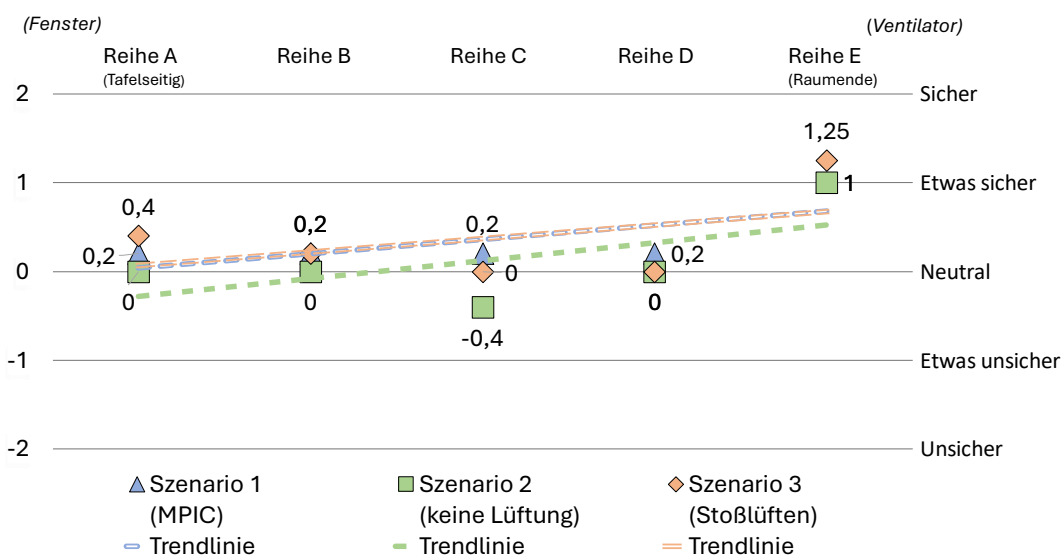


Abbildung 83: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario

## 4.2.6 Konzentration

In Abbildung 84 wird deutlich, dass im Klassenraum der 8.B insgesamt 3 von 13 Lernenden angaben, sich „weniger“ konzentrieren zu können, und 4 von 13 Lernenden angaben, sich „etwas weniger“ konzentrieren zu können. Nur eine Person gab an, sich „etwas mehr“ konzentriert zu fühlen. Besonders in den Reihen A und B fühlten sich die Lernenden am wenigsten konzentriert, wenn das Lüftungssystem eingeschaltet war.

### Klassenraum 8.B

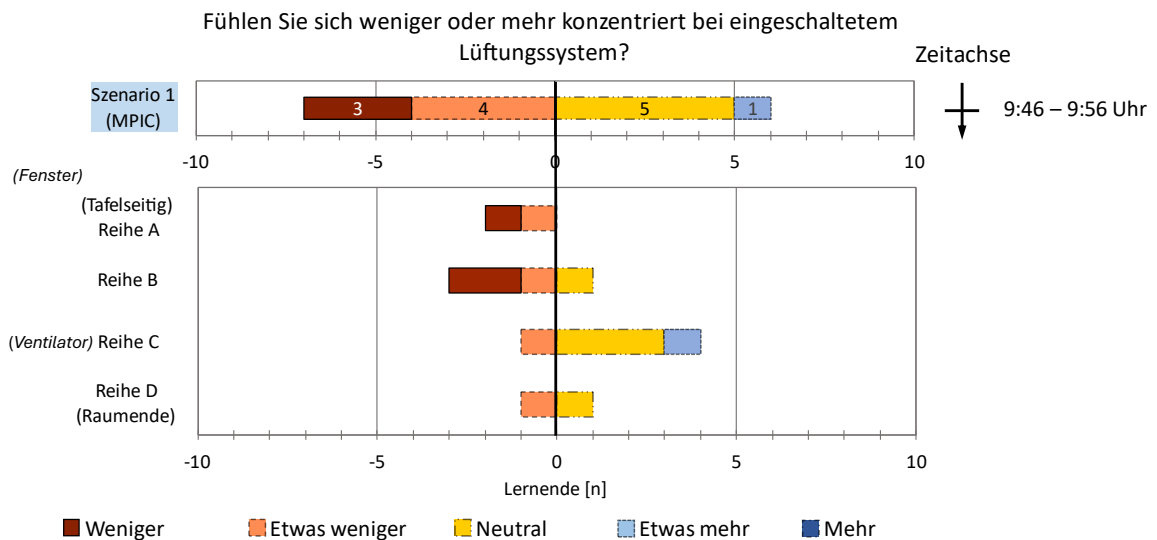


Abbildung 84: Diagramm bzgl. Konzentration am 06.04.2022 in der Klasse 8.B, bei ein- oder ausgeschaltetem Lüftungssystem; nur bei Szenario 1 (MPIC) erhoben

Im Klassenraum der 7.C zeigt sich, dass 17 von 24 Lernenden angaben, sich „etwas weniger“ oder „weniger“ konzentrieren zu können, während der Rest eine „neutrale“ Konzentration angab. Besonders in den hinteren Reihen D und E, die sich in der Nähe des Ventilators befinden, nahm die Konzentration deutlich ab, da alle dort sitzenden Lernenden angaben, sich „etwas weniger“ konzentrieren zu können (siehe Abbildung 85).

### Klassenraum 7.C

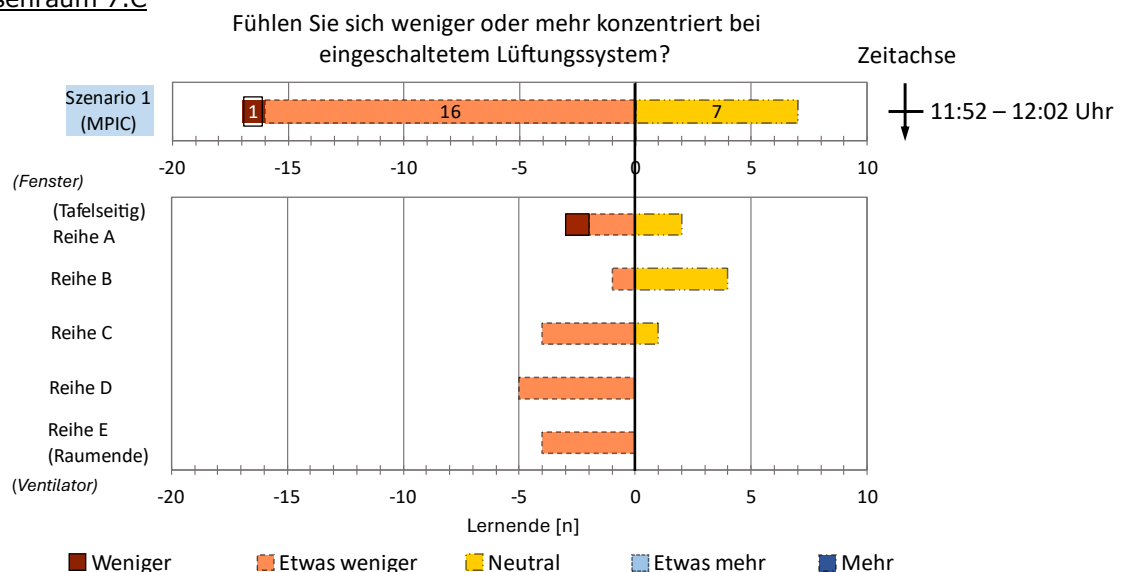


Abbildung 85: Diagramm bzgl. Konzentration am 06.04.2022 in der Klasse 7.C, bei ein- oder ausgeschaltetem Lüftungssystem; nur bei Szenario 1 (MPIC) erhoben

#### 4.2.7 Präferenz: Ein- oder ausgeschaltetes Lüftungssystem

Die Abbildung 86 zeigt, dass 10 von 13 Lernenden der Klasse 8.B, den Schultag lieber ohne eingeschaltetes Lüftungssystem verbringen würden. Die drei Lernenden, die den Schultag mit eingeschaltetem Lüftungssystem bevorzugen, stammen alle aus Reihe C, welche sich direkt unter dem Ventilator befindet und 3 Reihen entfernt vom gekippten Fenster liegt.

##### Klassenraum 8.B

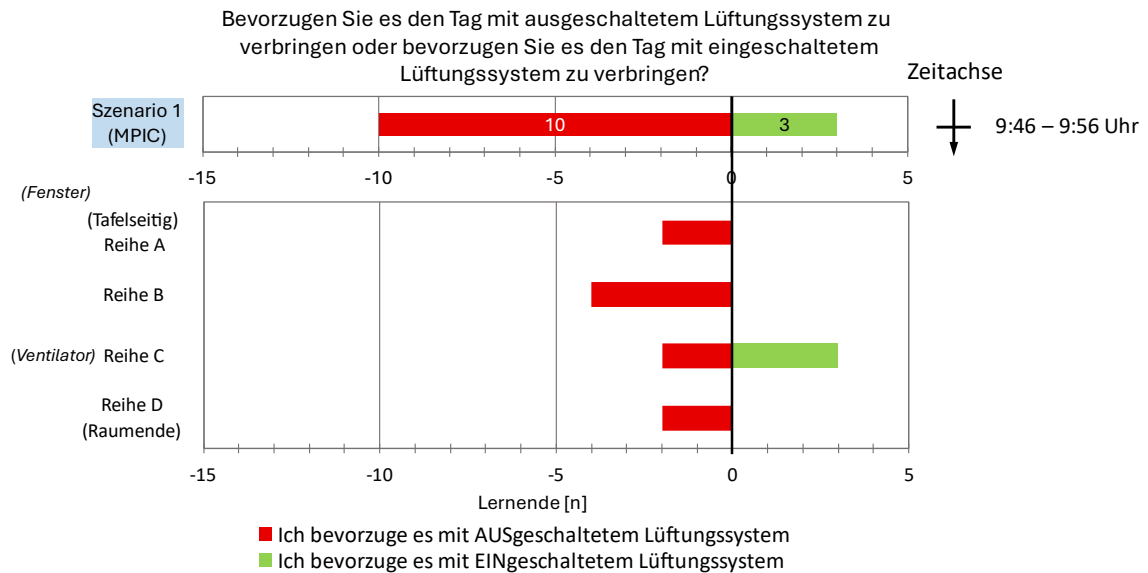


Abbildung 86: Bevorzugung ein- oder ausgeschaltetes Lüftungssystem über den Tag;  
Erhebung am 06.04.2022 in der Klasse 8.B

Im Klassenraum der 7.C bevorzugen 21 von 24 Lernenden ein ausgeschaltetes Lüftungssystem während des Schultags. In Reihe A gibt es eine lernende Person und in Reihe B zwei Lernende, die es vorziehen, den Tag mit eingeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen. In den hinteren Reihen ist niemand mehr, der das eingeschaltete Lüftungssystem bevorzugt (siehe Abbildung 87).

##### Klassenraum 7.C

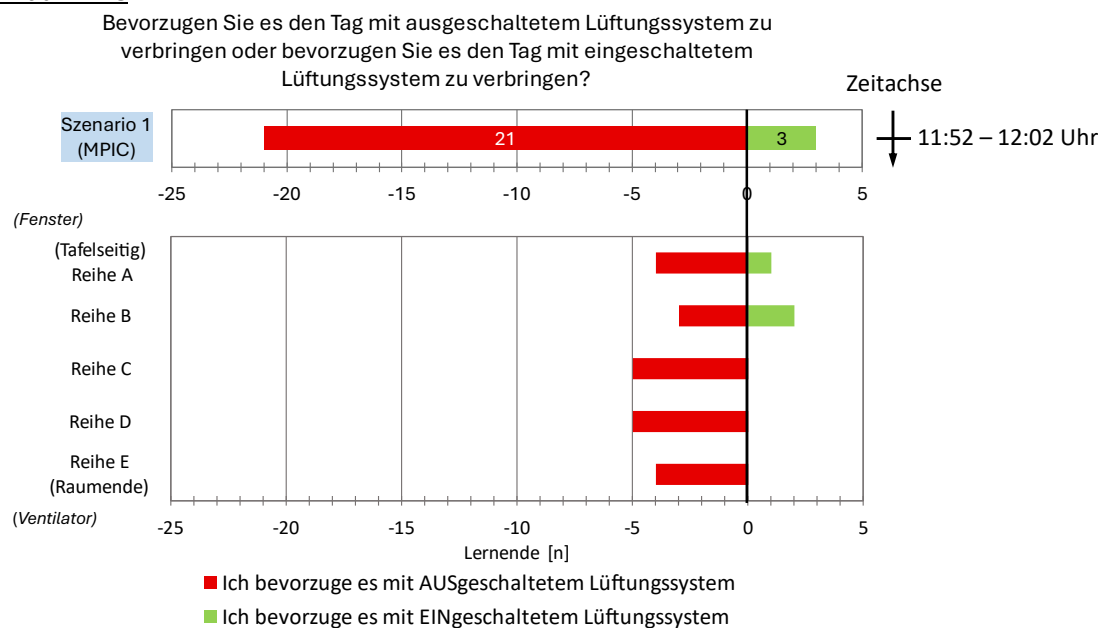


Abbildung 87: Bevorzugung ein- oder ausgeschaltetes Lüftungssystem über den Tag;  
Erhebung am 06.04.2022 in der Klasse 7.C

#### 4.2.8 Offene Fragen

Im Anhang in Abbildung 99: Fragebogen Klasse 8.B und Abbildung 100: Fragebogen Klasse 7.C sind die Abschnitte mit den offenen Fragen dargestellt. Die Ergebnisse sind, im Anhang, in der Tabelle 30 und Tabelle 31 vollständig dargestellt.

Auf die Frage nach dem Empfinden bezüglich der visuellen Optik und des Designs antworteten in der Klasse 8.B nur drei Lernende, dass sie keine negativen Kommentare oder Verbesserungsvorschläge zum Design hätten. Zehn von dreizehn Teilnehmenden äußerten hingegen Kritik, indem sie sich entweder mehr Farbe wünschten, das Design als nicht ansprechend empfanden oder es als zu auffällig und ablenkend beschrieben. Ähnlich verhielt es sich in der Klasse 7.C, wo lediglich drei von 24 Lernenden das Design als neutral, modern oder innovativ bewerteten. Die restlichen 21 Teilnehmenden äußerten den Wunsch nach mehr Farbe oder bemängelten, dass das Design ihnen nicht gefiel, zu auffällig und ablenkend oder gar bedrückend wirkte.

Insgesamt 24 der 37 Lernenden (65%) aus beiden Klassen empfanden, dass das Belüftungssystem als sehr auffällig und ablenkend empfunden wird. Darüber hinaus äußerten 12 weitere Lernende den Wunsch, dass es mehr Farben vertragen könnte. Ein weiterer Punkt wurde angemerkt, und zwar, dass das System als sehr groß wahrgenommen wurde.

Eine weitere Frage bezog sich auf das Empfinden hinsichtlich der visuellen Licht- und Sichtverhältnisse. In der Klasse 8.B empfand nur eine Person von 13 Lernenden die Lichtverhältnisse als störend. In der Klasse 7.C gaben sechs von 24 Lernenden an, dass sie die Lichtverhältnisse als störend und ablenkend empfanden oder dass die Anlage zu tief hing. Der Rest der Klasse bewertete die Lichtverhältnisse als neutral. Drei der Lernenden, die es als störend empfanden, saßen in Reihe A, also direkt vor der Tafel, während in Reihe D, der vorletzten Reihe, keine Person eine Beeinträchtigung durch die Lichtverhältnisse wahrnahm.

Nachdem der thermische Komfort abgefragt wurde, hatten die Lernenden die Möglichkeit, zusätzlich positive oder negative Anmerkungen zu äußern. In der Klasse 8.B gab es keine weiteren Kommentare. In der Klasse 7.C erwähnten jedoch drei Lernende, dass es im Winter durch das Lüftungssystem zu kalt sei, insbesondere in den Reihen C und D. Häufig wurde auf die Wintermonate verwiesen, in denen berichtet wurde, dass es aufgrund der niedrigen Temperaturen und möglicherweise auch der Zugluft als sehr kalt empfunden wurde.

Besonders bei der offenen Frage zum akustischen Komfort gaben in der Klasse 8.B sechs von 13 Lernenden (46 %) an, dass sie das Lüftungssystem als störend und zu laut empfanden. In der Klasse 7.C äußerten elf Lernende dieselbe Kritik, insbesondere während stiller Phasen und bei der Bearbeitung von Schulaufgaben, was ebenfalls 46 % entspricht. Insgesamt berichteten in beiden Klassen somit 17 von 37 Lernenden (46 %), dass sie das eingeschaltete Lüftungssystem als störend und laut wahrnehmen. Die damit verbundenen lauten Hintergrundgeräusche wurden negativ bewertet. Die Lernenden erklärten, dass es ihnen leichter falle, Straßenlärm, der weiter entfernt ist, auszublenken, als die permanente Geräuschkulisse eines Geräts, das direkt über ihren Köpfen platziert ist. Zudem wurde erwähnt, dass das eingeschaltete Lüftungssystem die Konzentrationsfähigkeit stark beeinträchtigt.

In Bezug auf das Sicherheitsempfinden gab es nur vier Rückmeldungen zu den offenen Fragen. Insgesamt wurden in beiden Klassen von den Lernenden keine Unterschiede bemerkt. Der Umweltaspekt, insbesondere der Einsatz von Plastik, sowie die Akustik wurden als negatives Feedback erwähnt.

## 4.3 Ergebnisse quantitativer Parameter mittels Messgerät/Messstation

In Kapitel 3.4 wurden die Messgeräte sowie die Messstationen und deren Funktionen erläutert. Dieses Kapitel präsentiert nun systematisch die entsprechenden Ergebnisse. Die einzelnen Szenarienbeschreibungen sind in Kapitel 3.2.4.3 zu finden.

### 4.3.1 Temperatur

Für den Klassenraum der 8.B sieht man in Tabelle 18 gut, dass über die ganze Schulstunde die Innentemperatur 22,2 °C bis 22,5 °C beträgt, während die Außentemperatur von 12,0 °C bis 12,9 °C sehr leicht schwankt. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) sinkt die Raumtemperatur um 0,1 °C, während die Außentemperatur unverändert bleibt. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) steigt die Raumtemperatur um 0,2 °C, und die Außentemperatur erhöht sich um 0,6 °C. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) bleibt die Raumtemperatur konstant, während die Außentemperatur um 0,1 °C sinkt. Laut ÖNORM EN 16798-1 darf für die Übergangszeit zwischen Heiz- und Kühlperiode die angepassten oberen und unteren Temperaturgrenzen aus Tabelle 2 genommen werden, welche zwischen 22,0 °C und 24,5 °C liegen.

**Tabelle 18: Klasse 8.B; Innen- & Außentemperatur; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien**  
**Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert**

Klassenraum 8.B	Innentemperatur [°C]	Außentemperatur [°C]
9:40 Uhr Schulstundenanfang	22,4	12,0
9:46 Uhr Start Szenario 1 (MPIC)	22,4	12,3
9:56 Uhr Ende Szenario 1 (MPIC)	22,3	12,3
9:59 Uhr Start Szenario 2 (keine Lüftung)	22,2	12,3
10:09 Uhr Ende Szenario 2 (keine Lüftung)	22,4	12,9
10:13 Uhr Start Szenario 3 (Stoßlüften)	22,5	12,9
10:23 Uhr Ende Szenario 3 (Stoßlüften)	22,5	12,8
10:30 Uhr Schulstundenende	22,5	12,8
Maximalwert über alle 3 Szenarien	22,5	12,9
Minimalwert über alle 3 Szenarien	22,2	12,2
Mittelwert über alle 3 Szenarien	22,4	12,6



Die Abbildung 88 veranschaulicht nochmals den Temperaturverlauf über die ganze Schulstunde sowie die Temperaturveränderung über die drei verschiedenen Lüftungsszenarien.

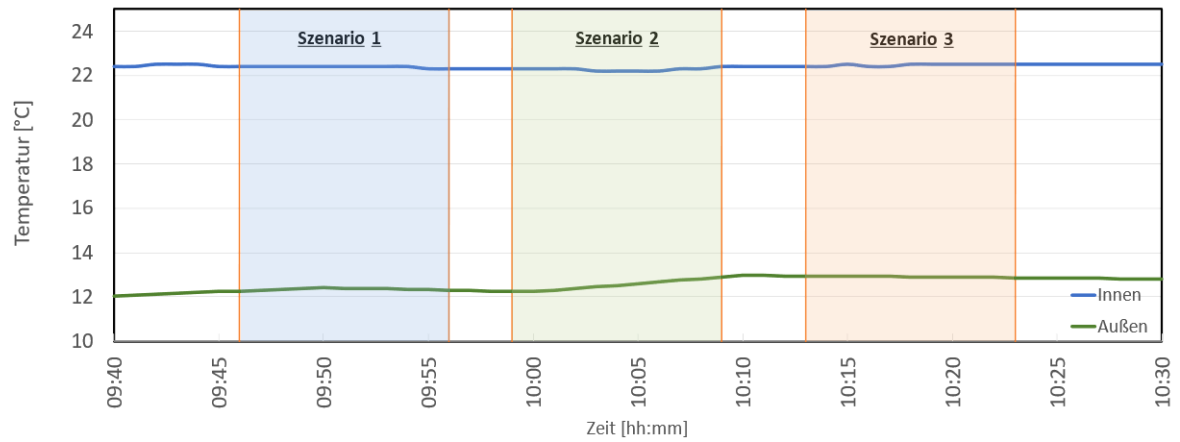


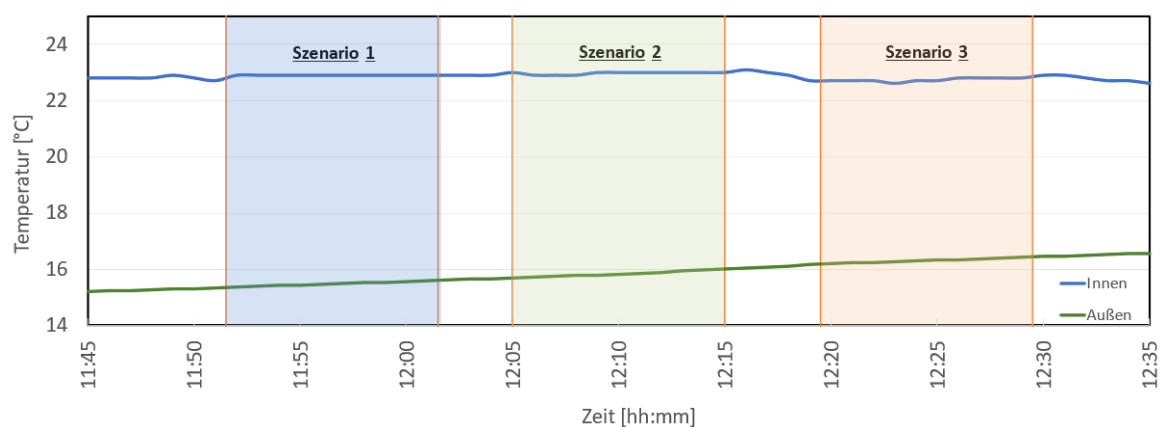
Abbildung 88: Temperatur [°C] / Zeit [hh:mm] Diagramm des 8.B Klassenraums: Messzeitraum von 9:40 bis 10:30

Der Klassenraum der 7.C wurde auch temperaturtechnisch beobachtet. In Tabelle 19 ist zu sehen, dass sich nur sehr leichte Temperaturschwankungen bzgl. Innen- und Außentemperatur ergeben haben. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) steigt die Raumtemperatur um 0,2 °C, während die Außentemperatur ebenfalls um 0,2 °C zunimmt. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) bleibt die Raumtemperatur unverändert, während die Außentemperatur um 0,3 °C ansteigt. In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) erhöht sich die Raumtemperatur um 0,1 °C, während die Außentemperatur um 0,2 °C steigt. Laut ÖNORM EN 16798-1 darf für die Übergangszeit zwischen Heiz- und Kühlperiode die angepasste oberen und unteren Temperaturgrenzen aus Tabelle 2 genommen werden, welche sich zwischen 22,0 °C und 24,5 °C liegen.

**Tabelle 19: Klasse 7.C; Innen- & Außentemperatur; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien**  
**Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert**

Klassenraum der 7.C	Innentemperatur [°C]	Außentemperatur [°C]
11:45 Uhr Schulstundenanfang	22,8	15,2
11:52 Uhr Start Szenario 1 (MPIC)	22,7	15,4
12:02 Uhr Ende Szenario 1 (MPIC)	22,9	15,6
12:05 Uhr Start Szenario 2 (keine Lüftung)	23,0	15,7
12:15 Uhr Ende Szenario 2 (keine Lüftung)	23,0	16,0
12:19 Uhr Start Szenario 3 (Stoßlüften)	22,7	16,2
12:29 Uhr Ende Szenario 3 (Stoßlüften)	22,8	16,4
12:35 Uhr Schulstundenende	22,6	16,6
Maximalwert über alle 3 Szenarien	23,0	16,4
Minimalwert über alle 3 Szenarien	22,6	15,4
Mittelwert über alle 3 Szenarien	22,9	15,9

Die Abbildung 89 stellt den Temperaturverlauf über die ganze Schulstunde sowie die Temperaturveränderung über die drei verschiedenen Lüftungsszenarien dar.



**Abbildung 89: Temperatur [°C] / Zeit [hh:mm] Diagramm des Klassenraums 7.C: Messzeitraum von 11:45 bis 12:35**

### 4.3.2 CO<sub>2</sub>-Konzentration

Das Messgerät AIRCO2NTROL 5000 erfasst die CO<sub>2</sub>-Konzentration während der gesamten Unterrichtsstunde, (siehe Kapitel 3.4.2), wobei die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft am 6. April 2022 mit 419,17 ppm von der „Daily CO<sub>2</sub> Data source“ von Dr. Pieter Tans angenommen wurde (siehe Webseite: <https://www.co2.earth/daily-co2>).

Die Tabelle 20 zeigt tabellarisch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Klassenraum der 8.B. Der Trend zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit eingeschaltetem Lüftungssystem, sprich Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3), während des Testzeitraums um 139 ppm abnimmt. Auch der errechnete PD-Wert sinkt um 3,16%.

In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) beginnt die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit einem Wert von 913 ppm, steigt jedoch innerhalb der 10-minütigen Testdauer um 340 ppm an und überschreitet die 1000 ppm Marke. Gleichzeitig erhöht sich der PD-Wert (% der Unzufriedenen mit der Raumluft, siehe Kapitel 2.3.3) deutlich um 7,57%.

In Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration um 169 ppm an, sowohl zu Beginn als auch am Ende des Szenarios liegen die Werte über 1000 ppm. Der errechnete PD-Wert (% der Unzufriedenen mit der Raumluft, siehe Kapitel 2.3.3) liegt hier am Beginn bei 25,57% und steigt auf 28,57% an.

