



APPEAL Engineering

**APPEALING AIR
IN A SUSTAINABLE
BUILDING**



Abschlussbericht

Luftqualitätsmanagement und Umweltmanagement in Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen (LUMUMBA)

Feld	Information
DBU-Aktenzeichen	39229/01
Bewilligungsempfänger	APPEAL Engineering UG (haftungsbeschränkt), Oppenhoffallee 143, 52066 Aachen
Antragsteller / Projektleiter	Prof. Dr. Sascha Nehr (Antragsteller); Dr. Hasan Çınar (Projektleiter bis Oktober 2025)
Förderthema	Instrumente und Kompetenzen der Nachhaltigkeitsbewertung sowie Stärkung von Nachhaltigkeitsbewusstsein und -handeln
Projektlaufzeit	01.02.2024 – 01.02.2026 (24 Monate)
Berichtsdatum	April 2026

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

APPEAL Engineering UG

Oppenhoffallee 143
52066 Aachen

info@appealengineering.com

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	V
Zusammenfassung	VII
1. Einleitung	8
1.1. Problemstellung	8
1.2. Umweltrelevanz	8
1.3. Untersuchungsrahmen	9
1.4. Fragestellung und Zielsetzung	9
2. Projektverlauf, fördernde und hemmende Umstände	10
2.1. Chronologischer Projektverlauf	10
2.2. Fördernde Umstände	10
2.3. Hemmende Umstände	11
3. Grundlagen des Luftqualitäts- und Umweltmanagements	12
3.1. Ausgangssituation	12
3.2. Handlungsfelder	13
3.3. Didaktisches Konzept: Reallaboransatz & Bildung für Nachhaltige Entwicklung	13
3.3.1. Reallabor als wissenschaftliche Methode	13
3.3.2. Verknüpfung von PDCA-Zyklus und Lernzyklus	14
3.3.3. Bezug zu UN Sustainable Development Goals	14
4. Methodisches Vorgehen	15
4.1. Identifikation der Modellräume	15
4.2. Messtechnische Charakterisierung der Modellräume	15
4.3. Beurteilung des Potenzials zur Verbesserung der Raumluftqualität	19
4.4. Beurteilung des Potenzials zur Senkung des Gesamtenergiebedarfs	19
4.5. Ökonomische Bewertung der Krankheitskosten durch unzureichende Raumluftqualität	20
4.6. Simulation von Modellräumen zur Erstellung digitaler Zwillinge	22
4.7. Planung, Installation und Validierung optimierter Lüftungssituationen	22
4.8. Ableitung allgemeiner Anforderungen an ein integriertes Managementsystem	24
4.9. Implementierung der partizipativen Workshops	24
4.9.1. Aufbau und Inhalt der fünf partizipativen Workshops	24
4.9.2. Zielgruppenadaptivität und Ausdifferenzierung des didaktischen Konzepts	26
4.9.3. Das didaktische Konzept als Beitrag zur Nachhaltigkeitsbildung	26
5. Ergebnisse	28
5.1. Erreichung Projektziele	28
5.2. Planungs- und Entscheidungstool für die teilnehmenden Einrichtungen	29
5.2.1. Bewertung der strukturellen Lüftungsvoraussetzungen (IAQ-Aspekt A)	29
5.2.2. CO ₂ -Konzentrationsprofile und IAQ-Kategorienbewertung (IAQ-Aspekt B)	30
5.2.3. Nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme und Energiebewertung (IAQ-Aspekte C und D)	31

5.3.	Neuartiger wissenschaftlicher Ansatz für die Branche der technischen Gebäudeausrüstung	32
5.3.1.	CO ₂ -basierte IAQ-Risikomatrix	32
5.3.2.	Integration in das BIM-basierte Planungswerkzeug	34
5.4.	Generischer Leitfaden zur Steuerung der Innenraumlufthqualität und der Umweltleistung	34
5.5.	Stärkung von Nachhaltigkeitsbewusstsein und -handeln	35
5.6.	Krankheitskosten durch unzureichende Innenraumlufthqualität	36
6.	Nachhaltige Ergebnisverwertung	38
6.1.	Fachöffentlichkeit	38
6.2.	Allgemeine Öffentlichkeit	38
6.3.	Technische Regelsetzung	39
6.3.1.	Beitrag zur Revision der ISO 16000-8 und der VDI 4300-9	39
6.3.2.	Weitere Beiträge zur technischen Regelsetzung	40
7.	Fazit	41
	Literatur	42

Abkürzungsverzeichnis

AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
AP	Arbeitspaket
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BSK	Bundesschülerkonferenz
BIM	Building Information Modeling
BNE	Bildung für nachhaltige Entwicklung
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
DPhV	Deutscher Philologenverband
EN	Europäische Norm
FGK	Fachverband Gebäude-Klima
IAQ	Indoor Air Quality
IAQMS	Indoor Air Quality Management System
ISO	International Organisation for Standardization
KITA	Kindertagesstätte
LUMUMBA	Luftqualitätsmanagement & Umweltmanagement in Bildungs- & Ausbildungseinrichtungen
NDIR	Nichtdispersiver Infrarotsensor
NO ₂	Stickstoffdioxid
O ₃	Ozon
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PM	Particulate Matter
PM _{2,5}	Diejenige Feinstaubfraktion, deren Korngröße kleiner als 2,5 Mikrometer ist
PW	Partizipativer Workshop
SDG	Sustainable Development Goals
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Symbolverzeichnis

A_{tos}	window opening area per occupant; tilted, one-sided ventilation Fensteröffnungsfläche pro Raumnutzer; gekippte, einseitige Belüftung
A_{fos}	window opening area per ground area; fully opened, one-sided ventilation Fensteröffnungsfläche pro Grundfläche; bei vollständiger Öffnung, einseitige Belüftung
A_{tc}	room envelope opening area per occupant; tilted, cross ventilation Raumhüllfläche pro Raumnutzer; Querlüftung
A_{fc}	room envelope opening area per ground area fully opened, cross-ventilation Fensteröffnungsfläche pro Grundfläche bei vollständiger Öffnung, Querlüftung
C	CO ₂ -Konzentration im Innenraum
C_0	CO ₂ -Konzentration der Außenluft
C_a	CO ₂ -Konzentration in ausgeatmeter Luft
$c(\text{CO}_2)$	Konzentration von Kohlenstoffdioxid
$c(\text{PM}_{2,5})$	Konzentration von PM _{2,5}
$c(\text{TVOC})$	Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen
$c_{p,\text{air}}$	spezifische Wärmekapazität von Luft (1,0 kJ (kg K) ⁻¹)
$E_{\text{comp, area, a}}$	annual, area-specific energy demand required to compensate losses through manual ventilation jährlicher, flächenspezifischer Energiebedarf zur Kompensation lüftungsbedingter Wärmeverluste
$\bar{f}$	wieder eingeatmete Luftfraktion
i	Index der jeweiligen IAQ-Kategorie (I, II oder III)
k	Luftwechselrate
λ_i	Kategorienspezifische Teilrisikofaktoren
n	Anzahl der anwesenden Personen,
$\dot{V}$	Zuluftvolumenstrom
V_R	Raumvolumen
V_{occ}	room volume per occupant Raumvolumen pro Raumnutzer

$\dot{V}_{\text{occ}}$	supply air flow rate per occupant personenspezifischer Zuluftvolumenstrom
q	Quantenemissionsrate
RH	relative humidity Relative Luftfeuchtigkeit
ρ_{air}	Dichte von Luft ($1,2 \text{ kg m}^{-3}$)
R_i	Kategorienspezifische Basisreproduktionszahl
σ	Gesamtrisikofaktor
t	beliebiger Zeitpunkt oder Expositionsdauer in Stunden
t_0	festgelegter Bezugszeitpunkt
$t_{\text{day, heating}}$	jährliche Tagesbetriebsstunden der Heizperiode nach DIN/TS 18599-10
T	Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluft
χ_v	Lüftungszeitanteil