**Tabelle 20: Klasse 8.B; CO<sub>2</sub>-Konzentration in [ppm] und PD (Anteil der unzufriedenen Personen) in [%]; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert**

Klassenraum der 8.B	CO <sub>2</sub> -Konzentration gesamt [ppm]	CO <sub>2</sub> -Konzentration über Außenluft [ppm]	PD [%]
9:40 Uhr Schulstundenanfang	1230	811	23,10
9:46 Uhr Start Szenario 1 (MPIC)	1062	643	19,50
9:56 Uhr Ende Szenario 1 (MPIC)	923	504	16,14
9:59 Uhr Start Szenario 2 (keine Lüftung)	931	512	16,35
10:09 Uhr Ende Szenario 2 (keine Lüftung)	1271	852	23,92
10:13 Uhr Start Szenario 3 (Stoßlüften)	1357	938	25,57
10:23 Uhr Ende Szenario 3 (Stoßlüften)	1526	1107	28,57
10:30 Uhr Schulstundenende	1638	1219	30,41
10:21 Uhr Maximalwert über alle 3 Szenarien	1538	1119	28,77
9:55 Uhr Minimalwert über alle 3 Szenarien	915	496	15,94
Mittelwert über alle 3 Szenarien	1181	762	22,10

Der zeitliche Ablauf der Schulstunden in der Klasse der 8.B, in denen die Umfrage durchgeführt und die drei unterschiedlichen Lüftungsszenarien getestet wurden, wird in der folgenden Abbildung 90 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Zu- und Abnahmen der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sowie grafisch Grenzen für die jeweiligen Bereiche. Für eine gute Luftqualität sollte die Konzentration unter 1000 ppm liegen, wobei ein Wert unter 800 ppm ideal wäre (siehe Kapitel 2.3.3). Zudem veranschaulichen dies die Farben des Ampelsystems, welches am AIRCO2NTROL 5000 verbaut war.

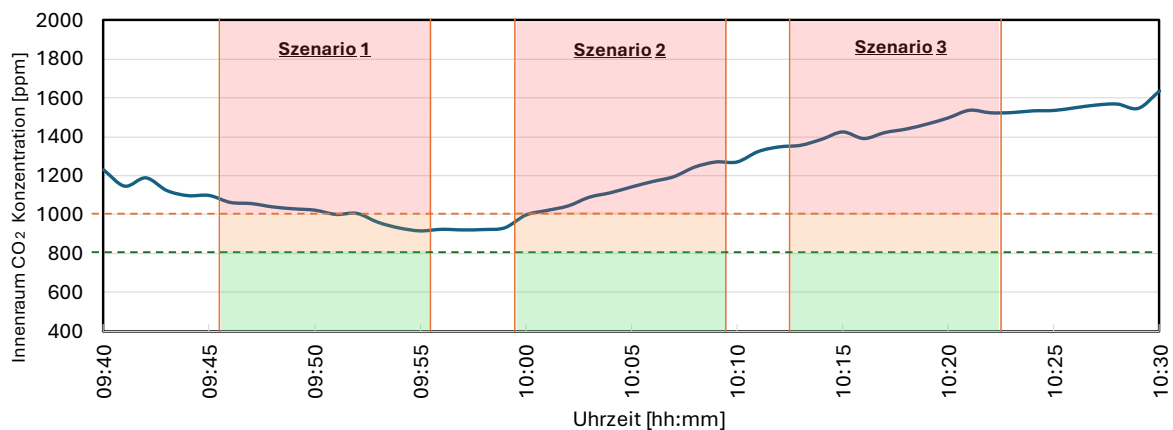


Abbildung 90: Klasse 8.B; Innenraum CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 09:40 bis 10:30

Zur weiteren Beurteilung wurden in Abbildung 91 die CO<sub>2</sub>-Konzentrationswerte über den gesamten Schultag hinweg betrachtet. Der niedrigste Wert von 915 ppm wurde am Ende (9:55 Uhr) des Szenarios 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3), bei eingeschaltetem Lüftungssystem, gemessen. In diesem Fall wurde ein berechneter PD-Wert (% der Unzufriedenen mit der Raumluft, siehe Kapitel 2.3.3) von etwa 16% ermittelt. Im Gegensatz dazu wurde der höchste Wert um 10:21 Uhr mit 1538 ppm gemessen, was zu einem berechneten Unzufriedenheitsfaktor von 28,77% führte. Zudem lagen die CO<sub>2</sub>-Werte über den gesamten Schultag nur zu 3,47% der Zeit unter dem empfohlenen Grenzwert von 1000 ppm aus Kapitel 2.3.3.

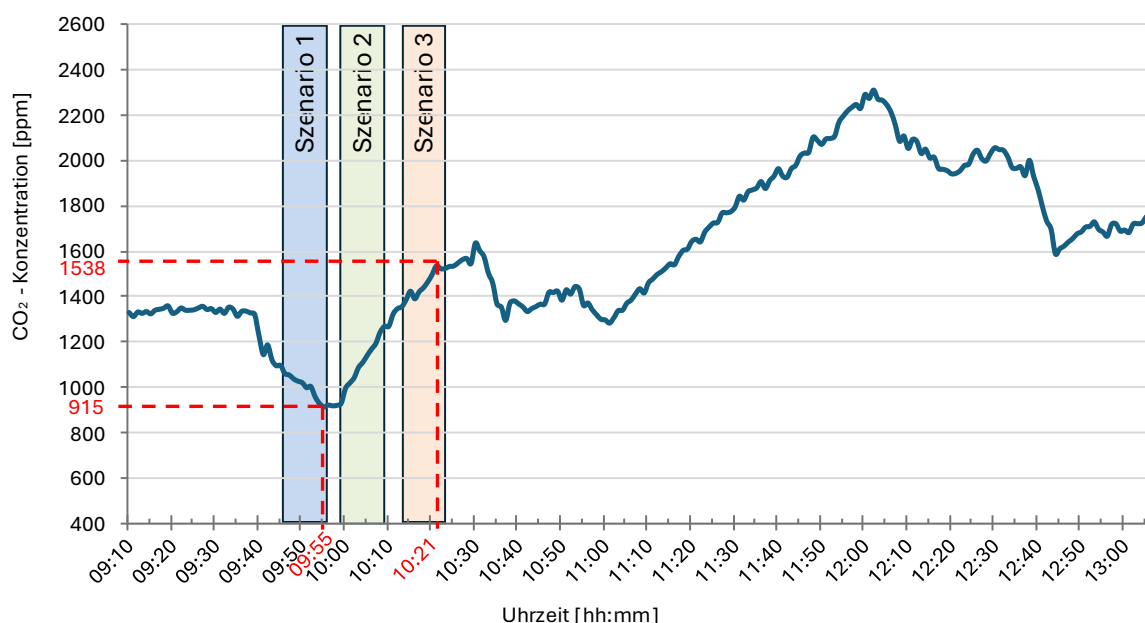


Abbildung 91: Klasse 8.B; Innenraum CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 09:10 bis 13:05

Die Tabelle 21 zeigt die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Klassenraum der 7.C. Besonders auffällig ist, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration nach Beginn der Schulstunden sehr schnell ansteigt, sobald der Raum geschlossen wird. Innerhalb von 7 Minuten erhöht sich der Wert um 650 ppm.

Der Ausgangswert in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) ist bereits hoch, dennoch lässt sich ein deutlicher Rückgang der CO<sub>2</sub>-Konzentration feststellen. Innerhalb der 10-minütigen Testzeit sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration um 215 ppm, was auch eine Verbesserung der Zufriedenheitsrate erwarten lässt.

Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) verdeutlicht, wie rasch sich die Bedingungen verschlechtern können. In einem geschlossenen Raum steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in nur 10 Minuten um 222 ppm an.

In Szenario 3, (siehe Kapitel 3.2.4.3) bei dem vor Beginn stoßgelüftet wird, sinkt der CO<sub>2</sub>-Wert innerhalb von 4-5 Minuten stark von 1553 auf 605 ppm. Allerdings steigt dieser Wert innerhalb des 10-minütigen Testzeitraums rapide von 605 auf 1208 ppm an, sobald der Raum wieder geschlossen ist. Auch der berechnete Zufriedenheitswert verändert sich drastisch, von 6,53% auf 22,65%, was einer Verdreieinhalbfachung entspricht.

**Tabelle 21: Klasse 7.C; CO<sub>2</sub>-Konzentration in [ppm] und PD (Anteil der unzufriedenen Personen) in [%]; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert**

Klassenraum der 7.C	CO <sub>2</sub> -Konzentration gesamt [ppm]	CO <sub>2</sub> -Konzentration über Außenluft [ppm]	PD [%]
11:45 Uhr Schulstundenanfang	941	522	16,60
11:52 Uhr Start Szenario 1 (MPIC)	1591	1172	29,65
12:02 Uhr Ende Szenario 1 (MPIC)	1376	957	25,92
12:05 Uhr Start Szenario 2 (keine Lüftung)	1321	902	24,89
12:15 Uhr Ende Szenario 2 (keine Lüftung)	1543	1124	28,86
12:19 Uhr Start Szenario 3 (Stoßlüften)	605	186	6,53
12:29 Uhr Ende Szenario 3 (Stoßlüften)	1208	789	22,65
12:35 Uhr Schulstundenende	724	305	10,52
11:52 Uhr Maximalwert über alle 3 Szenarien	1630	1211	30,29
12:18 Uhr Minimalwert über alle 3 Szenarien	519	100	3,28
Mittelwert über alle 3 Szenarien	1246	827	23,42

Die Abbildung 92 stellt die Trends der einzelnen Lüftungsszenarien grafisch dar und verdeutlicht, zu welchen Uhrzeiten die Werte unter 800 ppm, zwischen 800 und 1000 ppm sowie über 1000 ppm liegen.

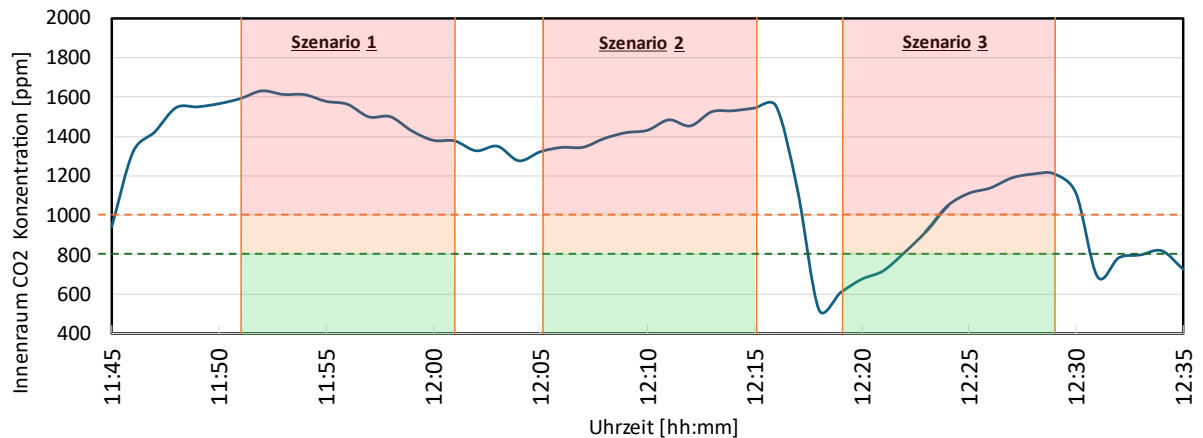


Abbildung 92: Klasse 7.C; Innenraum CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 11:45 bis 12:35

In Abbildung 93 wurden zur weiteren Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auch die Werte im Klassenraum der 7.C über den gesamten Schultag hinweg dargestellt. Der niedrigste Wert von 519 ppm wurde während der Teststunde zu Beginn des Szenarios 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3), unmittelbar nach dem Stoßlüften (12:18 Uhr), gemessen. In diesem Fall ergab sich ein berechneter PD-Wert (Prozentsatz der Unzufriedenheit) von nur 3,28%. Im Gegensatz dazu wurde die höchste CO<sub>2</sub>-Konzentration, im Testzeitraum, um 11:52 Uhr mit 1630 ppm erfasst, was zu einem deutlich höheren Unzufriedenheitsfaktor von 30,29% führte. Insgesamt lagen die CO<sub>2</sub>-Werte bis 12:35 Uhr, da die Klasse danach entlassen wurde, nur in 7,22% der Zeit unter dem empfohlenen Grenzwert von 1000 ppm aus Kapitel 2.3.3.

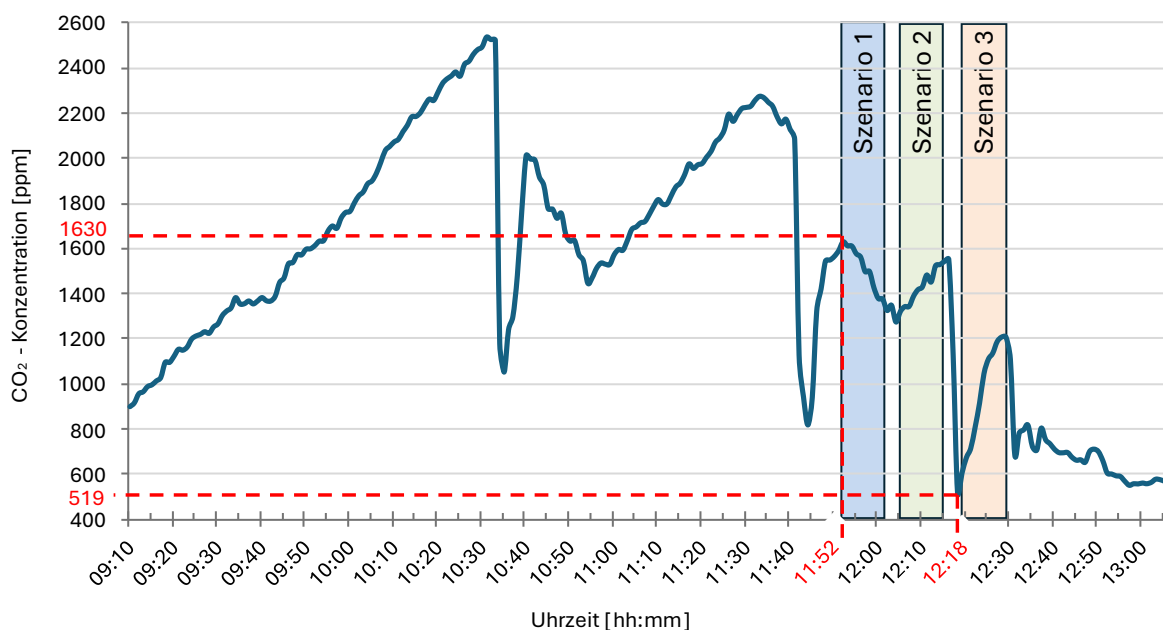


Abbildung 93: Klasse 7.C; Innenraum CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 9:10 bis 13:05

### 4.3.3 Akustik

Die Lautstärkemessung im belegten Klassenraum der 8.B wurde über die gesamten 10 Minuten hinweg durchgeführt (siehe Abbildung 27). Die Messung des leeren Klassenzimmers erfolgte mittels einer Spotmessung, bei der in jeder Reihe am Anfang und am Ende für jeweils 3 Sekunden gemessen wurde. Die Durchschnittswerte für den Klassenraum der 8.B sind in Abbildung 94 dargestellt. Diese zeigt, dass im belegten Klassenzimmer die Lautstärke bei Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) am niedrigsten ist (50,5 dB), während Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) mit 59,6 dB am lautesten und Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) mit 54,3 dB dazwischen liegt. Bei der durchschnittlichen Lautstärke im leeren Klassenzimmer fällt auf, dass Szenario 1 mit 48,4 dB deutlich höher liegt als Szenario 2 (32,9 dB) und Szenario 3 (34,9 dB). Laut Norm, siehe Kapitel 2.3.5, sollte der Wert unter 35 dB liegen, für Unterrichtsräume der Klasse A3 bei ruhiger Selbstbeschäftigung bzw. kommunikationsintensiver Nutzung.

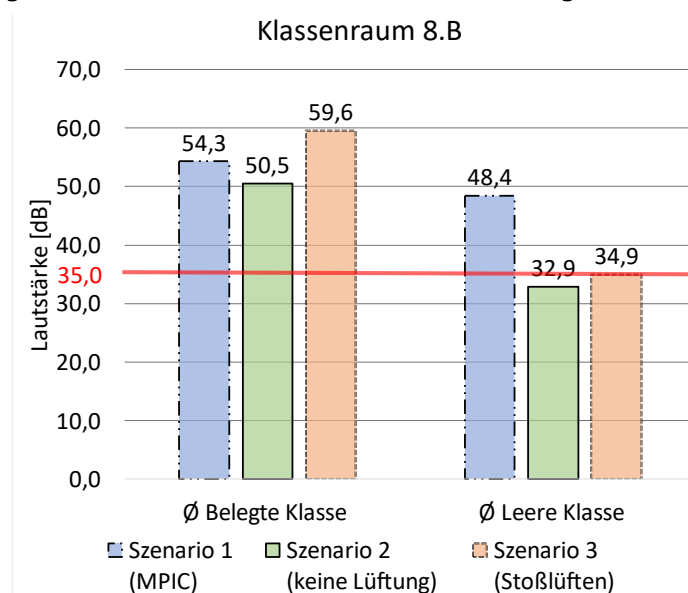


Abbildung 94: Klasse 8.B, Durchschnittliche Lautstärke bei belegtem- und leerem Klassenraum je Szenario; Grenzwertlinie bei 35 dB

In Abbildung 95 werden die Unterschiede der durchschnittlichen Lautstärke in einem leeren und einem belegten Klassenzimmer dargestellt, unter der Annahme, dass die Signalquelle mit 60 dB bei Verdoppelung der Distanz um 6 dB abnimmt (siehe Kapitel 2.3.5).

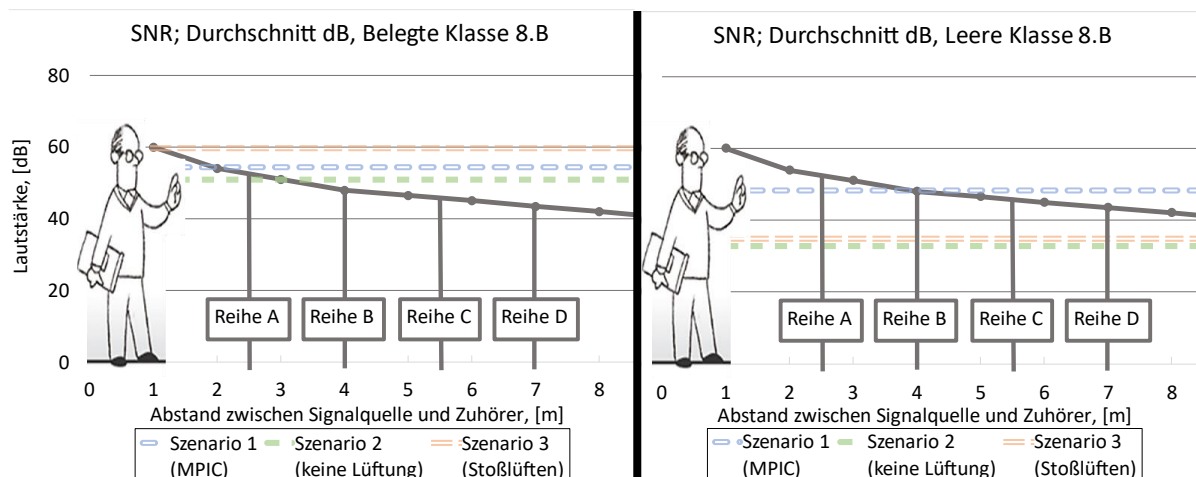


Abbildung 95: Klasse 8.B, Lautstärke [dB] zu Abstand zwischen Signalquelle und Zuhörer [m] Diagramm

Die Abbildung 96 zeigt die folgenden Ergebnisse bezüglich der Lautstärke im belegten sowie im leeren Klassenraum der 7.C. Im belegten Klassenraum ist die durchschnittliche Lautstärke bei Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) mit 56,6 dB am höchsten, während Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) mit 53,8 dB am leisesten ist. Im leeren Klassenraum ist Szenario 1 ebenfalls am lautesten mit 47,5 dB, gefolgt von Szenario 3, das mit 45,2 dB ähnlich laut ist. Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) weist im leeren Klassenraum mit 37,1 dB den niedrigsten Wert auf. Alle Durchschnittswerte, sowohl im belegten als auch im leeren Klassenraum, liegen über 35 dB.

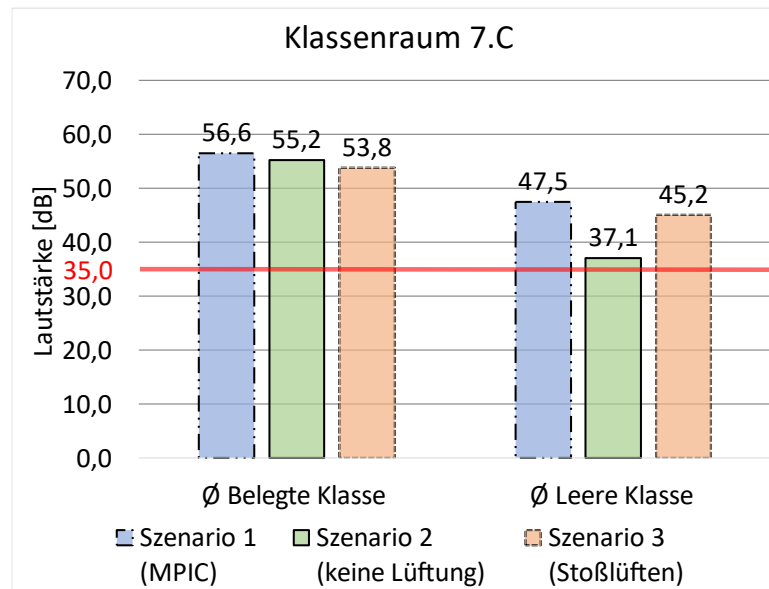


Abbildung 96: Klasse 7.C, Durchschnittliche Lautstärke bei belegtem- und leerem Klassenraum je Szenario; Grenzwertlinie bei 35 dB

In Abbildung 97 werden die Unterschiede der durchschnittlichen Lautstärke in einem leeren und einem belegten Klassenzimmer dargestellt, unter der Annahme, dass die Signalquelle mit 60 dB bei Verdoppelung der Distanz um 6 dB abnimmt (siehe Kapitel 2.3.5). Die Messung im leeren Klassenraum ergab pro Szenario einen Durchschnittswert, basierend auf allen Spotmessungen über alle Reihen hinweg. Für den belegten Zustand wurde pro Szenario jeweils nur eine Messung über den gesamten Messzeitraum durchgeführt und der Durchschnittswert ermittelt (siehe Kapitel 3.2.3).

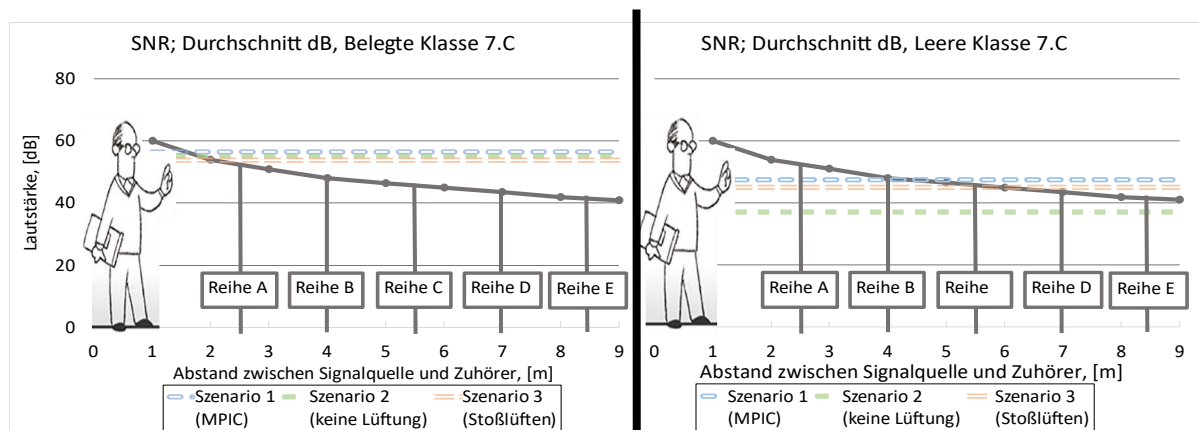


Abbildung 97: Klasse 7.C, Lautstärke [dB] zu Abstand zwischen Signalquelle und Zuhörer [m] Diagramm



## 4.4 Ergebnisse statistischer Auswertungen mittels Excel & SPSS

In Kapitel 3.5 der Methodik wurden die Vorgehensweise zur Durchführung der statischen Tests erläutert. Dieses Kapitel präsentiert nun systematisch die Ergebnisse dieser Tests. Die einzelnen Szenarienbeschreibungen sind in Kapitel 3.2.4.3 zu finden.

### 4.4.1 Friedman-Test

Die Tabelle 22 zeigt die deskriptive Statistik und die mittleren Ränge der Szenarien, basierend auf der Friedman-Varianzanalyse für die Klasse 8.B. Es wird deutlich, dass Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) die größten Abweichungen zu Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) aufweist, sowohl bei den Mittelwerten als auch bei den mittleren Rängen. In Frage 6, zur Sicherheit und Infektionsgefahr, ist der Abstand am geringsten (Mittelwert: 0,54; Rang: 0,65). Der größte Unterschied zeigt sich in Frage 1, mit einem Mittelwertunterschied von 1,54 und einem Rangunterschied von 1,43.