Zusammenfassung

Das Projekt LUMUMBA (LuftqualitätsManagement und UmweltManagement in Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen, DBU-Aktenzeichen 39229/01) wurde von der APPEAL Engineering UG (haftungsbeschränkt) in Aachen im Zeitraum vom 01.02.2024 bis 01.02.2026 mit Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) durchgeführt. Ziel des Projekts war die Entwicklung, Erprobung und Verfestigung eines praxistauglichen Konzepts für ein Innenraumluftqualitäts- und Umweltmanagementsystem in Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen, das die widersprüchlichen Prioritäten von Gesundheitsschutz (hohe Raumluftqualität) und Ressourcenschonung (Energieeffizienz beim Gebäudebetrieb) im Sinne eines Reallabor-Ansatzes auflöst.

Im Rahmen von LUMUMBA wurden insgesamt 8 Einrichtungen mit 19 Räumen untersucht (2 Kindertagesstätten mit 2 Räumen, 2 Grundschulen mit 3 Räumen, 2 Gymnasien mit 7 Räumen, 1 Berufskolleg mit 4 Räumen und 1 Hochschule mit 3 Räumen) – und damit der im Projektantrag vorgesehene Mindestuntersuchungsrahmen von 3 Einrichtungen deutlich übertroffen. Für eine quantitative Auswertung mit Untersuchung der jahreszeitlichen Variation beteiligten sich aktiv 6 Einrichtungen mit 14 Räumen (2 Kindertagesstätten, 1 Grundschule, 2 Gymnasien, 1 Hochschule). Diese Ergebnisse bilden die Grundlage der zugehörigen wissenschaftlichen Publikation (Nehr et al. 2025, eingereicht).

Die messtechnische Charakterisierung der Ist-Situation erfolgte mittels sensorbasierter Dauererfassung von CO₂, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit während der Heizperiode. Alle untersuchten Räume sind ausschließlich natürlich belüftet. Die Bewertung nach AMEV 166 zeigte, dass keiner der untersuchten Räume alle baulichen Anforderungen erfüllt und somit für alle Räume ein bedingter Bedarf einer mechanischen Lüftungsanlage besteht. Die CO₂-Konzentrationsprofile wiesen erhebliche Raum-zu-Raum-Variabilität auf; 7 von 14 Räumen erreichten den UBA-Mindestwert für nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme von 25–30 m³ h⁻¹ Person⁻¹ unter typischen Betriebsbedingungen nicht. Die flächenspezifischen Lüftungswärmeverluste wurden auf 1–40 kWh m⁻² a⁻¹ abgeschätzt und veranschaulichten den Zielkonflikt zwischen hygienisch unbedenklicher Raumluftqualität und energieeffizientem Gebäudebetrieb.

Als zentrales Ergebnis wurde eine CO₂-basierte 4×4-IAQ-Risikomatrix entwickelt, die Schweregrad (EN-16798-1-Kategorien) und Häufigkeit (prozentualer Zeitanteil) von CO₂-Überschreitungen kombiniert und als Entscheidungsunterstützungswerkzeug für das Innenraumluftqualitätsmanagement dient. Für zwei Räume (B1 und D3) wurde ein hohes IAQ-Risiko mit schwerem und häufigem Überschreiten hygienischer Grenzwerte festgestellt; die Mehrheit der Räume zeigte moderates Risiko.

Für technisch geeignete Räume wurden dezentrale Lüftungsgeräte als minimalinvasive Maßnahmen installiert (Einrichtungen C und D). Die Nachmessung belegt eine signifikante Verbesserung der Raumluftqualität bei reduzierten Lüftungswärmeverlusten. Digitale Zwillinge (3D-Modelle nach BIM-Methodik, INDALO-Plugin für Autodesk Revit) wurden für alle untersuchten Modellräume erstellt und für Ist-Soll-Simulationen genutzt.