**Tabelle 22: Klasse 8.B, Deskriptive Statistiken mit zugehörigen Rängen je Szenario pro Erhebungsfrage**  
Zusätzlich zum Verständnis: Durchschnittliche quantitative Messwerte

Deskriptive Statistiken				Ränge	Quantitative Messwerte
Frage 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei..?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø Raumtemp.
Szenario 1 (MPIC)	13	1,85	0,899	1,19	22,4 °C
Szenario 2 (keine Lüftung)	13	3,38	0,87	2,62	22,3 °C
Szenario 3 (Stoßlüften)	13	2,92	0,494	2,19	22,5 °C
Frage 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	
Szenario 1 (MPIC)	13	3,92	1,256	2,65	
Szenario 2 (keine Lüftung)	13	2,77	0,927	1,58	
Szenario 3 (Stoßlüften)	13	2,85	0,555	1,77	
Frage 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei..?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø Außentemp.
Szenario 1 (MPIC)	13	2,92	1,188	2,5	12,3 °C
Szenario 2 (keine Lüftung)	13	1,62	0,961	1,58	12,5 °C
Szenario 3 (Stoßlüften)	13	2	0,707	1,92	12,9 °C
Frage 4: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	
Szenario 1 (MPIC)	13	2,08	0,862	1,19	
Szenario 2 (keine Lüftung)	13	3,54	0,66	2,65	
Szenario 3 (Stoßlüften)	13	3,15	0,376	2,15	
Frage 5: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei..?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø Lautstärke
Szenario 1 (MPIC)	13	3,38	0,961	2,77	54,3 dB
Szenario 2 (keine Lüftung)	13	2,08	0,954	1,5	50,5 dB
Szenario 3 (Stoßlüften)	13	2,38	0,87	1,73	59,6 dB
Frage 6: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø CO <sub>2</sub> -Konzentration
Szenario 1 (MPIC)	13	3,31	0,48	2,23	995 ppm
Szenario 2 (keine Lüftung)	13	2,77	0,439	1,58	1109 ppm
Szenario 3 (Stoßlüften)	13	3,31	0,48	2,19	1453 ppm

Die Tabelle 23 zeigt die deskriptive Statistik und Ränge der einzelnen Szenarien für den Klassenraum der 7.C. Auch hier weicht Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) in allen Fragen am stärksten von Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) ab. Der geringste Unterschied zeigt sich bei Frage 6, zur Sicherheit und Infektionsrisiko, mit einem Mittelwertunterschied von 0,25 und einem Rangunterschied von 0,34. Der größte Unterschied tritt bei Frage 5 in Bezug auf Raumakustik und Lautstärke auf, mit einem Mittelwertunterschied von 1,62 und einem Rangunterschied von 1,19.

**Tabelle 23: Klasse 7.C, Deskriptive Statistiken mit zugehörigen Rängen je Szenario pro Erhebungsfrage**  
Zusätzlich zum Verständnis: Durchschnittliche quantitative Messwerte

Deskriptive Statistiken				Ränge	Quantitative Messwerte
Frage 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei..?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø Raumtemp.
Szenario 1 (MPIC)	24	2,83	0,702	1,58	22,9 °C
Szenario 2 (keine Lüftung)	24	3,58	0,654	2,48	23,0 °C
Szenario 3 (Stoßlüften)	24	3,17	0,702	1,94	22,7 °C
Frage 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	
Szenario 1 (MPIC)	24	2,92	0,584	2,46	
Szenario 2 (keine Lüftung)	24	2,33	0,637	1,6	
Szenario 3 (Stoßlüften)	24	2,58	0,654	1,94	
Frage 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei..?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø Außentemp.
Szenario 1 (MPIC)	24	2,13	0,85	2,4	15,5 °C
Szenario 2 (keine Lüftung)	24	1,46	0,779	1,56	15,8 °C
Szenario 3 (Stoßlüften)	24	1,96	1,16	2,04	16,3 °C
Frage 4: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	
Szenario 1 (MPIC)	24	2,96	0,69	1,63	
Szenario 2 (keine Lüftung)	24	3,58	0,776	2,4	
Szenario 3 (Stoßlüften)	24	3,25	0,794	1,98	
Frage 5: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei..?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø Lautstärke
Szenario 1 (MPIC)	24	3,79	0,658	2,71	56,6 dB
Szenario 2 (keine Lüftung)	24	2,17	1,007	1,52	55,2 dB
Szenario 3 (Stoßlüften)	24	2,5	0,978	1,77	53,8 dB
Frage 6: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum?	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Mittlerer Rang	Ø CO <sub>2</sub> -Konzentration
Szenario 1 (MPIC)	24	3,33	0,702	2,13	1500 ppm
Szenario 2 (keine Lüftung)	24	3,08	0,654	1,79	1434 ppm
Szenario 3 (Stoßlüften)	24	3,33	0,702	2,08	965 ppm

Die Tabelle 24 zeigt die Statistik für den Friedman-Test für den Klassenraum der 8.B, wie in der Methodik in Kapitel 3.5.1 erläutert. Die Tabelle enthält die Anzahl der Probanden ( $N = 13$ ), den Chi-Quadrat-Wert, die Freiheitsgrade ( $df = 2$ ) sowie die Signifikanz. Da der Chi-Quadrat-Wert mit 5,991 bei jeder der sechs Fragen niedriger ausfällt als der Wert des Friedman-Tests, wird in Spalte vier deutlich, dass bei allen Fragen eine Signifikanz besteht. Diese liegt auch bei einem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  (entspricht 5%) über den entsprechenden Werten der Umfragen. Der größte Abstand tritt bei Frage 4 auf, die sich auf den bevorzugten Luftzug bezieht, mit einem Chi-Quadrat-Wert von 19,632. Der geringste Abstand findet sich bei Frage 3, die die Luftzugempfindung betrifft, mit einem Chi-Quadrat-Wert von 7,737.

**Tabelle 24; Klasse 8.B, Statistik für den Friedman-Test (siehe Kapitel 3.5.1)**

	<b>N</b>	<b>Chi<sup>2</sup></b>	<b>df</b>	<b>Asymp. Sig.</b>
Frage 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei..?	13	16,409	2	0,000
Frage 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?	13	12,743	2	0,002
Frage 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei..?	13	7,737	2	0,021
Frage 4: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?	13	19,632	2	0,000
Frage 5: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei..?	13	18,727	2	0,000
Frage 6: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum?	13	8,273	2	0,016

Für den Klassenraum der 7.C wurde der Friedman-Test durchgeführt, und Tabelle 25 zeigt die Ergebnisse. Die Tabelle enthält die Anzahl der Probanden ( $N = 24$ ), den Chi-Quadrat-Wert, die Freiheitsgrade ( $df = 2$ ) sowie die Signifikanz. Alle Chi-Quadrat-Werte liegen über dem kritischen Wert von 5,991, was in allen Fällen eine Signifikanz bestätigt. Das Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (entspricht 5%) liegt ebenfalls bei allen einzelnen Fragen über den jeweiligen Werten. Der größte Unterschied zeigt sich bei Frage 5 (Raumakustik und Lautstärke) mit einem Chi-Quadrat-Wert von 25,083. Der geringste Unterschied wird bei Frage 6 (Sicherheit und Infektionsrisiko) mit einem Chi-Quadrat-Wert von 6,08 und einer Signifikanz von 0,048 festgestellt, was gerade noch signifikant ist.

**Tabelle 25; Klasse 7.C, Statistik für den Friedman-Test (siehe Kapitel 3.5.1)**

	<b>N</b>	<b>Chi<sup>2</sup></b>	<b>df</b>	<b>Asymp. Sig.</b>
Frage 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei..?	24	17,055	2	0,000
Frage 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?	24	15,527	2	0,000
Frage 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei..?	24	12,4	2	0,002
Frage 4: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?	24	13,72	2	0,001
Frage 5: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei..?	24	25,083	2	0,000
Frage 6: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum?	24	6,08	2	0,048

#### 4.4.2 Wilcoxon-Test

Der Wilcoxon-Test, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, zeigt für Frage 1-5 signifikante Unterschiede zwischen Szenario 1 und Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3). Tabelle 26 verdeutlicht, dass zwischen diesen Szenarien immer Signifikanz vorliegt, ausgenommen bei Frage 6. Zwischen Szenario 2 und 3 gibt es jedoch nie eine Signifikanz. Der z-Wert für einen Fraktilwert von 0,0167 beträgt 2,39, wobei der z-Wert zwischen Szenario 1 und 2 stets darüber liegt und der p-Wert für jede Frage unter 0,0167 liegt, außer bei Frage 6.

Der größte Abstand zeigt sich bei Frage 4, die den bevorzugten Luftzug betrifft, mit einem z-Wert von -3,126 und einem p-Wert von 0,002. Der geringste Abstand tritt bei Frage 3, bezüglich des Luftzugsempfinden, auf, mit einem z-Wert von -2,414 und einem p-Wert von 0,016, der gerade noch unter dem Schwellenwert von 0,0167 liegt. Zwischen Szenario 2 und Szenario 3 gibt es keine signifikanten Unterschiede, wobei der geringste Wert bei Frage 2 beobachtet wird, mit einem z-Wert von -0,447 und einem p-Wert von 0,665.

**Tabelle 26: Klasse 8.B, Statistik für den Wilcoxon-Test; Vergleich der Szenarien 1 & 2 sowie 2 & 3 (siehe Kapitel 3.5.2)**

Teststatistiken		
Frage 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-3,115
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,002
Frage 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-2,879
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,004
Frage 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-2,414
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,016
Frage 4: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-3,126
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,002
Frage 5: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) ?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-2,85
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,004
Frage 6: : In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) ?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-2,333
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,02

In Tabelle 27 zeigt sich, dass bei Frage 1 zur empfundenen Temperatur sowohl zwischen Szenario 2 und Szenario 1 als auch zwischen Szenario 2 und Szenario 3 eine statistische Signifikanz im Klassenraum der 7.C vorliegt. Bei den Fragen 2 bis 5 gibt es hingegen nur zwischen Szenario 2 und Szenario 1 signifikante Unterschiede. Bei Frage 6, die die Sicherheit im Hinblick auf das Infektionsrisiko betrifft, zeigt sich zwischen keinen der Szenarien eine Signifikanz. Der größte Abstand ist bei Frage 5 in Bezug auf Raumakustik und Lautstärke zwischen Szenario 2 und 1 zu verzeichnen, mit einem z-Wert von -3,876 und einem p-Wert von 0. Der geringste Abstand findet sich ebenfalls bei Frage 5, jedoch zwischen Szenario 2 und 3, mit einem z-Wert von -1,554 und einem p-Wert von 0,12.

**Tabelle 27: Klasse 7.C, Statistik für den Wilcoxon-Test; Vergleich der Szenarien 1 & 2 sowie 2 & 3 (siehe Kapitel 3.5.2)**

Teststatistiken		
Frage 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-3,626
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,013
Frage 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-3,742
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,083
Frage 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-2,839
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,051
Frage 4: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-3,26
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,023
Frage 5: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) ?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-3,867
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,12
Frage 6: : In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) ?	Szenario 2 zu Szenario 1	Szenario 2 zu Szenario 3
	Z-Wert	-1,897
	Asymp. Sig. (2-seitig)	0,034

#### **4.4.3 Stichprobengröße Kalkulation**

Mittels der im Kapitel 3.5.3 angegebenen Formel konnte unter der Annahme einer Stichprobengröße von 37 Probanden und einer Standardabweichung von 50% sowie einem Konfidenzniveau von 95% eine Genauigkeit von 16,11% erreicht werden.

Die Stichproben Größe sollte bei 385 Personen liegen, um eine exakte Aussage bezüglich der eruierten Daten zu bekommen (siehe Kapitel 3.5.3.1).

## 4.5 Analyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der qualitativen Parameter aus Kapitel 4.2, die Ergebnisse der quantitativen Parameter aus Kapitel 4.3 und die statistischen Ergebnisse aus Kapitel 4.4 zusammen analysiert.

### 4.5.1 Kleidungsfaktor

Bei einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 22,2 bis 22,5 °C in der Klasse 8.B (siehe Kapitel 4.3.1) und einem PPD von unter 6% für Kategorie 1, sprich für ein hohes Maß an Erwartung, wird ein Kleidungsfaktor von 0,7 bis 0,8 clo erwartet (siehe Kapitel 2.3.2). Der Mittelwert des Kleidungsfaktors, siehe Kapitel 4.2.1, lag im erwarteten Bereich für diese Jahreszeit am 6. April 2022, nämlich zwischen 0,71 und 0,84 clo. Interessant ist jedoch die Beobachtung, dass vier weibliche Lernende, die sich während des Szenarios etwas angezogen hatten, vor Beginn von Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) einen Kleidungsfaktor unterhalb des Klassenmittelwerts aufwiesen. Diese Personen empfanden die Temperatur zudem als "kühl" und bevorzugten in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine „wärmere“ Raumtemperatur. Nach der Anpassung ihrer Kleidung, zeigte sich in den folgenden zwei Szenarien nur mehr bei maximal einer dieser Lernenden eine leichte Anpassung bzgl. der empfunden- bzw. bevorzugten Temperatur. Ein starker Luftzug, der eventuell zu einer Änderung des Kleidungsfaktors führte, war ausschließlich in der Reihe A und B (siehe Kapitel 3.2.3) bei Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) bemerkbar, da die Außenluft zu dieser Zeit nur bei 12,0 – 12,9 °C lag.

Im Klassenraum der 7.C wurde eine Durchschnittstemperatur von 22,7 bis 23,0 °C (siehe Kapitel 4.3.1) gemessen, was zu einem Kleidungsfaktor von 0,7 clo nach der Kategorie 1, sprich für ein hohes Maß an Erwartung, führte (siehe Kapitel 2.3.2). Zu diesem Zeitpunkt lag die Außentemperatur bei 15,2 bis 16,6 °C. Auffällig ist, dass die nicht-binären Lernenden zwar einen Kleidungsfaktor unterhalb des Klassenmittelwerts aufwiesen, diese jedoch ein eher „warmes“ Temperaturempfinden hatten und sogar eine „etwas kühlere“ Raumtemperatur bevorzugten. Auch bei den männlichen Lernenden zeigte sich, dass sie einen Kleidungsfaktor unterhalb des Klassenmittelwerts aufwiesen. Trotzdem waren sie in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) am zufriedensten mit der Raumtemperatur und bevorzugten diese. Mit fortschreitenden Szenarien nahm jedoch die Unzufriedenheit in Bezug auf eine zu „warme“ Temperatur zu, und in Szenario 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) äußerte die Mehrheit den Wunsch nach einer kühleren Raumtemperatur. Die weiblichen Lernenden wiesen im Durchschnitt den höchsten Kleidungsfaktor auf. Trotzdem empfand ein Drittel von ihnen in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) die Temperatur als „ein bisschen zu kühl“. In Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) fühlte sich die Hälfte „ein bisschen zu warm“ und bevorzugte eine kühlere Temperatur, ohne jedoch ihre Kleidung anzupassen. Erst in Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3), als die Mehrheit die Temperatur als neutral empfand, passten genau zwei Personen ihre Kleidung an, um ihren Komfort zu verbessern. Der Luftzug liefert keine eindeutigen Erkenntnisse, obwohl in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) 18 von 24 Lernenden zumindest einen „sehr schwachen“ Luftzug verspürten, jedoch insgesamt 20 Lernenden „keine Veränderung“ oder sogar einen „ein bisschen stärkeren“ Luftzug bevorzugten. Im Gegenteil, 10 von 24 Lernenden bevorzugte sogar einen stärkeren Luftzug, insbesondere in Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3).

Es zeigt sich in beide Klassen, dass die Kleidungssituation der einzelnen Lernenden einen wesentlichen Einfluss auf ihr Wohlbefinden hat, insbesondere im Hinblick auf ihre thermische Behaglichkeit. Es kann gezeigt werden, dass eine rechtzeitige Anpassung des Kleidungsfaktors hierbei maßgeblich zur Verbesserung des Komforts beiträgt. Mit steigender Außentemperatur und einer erhöhten Innenraumtemperatur wird das Lüftungssystem überwiegend positiv wahrgenommen. Dies liegt vermutlich daran, dass ein schnellerer Luftaustausch und eine stärkere Zugluft, in diesem Fall, als angenehm empfunden werden und somit zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit beitragen.



## 4.5.2 Temperatur

Im Klassenzimmer der 8.B lagen die gemessenen Temperaturen zwischen 22,2 und 22,5 °C, was im Einklang mit den Erwartungen gemäß der ÖNORM 16798-1 (siehe Kapitel 2.3.1) steht. Die Raumtemperatur fiel somit genau in den Bereich der Kategorie 1, die für ein hohes Maß an Erwartung empfohlen wird. Daher konnten aus den quantitativen Messwerten zur Innenraumtemperatur keine negativen Rückschlüsse in Bezug auf die drei verschiedenen Lüftungsszenarien hinsichtlich des persönlichen thermischen Komforts der Lernenden gezogen werden.

Die Umfrage begann im 6. April 2022 um 9:40 Uhr, und die Außentemperatur lag zu diesem Zeitpunkt bei etwa 12 °C, welche im Vergleich zu Innenraumtemperatur relativ niedrig ist. Die Umfrageergebnisse, aus Abschnitt 4.2.2, der Klasse 8.B mit 13 Lernenden ermöglichen jedoch andere Erkenntnisse als jene von der gemessenen Werten. Sowohl in den Gesamtergebnissen als auch in der detaillierten Reihenaufschlüsselungen zeigt sich deutlich, dass sich das Temperaturempfinden der Lernenden stark verändert. Die aufgezeichnete Temperatur von den Messgeräten scheint dabei nicht der ausschlaggebende Faktor für die kälter empfundene Temperatur bei eingeschaltetem Lüftungssystem zu sein. Dies wird auch durch die Gegenfrage bestätigt, welche aufzeigt, dass in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine höhere bevorzugte Temperatur gewünscht wird, obwohl sich die Innenraumtemperatur kaum änderte.

Aus Abschnitt 4.2.2 lässt sich eine weitere interessante Erkenntnis feststellen. Der Trend zeigt, dass das Temperaturempfinden von Reihe A, welche die kühlsste Wahrnehmung bzw. die höchste bevorzugte Raumtemperatur aufweist, bis nach hinten zu Reihe D abnimmt. Dies könnte mit der Position des Fensters zusammenhängen, welches in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) im vorderen Bereich des Klassenzimmers für die Frischluftzufuhr sorgt (siehe Kapitel 3.2.3, Abbildung 27). Auch die Analyse der Sitzplatzverteilung, aus Abschnitt 4.2.2, zeigt, dass Lernende, die an den Außenwänden oder fensterseitig saßen, ein deutlich kühleres Temperaturempfinden hatten als jene im Inneren des Klassenraums und in den hinteren Reihen, welche weiter entfernt vom gekippten Fenster saßen. Die Gegenfrage zur bevorzugten Temperatur verstärkt diesen Verdacht erneut, da die beiden vorderen Reihen (Reihe A und Reihe B) eine deutlich wärmere Raumtemperatur wünschten, im Gegensatz zu den Reihen C und D. Dies könnte darauf hindeuten, dass die zu kühle Zuluft ein Problem darstellte. In Bezug auf die Raumtemperatur in Klasse 8.B wurde das Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gegenüber den anderen Szenarien bevorzugt.

Die statistischen Ergebnisse der Umfrage zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede im Temperaturempfinden sowie in der bevorzugten Raumtemperatur. Es lässt sich feststellen, dass es eine statistische Signifikanz zwischen den drei Lüftungsszenarien gibt (siehe Kapitel 4.4.1). Aus Kapitel 4.4.2 zeigt sich, dass lediglich zwischen Szenario 1 und Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine statistische Signifikanz besteht. Diese Ergebnisse decken sich auch mit der Gegenfrage zur bevorzugten Temperatur der Lernenden, bei der ebenfalls nur zwischen Szenario 1 und Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine statistische Signifikanz erkennbar ist. Hier ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als „kühl“ bewertet wird, während Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als „neutral“ empfunden wird.

Im Klassenzimmer der 7.C lag die gemessene Durchschnittstemperatur bei etwa 23 °C, was ebenfalls im erwarteten Bereich gemäß der ÖNORM 16798-1 (siehe Kapitel 2.3.1) liegt. Zudem befand sich die Raumtemperatur exakt im Bereich, der für ein hohes Maß an Erwartung empfohlen wird. Daher konnten aus den quantitativen Ergebnissen der Messwerte zur Raumtemperatur keine Analyse bzw. negativen Erkenntnisse in Bezug auf die drei verschiedenen Lüftungsszenarien in Bezug auf die thermische Behaglichkeit der Lernenden gewonnen werden.

Die Umfrage begann im 6. April 2022 um 11:45 Uhr, und die Außentemperatur lag zu diesem Zeitpunkt bei etwa 16 °C, welche bei Sonnenschein zu dieser Jahreszeit als warm empfunden werden kann. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.2 der Klasse 7.C mit 24 Lernenden liefern jedoch etwas andere Erkenntnisse im Vergleich zu den gemessenen Werten. Sowohl in den Gesamtergebnissen als auch in der detaillierten Reihenanalyse zeigt sich, dass sich das Temperaturempfinden der Lernenden verändert. Diesmal ist in dieser Klasse 7.C eine eher zu warme empfundene Raumtemperatur vor allem in Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3), für die Änderung verantwortlich. Das wird durch die Aussage unterstützt, dass diese bei Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3), 14 von 24 eine „ein bisschen kühler“ bzw. „kühlere“ Temperatur bevorzugten. In Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) war die Mehrheit „neutral“ gegenüber der Temperatur eingestellt, und es wurde zu zweidrittel keine Veränderung bezüglich der bevorzugten Raumtemperatur gewünscht. Dies lässt sich auch dadurch bestätigen, dass nur etwa 10% der Lernenden insgesamt über alle drei Szenarien hinweg die Raumtemperatur als zu kühl oder etwas zu kühl empfanden.

Die Reihenanalyse in Abschnitt 4.2.2 lieferte keine klaren Rückschlüsse über eine mögliche Kältequelle, und es konnte kein Trend über die Reihen hinweg erkannt werden. Die Ergebnisse zeigen lediglich, dass die Lernenden bei eingeschaltetem Lüftungssystem näher am neutralen Wert von 0 lagen, während Lernende bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und geschlossenen Fenstern eher einen warmen Eindruck hatten und zu einem Wert von 1, sprich „ein bisschen warm“ tendierten. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Zuluft in diesem Fall einen angenehmen, kühlenden Faktor darstellte. In Bezug auf die Raumtemperatur in Klasse 7.C wurde das Szenario 1 gegenüber den anderen Szenarien bevorzugt. Dies ist besonders interessant, da bereits erwähnt wurde, dass Klasse 8.B das Szenario 3 bevorzugt.

Die statistischen Ergebnisse der Umfrage aus Kapitel 4.4.2 zeigen jedoch deutlichere Unterschiede im Temperaturempfinden sowie in der bevorzugten Raumtemperatur. Auch hier lässt sich feststellen, dass es eine statistische Signifikanz gibt, jedoch lediglich zwischen Szenario 1 und Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3). Diese Ergebnisse decken sich auch mit der Gegenfrage zur bevorzugten Temperatur der Lernenden, bei der ebenfalls nur zwischen Szenario 1 und Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) eine signifikante Veränderung erkennbar ist. Man sieht hier, dass Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als warm empfunden wird, während Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als „neutral“ bewertet wird. Somit wird Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) als angenehmer wahrgenommen.

### 4.5.3 Zugluft

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.4.2 in Bezug auf die empfundene Zugluft im Klassenraum der 8.B, offenbarten eine knappe statistische Signifikanz zwischen Szenario 1 und Szenario 2. Bei dem bevorzugten Luftzug hingegen zeigte sich eine deutliche statistische Signifikanz.

Aus Kapitel 4.2.3 erkennt man, dass bei Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) alle weiblichen Lernenden einen zumindest „schwachen“ bis „starken“ Luftzug empfanden. Die Lernenden die einen „starken“ Luftzug verspürten saßen überwiegend in den vorderen Reihen. In der ersten Reihe waren das sogar 100%. Weiters erkennt man, dass nur weibliche Lernende den Luftzug als „stark“ wahrnahmen. Die männlichen Lernenden hingegen nahmen größtenteils keinen Luftzug wahr, möglicherweise auch, weil sie in der dritten von vier Reihen saßen. Die Fensteröffnung (siehe Kapitel 3.2.3) befindet sich vorne im Klassenraum, direkt neben der Tafel, wobei der Sitzplatz A1 am nächsten gelegen ist. Interessanterweise gab es in Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3), obwohl das Fenster ebenfalls gekippt war, von keinem der Lernenden die Rückmeldung eines „starken“ oder „sehr starken“ Luftzugs. Trotz der kalten Außenluft wurde in Szenario 3 von 11 der 13 Lernenden keine Veränderung gewünscht.

Für die Klasse 8.B ergibt sich gemäß den Annahmen aus Kapitel 2.3.6 bei einer Luftgeschwindigkeit von  $v = 0,1$  m/s, einer lokalen Temperatur von  $t = 22,4$  °C und einer Turbulenzrate von  $Tu = 40\%$  ein Prozentsatz der Unzufriedenheit aufgrund des Zugluftrisikos von  $DR = 8,36\%$ . Der tatsächliche Anteil der unzufriedenen Personen hinsichtlich des Luftzugempfindens in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) lag jedoch deutlich höher, was darauf hinweisen kann, dass die Luftgeschwindigkeit höher als 0,1 m/s gewesen sein muss, ebenso wie der Turbulenzgrad. Da die lokale Temperatur vor und nach dem Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) relativ konstant blieb, lässt sich vermuten, dass die Ursache in der erhöhten Luftbewegung und nicht an der Innenraumtemperatur lag. Dies könnte auch mit den Beobachtungen in Szenario 3 übereinstimmen, da sich ohne eingeschaltetes Lüftungssystem die Luftgeschwindigkeit deutlich verringert haben müsste. Die geringere Luftbewegung könnte erklären, warum in Szenario 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) kaum Beschwerden hinsichtlich der Zugluft auftraten, trotz des gekippten Fensters und der Außenluft von nur 12 °C.

Im Klassenraum der 7.C zeigt sich ebenfalls eine deutliche Signifikanz im Hinblick auf den empfundenen und bevorzugten Luftzug zwischen Szenario 1 und 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3). Interessanterweise wird bei wärmerer Außenluft zu einem späteren Zeitpunkt der Umfrage, im Gegensatz zum Klassenraum der 8.B, der Luftzug als positiv wahrgenommen. Die geringste Anzahl an gewünschten Änderungen wurde in Szenario 1 (siehe Kapitel 3.2.4.3) verzeichnet, wobei zwei Drittel der Lernenden keine Anpassungen wünschten. Obwohl in diesem Szenario 18 von 24 Lernenden zumindest einen Luftzug wahrgenommen haben, zeigt das Trendliniendiagramm deutlich, dass in den Szenarien 1 und 3 der bevorzugte Luftzug bei einem Wert von 0 lag, was „keine Änderung“ bedeutet. Im Gegensatz dazu wurde im Szenario 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3) in allen Reihen ein stärkerer Luftzug gewünscht. Auch das Trendliniendiagramm des empfundenen Luftzugs zeigt, dass in den Szenarien 1 und 3 spürbarer Luftzug vorhanden war, während Szenario 2 in allen Reihen unter den beiden anderen Szenarien lag und über alle Reihen hinweg kaum Luftzug verspürt wurde.

Zudem könnte die Tatsache, dass insgesamt nur eine Person eine „starke“ Zugluft verspürte, mit den spezifischen Sitzplatzbedingungen zusammenhängen. Vor allem in Szenario 2 äußerten mehr Lernende den Wunsch nach einer „stärkeren“ Zugluft.