Partizipative Workshops (PW1–PW5) wurden in den teilnehmenden Einrichtungen nach dem PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) des standardisierten Innenraumluftqualitätsmanagements (ISO 16000-40) und Umweltmanagements (ISO 14001) durchgeführt. Die Workshop-Reihe 'Appealing Air in a Sustainable Building' wurde zielgruppenadaptiv für verschiedene Bildungsstufen (KITA bis Hochschule) ausgestaltet und adressiert die BNE-Kernkompetenzen Systemkompetenz, Antizipationskompetenz und Gestaltungskompetenz nach dem UNESCO-Rahmen.

Die Ergebnisse wurden über multiple Kanäle verbreitet: eine peer-reviewte Open-Access-Publikation im Journal of Building Engineering (2024), populärwissenschaftliche Publikationen im Philologenverband NRW (Bildung aktuell, 2024) und in Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft (2025), eine Posterpräsentation bei der Tagung Innenraumluft 2024 und einem Vortrag beim Kölner Innenraumforum 2025, Standardisierungsinitiativen bei ISO/TC 146/SC 6 (ISO 16000-8) und VDI (VDI 4300 Blatt 9) sowie Engagement im Management Committee der EU COST-Action CA23139 "Net4CleanAir".

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Der Mensch verbringt mehr als 90 % seiner Zeit in Innenräumen. [1] Die Qualität der Innenraumluft (IAQ, Indoor Air Quality) wirkt sich direkt auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit aus, da luftgetragene Spurenstoffe – insbesondere Kohlenstoffdioxid (CO₂), Feinstaub (PM, Particulate Matter), Ozon (O₃), Stickstoffdioxid (NO₂) und flüchtige organische Verbindungen (TVOC, Total Volatile Organic Compounds) – Atemwegs- und Lungenerkrankungen sowie Nervenschäden verursachen können. [2] Die Hälfte aller Todesfälle im Zusammenhang mit Luftverschmutzung geht auf Innenraumluftschadstoffe zurück. [3] Die Belastung der nationalen Gesundheitssysteme ist sehr hoch. [4]

Gleichzeitig entfallen auf Bau, Nutzung, Renovierung und Abriss von Gebäuden etwa 40 % des globalen Energiebedarfs. [5,6] Die Reduzierung des Energiebedarfs beim Gebäudebetrieb ist daher eine zentrale Priorität für den Klimaschutz. Hierbei entsteht ein inhärenter Zielkonflikt: Zur Verbesserung der Raumluftqualität wird intensive Belüftung gefordert, während zur Energieeinsparung eine möglichst gute Gebäudedämmung und Reduzierung der Belüftungsleistungen angestrebt wird.

Kinder und Jugendliche, deren neurologische, respiratorische und immunologische Systeme sich noch in der Entwicklung befinden, sind besonders empfindlich gegenüber suboptimalen Raumluftbedingungen. [7–10] Erhöhte CO₂-Konzentrationen sind mit Symptomen wie Müdigkeit, Kopfschmerzen und Konzentrationsschwäche assoziiert und erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Übertragung luftgetragener Infektionen. Diese Gesundheitseffekte tragen zu Fehlzeiten bei Lehrenden und Lernenden bei und führen zu reduzierten Lernleistungen. [11–14] Der Fachverband Gebäude-Klima (FGK) geht davon aus, dass in Deutschland in weniger als 10 % der Schulen Klassenzimmer mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet sind. [15] Gleichzeitig fehlen rechtsverbindliche Konzentrationswerte für Raumluftschadstoffe in Bildungseinrichtungen, was zu einer rechtlichen Grauzone führt.