#### 4.5.4 Akustik

In Hinsicht auf die Raumakustik und die Lautstärke im Raum zeigte sich in der Klasse 8.B eine deutliche statistische Signifikanz zwischen den Szenarien 1 und 2 (siehe Kapitel 3.2.4.3), was auch im Fragebogen erkennbar wurde (siehe Kapitel 4.2.4). Sieben von 13 Lernenden empfanden die Lautstärke als „laut“ bzw. „sehr laut“, während in den beiden anderen Szenarien diese Bewertung nicht ein einziges Mal angegeben wurde. Zwischen Szenario 2 und 3 (siehe Kapitel 3.2.4.3) gab es auch keine statistische Signifikanz.

Der Trend aus Kapitel 4.2.4, Abbildung 74, zeigt zudem, dass insbesondere in den hinteren Reihen eine „leise“ bis „sehr leise“ Raumakustik vorherrscht. Dies könnte mit der Position des Fensters zusammenhängen, welches sich im vorderen Bereich des Klassenraumes direkt neben der Tafel befindet (siehe 3.2.3, Abbildung 27). Der Sitzplatz A1 ist dem Fenster am nächsten und der Ventilator ist direkt neben Sitzplatz C1 positioniert. Auch in den Szenarien 2 und 3 wird in den Reihen A und B mehrheitlich nur eine „neutrale“ Akustik wahrgenommen.

Betrachtet man die Messwerte aus Kapitel 4.3.3, ist es interessant zu sehen, dass in allen drei Szenarien die durchschnittliche Lautstärke über dem in Kapitel 2.3.5 empfohlenen Grenzwert liegt und das ohne eine zusätzliche Signalquelle wie etwa einer Lehrperson. Nur in der unbelegten Klasse lässt sich ein deutliches Muster erkennen, bei dem nur Szenario 1 deutlich über den 35 dB liegt, während Szenario 2 und 3 darunter liegen.

Bei einem Raumvolumen von  $117 \text{ m}^3$  (Fläche  $40 \text{ m}^2$ , siehe Kapitel 3.2.3, Raumhöhe ca. 3 m) wurde die Nachhallzeit  $T$  für Kommunikation mit 0,40 Sekunden und für Sprachdarbietungen mit 0,50 Sekunden berechnet (siehe Kapitel 2.3.5), was im empfohlenen Bereich von 0,50 bis 0,60 Sekunden aus Kapitel 2.3.5 liegt. Somit lässt sich feststellen, dass die Nachhallzeit in der Klasse 8.B keinen negativen Einfluss hat.

Ein Blick auf Abbildung 95 in Kapitel 4.3.3 zeigt, dass das Hintergrundgeräusch bei einer Signalquelle von 60 dB in allen Szenarien als zu laut empfunden wird. In Szenario 1 (MPIC) beträgt der Durchschnitt 54,3 dB, in Szenario 2 (keine Lüftung) liegt er bei 50,5 dB, und in Szenario 3 (Stoßlüften) beträgt der Durchschnitt 59,6 dB. Bereits ab Reihe B ist ein zu hoher Hintergrundgeräuschpegel erkennbar. Im leeren Klassenraum der 8.B beträgt der Durchschnitt im Szenario 1 (MPIC) 48,4 dB, während er in Szenario 2 (keine Lüftung) bei 32,9 dB und in Szenario 3 (Stoßlüften) bei 34,9 dB liegt. Daraus ergibt sich, dass das Hintergrundgeräusch nur in Szenario 1 zu laut ist, weshalb in den hinteren Reihen keine gute Hörqualität gewährleistet ist. Laut Kapitel 2.3.5 sollte ein Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von mindestens +4 bis +6 dB bei Erwachsenen und bei +15 dB bei Kindern liegen.

Im Klassenraum der 7.C zeigte sich gemäß Kapitel 4.4.2 eine statistische Signifikanz zwischen den Szenarien 1 und 2 hinsichtlich der Raumakustik. Besonders auffällig ist, dass über alle Fragen hinweg in diesem Fall der höchste Z-Wert zu beobachten ist, was somit auch die größte Signifikanz widerspiegelt. Dies wird auch in Kapitel 4.2.4 anhand von Abbildung 75 deutlich, wo 20 von 24 Personen eine „laute“ oder sogar „sehr laute“ Raumakustik wahrgenommen haben. In den beiden anderen Szenarien gaben jeweils nur drei Lernende an, die Raumakustik als „laut“ empfunden zu haben.

Die Reihenanalyse (siehe Kapitel 4.2.4) liefert keine Hinweise darauf, dass sich bestimmte Sitzreihen stärker gestört fühlten, obwohl das Fenster ganz vorne im Raum ist und der Sitzplatz A1 direkt daneben liegt. In den Trendlinien ist ebenfalls kein auffälliger Trend zu erkennen vor allem in Szenario 1 fühlten sich alle gleichermaßen stark gestört. Einzig in

Reihe E lässt sich erkennen, dass dort die größte Differenz zwischen den Szenarien besteht, da die Lernenden in Szenario 1 genau unter dem Ventilator sitzen und sonst am weitesten vom geöffneten Fenster entfernt sind. Das Szenario 1 wurde mit -1 bewertet, was „laut“ entspricht, während Szenario 2 mit +1,75 als „sehr leise“ eingestuft wurde.

Betrachtet man die akustischen Messwerte aus Kapitel 4.3.3, fällt auf, dass in allen drei Szenarien die durchschnittliche Lautstärke über dem in Kapitel 2.3.5 empfohlenen Grenzwert liegt und das ohne zusätzliche Geräuschquellen wie etwa einer Lehrperson. Sogar im leeren Klassenraum der 7.C, liegt der Geräuschpegel in allen Szenarien über 35 dB, was auf eine generell schlechte Raumakustik hinweist.

Die Nachhallzeit T wurde jedoch für diesen Raum mit einem Volumen von 220 m<sup>3</sup> (Fläche 55 m<sup>2</sup>, siehe Kapitel 3.2.3, Raumhöhe ca. 4 m) auf 0,47 Sekunden für normale Kommunikation und 0,58 Sekunden für Sprachdarbietungen berechnet (siehe Kapitel 2.3.5), was laut Kapitel 2.3.5 im empfohlenen Bereich liegt.

In Abbildung 97 aus Kapitel 4.3.3 wird deutlich, dass das Hintergrundgeräusch bei einer Signalquelle von 60 dB in allen Szenarien zu hoch ist. In Szenario 1 (MPIC) liegt der Durchschnitt bei 56,6 dB, in Szenario 2 (keine Lüftung) bei 55,2 dB und in Szenario 3 bei 53,8 dB. Bereits ab Reihe B ist ein übermäßiger Hintergrundgeräuschpegel feststellbar. Zudem ist erkennbar, dass selbst in einem leeren Klassenraum die Hintergrundgeräusche in Szenario 1 (MPIC) und 3 (Stoßlüften) ebenfalls zu laut sind. Im leeren Klassenzimmer betragen die Durchschnittswerte 47,5 dB in Szenario 1 (MPIC), 37,1 dB in Szenario 2 (keine Lüftung) und 45,2 dB in Szenario 3 (Stoßlüften). In Szenarien 1 und 3 wird ab Reihe C deutlich, dass die Lautstärke der Signalquelle mit dem Hintergrundrauschen verschwimmt, was zu einer schlechten Hörbarkeit in den hinteren Reihen führt. Lediglich in Szenario 2 bleibt das Hintergrundgeräusch bis zur letzten Reihe E auf einem niedrigeren Niveau. Laut Kapitel 2.3.5 sollte ein Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) für eine gute Hörbarkeit bei Erwachsenen zwischen +4 und +6 dB liegen, während es bei Kindern bei +15 dB liegen sollte.

#### 4.5.5 Sicherheit

Bei Frage 6 der Umfrage geht es um die Sicherheit der Lernenden hinsichtlich des Infektionsrisikos. Für den Klassenraum der 8.B zeigt die statistische Auswertung, laut Kapitel 4.4.2, keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien 1 und 2 sowie 2 und 3. Interessanterweise fühlten sich die Mehrheit der Lernenden bei den Lüftungsszenarien 1 und 3 „neutral“ und jeweils 4 von 13 Lernende „etwas sicher“. Im Szenario 2 hingegen gab es drei Lernende die sich „etwas unsicher“ fühlten. Ein klarer Trend oder Zusammenhang zur Sitzplatzanordnung aus Abschnitt 3.3.5 lässt sich jedoch nicht feststellen.

Wichtig zu erwähnen sind die Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenraum der 8.B, da diese auf eine potenziell erhöhte Infektionsgefahr hinweisen könnten. Nur in 3,47% der Zeit lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter dem empfohlenen Grenzwert von 1000 ppm (laut Kapitel 2.3.3). Mit einer durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1596 ppm, über den gesamten Schultag, befindet sich die Konzentration in einem Bereich, in dem sich Personen nur für kurze Zeit aufhalten sollten, da dies nur für eine geringe Nutzungsdauer, in Anlehnung an ISO 16000-41, und nicht für einen Klassenraum geeignet ist (siehe Kapitel 2.3.3).

Laut Kapitel 2.3.3, Abbildung 13, zur Virenemissionsrate ist bei einer höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration auch ein erhöhtes Infektionsrisiko erkennbar. Bei einer durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1596 ppm im Klassenraum der 8.B, ist man ohne Maske nach bereits 50 Minuten einem mittleren Risiko ausgesetzt, das entspricht einer Schulstunde. Mit einer FFP2-Maske tritt dieses Risiko erst nach ungefähr 4,75 Stunden auf, was jedoch immer noch unter der Dauer eines Schultags liegt. Bei dem gemessenen CO<sub>2</sub>-Maximalwert von 2314 ppm an diesem Tag ist dies noch schneller der Fall [70].

Diese nachfolgenden Werte gelten für einen Raum mit 13 Lernenden, die sich über einen Zeitraum von vier Stunden darin aufhalten. Die Abbildung zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration von der Anzahl der Personen im Raum abhängt, wodurch sich die Reproduktionszahl ableiten lässt. Die Abbildung 14 in Kapitel 2.3.3 von Rudnick und Milton zeigt, dass sich bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm die Reproduktionszahl für Influenza von 5 auf 9 erhöht, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf 2000 ppm ansteigt. Das zeigt, wie sich die Virusübertragung durch schlechtere Belüftung und höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen erheblich verstärken kann. Laut der Masterarbeit von Pollozhani (2022) stehen die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Belastung mit infektiösen Virenpartikeln in direkter Beziehung zur Luftaustauschrate. Schlechte Raumluftqualität führt zu erhöhten CO<sub>2</sub>-Werten und Virenlast, während diese durch verbesserte Lüftungsmaßnahmen gesenkt werden können. Die Infektionsrisikobewertung zeigt, dass mechanische Lüftungssysteme die Anforderungen an die Raumluftqualität und die Reduzierung des Infektionsrisikos effektiver erfüllen als natürliche Lüftung [23].

Interessant ist auch, dass der Minimalwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration über den gesamten Tag mit 915 ppm genau in das Lüftungsszenario 1 der Testschulstunde fällt. Dies spricht dafür, dass das Lüftungssystem voraussichtlich nur während des Testzeitraums verwendet wurde.

Für eine durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1181 ppm liegt der errechnete Wert der unzufriedenen Lernenden mit einem PD-Wert (% der Unzufriedenen mit der Raumluft, siehe Kapitel 2.3.3) bei ungefähr 22,10%. Dieser Wert stimmt jedoch nicht mit den Ergebnissen der Umfrage und der statistischen Analyse überein, da keine signifikanten



Unterschiede zwischen den Szenarien festgestellt wurden und über alle Szenarien hinweg ein neutrales Sicherheitsempfinden herrscht.

In der Klasse 7.C zeigte sich keine statistische Signifikanz hinsichtlich der Szenarien in Bezug auf Sicherheit und Infektionsrisiken (siehe Kapitel 4.4.2). Es gibt keine Hinweise darauf, dass sich in einem bestimmten Szenario die Mehrheit der Lernenden deutlich unsicherer fühlte, vielmehr zeigten die meisten über alle Szenarien hinweg eine „neutrale“ Einstellung. Lediglich die Aufteilung der Reihen deutet darauf hin, dass die Lernenden in Reihe E, die am nächsten beim Ventilator der Lüftungsanlage saßen und am weitesten vom gekippten Fenster entfernt waren, sich in allen drei Szenarien am sichersten fühlten. (siehe Kapitel 3.2.3, Abbildung 31)

Betrachtet man jedoch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über den gesamten Tag, stellt man fest, dass der CO<sub>2</sub>-Maximalwert in der Klasse 7.C, trotz vollständig öffnender Fenster, sogar den der Klasse 8.B überstieg, und zwar mit einer Konzentration von 2536 ppm. Dieser hohe Wert muss unbedingt vermieden werden, und es besteht Handlungsbedarf in Bezug auf die Lüftungssituation (siehe Kapitel 2.3.3). Der Minimalwert mit 605 ppm fiel abermals in den Testzeitraum der Schulstudie, und zwar zu Beginn von Szenario 3, also beim Stoßlüften. Dies lässt darauf schließen, dass eventuell zu selten bzw. zu kurz stoßgelüftet wird, um eine CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 1000 ppm zu halten.

In Szenario 1 konnte die CO<sub>2</sub>-Konzentration mittels Lüftungsanlage gesenkt werden, während die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den anderen beiden Szenarien stark anstieg (siehe Kapitel 4.3.2). Darüber hinaus lag nur in 7,2% der Schulzeit die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 1000 ppm. Der berechnete Unzufriedenheitswert (PD), basierend auf einer durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1246 ppm, sollte bei 23,42% liegen, was sich jedoch nicht mit den Ergebnissen der Umfrage und der statistischen Analyse überein, da keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien festgestellt wurden und über alle Szenarien hinweg ein neutrales Sicherheitsempfinden herrscht.

Diese nachfolgenden Werte gelten für einen Raum mit 24 Lernenden, die sich über einen Zeitraum von vier Stunden darin aufhalten. Die Abbildung 14 in Kapitel 2.3.3 von Rudnick und Milton zeigt, dass sich bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm die Reproduktionszahl für Influenza auf 6 und bei 2000 ppm auf 12, also eine Verdopplung, geschätzt werden kann. Die Abbildung zeigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration von der Anzahl der Personen im Raum abhängt, wodurch sich die Reproduktionszahl ableiten lässt. Trotz dieser Situation wurde das Risiko nicht erkannt und keine Unterschiede festgestellt, da nur eine geringe Signifikanz in Bezug auf die Luftqualität und die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Verhältnis zur Temperatur aufgezeigt wurde.

In der Klasse 7.C ist deutlich zu erkennen, dass laut Kapitel 2.3.3, Abbildung 13, zur Virenemissionsrate ein höheres Infektionsrisiko mit einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration einhergeht. Bei einer durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1570 ppm besteht ohne Maske bereits nach 50 Minuten ein mittleres Risiko, das entspricht einer Schulstunde. Mit einer FFP2-Maske tritt dieses Risiko erst nach ungefähr 4,75 Stunden auf, was jedoch immer noch unter der Dauer eines Schultages liegt. Bei dem gemessenen CO<sub>2</sub>-Maximalwert von 2536 ppm ist dies wiederum noch schneller der Fall [70]. Überdies muss dieser hohe Wert unbedingt vermieden werden, und es besteht weiters Handlungsbedarf in Bezug auf die Lüftungssituation (siehe Kapitel 2.3.3).

#### 4.5.6 Konzentration

Hinsichtlich der Abfrage in Kapitel 4.2.6 bzgl. der Konzentration berichteten im Klassenraum der 8.B über die Hälfte der 13 Lernenden, dass sie sich bei eingeschaltetem Lüftungssystem weniger konzentriert fühlten, während lediglich eine Person angab, sich besser konzentrieren zu können. Betrachtet man jedoch die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aus Kapitel 4.5.2, sollte eigentlich eine schlechtere Konzentration bei höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu erwarten sein, und nur mit eingeschaltetem Lüftungssystem kann dem in dieser Klasse entgegengewirkt werden.

Eine zusätzliche Analyse der Konzentration in Bezug auf die Temperatur aus Kapitel 2.3.1 zeigt, dass die Konzentration bei einer Raumtemperatur von 22,2 bis 22,5 °C nahezu bei 100% liegen sollte. Daher lässt sich feststellen, dass es sehr wahrscheinlich nicht an der Raumtemperatur gelegen haben kann.

Insgesamt ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Lautstärke und der Konzentration der Lernenden erkennbar, insbesondere im Hinblick auf Szenario 1 mit eingeschaltetem Lüftungssystem. Dies wird auch durch die Antworten in den offenen Fragen bestätigt, bei denen die Mehrheit erneut auf die Lautstärke des Lüftungssystems hinwies und die Beeinträchtigung der Konzentration ansprach (siehe Kapitel 4.2.8)

Im Klassenraum der 8.B könnte zudem die negative Wahrnehmung der thermischen Behaglichkeit eine Rolle spielen, was zu einer allgemeinen Ablehnung des Lüftungssystems beiträgt.

Im Hinblick auf die Konzentration gaben 70,8% der Lernenden im Klassenraum der 7.C an, sich weniger konzentriert gefühlt zu haben, und weiters gab es keine positiven Rückmeldungen zum eingeschalteten Lüftungssystem (siehe Kapitel 4.2.6). Obwohl eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration normalerweise zu einer verschlechterten Konzentration der Lernenden führen sollte. Eine niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentration kann jedoch nur durch Szenario 1 und Szenario 3 erreicht werden. In Szenario 1 zeigte die CO<sub>2</sub>-Konzentration über den gesamten Verlauf des 10-minütigen Testzeitraums hinweg einen stetigen Rückgang. Vor Szenario 3 konnte durch Stoßlüften ebenfalls ein Rückgang der CO<sub>2</sub>-Konzentration festgestellt werden (siehe Kapitel 4.3.2). Sobald jedoch die Fenster wieder geschlossen wurden, war ein rapider Anstieg innerhalb von nur 10 Minuten zu verzeichnen, es kam zu einer Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Trotz dieser Situation wurde Szenario 3 im Gegensatz zu Szenario 1 bevorzugt.

Die Raumtemperatur befand sich ebenfalls im optimalen Bereich, was laut Kapitel 2.3.1 auf eine hohe Produktivität hindeutet. Daher lässt sich feststellen, dass es sehr wahrscheinlich nicht an der Raumtemperatur gelegen haben kann.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die höchste statistische Signifikanz bei der negativen Raumakustik in Szenario 1 auftrat und dass Temperatur sowie Luftzug in der Klasse 7.C keine deutlichen negativen Empfindungen hervorriefen. Somit kann festgestellt werden, dass die Lautstärke bzw. Raumakustik mit großer Sicherheit der Grund für die schlechte Konzentration der Lernenden ist. Dies wird auch durch die Antworten in den offenen Fragen bestätigt, bei denen die Mehrheit erneut auf die Lautstärke des Lüftungssystems hinwies und die Beeinträchtigung der Konzentration ansprach (siehe Kapitel 4.2.8).



#### 4.5.7 Offene Fragen

In Kapitel (siehe Kapitel 4.2.7) auf die Frage, ob man einen Tag mit eingeschaltetem oder ausgeschaltetem Lüftungssystem verbringen möchte, zeigt sich, dass in beiden Klassen insgesamt nur 6 von insgesamt 37 Personen den Tag mit eingeschaltetem Lüftungssystem bevorzugen. In beiden Klassen ist insbesondere die in Szenario 1 (MPIC) laut wahrgenommen Raumakustik der entscheidende Faktor für die Unzufriedenheit. Darüber hinaus spielte zu früheren Tageszeiten die kühlere Außentemperatur, welche einen kalten Luftzug, und somit einen negativen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit haben kann, eine wichtige Rolle.

Betrachtet man die sechs Lernenden aus Kapitel (siehe Kapitel 4.2.8), die ein eingeschaltetes Lüftungssystem bevorzugten, genauer, wird deutlich, dass sie sich in Bezug auf die Raumtemperatur nicht negativ beeinflusst fühlten. Der Luftzug wurde von diesen Lernenden in Szenario 1 ebenfalls als störend empfunden, und auch die „laute“ Akustik bzw. Lautstärke bereitete diesen Personen keine Probleme. Darüber hinaus berichteten 3 von diesen 6 Lernenden von einem höheren Sicherheitsempfinden in Bezug auf das Infektionsrisiko in Szenario 1. Die einzige positive Rückmeldung bezüglich der Konzentration kam ebenfalls von einer dieser sechs Lernenden, die während des Tages das Lüftungssystem bevorzugt eingeschaltet hatten. Auch die anderen fünf zeigten eine neutrale Einstellung in Bezug auf ihre Konzentration. Von diesen sechs Lernenden sind fünf männlich und eine weiblich, was sich aus insgesamt 9 männlichen, 25 weiblichen und 3 nicht-binären Lernenden in beiden Klassen zusammensetzt.

## 4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt die Abbildung 98, dass in Klassenraum 8.B die Akustik eine große Unzufriedenheit hervorruft. Dennoch fallen in dieser Klasse die thermischen Faktoren wie Temperaturempfinden und Luftzug sowie deren Präferenzen stärker ins Gewicht, wenn es um die allgemeine Unzufriedenheit geht. Dies spiegelt sich auch in den statistischen Ergebnissen wider, die in der Klasse 8.B die größten signifikanten Unterschiede bei Temperatur und Luftzug aufzeigen.

Im Vergleich dazu zeigt sich im Klassenraum der 7.C, dass die höchste Unzufriedenheit in Bezug auf die Raumakustik bzw. Lautstärke besteht. Auch hier untermauert die Statistik dieses Ergebnis, indem sie die größte Signifikanz in diesem Bereich feststellt.

Im Vergleich der beiden Klassenräume wird deutlich, was auch die qualitative Umfrage bestätigt, dass es einen Unterschied in der thermischen Behaglichkeit gibt. Insbesondere in den frühen Schulstunden wird die Zugluft als zu kalt empfunden, was zu Unbehagen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit führt. Im Gegensatz dazu wird eine stärkere, wärmere Zugluft in späteren Schulstunden als angenehm und sogar positiv wahrgenommen.

Die Daten der Raumtemperaturmessungen sind in dieser Hinsicht jedoch kaum relevant, da sich die Raumtemperatur in den Klassenräumen während des Messzeitraums kaum änderte und auch laut Kapitel 2.3.1 in erwarteten Bereich liegen.

Drei weitere Punkte, die Abbildung 98 anschaulich verdeutlicht, sind, dass beide Klassen ein ausgeschaltetes Lüftungssystem bevorzugen und in Bezug auf die Konzentration eine hohe Unzufriedenheit mit dem eingeschalteten Lüftungssystem zeigen. Darüber hinaus ist in beiden Fällen die Akustik für ein hohes Maß an Unzufriedenheit verantwortlich, was auf die übermäßige Hintergrundlautstärke des Lüftungssystems zurückzuführen ist (siehe Kapitel 4.3.3). Die Auswertung der offenen Fragen aus Kapitel (siehe Kapitel 4.2.8) stützt diese Einordnung, da 17 von 37 Lernenden erneut angaben, ihren akustischen Komfort als beeinträchtigt zu empfinden und das Lüftungssystem als störend und laut wahrzunehmen.

Die Sicherheit hinsichtlich des Infektionsrisikos spielt in keinem der drei Lüftungsszenarien eine entscheidende Rolle für die Lernenden. Die statistischen Ergebnisse aus dem Kapitel 4.4.2 untermauern diese Aussage, da keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien festgestellt wurden. Die Messwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration hingegen widerlegen diese Annahme, da mit einer höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration sowohl ein erhöhtes Infektionsrisiko verbunden ist, das insbesondere durch das Lüftungssystem gesenkt werden kann.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass bei einem gemeinsamen Blick auf beide Klassen, die Unzufriedenheit in Bezug auf Raumakustik/Lautstärke, Konzentration und die Bevorzugung eines ausgeschalteten Lüftungssystems, egal zu welcher Tageszeit hinweg konstant hoch bleibt.

Die Sicherheit in Bezug auf das Infektionsrisiko spielt in keinem Klassenraum und in keinem Szenario eine Rolle. Dies wird in der Abbildung 98 klar ersichtlich, sowohl bei der Betrachtung der einzelnen Klasse als auch im Gesamtkontext.

Die Unzufriedenheit in Bezug auf die thermischen Behaglichkeitsfaktoren oder -empfindungen ist vor allem von der Jahreszeit und der Tageszeit abhängig. Der Zusammenhang mit dem Lüftungssystem ist deutlich erkennbar: Bei niedrigen Außentemperaturen in den Wintermonaten, kombiniert mit starkem Luftzug, wird das Lüftungssystem als negativ und zu kalt bewertet. Hingegen wird das Lüftungssystem bei höheren Außen- und Innenraumtemperaturen, verbunden mit einem angenehmen Luftaustausch, positiv wahrgenommen, da die Luft schneller ausgetauscht wird und der Luftzug als angenehm empfunden wird.

Diese gesamten Beobachtungen stimmen auch mit einer Studie aus Kapitel 2.4.4 überein. Dort wird ebenfalls die Akustik als einer der am stärksten, störenden Faktoren angegeben.

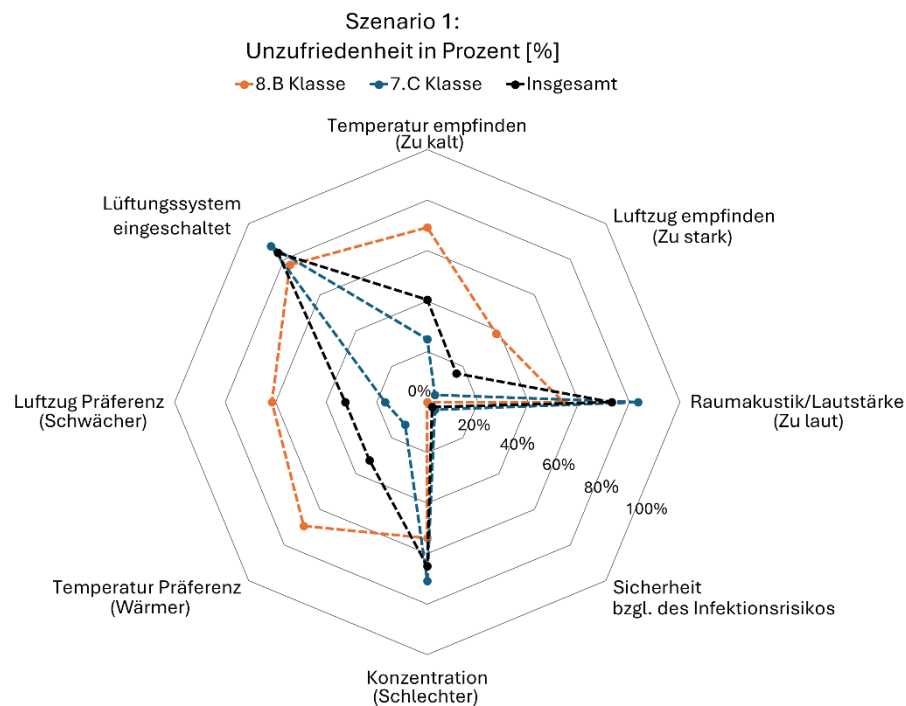


Abbildung 98: Netzdiagramm der Unzufriedenheit in Prozent [%], Klassenaufteilung und gesamt von Szenario 1

Mit einer Stichprobengröße von 37 Lernenden kann eine Genauigkeit von 16,11% erreicht werden. Statistisch betrachtet bedeutet dies einen größeren Fehlerbereich, weshalb die Ergebnisse nicht als definitive Aussagen, sondern lediglich als Einschätzungen und Leitfaden angesehen werden sollten. Um präzisere Aussagen über die eruierten Daten zu erhalten, müsste die Probandengröße auf 385 Lernende erhöht werden (siehe Kapitel 4.4.3).

## 5 Zusammenfassung und Perspektiven

In diesem Kapitel wird die gesamte Arbeit nochmals kurz resümiert, und die Limitationen sowie die Perspektiven für weiterführende Studien werden erläutert. Die Schlussfolgerung bildet ebenfalls einen wichtigen Bestandteil dieses abschließenden Abschnitts.

### 5.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden anhand von Ergebnissen qualitativer Parameter, die durch eine Umfrage in zwei Schulklassen erhoben wurden, das Nutzungserlebnis von nachgerüsteten Lüftungssystemen in natürlich belüfteten Räumen im Vergleich zu natürlicher Belüftung erfasst. Die Umfrage deckt Aspekte wie Kleidung, Temperatur, Luftzug, Akustik/Lautstärke, Sicherheit sowie Konzentration ab. Dabei wurden drei unterschiedliche Szenarien verglichen und durchgeführt: In Szenario 1 wurde das hybride Lüftungssystem eingeschaltet, in Szenario 2 gab es keine Lüftung, was den Ausgangszustand darstellt, sprich die Fenster geschlossen sind, und in Szenario 3 wurde in der Klasse 8.B von 10:09 bis 10:13 Uhr und in der Klasse 7.C von 12:15 bis 12:19 Uhr jeweils für 4 Minuten stoßgelüftet. Darüber hinaus wurde anhand quantitativer Parameter wie Temperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Akustik/Lautstärke, die durch Messgeräte ermittelt wurden, in Anlehnung an Richtlinien und Normen der Einfluss der örtlichen Gegebenheiten untersucht. Mittels statistischer Tests nach Friedman und Wilcoxon wurde zudem untersucht, ob zwischen den Szenarien signifikante Unterschiede bestehen oder ob die Abweichungen lediglich zufällig sind. Durch die Analyse und Berücksichtigung der qualitativen, quantitativen und statistischen Ergebnisse sollte es möglich sein, eine Tendenz zu erkennen, welches Szenario unter welchen Bedingungen ein positives oder negatives Nutzungserlebnis hatte. Zudem wird untersucht, ob diese Bewertungen mit den gemessenen Daten übereinstimmen und welche Verbesserungen oder Handlungsempfehlungen sich daraus ableiten lassen.

## 5.2 Schlussfolgerung

Die Auswertungen der Fragebögen sowie die Ergebnisse der Messgeräte und statistischen Daten zeigen klar, dass die verschiedenen Lüftungsszenarien, insbesondere das hybride Lüftungssystem, deutliche Unterschiede aufweisen. Auffällig ist, dass das hybride System als einziges in der Lage ist, die CO<sub>2</sub>-Konzentration kontinuierlich und effektiv zu senken, insbesondere in Klassenräumen, die über keine vollständig zu öffnenden Fenster verfügen, im Gegensatz zur natürlichen Belüftung. An dem untersuchten Tag (6. April 2022) überschritt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in beiden Räumen den empfohlenen Höchstwert von 1000 ppm deutlich im Tagesverlauf, was auf einen dringenden Handlungsbedarf hinsichtlich der Lüftungssituation hinweist. Diese erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration steht in Zusammenhang mit einem erhöhten Infektionsrisiko und stellt damit einen sicherheitsrelevanten Faktor dar. Interessanterweise bewerteten die Lernenden das hybride Lüftungssystem im Hinblick auf das Nutzungserlebnis schlechter als die natürliche Belüftung. Diese Unzufriedenheit lässt sich jedoch nicht auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration zurückführen, da diese als nicht signifikant wahrgenommen wurde.

Vielmehr stellte sich heraus, dass sowohl der akustische als auch der thermische Komfort, insbesondere in den kälteren Jahreszeiten oder während der frühen Unterrichtsstunden, negativ bewertet wurden, da die Außenluft als zu kalt empfunden wurde. In den späteren Unterrichtsstunden war die Lärmbelastung erst recht ein zentrales Problem, das sich auch negativ auf die Konzentrationsfähigkeit der Lernenden auswirkte. Diese erhöhte Lärmbelastung wurde auch durch die Messergebnisse bestätigt. Diese Erkenntnisse stimmen mit der Literatur aus Kapitel 2.4.4 überein, die Lärm als den größten Störfaktor identifiziert.

Der thermische Komfort hing voraussichtlich mit der Luftgeschwindigkeit und den niedrigen Temperaturen der Außenluft zusammen, da die Raumtemperatur kaum Veränderungen zeigte. Auffällig war, dass trotz der längeren Nutzung des Systems kein Gewöhnungseffekt bei den Lernenden zu beobachten war, insbesondere im Zusammenhang mit dem thermischen Komfort und dem Einfluss der Kleidung. Bemerkenswert ist, dass die Lernenden im Szenario 1, in dem das Lüftungssystem eingeschaltet war, ihre Kleidung nicht im Voraus ausreichend an die kühleren Bedingungen anpassten. Obwohl ihre Erfahrungswerte aus dem Winter zeigten, dass das eingeschaltete Lüftungssystem zu niedrigeren Temperaturen führen kann, wurde erst währenddessen die entsprechende Anpassung vorgenommen. Auch die Antworten auf die offenen Fragen bestätigten, dass dieses Wissen vorhanden war.

Ein leiserer Ventilator und die Optimierung der Luftgeschwindigkeit könnten das hybride Lüftungssystem, das insbesondere bei wärmeren Außentemperaturen gleichwertig oder leicht besser abschneidet als die natürliche Belüftung, erheblich verbessern. Dadurch könnte die CO<sub>2</sub>-Konzentration deutlich gesenkt werden, was wiederum mit einem verringerten Infektionsrisiko einhergeht. Darüber hinaus könnte die Konzentration und Leistungsfähigkeit der Lernenden durch eine bessere Luftqualität gesteigert werden, sofern der störende Faktor des hohen Geräuschpegels nicht vorhanden ist.

### 5.3 Limitierungen

Die Befragung zur Umfrage wurde zu einem einzigen Zeitpunkt am 6. April 2022 durchgeführt. In dieser Jahreszeit sind jedoch weder die extremen Temperaturen des Sommers noch die kältesten Phasen des Winters berücksichtigt. Um eine umfassende und präzise Einschätzung der abgefragten Szenarien zu gewährleisten, müssten diese idealerweise in allen Jahreszeiten und über mehrere Tage hinweg getestet werden, um genauere Ergebnisse von den Lernenden zu erhalten. Dies würde jedoch erheblich mehr Zeit, finanzielle Mittel und Personal erfordern. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, die verschiedenen Lüftungsszenarien an mehreren Schulen mit einer größeren Anzahl von Lernenden parallel, also zeitgleich, zu testen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen und eindeutige Aussagen treffen zu können. Zudem schwanken die Altersunterschiede zwischen den einzelnen Personen lediglich um 2 bis 3 Jahre. Um aussagekräftigere Zusammenhänge zu verifizieren, sollten in zukünftigen Studien die Altersvariationen umfassender berücksichtigt werden.

In dieser Schulstudie wurden drei Szenarien getestet, darunter die natürliche Lüftung, der Ausgangszustand ohne Lüftung sowie ein nachgerüstetes hybrides Lüftungssystem. Es wäre sinnvoll, auch vergleichbare Klassenzimmer in denselben getesteten Schulen, die mit einem vollmechanischen Lüftungssystem ausgestattet sind, in die Untersuchung einzubeziehen. Diese Klassen könnten als Kontrollgruppen dienen, wodurch alle Lüftungssysteme mechanische, hybride und natürliche sowie Szenarien ohne Belüftung evaluiert werden könnten. Dies würde eine bessere Vergleichbarkeit und eine fundiertere Beurteilung der verschiedenen Lüftungsszenarien ermöglichen.

Die Messdaten zu Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden an einer Stelle des Raumes mit einem Sensor erfasst. Um verbesserte Ergebnisse zu erhalten, sollten mehrere Sensoren im gesamten Klassenraum verteilt werden, um ein umfassenderes Bild der CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie der Raumtemperatur zu erhalten. Auf diese Weise könnten auch lokale Unterschiede, wie Bereiche mit erhöhten oder niedrigeren Werten, identifiziert werden. Es wäre zudem sinnvoll, die Temperatur sowohl in Fuß- als auch in Kopfhöhe zu messen, um mögliche kalte Zuluft und dadurch entstehende lokale Unbehaglichkeiten im Raum aufzuspüren.

Die Akustik bzw. Lautstärke wurde mit einem Handy mithilfe der Sound Meter App gemessen. Diese Methode wurde aufgrund von Zeit- und Nutzungsfreundlichkeitsaspekten gewählt, um erste Einschätzungen zu erhalten, die in vorangegangenen Studien nicht oder unzureichend berücksichtigt wurden. Um jedoch genauere Ergebnisse zu erzielen, sollten stattdessen an mehreren Stellen des Raumes geeignete Schallmessgeräte eingesetzt werden. So ließen sich präzisere Daten über die Geräuschverteilung im Raum erfassen und mögliche akustische Schwachstellen gezielt identifizieren.

Eine weitere Einschränkung dieser Masterarbeit betrifft die Messbarkeit des Luftzugs, der nicht quantitativ erfasst wurde. Stattdessen wurde er ausschließlich durch die Wahrnehmung der Probanden sowie durch eine anschließende statistische Auswertung ermittelt, die signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien aufzeigt. Die Sensoren sollten idealerweise an jedem Platz positioniert werden, um die lokalen Strömungen zu erfassen. Daher sollte insbesondere die Platzierung mehrerer Anemometer in Erwägung gezogen werden, um mögliche Störungen und deren Auswirkungen mit den qualitativen Ergebnissen der Umfrage vergleichen zu können.

Eine weitere Limitation dieser Arbeit ist, dass die operative oder Betriebstemperatur nicht erfasst wurde, obwohl sie den thermischen Komfort im Raum besser widerspiegelt als die reine Lufttemperatur. Diese Temperatur ermöglicht eine genauere Steuerung und Optimierung des Raumklimas, was zu einer effizienteren Regelung der Temperatur beiträgt.

## 5.4 Perspektiven für weiterführende Studien

Weitere Umfragen in Klassenzimmern oder Bildungseinrichtungen sollten durchgeführt werden, um aussagekräftigere und fundierte Aussagen treffen sowie umfassende Analysen zu hybriden Lüftungssystemen im Vergleich zu natürlicher Lüftung erstellen zu können. Für zukünftige Studien ist es wichtig, die Luftgeschwindigkeit und damit den wahrgenommenen Luftzug nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu erfassen. Dazu sollten Anemometer installiert werden, um genaue Daten über die Luftgeschwindigkeit zu erheben und somit den Einfluss des Luftzugs auf das Raumklima und das Wohlbefinden der Personen im Raum präziser zu bewerten.

Da die Akustik bzw. die Lautstärke im Klassenraum bei den Lernenden eine große Unzufriedenheit hervorgerufen hat, sollte dieser Aspekt in weiteren, aufbauenden Studien noch genauer untersucht werden. Der Fokus sollte vermehrt auf die akustischen Verhältnisse gelegt werden, indem passende Schallmessgeräte verwendet werden, um genaue Messungen der Geräuschpegel und der Klangqualität im Raum durchzuführen. Es könnten auch andere Ventilatoren getestet werden, die möglicherweise leiser arbeiten. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, die Wirkung von Maßnahmen zur Verbesserung des Akustikerlebnisses zu erforschen. Hierbei könnten die Lernenden, die über Unzufriedenheit in Bezug auf die Lautstärke klagen, unterstützende Hilfsmittel wie Kopfhörer oder andere lärmindernde Geräte erhalten. Im Anschluss sollte eine erneute Umfrage durchgeführt und die akustischen Messwerte verglichen werden, um zu analysieren, ob sich die Unzufriedenheit verringert hat oder ob sich das Nutzungserlebnis hinsichtlich der Unzufriedenheit in anderen Bereichen verändert hat.

Auch spannend wäre eine Untersuchung, bei der Lernende, die nicht mit dem Lüftungssystem vertraut sind, mit denen verglichen werden, die es bereits längere Zeit nutzen und dessen Wirkung sowie Bedienung verstehen. Dabei könnte untersucht werden, ob Gewöhnungseffekte auftreten, das heißt, ob die Akzeptanz des Lüftungssystems mit der Zeit steigt, oder ob im Gegenteil eine verstärkte Ablehnung durch die langfristige Nutzung entsteht. Diese Studie könnte wertvolle Erkenntnisse darüber liefern, wie Nutzungsdauer und Vertrautheit mit einem System die Wahrnehmung und Akzeptanz beeinflussen. Es wäre interessant zu sehen, ob Lernende, die das System von Anfang an kennen, möglicherweise weniger Kritik äußern oder sich gar an die anfänglichen Unannehmlichkeiten gewöhnt haben, während Neulinge möglicherweise größere Probleme haben, sich an die Lüftungsbedingungen anzupassen.

Eine verbesserte Einbindung der Lernenden in Bezug auf die Wahrnehmung von Sicherheitsaspekten hinsichtlich des Infektionsrisikos ist von großer Bedeutung. Dies umfasst die Aufklärung der Lernenden über das eingesetzte System. Zusätzlich sollte während der verschiedenen Szenarien visuell veranschaulicht werden, wie sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration verändert, um bei den Lernenden ein besseres Bewusstsein und ein Gefühl für die Auswirkungen zu schaffen. Dabei sollte die integrierte Ampelschaltung des CO<sub>2</sub>-Messgeräts deutlich präsenter gestaltet werden, da sie sonst möglicherweise während des normalen Schulalltags nicht ausreichend wahrgenommen oder ernst genommen wird.

Eine spannende Weiterführung dieser Studie wäre ein Vergleich und eine Umfrage in Klassenräumen mit mechanischen Lüftungssystemen. Diese könnten in denselben Schulen und ähnlich ausgerichteten Klassenräumen als Vergleichswerte dienen, um umfassende Erkenntnisse über das Nutzungserlebnis in allen verschiedenen Lüftungsszenarien zu gewinnen.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flussdiagramm, Kapitel 2: Stand der Wissenschaft.....	6
Abbildung 2: Richtig lüften im Schulalltag [16] .....	8
Abbildung 3: Schematische Struktur eines mechanischen Lüftungssystems [18].....	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines hybriden Lüftungssystems: Bodennahe Zuluft über Fenster mit mechanischen Lüftungssystems mit verteilter Abluftabsaugung. (Graphik: A. Koppenborg) [22] .....	12
Abbildung 5: Empfohlener Bereiche; operativen Raumtemperatur zu .... Außenlufttemperatur [26] .....	18
Abbildung 6: Vergleich des Zusammenhangs zwischen Produktivität und Klimabeurteilungsskala [28].....	19
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Produktivität (in%; 1 = 100%) und Temperatur (in °C) [adaptiert von 29].....	19
Abbildung 8: Leistung von Schularbeiten als Funktion der Klassenraumtemperatur [30].....	20
Abbildung 9: Bild 1 - PPD als Funktion des PMV [6] .....	23
Abbildung 10: Bereiche um die optimale Temperatur in Abhängigkeit von Aktivität und Kleidung [6] .....	24
Abbildung 11: Zusammenhang CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] und unzufriedenen Personen [%] [7] .....	26
Abbildung 12: Lerngerechte CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] zu Zeit [min] [36].....	29
Abbildung 13: CO <sub>2</sub> -Konzentraion: Diagramm zur Corona-Risikolosen Aufenthaltsdauer in Räumen [adaptiert von70] .....	30
Abbildung 14: Personen in Raum zu Reproduktionsrate, in Abhängigkeit der CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm ] [71].....	31
Abbildung 15: Relative Feuchte in [%] zu Raumlufttemperatur in [°C] [25] .....	33
Abbildung 16: Loudness (dB) to speaker/signal source-to-listernes distance (ft) [39].....	37
Abbildung 17: IEQ-Analyserahmen: Kriterienebene dient dem Vergleich und der Analyse der qualitativen Bewohnerumfragen mit den quantitativen Gebäudedaten [45].....	40
Abbildung 18: Prozentsatz des Unbehagens von Lernenden hinsichtlich der verschiedenen IEQ-Aspekte [47] .....	44
Abbildung 19: Ausschnitt Grafik: Empfinden der Umgebungslautstärke in Raum [48] .....	47
Abbildung 20: Flussdiagramm, Kapitel 3: Methodik der Forschungsarbeit .....	53
Abbildung 21: Ortsplan, Standort des Privatgymnasiums Sacré Coeur [adaptiert von 50]....	55
Abbildung 22: Schrägluftbild Sacré Coeur Graz [49] .....	55
Abbildung 23: Schrägluftbild Klassenraum 8.B Außenansicht [adaptiert von 49].....	56
Abbildung 24: Schrägluftbild Klassenraum 7.C Außenansicht [adaptiert von 49].....	56
Abbildung 25: Lageplan der beiden Klassenräume 7.C und 8.B [adaptiert von 73] .....	57
Abbildung 26: Klassenraum 8.B, MPIC-System Fotodokumentation, Innenraumansicht [73]58	
Abbildung 27: Klassenraum 8.B, Grundrissplan [adaptiert von 23].....	59
Abbildung 28: 3-D Darstellung des MPIC Lüftungssystems Klassenraum 8.B [adaptiert von 23] .....	59
Abbildung 29: Klassenraum 7.C, MPIC-System Fotodokumentation, Innenraumansicht [73]60	
Abbildung 30: 3-D Darstellung des MPIC Lüftungssystems Klassenraum 7.C [adaptiert von 23] .....	61
Abbildung 31: Klassenraum 7.C, Grundrissplan [adaptiert von 23].....	62

Abbildung 32: Abfrage bzgl. Bekleidungsstatus/Kleidungsfaktor (clo) .....	66
Abbildung 33: Abschlussfrage: Änderung des Kleidungsstatus .....	67
Abbildung 34: Frage 1: Empfindung Raumtemperatur Szenario 1/2/3.....	68
Abbildung 35: Frage 2: Präferenz Raumtemperatur Szenario 1/2/3 .....	69
Abbildung 36: Frage 3: Empfindung der Zugluft Szenario 1/2/3 .....	70
Abbildung 37: Frage 4: Präferenz Zugluft Szenario 1/2/3.....	71
Abbildung 38: Frage 5: Empfindung Raumakustik Szenario 1/2/3.....	72
Abbildung 39: Frage 6: Sicherheit in Bezug auf Infektionsrisikos Szenario 1/2/3.....	73
Abbildung 40: Frage 6: Konzentration bzgl. eingeschaltetem Lüftungssystem Szenario 1 ...	74
Abbildung 41: Fragebogen: Offene Fragen .....	75
Abbildung 42: NDIR - Sensor mit Datenlogger; AIRCO2NTROL 5000 [52] .....	78
Abbildung 43: Kalibrierungsprozesses für die Sensoren [23] .....	78
Abbildung 44: Ortsplan: Distanz Mandellstraße 9 zu Petersgasse 1 [adaptiert von 50] [50] .	79
Abbildung 45: Sound Meter App [72] .....	80
Abbildung 46: Glockenkurve z-Wert grafisch [62].....	89
Abbildung 47: Flussdiagramm, Kapitel 4 Ergebnisse und Analyse .....	97
Abbildung 48: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:	
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	100
Abbildung 49: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:	
Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	101
Abbildung 50: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario	
.....	101
Abbildung 51: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:	
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	102
Abbildung 52: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:	
Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	102
Abbildung 53: Raumtemperaturempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario	
.....	103
Abbildung 54: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:	
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	104
Abbildung 55: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:	
Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	104
Abbildung 56: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 8.B (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario	
.....	105
Abbildung 57: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:	
Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	106
Abbildung 58: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 7.C:	
Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	106
Abbildung 59: Bevorzugte Raumtemperatur am 06.04.2022 in der Klasse 7.C (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario	
.....	107
Abbildung 60: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B:      Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	108

Abbildung 61: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	108
Abbildung 62: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	109
Abbildung 63: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	110
Abbildung 64: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	110
Abbildung 65: Luftzugempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	111
Abbildung 66: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	112
Abbildung 67: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	112
Abbildung 68: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	113
Abbildung 69: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	114
Abbildung 70: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	114
Abbildung 71: Bevorzugter Luftzug am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	115
Abbildung 72: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	116
Abbildung 73: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	117
Abbildung 74: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	117
Abbildung 75: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	118
Abbildung 76: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	119
Abbildung 77: Akustikempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	119
Abbildung 78: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	120
Abbildung 79: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	121
Abbildung 80: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 8.B: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	121

Abbildung 81: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Gesamt sowie in den jeweiligen Szenarien .....	122
Abbildung 82: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: Reihenaufschlüsselung je Szenario .....	123
Abbildung 83: Sicherheitsempfinden am 06.04.2022 in der Klasse 7.C: (Grundrissplan siehe Kapitel 3.2.3) Reihenbasiertes Trendliniendiagramm je Szenario .....	123
Abbildung 84: Diagramm bzgl. Konzentration am 06.04.2022 in der Klasse 8.B, bei ein- oder ausgeschaltetem Lüftungssystem; nur bei Szenario 1 (MPIC) erhoben .....	124
Abbildung 85: Diagramm bzgl. Konzentration am 06.04.2022 in der Klasse 7.C, bei ein- oder ausgeschaltetem Lüftungssystem; nur bei Szenario 1 (MPIC) erhoben .....	124
Abbildung 86: Bevorzugung ein- oder ausgeschaltetes Lüftungssystem über den Tag; Erhebung am 06.04.2022 in der Klasse 8.B.....	125
Abbildung 87: Bevorzugung ein- oder ausgeschaltetes Lüftungssystem über den Tag; Erhebung am 06.04.2022 in der Klasse 7.C .....	125
Abbildung 88: Temperatur [°C] / Zeit [hh:mm] Diagramm des 8.B Klassenraums: Messzeitraum von 9:40 bis 10:30 .....	129
Abbildung 89: Temperatur [°C] / Zeit [hh:mm] Diagramm des Klassenraums 7.C: Messzeitraum von 11:45 bis 12:35 .....	130
Abbildung 90: Klasse 8.B; Innenraum CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 11:45 bis 12:35 .....	132
Abbildung 91: Klasse 8.B; Innenraum CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 9:10 bis 13:05 .....	132
Abbildung 92: Klasse 7.C; Innenraum CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 11:45 bis 12:35 .....	134
Abbildung 93: Klasse 7.C; Innenraum CO <sub>2</sub> -Konzentration [ppm] / Zeit [hh:mm]; Messzeitraum von 9:10 bis 13:05 .....	134
Abbildung 94: Klasse 8.B, Durchschnittliche Lautstärke bei belegtem- und leerem Klassenraum je Szenario; Grenzwertlinie bei 35 dB .....	135
Abbildung 95: Klasse 8.B, Lautstärke [dB] zu Abstand zwischen Signalquelle und Zuhörer [m] Diagramm.....	135
Abbildung 96: Klasse 7.C, Durchschnittliche Lautstärke bei belegtem- und leerem Klassenraum je Szenario; Grenzwertlinie bei 35 dB .....	136
Abbildung 97: Klasse 7.C, Lautstärke [dB] zu Abstand zwischen Signalquelle und Zuhörer [m] Diagramm.....	136
Abbildung 98: Netzdiagramm der Unzufriedenheit in Prozent [%], Klassenaufteilung und gesamt von Szenario 1 .....	155
Abbildung 99: Fragebogen Klasse 8.B.....	172
Abbildung 100: Fragebogen Klasse 7.C.....	179

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategorien für die Innenraumqualität (Tabelle 4 - ÖNORM 16798-1) [5] .....	16
Tabelle 2: Ausschnitt Tabelle B.5 aus ÖNORM 16798-1 [5].....	16
Tabelle 3: Operative Raumtemperatur nach unterschiedlichen normativen Quellen .....	17
Tabelle 4: ÖNORM 7730 Tabelle 1: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala [5].....	19
Tabelle 5: ÖNORM 7730 Tabelle 1: Sieben Punkte der Klimabeurteilungsskala [6].....	21
Tabelle 6: Verteilung der individuellen Klimaurteile für verschiedene Werte des mittleren Votums [6] .....	23
Tabelle 7: Beispiele für Energieumsätze [6] .....	24
Tabelle 8: Klassifizierung der Raumlufthqualität nach ÖNORM EN 13779 [7].....	26
Tabelle 9: Klassifizierung und Richtwerte für Raumlufthqualität und der CO <sub>2</sub> -Konzentration in ppm [7] .....	27
Tabelle 10: Vorgeschlagene Qualitätsklassen für CO <sub>2</sub> laut Tab. A.2 in ISO 16000-41 (2023) [34] .....	28
Tabelle 11: Beurteilungswert CO <sub>2</sub> -Konzentration laut Ad-hoc Arbeitsgruppe [34] .....	28
Tabelle 12: Ausschnitt Beschreibung der Nutzungsarten der Räume der Gruppe A laut DIN 18041 [42] .....	35
Tabelle 13: Schallpegelgrenzen und deren Bedeutung [72] .....	81
Tabelle 14: Chi-Quadrat Tabelle [57] .....	85
Tabelle 15: Werte der Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung [64] .....	91
Tabelle 16: Klasse 8.B; Abfrage des Kleidungsfaktor [clo] am 06.04.2022; Die durchschnittliche Raumtemperatur / Außentemperatur betrug bei Szenario 1: 22,4°C / 12,3°C   bei Szenario 2: 22,3°C / 12,6°C   bei Szenario 3: 22,5°C / 12,8°C für die Szenarienbeschreibung siehe Kapitel 3.2.4.3 .....	98
Tabelle 17: Klasse 7.C; Abfrage des Kleidungsfaktor [clo] am 06.04.2022; Die durchschnittliche Raumtemperatur / Außentemperatur betrug bei Szenario 1: 22,8°C / 15,5°C   bei Szenario 2: 23,0°C / 15,9°C   bei Szenario 3: 22,8°C / 16,3°C für die Szenarienbeschreibung siehe Kapitel 3.2.4.3 .....	99
Tabelle 18: Klasse 8.B; Innen- & Außentemperatur; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert .....	128
Tabelle 19: Klasse 7.C; Innen- & Außentemperatur; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert .....	130