CO₂ gilt als anerkannter Leitparameter zur hygienischen Bewertung der Raumluftqualität, da seine Konzentration mit anderen Spurenstoffkonzentrationen korreliert. Nach dem Umweltbundesamt (UBA) gilt Innenraumluft mit CO₂-Konzentrationen unter 1.000 ppm als hygienisch unbedenklich, bei 1.000–2.000 ppm als hygienisch auffällig und über 2.000 ppm als hygienisch inakzeptabel. [16,17] Der internationale Standard ISO 16000-40 stellt den umfassenden Rahmen eines Innenraumluftqualitäts-Managementsystems (IAQMS, Indoor Air Quality Management System) auf Basis des Plan-Do-Check-Act-Zyklus (PDCA) bereit, wurde jedoch bislang nur in sehr begrenztem Umfang in der Praxis implementiert und wissenschaftlich untersucht. [18]

1.2. Umweltrelevanz

Das Projekt LUMUMBA adressiert alle drei Säulen der Nachhaltigkeit und verknüpft lokale Maßnahmen mit globalen Nachhaltigkeitszielen (UN Sustainable Development Goals, UN SDGs), insbesondere SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen), SDG 4 (Hochwertige Bildung), SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie), SDG 11 (Nachhaltige Städte) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz).

Drei Säulen der Nachhaltigkeit im LUMUMBA-Projekt

- Ökologisch: Schutz der menschlichen Gesundheit durch Verbesserung der Innenraumluftqualität; Ressourcenschonung durch Reduktion lüftungsbedingter Heizenergieverluste; Minderung von CO₂-Emissionen durch reduzierten Verbrauch fossiler Energieträger.
- Ökonomisch: Monetäre Einsparungen beim Gebäudebetrieb durch energieeffizientes Heizen, Lüften und Klimatisieren; kalkulierbare Amortisationszeiten für Investitionen in technische Maßnahmen.
- Sozial: Nachhaltige Wissensvermittlung im partizipativen Reallaboransatz; Stärkung des Nachhaltigkeitsbewusstseins und -handelns der Lernenden; Schaffung einer Basis für kontinuierliche Verbesserung der Umweltleistung.

Der Bezug zu betrieblichen Managementsystemen – insbesondere ISO 16000-40 (Innenraumluftqualitätsmanagement) und ISO 14001 (Umweltmanagement) [19] – stellt sicher, dass die gewonnenen Erkenntnisse über die Projektlaufzeit hinaus institutionell verankert und kontinuierlich weiterentwickelt werden.

1.3. Untersuchungsrahmen

Der Gesamtuntersuchungsrahmen des LUMUMBA-Projekts umfasst 19 Räume in acht Einrichtungen, die in Tabelle 1 dargestellt sind.

Tabelle 1: Überblick über den Gesamtuntersuchungsrahmen von LUMUMBA.

Einrichtungskürzel	Einrichtungstyp	Untersuchte Räume	Altersstruktur der Lernenden
A	Kindertagesstätte (KITA)	A1	3- bis 6-Jährige
B	Kindertagesstätte (KITA)	B1	2- bis 4-Jährige
C	Grundschule	C1, C2	9- bis 11-Jährige
D	Gymnasium	D1, D2, D3, D4, D5, D6	10- bis 18-Jährige
E	Gymnasium	E1	10- bis 18-Jährige
F	Hochschule	F1, F2, F3	Erwachsene
G	Berufskolleg	G1, G2, G3, G4	15- bis 18-Jährige
H	Grundschule	H1	9- bis 11-Jährige

Für die quantitative Auswertung mit Untersuchung der jahreszeitlichen Variation (Heiz- und Sommerperiode) haben sich aktiv 6 Einrichtungen (A, B, C, D, E und F) mit insgesamt 14 Räumen beteiligt: zwei Kindertagesstätten (zwei Räume), eine Grundschule (zwei Räume), zwei Gymnasien (sieben Räume) und eine Hochschule (drei Räume). Diese Stichprobe bildet die Grundlage einer wissenschaftlichen Publikation, die beim *Indoor Environments* zur Veröffentlichung eingereicht wurde. [20] Ein Teildatensatz (Einrichtung D) wurde bereits als wissenschaftlicher Artikel bei *Journal of Building Engineering* publiziert. [21]

Zwei der acht Einrichtungen haben bauliche Maßnahmen zur Verbesserung von Lüftungssituation und der Energieeffizienz umgesetzt: Grundschule C (zwei Räume), ein Gymnasium D (ein Raum).