Tabelle 20: Klasse 8.B; CO <sub>2</sub> -Konzentration in [ppm] und PD (Anteil der unzufriedenen Personen) in [%]; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert .....	131
Tabelle 21: Klasse 7.C; CO <sub>2</sub> -Konzentration in [ppm] und PD (Anteil der unzufriedenen Personen) in [%]; Start- und Endzeitpunkt sowie die jeweiligen Szenarien; Max-, Min- & Mittelwert .....	133
Tabelle 22: Klasse 8.B, Deskriptive Statistiken mit zugehörigen Rängen je Szenario pro Erhebungsfrage Zusätzlich zum Verständnis: Durchschnittliche quantitative Messwerte .....	137
Tabelle 23: Klasse 7.C, Deskriptive Statistiken mit zugehörigen Rängen je Szenario pro Erhebungsfrage Zusätzlich zum Verständnis: Durchschnittliche quantitative Messwerte .....	138
Tabelle 24; Klasse 8.B, Statistik für den Friedman-Test (siehe Kapitel 3.5.1) .....	139
Tabelle 25; Klasse 7.C, Statistik für den Friedman-Test (siehe Kapitel 3.5.1) .....	139
Tabelle 26: Klasse 8.B, Statistik für den Wilcoxon-Test; Vergleich der Szenarien 1 & 2 sowie 2 & 3 (siehe Kapitel 3.5.2).....	140
Tabelle 27: Klasse 7.C, Statistik für den Wilcoxon-Test; Vergleich der Szenarien 1 & 2 sowie 2 & 3 (siehe Kapitel 3.5.2).....	141
Tabelle 28: Klasse 8.B, Excel gesamte Fragebogenauswertung.....	186
Tabelle 29: Klasse 7.C, Excel gesamte Fragebogenauswertung .....	188
Tabelle 30: Offene Fragen im Klassenraum der 8.B .....	191
Tabelle 31: Offene Fragen im Klassenraum der 7.C .....	193



## Literaturverzeichnis

### Literatur

- [1] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, "Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Gebäuden," 2020.
- [2] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, "Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Bildungseinrichtungen," 2024.
- [3] H. C. Burridge et al., "Variations in classroom ventilation during the COVID-19 pandemic: Insights from monitoring 36 naturally ventilated classrooms in the UK during 2021," *Journal of Building Engineering*, pp. 1–19, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.105459.
- [4] D. Gurdasani et al., "Covid-19 in the UK: policy on children and schools: Deepti Gurdasani and colleagues argue UK covid policy did not give children sufficient priority and question the evidence behind government decisions," *BMJ*, e071234, 2022, doi: 10.1136/bmj-2022-071234.
- [5] Energetische Bewertung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufthqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Module M1-6, EN\_16798-1\_2019, Austrian Standards International, Wien, Nov. 2019. [Online]. Available: [https://effects.austrian-standards.at/action/effectsDownload/664889/2/OENORM\\_EN\\_16798-1\\_2019\\_11\\_01\\_de.pdf](https://effects.austrian-standards.at/action/effectsDownload/664889/2/OENORM_EN_16798-1_2019_11_01_de.pdf)
- [6] Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005), 7730, Austrian Standards International, Wien, May. 2006.
- [7] Dipl.-Ing. Peter Tappler, "Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft: KOHLENSTOFFDIOXID ALS LÜFTUNGSPARAMETER," 2017.
- [8] D. Zhang and P. M. Bluysen, "Understanding the indoor environment and its effects Part 1. Field study of 21 primary schools," *Rehva Journal*, 57(2), pp. 32–35, 2020.
- [9] "Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen," (in ger), *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, vol. 61, no. 2, pp. 239–248, 2018, doi: 10.1007/s00103-017-2682-y.
- [10] The Chartered Institution of Building Services Engineers, *Energy efficiency in buildings: CIBSE Guide F*. London: CIBSE, 2012.
- [11] The Chartered Institution of Building Services Engineers, *Indoor air quality and ventilation: CIBSE Knowledge Series: KS17*. London: CIBSE, 2012.
- [12] EWE ZuhauseWärme-Redaktion, Ratgeber: Luftwechselrate. [Online]. Available: <https://ewe-waerme.de/zuhause/ratgeber/luftwechselrate> (accessed: Sep. 1 2024).
- [13] The Chartered Institution of Building Services Engineers, *Environmental design: CIBSE Guide A*, 6th ed. London: CIBSE, 1999.
- [14] Umweltbundesamt, *Lüftung, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an> (accessed: Aug. 31 2024).
- [15] OIB-Richtlinie 3 - Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, Österreichisches Institut für Bautechnik, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien/richtlinien/2019/oib-richtlinie-3>
- [16] Umweltbundesamt, *Richtig Lüften in Schulen*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen> (accessed: Jul. 24 2024).
- [17] G. Chiesa and M. Vigliotti, "Comparing mechanical ventilation control strategies for indoor air quality: Monitoring and simulation results of a school building in northern Italy," *Energy and Buildings*, p. 114665, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114665.
- [18] Donum Haustechnik GmbH, *Mechanische Lüftungsanlagen: Wann sind mechanische Lüftungsanlagen erforderlich?* [Online]. Available: <https://www.donum-ht.at/wissenswertes/lueftung/mechanische-lueftungsanlagen/> (accessed: Aug. 28 2024).
- [19] F. Pollozhani, R. S. McLeod, C. Schwarzbauer, and C. J. Hopfe, "Assessing school ventilation strategies from the perspective of health, environment, and energy," *Applied Energy*, vol. 353, p. 121961, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121961.
- [20] M. T. Kremer, K. Rewitz, and D. Müller, "Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen," 2021.

- 
- [21] Dr.-Ing. Franc Sodec, "Quelllüftung und ihre Anwendungsbereiche: Vorteile und Einsatzgrenzen von Raumluftrömung," 2002.
- [22] F. Helleis, T. Klimach, and U. Pöschl, "Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz in Innenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumluftechnik und Luftreiniger," Max-Planck-Institut für Chemie, Hahn-Meitner-Weg 1, 55131 Mainz, Deutschland, 2023.
- [23] Fatos Pollozhani, "Energy performance and infection risk evaluation of retrofitted ventilation systems in times of COVID," 2022 TU Graz.
- [24] Ergonomie der thermischen Umgebung - Instrumente zur Messung physikalischer Größe, 7726, Austrian Standards International, Wien.
- [25] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, "Positionspapier zu Auswirkungen energiesparender Maßnahmen auf die Innenraumluf," 2023.
- [26] A. Mair, "Messung und Auswertung zur Behaglichkeit insbesondere im Sommerfall am Beispiel der Höttinger Hauptschule," DIPLOMARBEIT, 2012.
- [27] F.-J. G. Bürger, Energieeffizientes Bauen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024.
- [28] Y. Geng, W. Ji, B. Lin, and Y. Zhu, "The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity," vol. 121, pp. 158–167, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.022.
- [29] O. Seppänen, W. J. Fisk, Q.H. Lei, "Effect of Temperature on Task Performance in Office Environment," 2006.
- [30] P. Wargocki, J. A. Porras-Salazar, and S. Contreras-Espinoza, "The relationship between classroom temperature and children's performance in school," Building and Environment, vol. 157, pp. 197–204, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.04.046.
- [31] ECA, "Guidelines for ventilation requirements in buildings, Report no. 11: EUROPEAN CONCERTED ACTION INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON MAN," Joint Research Centre - Environment Institute, 1992.
- [32] P. Tappler, CO<sub>2</sub>-SIM 5.3. Rechenblatt zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen. [Online]. Available: raumluf.org
- [33] Umweltbundesamt, Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid> (accessed: Jul. 31 2024).
- [34] ISO 16000-41: Indoor air — Part 41: Assessment and classification, International Organization for Standardization, 2023.
- [35] "Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluf. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden," (in ger), Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, vol. 51, no. 11, pp. 1358–1369, 2008, doi: 10.1007/s00103-008-0707-2.
- [36] TROX GmbH, Ed., Luft zum lernen. TROX SCHOOLAIR – Energieeffiziente Lüftungslösungen für Schulen: Neukirchen-Vluyn, 2010.
- [37] The Chartered Institution of Building Services Engineers, Comfort - CIBSE Knowledge Series: KS6. London: CIBSE, 2006.
- [38] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, "Wegweiser für eine Gesunde Raumluf: Die Chemie des Wohnens," Jun. 2018. [Online]. Available: <https://www.innenraumanalytik.at/wegweiser2018.pdf>
- [39] Suzanne Rupp DeMallie, Suzanne's Classroom Hearing Advocacy: Poor - Acoustics. [Online]. Available: <https://suzannedemallie.com/poor-acoustics> (accessed: Jan. 24 2023).
- [40] Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 6: Schallabsorption in Räumen, 12354-6, Austrian Standards International, Wien, Jun. 2004.
- [41] Berglund, Birgitta, Lindvall, Thomas, Schwela, Dietrich H, Guidelines for community noise: World Health Organization, 1999. [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66217>
- [42] DIN 18041 - Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung - 03.2016.
- [43] OIB-Richtlinie 5 - Schallschutz, Österreichisches Institut für Bautechnik, May. 2023. [Online]. Available: [https://www.oib.or.at/sites/default/files/oib-rl\\_5\\_ausgabe\\_mai\\_2023.pdf](https://www.oib.or.at/sites/default/files/oib-rl_5_ausgabe_mai_2023.pdf)
- [44] Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik, 8115-3, Austrian Standards International, Wien, Jul. 2023.
-



- [45] J.-W. Lee, S.-M. Lee, and S.-E. Lee, "Importance of indoor environmental quality surveys for evaluating renovation effects," *Journal of Building Engineering*, vol. 78, p. 107726, 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107726.
- [46] S. S. Korsavi, R. V. Jones, and A. Fuertes, "Operations on windows and external doors in UK primary schools and their effects on indoor environmental quality," *Building and Environment*, vol. 207, p. 108416, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108416.
- [47] P. M. Bluysen, D. Zhang, S. Kurvers, M. Overtom, and M. Ortiz-Sanchez, "Self-reported health and comfort of school children in 54 classrooms of 21 Dutch school buildings," *Building and Environment*, vol. 138, pp. 106–123, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.04.032.
- [48] V. Eibinger, F. Pollozhani, D. Wright, R. Mcleod, and C. Hopfe, "Testing user perceptions of retrofitted COVID-19 ventilation systems in naturally ventilated spaces," in *Proceedings of BauSim 2022: 9th Conference of IBPSA-Germany and Austria*, 2022.
- [49] VOSÖ-Redaktion, Campus Sacré Coeur Graz. [Online]. Available: <https://www.ordensschulen.at/unsere-bildungseinrichtungen/18-einrichtungen/graz/15-sacre-coeur-graz> (accessed: Nov. 15 2023).
- [50] S. Digitaler Atlas, Karten Portal. [Online]. Available: <https://gis.stmk.gv.at/atlas2/Lageplan.asp?code=5745113&typ=ort> (accessed: May 10 2023).
- [51] Google, Ausschnitt der Stadt Graz, Privatschule Sacré Coeur Graz.
- [52] TFA Dostmann, CO<sub>2</sub>-Monitor mit Datenlogger AIRCO<sub>2</sub>NTROL 5000 – TFA Dostmann. [Online]. Available: <https://www.tfa-dostmann.de/produkt/co2-monitor-mit-datenlogger-airco2ntrol-5000-31-5008/> (accessed: 25.Mai.2023).
- [53] Christoph Waller - Long Life for Art & Datenlogger-Store e.K., AIRCO<sub>2</sub>NTROL5000: CO<sub>2</sub> Messgerät mit Datenlogger. [Online]. Available: <https://www.datenlogger-store.de/aircontrol-5000-co2-datenlogger.html> (accessed: Sep. 29 2024).
- [54] Christina J. Hopfe, Thomas Klimach, Robert S. McLeod, Ulrich Pöschl. Unterstützt durch (alphabetisch gereiht): Arne Bathke, Raphael Berger, Andreas Berghaler, Thomas Czypionka, Jakob-Moritz Eberl, Ulrich Elling, Gerry Foitik, Nikolaus Forgó, Anita Gottlob, Ingomar Gutmann, Beate Jahn, Peter Klimek, Sylvia Kritzing, Herwig Ostermann, Niki Popper, Andrea Schmidt, Barbara Schober, Stefan Thurner, Michael Wagner, "Leitfaden zum Gebrauch von CO<sub>2</sub>-Sensoren zur Verbesserung von Luftqualität und Infektionsschutz in Innenräumen," 2.November.2022.
- [55] T. McLennon, S. Patel, A. Behar, and M. Abdoli-Eramaki, "Evaluation of smartphone sound level meter applications as a reliable tool for noise monitoring," *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 16, no. 9, pp. 620–627, 2019, doi: 10.1080/15459624.2019.1639718.
- [56] Dr. Adam Lund & Mark Lund, Wilcoxon Signed Rank Test in SPSS Statistics - procedure, output and interpretation of output using a relevant example. [Online]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/wilcoxon-signed-rank-test-using-spss-statistics.php> (accessed: Jan. 24 2023).
- [57] Dr. Adam Lund & Mark Lund, Friedman Test in SPSS Statistics - How to run the procedure, understand the output using a relevant example | Laerd Statistics. [Online]. Available: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/friedman-test-using-spss-statistics.php> (accessed: Jan. 24 2023).
- [58] N. Brace, R. Kemp, and R. Snelgar, *SPSS for psychologists*, 5th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012.
- [59] Dr. Jürg Schwarz, Friedman-Test: Methodenberatung. [Online]. Available: [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss/unterschiede/zentral/friedman.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/friedman.html)
- [60] DATAtab Team (2023), Friedman Test. [Online]. Available: <https://datatab.de/tutorial/friedman-test> (accessed: Jan. 24 2023).
- [61] Dr. Jürg Schwarz, Wilcoxon-Test: Methodenberatung. [Online]. Available: [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss/unterschiede/zentral/wilcoxon.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/wilcoxon.html)
- [62] P. Planing, *Statistik Grundlagen: Das interaktive Lehrbuch mit über 150 YouTube-Videos rund um die Burgerkette FIVE PROFS*. [Stuttgart]: Planing Publishing, 2022. [Online]. Available: <https://statistikgrundlagen.de/ebook/chapter/rangsummentest>
- [63] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1988.
- [64] S. Schumann, Ed., *Repräsentative Umfrage*, 7th ed.: De Gruyter Oldenbourg, 2018.
- [65] Qualtrics LLC, Sample Size Calculator – die richtige Stichprobengröße bestimmen. [Online]. Available: <https://www.qualtrics.com/de/erlebnismanagement/marktforschung/sample-size-calculator/> (accessed: Aug. 24 2024).
- [66] Maple Tech. International LLC., Sample Size Calculator. [Online]. Available: <https://www.calculator.net/sample-size-calculator.html> (accessed: 24.0.2024).

- [67] J.-W. Park and M.-S. Jung, "A Note on Determination of Sample Size for a Likert Scale," *Communications for Statistical Applications and Methods*, vol. 16, no. 4, pp. 669–673, 2009, doi: 10.5351/CKSS.2009.16.4.669.
- [68] Frankline Krabuacha, How to Determine Sample Size for a Research Study. [Online]. Available: <https://www.geopoll.com/blog/sample-size-research/> (accessed: Aug. 24 2024).
- [69] P. M. Bluyssen, M. Ortiz, and D. Zhang, "The effect of a mobile HEPA filter system on 'infectious' aerosols, sound and air velocity in the SenseLab," *Building and Environment*, vol. 188, p. 107475, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107475.
- [70] Hermann-Rietschel-Instituts der Technischen Universität Berlin, "Coronamaßnahmen: Auf die CO<sub>2</sub>-Dosis kommt es an," Mar. 2022. [Online]. Available: <https://www.tu.berlin/ueber-die-tu-berlin/profil/pressemitteilungen-nachrichten/coronamassnahmen-auf-die-co2-dosis-kommt-es-an>
- [71] S. N. Rudnick and D. K. Milton, "Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration," *Indoor air*, vol. 13, no. 3, pp. 237–245, 2003, doi: 10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
- [72] RootApps, Schallmessung (Sound Meter) (Version 3.6.9) [Mobile app]. Google Play. [Online]. Available: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gamebasic.decibel&hl=de\\_AT](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gamebasic.decibel&hl=de_AT)
- [73] R. S. Mcleod, C. J. Hopfe, and F. Pollozhani, CovEd: Verbesserte SARS-CoV-2-Raumbelüftungsprotokolle für natürlich belüftete Büro-, Seminar- und Klassenräume. [Online]. Available: <https://www.tugraz.at/institute/ibpsc/forschung/forschungsprojekte/laufende-projekte/coved#:~:text=Ziel%20dieses%20Projektes%20ist%20es,werden%20zwei%20wichtige%20Funktionen%20erf%C3%BCllen.> (accessed: Sep. 28 2024).
- [74] Statistik Austria, Schulen in Österreich bis 2022/2023. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1239498/umfrage/schulen-in-oesterreich/> (accessed: Oct. 18 2024).
- [75] McLeod, R.S., Hopfe, C.J., Pollozhani, F., Gustin, M., Villanova, L., Perkovic, T., and Aznira, M., "ImpAQS (Improving Air Quality in Schools): Langzeitstudie zur Belüftung und Raumluftqualität in österreichischen Klassenräumen – Abschlussbericht (2024) [unpublished work]," 2024.
- [76] Christian Schwarzbauer, "Forschungsprojekt "Sicheres Klassenzimmer": Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht," 2022.
- [77] E. Uhde, T. Salthammer, S. Wientzek, A. Springorum, and J. Schulz, "Effectiveness of air-purifying devices and measures to reduce the exposure to bioaerosols in school classrooms," *Indoor air*, vol. 32, no. 8, e13087, 2022, doi: 10.1111/ina.13087.

## Formelverzeichnis

(1)	$t_o = \frac{h_r \cdot t_r + h_c \cdot t_a}{h_r + h_c}$ .....	17
(2)	$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot$ .....	22
(3)	$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)$ .....	22
(4)	$PD = 395 \cdot e^{(-15,15 \cdot C^{-0,25})}$ .....	25
(5)	$T = 0,32 \log V - 0,17$ .....	35
(6)	$T_{ref} = 0,37 \cdot \lg V - 0,14$ .....	35
(7)	$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (v_{a,l} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_{a,l} \cdot Tu + 3,14)$ .....	38
(8)	$\chi_r^2 = \frac{12}{n \cdot k(k+1)} \cdot \sum_{i=1}^k R_i^2 - 3 \cdot n(k+1)$ .....	84
(9)	$df = k - 1$ .....	84
(10)	$\chi_{r(corr)}^2 = \frac{\chi_r^2}{1 - \frac{1}{n \cdot k(k^2-1)} \cdot \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)}$ .....	85
(11)	$T^+ + T^- = \frac{n(n+1)}{2}$ .....	88
(12)	$W = \min(T^+; T^-)$ .....	88
(13)	$\mu_w = \frac{n \cdot (n+1)}{4}$ .....	88
(14)	$z = \frac{W - \mu_w}{\sigma_w}$ .....	89
(15)	$\sigma_w = \sqrt{\frac{n \cdot (n+1) \cdot (2 \cdot n+1) - \frac{\sum_{i=1}^k t_i^3 - t_i}{2}}{24}}$ .....	89
(16)	$r = \left  \frac{z}{\sqrt{n}} \right $ .....	90
(17)	$n = \frac{(Z^2 \cdot p \cdot (1-p))}{E^2}$ .....	92
(18)	$E = \sqrt{\frac{(Z^2 \cdot p \cdot (1-p))}{n}}$ .....	93

## Anhang

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



### Umfrage zur thermischen Behaglichkeit bezüglich dem Covid-19 Lüftungssystem

Im Zuge dieser Umfrage wird die Behaglichkeit von Personen in Räumen mit einer Covid-19 Lüftungsanlage untersucht. Dabei wird zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage verglichen und ob sich der Komfort der Personen verbessert oder verschlechtert.

„Sämtliche von Ihnen in der Online-Befragung gemachten Angaben werden vertraulich und unter Einhaltung der gesetzlichen Datenschutzbestimmungen gemäß der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSG) behandelt. Die Antworten im Fragebogen werden ausschließlich im Rahmen des CovEd-19 Projekts verwendet. Personenbezogene Daten werden nicht an Dritte und an der Umfrage nicht beteiligte Personen bzw. Institutionen weitergegeben. Die Teilnahme an der Befragung ist freiwillig und anonym. Rückschlüsse auf die Personen der Teilnehmenden sind nicht möglich und auch nicht beabsichtigt. Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgemäß, es gibt keine falschen Antworten.“<sup>1</sup>

#### Screening Fragen

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

#### Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>2 3</sup> (Mehrfachauswahl)

##### Oberkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Ärmellose Weste       | 0.06 |
| <input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt | 0.25 |
| <input type="checkbox"/> Pullover              | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Kurzes Kleid          | 0.33 |
| <input type="checkbox"/> Langes Kleid          | 0.47 |
| <input type="checkbox"/> Jacke/Mantel          | 0.48 |
| <input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl   | 0.20 |

##### Sonstiges:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab | 0,01 |
| <input type="checkbox"/> Warme Wintermütze | 0,03 |
| <input type="checkbox"/> Schal             | 0,01 |

##### Unterkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Kurze Hose        | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dünn)       | 0.24 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dick)       | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock | 0.14 |
| <input type="checkbox"/> Winterlicher Rock | 0.23 |
| <input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche | 0.20 |

##### Füße:

- |                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Socken  | 0.02 |
| <input type="checkbox"/> Schuhe  | 0.04 |
| <input type="checkbox"/> Stiefel | 0.10 |

#### Beispiele: ↘



Person A trägt z.B.:  
☒ Langärmeliges T-Shirt  
☒ Winterlicher Rock  
☒ Lange Unterwäsche  
☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:  
☒ Kurzärmeliges T-Shirt  
☒ Kurze Hose  
☒ Socken  
☒ Schuhe

#### Sitzplatz:

- A-F: A ist die vorderste Reihe, bis F ist die hinterste Reihe
- 1-8: 1 ist die Person in einer Reihe, die dem Fenster am nächsten ist. 8 ist die Person, die am weitesten vom Fenster entfernt ist.

#### Sitzplatznummer:

<sup>1</sup> <https://survey.questionstar.com/2dbbf159>. Datum des Zugriffs: 05.01.2022

<sup>2</sup> HE, X. et al.: Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces S. 5

<sup>3</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5718774/>. Datum des Zugriffs: 21.01.2022

Abbildung 99: Fragebogen Klasse 8.B

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



**Fragen bei EINGESCHALTETEM Lüftungssystem und EINEM GEKIPPTEN Fenster (1)**

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei eingeschaltetem Lüftungssystem und einem gekippten Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter
 ☐ Ein bisschen kühler
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen wärmer
 ☐ Wärmer

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar
 ☐ Sehr schwach
 ☐ schwach
 ☐ stark
 ☐ Sehr stark

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer
 ☐ Ein bisschen schwächer
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen stärker
 ☐ Stärker

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Sehr leise
 ☐ Leise
 ☐ Neutral
 ☐ Laut
 ☐ Sehr laut

**6. Fühlen Sie sich weniger oder mehr konzentriert bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Viel weniger
 ☐ Etwas weniger
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas mehr
 ☐ Mehr

**7. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich des Infektionsrisikos) fühlen Sie sich im Klassenraum mit einem geöffneten Fenstern und bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher
 ☐ Etwas unsicher
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas sicher
 ☐ Sicher

**8. In Anbetracht der oben aufgelisteten Faktoren, bevorzugen Sie es den Tag mit ausgeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen oder bevorzugen Sie es den Tag mit eingeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen?**

- ☐ Ich bevorzuge es mit AUSgeschaltetem Lüftungssystem
 ☐ Ich bevorzuge es mit EINGeschaltetem Lüftungssystem

**Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)**

- ☐ Nein
 ☐ Ja ..... ausgezogen
 ☐ Ja ..... angezogen

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



## Umfrage zur thermischen Behaglichkeit bezüglich dem Covid-19 Lüftungssystem

Im Zuge dieser Umfrage wird die Behaglichkeit von Personen in Räumen mit einer Covid-19 Lüftungsanlage untersucht. Dabei wird zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage verglichen und ob sich der Komfort der Personen verbessert oder verschlechtert.

„Sämtliche von Ihnen in der Online-Befragung gemachten Angaben werden vertraulich und unter Einhaltung der gesetzlichen Datenschutzbestimmungen gemäß der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) behandelt. Die Antworten im Fragebogen werden ausschließlich im Rahmen des CovEd-19 Projekts verwendet. Personenbezogene Daten werden nicht an Dritte und an der Umfrage nicht beteiligte Personen bzw. Institutionen weitergegeben. Die Teilnahme an der Befragung ist freiwillig und anonym. Rückschlüsse auf die Personen der Teilnehmenden sind nicht möglich und auch nicht beabsichtigt. Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgemäß, es gibt keine falschen Antworten.“<sup>4</sup>

### Screening Fragen

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

### Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>5 6</sup> (Mehrfachauswahl)

#### Oberkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Ärmellose Weste       | 0.06 |
| <input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt | 0.25 |
| <input type="checkbox"/> Pullover              | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Kurzes Kleid          | 0.33 |
| <input type="checkbox"/> Langes Kleid          | 0.47 |
| <input type="checkbox"/> Jacke/Mantel          | 0.48 |
| <input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl   | 0.20 |

#### Sonstiges:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab | 0,01 |
| <input type="checkbox"/> Warme Wintermütze | 0,03 |
| <input type="checkbox"/> Schal             | 0,01 |

#### Unterkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Kurze Hose        | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dünn)       | 0.24 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dick)       | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock | 0.14 |
| <input type="checkbox"/> Winterlicher Rock | 0.23 |
| <input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche | 0.20 |

#### Füße:

- |                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Socken  | 0.02 |
| <input type="checkbox"/> Schuhe  | 0.04 |
| <input type="checkbox"/> Stiefel | 0.10 |

#### Beispiele:



Person A trägt z.B.:  
☒ Langärmeliges T-Shirt  
☒ Winterlicher Rock  
☒ Lange Unterwäsche  
☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:  
☒ Kurzärmeliges T-Shirt  
☒ Kurze Hose  
☒ Socken  
☒ Schuhe

#### Sitzplatz:

- **A-F:** A ist die vorderste Reihe, bis F ist die hinterste Reihe
- **1-8:** 1 ist die Person in einer Reihe, die dem Fenster am nächsten ist. 8 ist die Person, die am weitesten vom Fenster entfernt ist.

**Sitzplatznummer:**

<sup>4</sup> <https://survey.questionstar.com/2dbbf159>. Datum des Zugriffs: 05.01.2022

<sup>5</sup> HE, X. et al.: Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces S. 5

<sup>6</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5718774/>. Datum des Zugriffs: 21.01.2022



Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



**Fragen bei AUSGESCHALTETEM Belüftungssystem und GESCHLOSSENEN Fenstern (2)**

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und geschlossenen Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter
 ☐ Ein bisschen kühler
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen wärmer
 ☐ Wärmer

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar
 ☐ Sehr schwach
 ☐ schwach
 ☐ stark
 ☐ Sehr stark

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer
 ☐ Ein bisschen schwächer
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen stärker
 ☐ Stärker

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Sehr leise
 ☐ Leise
 ☐ Neutral
 ☐ Laut
 ☐ Sehr laut

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit geschlossenen Fenstern und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher
 ☐ Etwas unsicher
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas sicher
 ☐ Sicher

**Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)**

- ☐ Nein
 ☐ Ja ..... ausgezogen
 ☐ Ja ..... angezogen

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



## Umfrage zur thermischen Behaglichkeit bezüglich dem Covid-19 Lüftungssystem

Im Zuge dieser Umfrage wird die Behaglichkeit von Personen in Räumen mit einer Covid-19 Lüftungsanlage untersucht. Dabei wird zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage verglichen und ob sich der Komfort der Personen verbessert oder verschlechtert.

„Sämtliche von Ihnen in der Online-Befragung gemachten Angaben werden vertraulich und unter Einhaltung der gesetzlichen Datenschutzbestimmungen gemäß der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) behandelt. Die Antworten im Fragebogen werden ausschließlich im Rahmen des CovEd-19 Projekts verwendet. Personenbezogene Daten werden nicht an Dritte und an der Umfrage nicht beteiligte Personen bzw. Institutionen weitergegeben. Die Teilnahme an der Befragung ist freiwillig und anonym. Rückschlüsse auf die Personen der Teilnehmenden sind nicht möglich und auch nicht beabsichtigt. Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgemäß, es gibt keine falschen Antworten.“<sup>7</sup>

### Screening Fragen

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

### Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>8,9</sup> (Mehrfachauswahl)

#### Oberkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Ärmellose Weste       | 0.06 |
| <input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt | 0.25 |
| <input type="checkbox"/> Pullover              | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Kurzes Kleid          | 0.33 |
| <input type="checkbox"/> Langes Kleid          | 0.47 |
| <input type="checkbox"/> Jacke/Mantel          | 0.48 |
| <input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl   | 0.20 |

#### Sonstiges:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab | 0,01 |
| <input type="checkbox"/> Warme Wintermütze | 0,03 |
| <input type="checkbox"/> Schal             | 0,01 |

#### Unterkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Kurze Hose        | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dünn)       | 0.24 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dick)       | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock | 0.14 |
| <input type="checkbox"/> Winterlicher Rock | 0.23 |
| <input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche | 0.20 |

#### Füße:

- |                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Socken  | 0.02 |
| <input type="checkbox"/> Schuhe  | 0.04 |
| <input type="checkbox"/> Stiefel | 0.10 |

#### Beispiele: ↘



Person A trägt z.B.:  
☒ Langärmeliges T-Shirt  
☒ Winterlicher Rock  
☒ Lange Unterwäsche  
☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:  
☒ Kurzärmeliges T-Shirt  
☒ Kurze Hose  
☒ Socken  
☒ Schuhe

#### Sitzplatz:

- A-F: A ist die vorderste Reihe, bis F ist die hinterste Reihe
- 1-8: 1 ist die Person in einer Reihe, die dem Fenster am nächsten ist. 8 ist die Person, die am weitesten vom Fenster entfernt ist.

**Sitzplatznummer:**

<sup>7</sup> <https://survey.questionstar.com/2dbbf159>. Datum des Zugriffs: 05.01.2022

<sup>8</sup> HE, X. et al.: Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces S. 5

<sup>9</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5718774/>. Datum des Zugriffs: 21.01.2022



Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



**Fragen bei AUSGESCHALTETEM Belüftungssystem und GEKIPPTEN Fenster (3)**

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und gekippten Fenster?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter
 ☐ Ein bisschen kühler
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen wärmer
 ☐ Wärmer

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und gekippten Fenster?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar
 ☐ Sehr schwach
 ☐ schwach
 ☐ stark
 ☐ Sehr stark

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer
 ☐ Ein bisschen schwächer
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen stärker
 ☐ Stärker

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und gekippten Fenster?**

- ☐ Sehr leise
 ☐ Leise
 ☐ Neutral
 ☐ Laut
 ☐ Sehr laut

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit gekipptem Fenster und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher
 ☐ Etwas unsicher
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas sicher
 ☐ Sicher

**Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)**

- ☐ Nein
 ☐ Ja ..... ausgezogen
 ☐ Ja ..... angezogen

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau

**Offene Fragen****Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Optik/Design)? (Mehrfachauswahl)**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Aufwertung für den Klassenraum    | <input type="checkbox"/> Sehr auffallend bzw. ablenkend |
| <input type="checkbox"/> Könnte mehr Farbe vertragen       | <input type="checkbox"/> Nicht auffallend bzw. Neutral  |
| <input type="checkbox"/> Futuristisch und modern           | <input type="checkbox"/> Wirkt bedrückend und trist     |
| <input type="checkbox"/> Wirkt innovativ                   | <input type="checkbox"/> Gefällt gut, weil.....         |
| <input type="checkbox"/> Fügt sich gut ins Klassenbild ein | <input type="checkbox"/> Gefällt gar nicht, weil.....   |

**Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Licht- und Sichtverhältnisse)?**

- |  |                                  |  |
|--|----------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Positiv beeinflusst | <input type="checkbox"/> Neutral | <input type="checkbox"/> Störend, weil ..... |
|--|----------------------------------|--|

**Möchten Sie etwas hinzufügen, dass oben in Bezug auf Ihren thermischen Komfort (Wohlbefinden) noch nicht besprochen wurde?****Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihren akustischen Komfort (Lautstärke) noch nicht besprochen wurde?****Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihr Sicherheitsempfinden (in Bezug auf Covid-19) noch nicht besprochen wurde?**

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



## Umfrage zur thermischen Behaglichkeit bezüglich dem Covid-19 Lüftungssystem

Im Zuge dieser Umfrage wird die Behaglichkeit von Personen in Räumen mit einer Covid-19 Lüftungsanlage untersucht. Dabei wird zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage verglichen und ob sich der Komfort der Personen verbessert oder verschlechtert.

„Sämtliche von Ihnen in der Online-Befragung gemachten Angaben werden vertraulich und unter Einhaltung der gesetzlichen Datenschutzbestimmungen gemäß der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) behandelt. Die Antworten im Fragebogen werden ausschließlich im Rahmen des CovEd-19 Projekts verwendet. Personenbezogene Daten werden nicht an Dritte und an der Umfrage nicht beteiligte Personen bzw. Institutionen weitergegeben. Die Teilnahme an der Befragung ist freiwillig und anonym. Rückschlüsse auf die Personen der Teilnehmenden sind nicht möglich und auch nicht beabsichtigt. Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgemäß, es gibt keine falschen Antworten.“<sup>1</sup>

### Screening Fragen

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

### Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>2,3</sup> (Mehrfachauswahl)

#### Oberkörper:

<input type="checkbox"/> Ärmellose Weste	0.06
<input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt	0.08
<input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt	0.25
<input type="checkbox"/> Pullover	0.28
<input type="checkbox"/> Kurzes Kleid	0.33
<input type="checkbox"/> Langes Kleid	0.47
<input type="checkbox"/> Jacke/Mantel	0.48
<input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl	0.20

#### Sonstiges:

<input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab	0,01
<input type="checkbox"/> Warme Wintermütze	0,03
<input type="checkbox"/> Schal	0,01

#### Unterkörper:

<input type="checkbox"/> Kurze Hose	0.08
<input type="checkbox"/> Hose (dünn)	0.24
<input type="checkbox"/> Hose (dick)	0.28
<input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock	0.14
<input type="checkbox"/> Winterlicher Rock	0.23
<input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche	0.20

#### Füße:

<input type="checkbox"/> Socken	0.02
<input type="checkbox"/> Schuhe	0.04
<input type="checkbox"/> Stiefel	0.10

#### Beispiele: ↘



Person A trägt z.B.:  
☒ Langärmeliges T-Shirt  
☒ Winterlicher Rock  
☒ Lange Unterwäsche  
☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:  
☒ Kurzärmeliges T-Shirt  
☒ Kurze Hose  
☒ Socken  
☒ Schuhe

#### Sitzplatz:

- A-F: A ist die vorderste Reihe, bis F ist die hinterste Reihe
- 1-8: 1 ist die Person in einer Reihe, die dem Fenster am nächsten ist. 8 ist die Person, die am weitesten vom Fenster entfernt ist.

#### Sitzplatznummer:

<sup>1</sup> <https://survey.questionstar.com/2dbbf159>. Datum des Zugriffs: 05.01.2022

<sup>2</sup> HE, X. et al.: Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces S. 5

<sup>3</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5718774/>. Datum des Zugriffs: 21.01.2022

Abbildung 100: Fragebogen Klasse 7.C

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



**Fragen bei EINGESCHALTETEM Lüftungssystem und EINEM GEKIPPTEN Fenster (1)**

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei eingeschaltetem Lüftungssystem und einem gekippten Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter
 ☐ Ein bisschen kühler
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen wärmer
 ☐ Wärmer

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar
 ☐ Sehr schwach
 ☐ schwach
 ☐ stark
 ☐ Sehr stark

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer
 ☐ Ein bisschen schwächer
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen stärker
 ☐ Stärker

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Sehr leise
 ☐ Leise
 ☐ Neutral
 ☐ Laut
 ☐ Sehr laut

**6. Fühlen Sie sich weniger oder mehr konzentriert bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Viel weniger
 ☐ Etwas weniger
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas mehr
 ☐ Mehr

**7. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich des Infektionsrisikos) fühlen Sie sich im Klassenraum mit einem geöffneten Fenstern und bei eingeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher
 ☐ Etwas unsicher
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas sicher
 ☐ Sicher

**8. In Anbetracht der oben aufgelisteten Faktoren, bevorzugen Sie es den Tag mit ausgeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen oder bevorzugen Sie es den Tag mit eingeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen?**

- ☐ Ich bevorzuge es mit AUSgeschaltetem Lüftungssystem
 ☐ Ich bevorzuge es mit EINGeschaltetem Lüftungssystem

**Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)**

- ☐ Nein
 ☐ Ja ..... ausgezogen
 ☐ Ja ..... angezogen

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



## Umfrage zur thermischen Behaglichkeit bezüglich dem Covid-19 Lüftungssystem

Im Zuge dieser Umfrage wird die Behaglichkeit von Personen in Räumen mit einer Covid-19 Lüftungsanlage untersucht. Dabei wird zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage verglichen und ob sich der Komfort der Personen verbessert oder verschlechtert.

„Sämtliche von Ihnen in der Online-Befragung gemachten Angaben werden vertraulich und unter Einhaltung der gesetzlichen Datenschutzbestimmungen gemäß der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) behandelt. Die Antworten im Fragebogen werden ausschließlich im Rahmen des CovEd-19 Projekts verwendet. Personenbezogene Daten werden nicht an Dritte und an der Umfrage nicht beteiligte Personen bzw. Institutionen weitergegeben. Die Teilnahme an der Befragung ist freiwillig und anonym. Rückschlüsse auf die Personen der Teilnehmenden sind nicht möglich und auch nicht beabsichtigt. Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgemäß, es gibt keine falschen Antworten.“<sup>4</sup>

### Screening Fragen

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

### Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>5 6</sup> (Mehrfachauswahl)

#### Oberkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Ärmellose Weste       | 0.06 |
| <input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt | 0.25 |
| <input type="checkbox"/> Pullover              | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Kurzes Kleid          | 0.33 |
| <input type="checkbox"/> Langes Kleid          | 0.47 |
| <input type="checkbox"/> Jacke/Mantel          | 0.48 |
| <input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl   | 0.20 |

#### Sonstiges:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab | 0,01 |
| <input type="checkbox"/> Warme Wintermütze | 0,03 |
| <input type="checkbox"/> Schal             | 0,01 |

#### Unterkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Kurze Hose        | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dünn)       | 0.24 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dick)       | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock | 0.14 |
| <input type="checkbox"/> Winterlicher Rock | 0.23 |
| <input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche | 0.20 |

#### Füße:

- |                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Socken  | 0.02 |
| <input type="checkbox"/> Schuhe  | 0.04 |
| <input type="checkbox"/> Stiefel | 0.10 |

#### Beispiele:



Person A trägt z.B.:  
☒ Langärmeliges T-Shirt  
☒ Winterlicher Rock  
☒ Lange Unterwäsche  
☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:  
☒ Kurzärmeliges T-Shirt  
☒ Kurze Hose  
☒ Socken  
☒ Schuhe

#### Sitzplatz:

- **A-F:** A ist die vorderste Reihe, bis F ist die hinterste Reihe
- **1-8:** 1 ist die Person in einer Reihe, die dem Fenster am nächsten ist. 8 ist die Person, die am weitesten vom Fenster entfernt ist.

**Sitzplatznummer:**

<sup>4</sup> <https://survey.questionstar.com/2dbbf159>. Datum des Zugriffs: 05.01.2022

<sup>5</sup> HE, X. et al.: Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces S. 5

<sup>6</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5718774/>. Datum des Zugriffs: 21.01.2022

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



**Fragen bei AUSGESCHALTETEM Belüftungssystem und GESCHLOSSENEN Fenstern (2)**

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und geschlossenen Fenstern?**

- ☐ Kühl
 ☐ Ein bisschen kühl
 ☐ Neutral
 ☐ Ein bisschen warm
 ☐ Warm

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter
 ☐ Ein bisschen kühler
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen wärmer
 ☐ Wärmer

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar
 ☐ Sehr schwach
 ☐ schwach
 ☐ stark
 ☐ Sehr stark

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer
 ☐ Ein bisschen schwächer
 ☐ Keine Änderung
 ☐ Ein bisschen stärker
 ☐ Stärker

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Sehr leise
 ☐ Leise
 ☐ Neutral
 ☐ Laut
 ☐ Sehr laut

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit geschlossenen Fenstern und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher
 ☐ Etwas unsicher
 ☐ Neutral
 ☐ Etwas sicher
 ☐ Sicher

**Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)**

- ☐ Nein
 ☐ Ja ..... ausgezogen
 ☐ Ja ..... angezogen



Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau



## Umfrage zur thermischen Behaglichkeit bezüglich dem Covid-19 Lüftungssystem

Im Zuge dieser Umfrage wird die Behaglichkeit von Personen in Räumen mit einer Covid-19 Lüftungsanlage untersucht. Dabei wird zwischen ein- und ausgeschalteter Lüftungsanlage verglichen und ob sich der Komfort der Personen verbessert oder verschlechtert.

„Sämtliche von Ihnen in der Online-Befragung gemachten Angaben werden vertraulich und unter Einhaltung der gesetzlichen Datenschutzbestimmungen gemäß der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) behandelt. Die Antworten im Fragebogen werden ausschließlich im Rahmen des CovEd-19 Projekts verwendet. Personenbezogene Daten werden nicht an Dritte und an der Umfrage nicht beteiligte Personen bzw. Institutionen weitergegeben. Die Teilnahme an der Befragung ist freiwillig und anonym. Rückschlüsse auf die Personen der Teilnehmenden sind nicht möglich und auch nicht beabsichtigt. Bitte beantworten Sie die Fragen wahrheitsgemäß, es gibt keine falschen Antworten.“<sup>7</sup>

### Screening Fragen

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: ☐ Männlich ☐ Weiblich ☐ Nicht- binär ☐ Sonstiges

### Welche Kleidungsstücke tragen Sie im Moment?<sup>8 9</sup> (Mehrfachauswahl)

#### Oberkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Ärmellose Weste       | 0.06 |
| <input type="checkbox"/> Kurzärmeliges T-Shirt | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Langärmeliges T-Shirt | 0.25 |
| <input type="checkbox"/> Pullover              | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Kurzes Kleid          | 0.33 |
| <input type="checkbox"/> Langes Kleid          | 0.47 |
| <input type="checkbox"/> Jacke/Mantel          | 0.48 |
| <input type="checkbox"/> Langes Unterleiberl   | 0.20 |

#### Sonstiges:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Mütze, Hut, Hijab | 0,01 |
| <input type="checkbox"/> Warme Wintermütze | 0,03 |
| <input type="checkbox"/> Schal             | 0,01 |

#### Unterkörper:

- |  |      |
|--|------|
| <input type="checkbox"/> Kurze Hose        | 0.08 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dünn)       | 0.24 |
| <input type="checkbox"/> Hose (dick)       | 0.28 |
| <input type="checkbox"/> Sommerlicher Rock | 0.14 |
| <input type="checkbox"/> Winterlicher Rock | 0.23 |
| <input type="checkbox"/> Lange Unterwäsche | 0.20 |

#### Füße:

- |                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <input type="checkbox"/> Socken  | 0.02 |
| <input type="checkbox"/> Schuhe  | 0.04 |
| <input type="checkbox"/> Stiefel | 0.10 |

#### Beispiele:



Person A trägt z.B.:  
☒ Langärmeliges T-Shirt  
☒ Winterlicher Rock  
☒ Lange Unterwäsche  
☒ Schuhe



Person B trägt z.B.:  
☒ Kurzärmeliges T-Shirt  
☒ Kurze Hose  
☒ Socken  
☒ Schuhe

#### Sitzplatz:

- **A-F:** A ist die vorderste Reihe, bis F ist die hinterste Reihe
- **1-8:** 1 ist die Person in einer Reihe, die dem Fenster am nächsten ist. 8 ist die Person, die am weitesten vom Fenster entfernt ist.

#### Sitzplatznummer:

<sup>7</sup> <https://survey.questionstar.com/2dbbf159>. Datum des Zugriffs: 05.01.2022

<sup>8</sup> HE, X. et al.: Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces S. 5

<sup>9</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5718774/>. Datum des Zugriffs: 21.01.2022

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau

**Fragen bei AUSGESCHALTETEM Belüftungssystem und zuvor OFFENEN Fenstern (3)**

**1. Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und zuvor offenen Fenstern?**

- ☐ Kühl      ☐ Ein bisschen kühl      ☐ Neutral      ☐ Ein bisschen warm      ☐ Warm

**2. Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?**

- ☐ Kälter      ☐ Ein bisschen kühler      ☐ Keine Änderung      ☐ Ein bisschen wärmer      ☐ Wärmer

**3. Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und zuvor offenen Fenstern?**

- ☐ Nicht wahrnehmbar      ☐ Sehr schwach      ☐ schwach      ☐ stark      ☐ Sehr stark

**4. Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?**

- ☐ Schwächer      ☐ Ein bisschen schwächer      ☐ Keine Änderung      ☐ Ein bisschen stärker      ☐ Stärker

**5. Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ausgeschaltetem Lüftungssystem und zuvor offenen Fenstern?**

- ☐ Sehr leise      ☐ Leise      ☐ Neutral      ☐ Laut      ☐ Sehr laut

**6. In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit zuvor offenen Fenstern und bei ausgeschaltetem Lüftungssystem?**

- ☐ Unsicher      ☐ Etwas unsicher      ☐ Neutral      ☐ Etwas sicher      ☐ Sicher

**Haben Sie während diesem Belüftungsszenarios ein oder mehrere Kleidungsstücke aus- bzw. angezogen? (z.B.: Pullover ausgezogen oder Jacke darüber gezogen etc.)**

- ☐ Nein      ☐ Ja ..... ausgezogen      ☐ Ja ..... angezogen



Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau

**Offene Fragen****Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Optik/Design)? (Mehrfachauswahl)**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Aufwertung für den Klassenraum    | <input type="checkbox"/> Sehr auffallend bzw. ablenkend |
| <input type="checkbox"/> Könnte mehr Farbe vertragen       | <input type="checkbox"/> Nicht auffallend bzw. Neutral  |
| <input type="checkbox"/> Futuristisch und modern           | <input type="checkbox"/> Wirkt bedrückend und trist     |
| <input type="checkbox"/> Wirkt innovativ                   | <input type="checkbox"/> Gefällt gut, weil.....         |
| <input type="checkbox"/> Fügt sich gut ins Klassenbild ein | <input type="checkbox"/> Gefällt gar nicht, weil.....   |

**Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Licht- und Sichtverhältnisse)?**

- |  |                                  |  |
|--|----------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Positiv beeinflusst | <input type="checkbox"/> Neutral | <input type="checkbox"/> Störend, weil ..... |
|--|----------------------------------|--|

**Möchten Sie etwas hinzufügen, dass oben in Bezug auf Ihren thermischen Komfort (Wohlbefinden) noch nicht besprochen wurde?**

**Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihren akustischen Komfort (Lautstärke) noch nicht besprochen wurde?**

**Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihr Sicherheitsempfinden (in Bezug auf Covid-19) noch nicht besprochen wurde?**

Tabelle 28: Klasse 8.B, Excel gesamte Fragebogenauswertung

Szenario 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ...?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kühl	Ein bisschen kühl	Neutral	Ein bisschen warm	Warm	
1	A1	17	W	x					
2	A3	17	W	x					
3	B1	17	W	x					
4	B2	18	W	x					
5	B3	17	W		x				
6	B4	18	W		x				
7	C1	20	M	x					
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M			x			
10	C4	18	M			x			
11	C5	17	W		x				
12	D1	19	W	x					
13	D3	18	W			x			
Ergebnis				6	3	4	0	0	
Szenario 2: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ...?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kühl	Ein bisschen kühl	Neutral	Ein bisschen warm	Warm	
1	A1	17	W			x			
2	A3	17	W				x		
3	B1	17	W			x			
4	B2	18	W				x		
5	B3	17	W		x				
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M		x				
8	C2	17	M				x		
9	C3	17	M				x		
10	C4	18	M				x		
11	C5	17	W			x			
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W					x	
Ergebnis				0	2	5	5	1	
Szenario 3: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ...?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kühl	Ein bisschen kühl	Neutral	Ein bisschen warm	Warm	
1	A1	17	W		x				
2	A3	17	W			x			
3	B1	17	W			x			
4	B2	18	W			x			
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M			x			
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M			x			
10	C4	18	M				x		
11	C5	17	W			x			
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W		x				
Ergebnis				0	2	10	1	0	
Szenario 1: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ...?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Nicht wahrnehmbar	Sehr schwach	schwach	stark	Sehr stark	
1	A1	17	W				x		
2	A3	17	W				x		
3	B1	17	W				x		
4	B2	18	W				x		
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M			x			
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M	x					
10	C4	18	M	x					
11	C5	17	W				x		
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W			x			
Ergebnis				3	0	5	5	0	
Szenario 2: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ...?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Nicht wahrnehmbar	Sehr schwach	schwach	stark	Sehr stark	
1	A1	17	W	x					
2	A3	17	W			x			
3	B1	17	W	x					
4	B2	18	W	x					
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W	x					
7	C1	20	M	x					
8	C2	17	M	x					
9	C3	17	M	x					
10	C4	18	M	x					
11	C5	17	W	x					
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W			x			
Ergebnis				9	0	4	0	0	
Szenario 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ...?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Nicht wahrnehmbar	Sehr schwach	schwach	stark	Sehr stark	
1	A1	17	W			x			
2	A3	17	W		x				
3	B1	17	W		x				
4	B2	18	W		x				
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M	x					
8	C2	17	M	x					
9	C3	17	M		x				
10	C4	18	M		x				
11	C5	17	W						
12	D1	19	W	x					
13	D3	18	W			x			
Ergebnis				3	7	3	0	0	
Szenario 1: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kälter	Ein bisschen kühler	keine Änderung	Ein bisschen wärmer	Wärmer	
1	A1	17	W			x			x
2	A3	17	W			x			x
3	B1	17	W			x			x
4	B2	18	W			x			x
5	B3	17	W				x		x
6	B4	18	W				x		x
7	C1	20	M					x	
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M		x				
10	C4	18	M		x				
11	C5	17	W			x			
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W		x				
Ergebnis				0	3	1	3	6	
Szenario 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kälter	Ein bisschen kühler	keine Änderung	Ein bisschen wärmer	Wärmer	
1	A1	17	W			x			
2	A3	17	W			x			
3	B1	17	W			x			
4	B2	18	W			x			
5	B3	17	W				x		
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M				x		
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M		x				
10	C4	18	M	x					
11	C5	17	W			x			
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W	x					
Ergebnis				2	1	8	2	0	
Szenario 3: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kälter	Ein bisschen kühler	keine Änderung	Ein bisschen wärmer	Wärmer	
1	A1	17	W			x			
2	A3	17	W		x				
3	B1	17	W			x			
4	B2	18	W			x			
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M				x		
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M			x			
10	C4	18	M		x				
11	C5	17	W			x			
12	D1	19	W			x			
13	D3	18	W		x				
Ergebnis				0	3	9	1	0	
Szenario 1: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Schwächer	Ein bisschen schwächer	keine Änderung	Ein bisschen stärker	Stärker	
1	A1	17	W		x				
2	A3	17	W	x					
3	B1	17	W	x					
4	B2	18	W	x					
5	B3	17	W		x				
6	B4	18	W			x			
7	C1	20	M		x				
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M			x			
10	C4	18	M			x			
11	C5	17	W	x					
12	D1	19	W		x				
13	D3	18	W			x			
Ergebnis				4	4	5	0	0	
Szenario 2: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Schwächer	Ein bisschen schwächer	keine Änderung	Ein bisschen stärker	Stärker	
1	A1	17	W			x			
2	A3	17	W			x			
3	B1	17	W			x			
4	B2	18	W			x			
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W				x		
7	C1	20	M			x			
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M				x		
10	C4	18	M				x		
11	C5	17	W				x		
12	D1	19	W				x		
13	D3	18	W				x		
Ergebnis				0	0	7	5	1	
Szenario 3: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?									
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Schwächer	Ein bisschen schwächer	keine Änderung	Ein bisschen stärker	Stärker	
1	A1	17	W			x			
2	A3	17	W			x			
3	B1	17	W			x			
4	B2	18	W			x			
5	B3	17	W			x			
6	B4	18	W				x		
7	C1	20	M			x			
8	C2	17	M			x			
9	C3	17	M			x			
10	C4	18	M				x		
11	C5	17	W				x		
12	D1	19	W				x		
13	D3	18	W				x		
Ergebnis				0	0	11	2	0	

Szenario 1: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Sehr leise	Leise	Neutral	Laut	Sehr laut
1	A1	17	W				x	
2	A3	17	W					x
3	B1	17	W				x	
4	B2	18	W				x	
5	B3	17	W			x		
6	B4	18	W			x		
7	C1	20	M				x	
8	C2	17	M		x			
9	C3	17	M		x			
10	C4	18	M		x			
11	C5	17	W				x	
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W				x	
Ergebnis				0	3	3	6	1

Szenario 2: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Sehr leise	Leise	Neutral	Laut	Sehr laut
1	A1	17	W			x		
2	A3	17	W			x		
3	B1	17	W			x		
4	B2	18	W		x			
5	B3	17	W			x		
6	B4	18	W			x		
7	C1	20	M	x				
8	C2	17	M	x				
9	C3	17	M	x				
10	C4	18	M	x				
11	C5	17	W		x			
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W	x				
Ergebnis				5	2	6	0	0

Szenario 3: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Sehr leise	Leise	Neutral	Laut	Sehr laut
1	A1	17	W			x		
2	A3	17	W			x		
3	B1	17	W			x		
4	B2	18	W		x			
5	B3	17	W			x		
6	B4	18	W			x		
7	C1	20	M		x			
8	C2	17	M	x				
9	C3	17	M	x				
10	C4	18	M	x				
11	C5	17	W			x		
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W			x		
Ergebnis				3	2	8	0	0

Szenario 1: Fühlen Sie sich weniger oder mehr konzentriert bei eingeschaltetem Lüftungssystem?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Weniger	Etwas weniger	Neutral	Etwas mehr	Mehr
1	A1	17	W		x			
2	A3	17	W	x				
3	B1	17	W	x				
4	B2	18	W	x				
5	B3	17	W		x			
6	B4	18	W			x		
7	C1	20	M			x		
8	C2	17	M			x		
9	C3	17	M				x	
10	C4	18	M			x		
11	C5	17	W		x			
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W		x			
Ergebnis				3	4	5	1	0

Szenario 1: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Unsicher	Etwas Unsicher	Neutral	Etwas sicher	Sicher
1	A1	17	W			x		
2	A3	17	W			x		
3	B1	17	W			x		
4	B2	18	W			x		
5	B3	17	W				x	
6	B4	18	W			x		
7	C1	20	M			x		
8	C2	17	M				x	
9	C3	17	M				x	
10	C4	18	M			x		
11	C5	17	W				x	
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W			x		
Ergebnis				0	0	9	4	0

Szenario 2: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Unsicher	Etwas Unsicher	Neutral	Etwas sicher	Sicher
1	A1	17	W		x			
2	A3	17	W			x		
3	B1	17	W			x		
4	B2	18	W			x		
5	B3	17	W		x			
6	B4	18	W			x		
7	C1	20	M			x		
8	C2	17	M			x		
9	C3	17	M			x		
10	C4	18	M			x		
11	C5	17	W			x		
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W		x			
Ergebnis				0	3	10	0	0

Szenario 3: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Unsicher	Etwas Unsicher	Neutral	Etwas sicher	Sicher
1	A1	17	W			x		
2	A3	17	W			x		
3	B1	17	W			x		
4	B2	18	W			x		
5	B3	17	W				x	
6	B4	18	W				x	
7	C1	20	M			x		
8	C2	17	M			x		
9	C3	17	M			x		
10	C4	18	M			x		
11	C5	17	W				x	
12	D1	19	W			x		
13	D3	18	W		x			
Ergebnis				0	0	9	4	0

Szenario 1: Bevorzugen Sie es den Tag mit ausgeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen oder bevorzugen Sie es den Tag mit eingeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Ich bevorzuge es mit AUSgeschaltetem Lüftungssystem	Ich bevorzuge es mit EINgeschaltetem Lüftungssystem			
1	A1	17	W	x				
2	A3	17	W	x				
3	B1	17	W	x				
4	B2	18	W	x				
5	B3	17	W	x				
6	B4	18	W	x				
7	C1	20	M	x				
8	C2	17	M			x		
9	C3	17	M			x		
10	C4	18	M			x		
11	C5	17	W	x				
12	D1	19	W	x				
13	D3	18	W	x				
Ergebnis				10	3			

Tabelle 29: Klasse 7.C, Excel gesamte Fragebogenauswertung

Szenario 1: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ...?									Szenario 1: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kühl	Ein bisschen kühl	Neutral	Ein bisschen warm	Warm	Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kälter	Ein bisschen kühler	keine Änderung	Ein bisschen wärmer	Wärmer
1	A1	16	W		x	x			1	A1	16	W			x		
2	A2	16	W						2	A2	16	W			x		
3	A3	17	W			x			3	A3	17	W			x		
4	A4	17	W		x				4	A4	17	W				x	
5	A5	16	W			x			5	A5	16	W			x		
6	B1	16	M			x			6	B1	16	M		x			
7	B2	17	M			x			7	B2	17	M		x			
8	B3	17	W		x				8	B3	17	W				x	
9	B4	17	M			x			9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x			10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W			x			11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W			x			12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W			x			13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x			14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W		x				15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W			x			16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W				x		17	D2	17	W		x			
18	D3	16	NB			x			18	D3	16	NB			x		
19	D4	17	NB			x			19	D4	17	NB			x		
20	D5	18	W	x					20	D5	18	W				x	
21	E1	17	M		x				21	E1	17	M			x		
22	E2	17	NB				x		22	E2	17	NB		x			
23	E3	16	M				x		23	E3	16	M		x			
24	E4	17	W			x			24	E4	17	W			x		
Ergebnis				1	5	15	3	0	Ergebnis				0	5	16	3	0
Szenario 2: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ...?									Szenario 2: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kühl	Ein bisschen kühl	Neutral	Ein bisschen warm	Warm	Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kälter	Ein bisschen kühler	keine Änderung	Ein bisschen wärmer	Wärmer
1	A1	16	W				x		1	A1	16	W		x			
2	A2	16	W			x			2	A2	16	W		x			
3	A3	17	W			x			3	A3	17	W		x			
4	A4	17	W				x		4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W				x		5	A5	16	W		x			
6	B1	16	M					x	6	B1	16	M	x				
7	B2	17	M				x		7	B2	17	M		x			
8	B3	17	W			x			8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M			x			9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x			10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W				x		11	C1	17	W		x			
12	C2	17	W				x		12	C2	17	W		x			
13	C3	16	W			x			13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x			14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W			x			15	C5	17	W		x			
16	D1	17	W			x			16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W				x		17	D2	17	W		x			
18	D3	16	NB				x		18	D3	16	NB		x			
19	D4	17	NB			x			19	D4	17	NB		x			
20	D5	18	W			x			20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M			x			21	E1	17	M			x		
22	E2	17	NB				x		22	E2	17	NB		x			
23	E3	16	M					x	23	E3	16	M	x				
24	E4	17	W			x			24	E4	17	W			x		
Ergebnis				0	0	12	10	2	Ergebnis				2	12	10	0	0
Szenario 3: Wie empfinden Sie die Raumtemperatur bei ...?									Szenario 3: Wie würden Sie die Raumtemperatur bevorzugen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kühl	Ein bisschen kühl	Neutral	Ein bisschen warm	Warm	Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Kälter	Ein bisschen kühler	keine Änderung	Ein bisschen wärmer	Wärmer
1	A1	16	W			x			1	A1	16	W			x		
2	A2	16	W			x			2	A2	16	W		x			
3	A3	17	W			x			3	A3	17	W			x		
4	A4	17	W			x			4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W				x		5	A5	16	W		x			
6	B1	16	M					x	6	B1	16	M	x				
7	B2	17	M			x			7	B2	17	M		x			
8	B3	17	W			x			8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M			x			9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x			10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W				x		11	C1	17	W		x			
12	C2	17	W			x			12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W			x			13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x			14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W	x					15	C5	17	W				x	
16	D1	17	W			x			16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x			17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB				x		18	D3	16	NB		x			
19	D4	17	NB			x			19	D4	17	NB		x			
20	D5	18	W						20	D5	18	W					
21	E1	17	M				x		21	E1	17	M			x		
22	E2	17	NB			x			22	E2	17	NB			x		
23	E3	16	M			x			23	E3	16	M		x			
24	E4	17	W			x			24	E4	17	W		x			
Ergebnis				1	0	18	4	1	Ergebnis				1	0	18	1	0

Szenario 1: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Nicht wahrnehmbar	Sehr schwach	schwach	stark	Sehr stark
1	A1	16	W		x			
2	A2	16	W		x			
3	A3	17	W		x			
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W		x			
6	B1	16	M		x			
7	B2	17	M		x			
8	B3	17	W		x			
9	B4	17	M		x			
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W		x			
14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W	x				
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W				x	
18	D3	16	NB	x				
19	D4	17	NB		x	x		
20	D5	18	W					
21	E1	17	M	x				
22	E2	17	NB	x				
23	E3	16	M	x				
24	E4	17	W	x				
Ergebnis				6	10	7	1	0

Szenario 2: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Nicht wahrnehmbar	Sehr schwach	schwach	stark	Sehr stark
1	A1	16	W	x				
2	A2	16	W	x				
3	A3	17	W	x				
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W	x				
6	B1	16	M	x				
7	B2	17	M	x				
8	B3	17	W	x				
9	B4	17	M	x				
10	B5	17	W	x				
11	C1	17	W		x			
12	C2	17	W		x			
13	C3	16	W	x				
14	C4	17	W	x				
15	C5	17	W	x				
16	D1	17	W	x				
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB	x				
19	D4	17	NB		x			
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M	x				
22	E2	17	NB	x				
23	E3	16	M	x				
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				17	3	4	0	0

Szenario 3: Wie empfinden Sie den Luftzug im Raum bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Nicht wahrnehmbar	Sehr schwach	schwach	stark	Sehr stark
1	A1	16	W	x				
2	A2	16	W	x				
3	A3	17	W			x		
4	A4	17	W		x			
5	A5	16	W			x		
6	B1	16	M	x				
7	B2	17	M		x			
8	B3	17	W					
9	B4	17	M	x				
10	B5	17	W	x				
11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W	x				
14	C4	17	W	x				
15	C5	17	W				x	
16	D1	17	W	x				
17	D2	17	W				x	
18	D3	16	NB	x				
19	D4	17	NB			x		
20	D5	18	W					
21	E1	17	M					
22	E2	17	NB	x				
23	E3	16	M	x				
24	E4	17	W	x				
Ergebnis				13	2	6	3	0

Szenario 1: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Schwächer	Ein bisschen schwächer	keine Änderung	Ein bisschen stärker	Stärker
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W					x
3	A3	17	W			x		
4	A4	17	W		x			
5	A5	16	W			x		
6	B1	16	M			x		
7	B2	17	M				x	
8	B3	17	W	x				
9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W		x			
13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W		x			
18	D3	16	NB			x		
19	D4	17	NB			x		
20	D5	18	W				x	
21	E1	17	M			x		
22	E2	17	NB			x		
23	E3	16	M				x	
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				1	3	16	4	0

Szenario 2: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Schwächer	Ein bisschen schwächer	keine Änderung	Ein bisschen stärker	Stärker
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W					x
3	A3	17	W				x	
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W				x	
6	B1	16	M					x
7	B2	17	M					x
8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W				x	
12	C2	17	W					x
13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB			x		
19	D4	17	NB				x	
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M			x		
22	E2	17	NB				x	
23	E3	16	M					x
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				0	0	14	6	4

Szenario 3: Wie würden Sie den Luftzug im Raum bevorzugen?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Schwächer	Ein bisschen schwächer	keine Änderung	Ein bisschen stärker	Stärker
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W					x
3	A3	17	W		x			
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W				x	
6	B1	16	M					x
7	B2	17	M			x		
8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W				x	
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W		x			
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W		x			
18	D3	16	NB			x		
19	D4	17	NB				x	
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M			x		
22	E2	17	NB			x		
23	E3	16	M				x	
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				0	3	14	5	2

Szenario 1: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Sehr leise	Leise	Neutral	Laut	Sehr laut
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W				x	
3	A3	17	W					x
4	A4	17	W				x	
5	A5	16	W				x	
6	B1	16	M			x		
7	B2	17	M		x			
8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M				x	
10	B5	17	W				x	
11	C1	17	W				x	
12	C2	17	W				x	
13	C3	16	W				x	
14	C4	17	W				x	
15	C5	17	W				x	
16	D1	16	W				x	
17	D2	17	W		x			
18	D3	16	NB				x	
19	D4	17	NB				x	
20	D5	18	W				x	
21	E1	17	M				x	
22	E2	17	NB				x	
23	E3	16	M				x	
24	E4	17	W				x	
Ergebnis				0	2	2	19	1

Szenario 2: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Sehr leise	Leise	Neutral	Laut	Sehr laut
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W		x			
3	A3	17	W		x			
4	A4	17	W				x	
5	A5	16	W				x	
6	B1	16	M	x				
7	B2	17	M	x				
8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M	x				
10	B5	17	W	x				
11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W		x			
13	C3	16	W		x			
14	C4	17	W		x			
15	C5	17	W		x			
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB		x			
19	D4	17	NB		x			
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M	x				
22	E2	17	NB	x				
23	E3	16	M		x			
24	E4	17	W	x				
Ergebnis				7	9	5	3	0

Szenario 3: Wie empfinden Sie die Raumakustik (Lautstärke der Hintergrundgeräusche im Raum) bei ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Sehr leise	Leise	Neutral	Laut	Sehr laut
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W			x		
3	A3	17	W		x			
4	A4	17	W		x			
5	A5	16	W				x	
6	B1	16	M	x				
7	B2	17	M			x		
8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M	x				
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W	x				
14	C4	17	W	x				
15	C5	17	W				x	
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB		x			
19	D4	17	NB			x		
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M		x			
22	E2	17	NB	x				
23	E3	16	M		x			
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				5	5	11	3	0

Szenario 1: Fühlen Sie sich weniger oder mehr konzentriert bei eingeschaltetem Lüftungssystem?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Weniger	Etwas weniger	Neutral	Etwas mehr	Mehr
1	A1	16	W			x		
2	A2	16	W			x		
3	A3	17	W	x				
4	A4	17	W		x			
5	A5	16	W		x			
6	B1	16	M			x		
7	B2	17	M			x		
8	B3	17	W		x			
9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W		x			
12	C2	17	W		x			
13	C3	16	W		x			
14	C4	17	W		x			
15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W		x			
17	D2	17	W		x			
18	D3	16	NB		x			
19	D4	17	NB		x			
20	D5	18	W		x			
21	E1	17	M		x			
22	E2	17	NB		x			
23	E3	16	M		x			
24	E4	17	W		x			
Ergebnis				1	16	7	0	0

Szenario 1: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Unsicher	Etwas Unsicher	Neutral	Etwas sicher	Sicher
1	A1	16	W				x	
2	A2	16	W			x		
3	A3	17	W				x	
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W			x		
6	B1	16	M			x		
7	B2	17	M			x		
8	B3	17	W				x	
9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W				x	
11	C1	17	W					x
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB				x	
19	D4	17	NB				x	
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M					x
22	E2	17	NB				x	
23	E3	16	M					x
24	E4	17	W		x			
Ergebnis				0	1	16	5	2

Szenario 2: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Unsicher	Etwas Unsicher	Neutral	Etwas sicher	Sicher
1	A1	16	W			x		
2	A2	16	W					
3	A3	17	W			x		
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W			x		
6	B1	16	M			x		
7	B2	17	M					
8	B3	17	W			x		
9	B4	17	M					
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W		x			
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W		x			
14	C4	17	W					
15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB					
19	D4	17	NB			x		
20	D5	18	W			x		
21	E1	17	M					x
22	E2	17	NB			x		
23	E3	16	M					x
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				0	2	20	0	2

Szenario 3: In Bezug auf Covid-19, wie sicher (bezüglich dem Infektionsrisiko) fühlen Sie sich im Klassenraum mit ...?								
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Unsicher	Etwas Unsicher	Neutral	Etwas sicher	Sicher
1	A1	16	W			x		
2	A2	16	W			x		
3	A3	17	W					x
4	A4	17	W			x		
5	A5	16	W			x		
6	B1	16	M			x		
7	B2	17	M			x		
8	B3	17	W				x	
9	B4	17	M			x		
10	B5	17	W			x		
11	C1	17	W			x		
12	C2	17	W			x		
13	C3	16	W			x		
14	C4	17	W			x		
15	C5	17	W			x		
16	D1	17	W			x		
17	D2	17	W			x		
18	D3	16	NB			x		
19	D4	17	NB			x		
20	D5	18	W					
21	E1	17	M					x
22	E2	17	NB				x	
23	E3	16	M					x
24	E4	17	W			x		
Ergebnis				0	0	19	2	3

Szenario 1: Bevorzugen Sie es den Tag mit ausgeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen oder bevorzugen Sie es den Tag mit eingeschaltetem Lüftungssystem zu verbringen?						
Person	Sitzplatz	Altersgruppe	Geschlecht	Ich bevorzuge es mit Ausgeschaltetem Lüftungssystem	Ich bevorzuge es mit Eingeschaltetem Lüftungssystem	
1	A1	16	W			x
2	A2	16	W	x		
3	A3	17	W	x		
4	A4	17	W	x		
5	A5	16	W	x		
6	B1	16	M			x
7	B2	17	M			x
8	B3	17	W	x		
9	B4	17	M	x		
10	B5	17	W	x		
11	C1	17	W	x		
12	C2	17	W	x		
13	C3	16	W	x		
14	C4	17	W	x		
15	C5	17	W	x		
16	D1	17	W	x		
17	D2	17	W	x		
18	D3	16	NB	x		
19	D4	17	NB	x		
20	D5	18	W	x		
21	E1	17	M	x		
22	E2	17	NB	x		
23	E3	16	M	x		
24	E4	17	W	x		
Ergebnis				21		3

Tabelle 30: Offene Fragen im Klassenraum der 8.B

Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Optik/Design)? (Mehrfachauswahl)

Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	17	W	A1	Gefällt nicht, weil sieht aus wie Industriehalle
2	17	W	A3	Berückend/ Sehr auffalend - lenkt ab/ Gefällt nicht, weil es nicht schön ist
3	17	W	B1	Sehr auffalend - lenkt ab/ Gefällt nicht
4	18	W	B2	Sehr auffalend - lenkt ab /Gefällt nicht, weil es nicht gut aussieht
5	17	W	B3	Sehr auffalend - lenkt ab/ Mehr Farbe/modern
6	18	W	B4	Gefällt nicht, weil schaut echt merkwürdig aus
7	20	M	C1	Neutral/ Mehr Farbe
8	17	M	C2	Mehr Farbe/ modern/ Neutral
9	17	M	C3	Modern/ innovativ
10	18	M	C4	Neutral
11	17	W	C5	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab/ bedrückend/ Gefällt nicht, komische Konstruktion
12	19	W	D1	Mehr Farbe/ modern/ Sehr auffalend - lenkt ab
13	18	W	D3	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab

Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Licht- und Sichtverhältnisse)?

Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	17	W	A1	Neutral
2	17	W	A3	Neutral
3	17	W	B1	Neutral
4	18	W	B2	Störend weil, im Blickfeld von Reihe D
5	17	W	B3	Neutral
6	18	W	B4	Neutral
7	20	M	C1	Neutral
8	17	M	C2	Neutral
9	17	M	C3	Neutral
10	18	M	C4	Neutral
11	17	W	C5	Neutral
12	19	W	D1	Neutral
13	18	W	D3	Neutral

Möchten Sie etwas hinzufügen, dass oben in Bezug auf Ihren thermischen Komfort (Wohlbefinden) noch nicht besprochen wurde?

Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	17	W	A1	
2	17	W	A3	
3	17	W	B1	
4	18	W	B2	
5	17	W	B3	
6	18	W	B4	
7	20	M	C1	
8	17	M	C2	
9	17	M	C3	
10	18	M	C4	
11	17	W	C5	
12	19	W	D1	
13	18	W	D3	

Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihren akustischen Komfort (Lautstärke) noch nicht besprochen wurde?

Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	17	W	A1	Auf dauer störend, lenkt ab
2	17	W	A3	Laut
3	17	W	B1	Laut es sinkt die Konzentration bei eingeschaltet Lüftungssystem
4	18	W	B2	
5	17	W	B3	Zu laut bei Schularbeiten
6	18	W	B4	Stört nicht
7	20	M	C1	
8	17	M	C2	
9	17	M	C3	Angenehmes Geräusch/Lautstärke.
10	18	M	C4	
11	17	W	C5	Störend vorallem bei Schularbeiten
12	19	W	D1	
13	18	W	D3	

(in Bezug auf Covid-19) noch nicht besprochen wurde?

Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	17	W	A1	
2	17	W	A3	Fühlt sich nicht sicherer
3	17	W	B1	
4	18	W	B2	
5	17	W	B3	
6	18	W	B4	
7	20	M	C1	
8	17	M	C2	
9	17	M	C3	
10	18	M	C4	
11	17	W	C5	Mit oder ohne gleich sicher
12	19	W	D1	Fensteröffnung am zweiten Kippfenster nicht mehr möglich
13	18	W	D3	Noch weniger Luftzufuhr in den Raum da zweites Kippfenster verbaut



Tabelle 31: Offene Fragen im Klassenraum der 7.C

Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Optik/Design)? (Mehrfachauswahl)				
Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	16	W	A1	Sehr auffalend - lenkt ab
2	16	W	A2	Sehr auffalend - lenkt ab/ bedrückend
3	17	W	A3	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab bedrückend/ gefällt nicht
4	17	W	A4	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab bedrückend/ gefällt nicht zu groß
5	16	W	A5	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab bedrückend/ gefällt nicht zu groß
6	16	M	B1	Modern/ innovativ
7	17	M	B2	Neutral
8	17	W	B3	Sehr auffalend - lenkt ab gefällt nicht zu groß
9	17	M	B4	Neutral/ gefällt nicht sinnlos
10	17	W	B5	Neutral/ gefällt nicht nervig
11	17	W	C1	innovativ/ Sehr auffalend - lenkt ab
12	17	W	C2	Sehr auffalend - lenkt ab bedrückend/
13	16	W	C3	Sehr auffalend - lenkt ab, aber mit der Zeit nimmt das ab
14	17	W	C4	Sehr auffalend - lenkt ab
15	17	W	C5	Mehr Farbe/ modern Sehr auffalend - lenkt ab
16	17	W	D1	Sehr auffalend - lenkt ab bedrückend/
17	17	W	D2	Innovativ/ Sehr auffalend - lenkt ab
18	16	NB	D3	Modern/ innovativ/ Sehr auffalend - lenkt ab/ bedrückend
19	17	NB	D4	Modern/ innovativ/ Sehr auffalend - lenkt ab
20	18	W	D5	Modern/ innovativ/ Sehr auffalend - lenkt ab
21	17	M	E1	Neutral
22	17	NB	E2	Gefällt nicht, weil es Klassenbild passt nicht.
23	16	M	E3	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab
24	17	W	E4	Mehr Farbe/ Sehr auffalend - lenkt ab

Wie empfinden Sie das Belüftungssystem visuell (bezüglich der Licht- und Sichtverhältnisse)?				
Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	16	W	A1	Neutral
2	16	W	A2	Neutral
3	17	W	A3	Störend/ Design verbessern
4	17	W	A4	Störend weil, es lenkt ab
5	16	W	A5	Störend lenkt ab
6	16	M	B1	Neutral
7	17	M	B2	Neutral
8	17	W	B3	Störend
9	17	M	B4	Neutral
10	17	W	B5	Neutral
11	17	W	C1	Neutral
12	17	W	C2	Neutral
13	16	W	C3	Neutral
14	17	W	C4	Störend weil, es hängt zu tief
15	17	W	C5	Neutral
16	17	W	D1	Neutral
17	17	W	D2	Neutral
18	16	NB	D3	Neutral
19	17	NB	D4	Neutral
20	18	W	D5	Neutral
21	17	M	E1	Neutral
22	17	NB	E2	Störend, weil Jalousie wird blockiert
23	16	M	E3	Neutral
24	17	W	E4	Neutral

Möchten Sie etwas hinzufügen, dass oben in Bezug auf Ihren thermischen Komfort (Wohlbefinden) noch nicht besprochen wurde?				
Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	16	W	A1	
2	16	W	A2	
3	17	W	A3	
4	17	W	A4	
5	16	W	A5	
6	16	M	B1	
7	17	M	B2	
8	17	W	B3	
9	17	M	B4	
10	17	W	B5	
11	17	W	C1	
12	17	W	C2	
13	16	W	C3	
14	17	W	C4	Im Winter zu kalt
15	17	W	C5	
16	17	W	D1	
17	17	W	D2	
18	16	NB	D3	Im Winter zu kalt
19	17	NB	D4	
20	18	W	D5	Im Winter zu kalt
21	17	M	E1	
22	17	NB	E2	
23	16	M	E3	
24	17	W	E4	

Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihren akustischen Komfort (Lautstärke) noch nicht besprochen wurde?				
Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	16	W	A1	
2	16	W	A2	
3	17	W	A3	System zu laut/ dauerbeschallung anders als straßenlärm
4	17	W	A4	Viel zu laut
5	16	W	A5	Zu laut
6	16	M	B1	
7	17	M	B2	Störend bei stiller klasse
8	17	W	B3	Dauerndes Störgeräusch
9	17	M	B4	Störend wurde deswegen nicht genutzt
10	17	W	B5	
11	17	W	C1	
12	17	W	C2	
13	16	W	C3	
14	17	W	C4	Störend bei voll abufgedrehten und schularbeiten
15	17	W	C5	
16	17	W	D1	
17	17	W	D2	
18	16	NB	D3	Störend, laut
19	17	NB	D4	Sehr laut
20	18	W	D5	Sehr laut
21	17	M	E1	
22	17	NB	E2	
23	16	M	E3	Generell laut
24	17	W	E4	

Gibt es etwas, das Sie hinzufügen möchten, dass oben in Bezug auf Ihr Sicherheitsempfinden (in Bezug auf Covid-19) noch nicht besprochen wurde?				
Person	Altersgruppe	Geschlecht	Sitzplatz	
1	16	W	A1	Vergessen es einzuschalten
2	16	W	A2	
3	17	W	A3	
4	17	W	A4	Keinen Unterschied
5	16	W	A5	Bringt nichts
6	16	M	B1	
7	17	M	B2	
8	17	W	B3	
9	17	M	B4	
10	17	W	B5	
11	17	W	C1	
12	17	W	C2	
13	16	W	C3	Neutral
14	17	W	C4	
15	17	W	C5	
16	17	W	D1	
17	17	W	D2	
18	16	NB	D3	
19	17	NB	D4	
20	18	W	D5	
21	17	M	E1	
22	17	NB	E2	
23	16	M	E3	
24	17	W	E4	