Aus Datenschutzgründen wurden die Einrichtungen anonymisiert. Die 6 an der quantitativen Auswertung beteiligten Einrichtungen wurden als A bis F bezeichnet, die untersuchten Räume entsprechend als A1, B1, C1, C2, D1–D6, E1 und F1–F3.

1.4. Fragestellung und Zielsetzung

LUMUMBA verfolgt die übergeordnete Fragestellung: Wie kann ein Innenraumluftqualitäts-Managementsystem (IAQMS) nach ISO 16000-40 in Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen effektiv implementiert werden, um (i) IAQ-Maßnahmen zu planen, die gebäude- und nutzungsspezifische Rahmenbedingungen berücksichtigen; (ii) sensorbasierte IAQ-Messungen durchzuführen und Werkzeuge zur Datenanalyse bereitzustellen; (iii) die Konformität mit geltenden IAQ-Normen und Planungskriterien zu überprüfen; und (iv) energieeffiziente Strategien zur Bereitstellung hoher Raumluftqualität abzuleiten und umzusetzen?

LUMUMBA kann als erfolgreich evaluiert werden, wenn nach der Projektlaufzeit folgende Resultate vorliegen:

- Planungs- und Entscheidungstool für die teilnehmenden Bildungseinrichtungen zur energieeffizienten Bereitstellung einer hohen Innenraumluftqualität bei gleichzeitiger Verknüpfung mit einem Managementsystem zur kontinuierlichen Verbesserung.
- Neuartiger ingenieurwissenschaftlicher Ansatz für die Branche der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), der sowohl Messungen als auch numerische Simulationen zur Bewertung von Raumluftqualitätsparametern umfasst und eine Schnittstelle zur BIM-Methodik schafft.
- Generischer Leitfaden zur Steuerung der Innenraumluftqualität und der Umweltleistung beim Betrieb von Nichtwohngebäuden im Sinne eines Managementsystems.

2. Projektverlauf, fördernde und hemmende Umstände

2.1. Chronologischer Projektverlauf

Das Projekt startete am 01.02.2024 mit der Identifikation geeigneter Modellräume (Arbeitspaket 1 (AP1)). Im Zeitraum Februar bis März 2024 wurden Einrichtungskontakte geknüpft und Vorarbeiten in Einrichtung D ausgeweitet und systematisiert. Die Messkampagnen erstreckten sich von März 2024 bis November 2025. Auf Basis dieser Messdaten erfolgte in AP2 die Erstellung digitaler Zwillinge und die numerische Simulation von Ist- und Soll-Szenarien. In AP3 wurden die aus AP2 abgeleiteten minimalinvasiven Optimierungsmaßnahmen (dezentrale Lüftungsgeräte in den Einrichtungen C und D) baulich realisiert und messtechnisch validiert. AP4 umfasste die Gesamtevaluation, die wirtschaftliche Einordnung sowie die Verankerung der Ergebnisse in Managementsystemen und die Dissemination über wissenschaftliche, populärwissenschaftliche und regelsetzende Kanäle.

Die fünf partizipativen Workshops (PW1–PW5) wurden parallel zu den jeweiligen Arbeitspaketen in den teilnehmenden Einrichtungen durchgeführt. Alle fünf im Projektantrag definierten Meilensteine wurden erreicht; der Untersuchungsrahmen wurde von ursprünglich mindestens 3 auf 8 Einrichtungen und von 3 auf 19 Räume erheblich ausgeweitet.

Ein exemplarischer Projektablauf ist in Abbildung 1 für die teilnehmende Einrichtung C dargestellt.

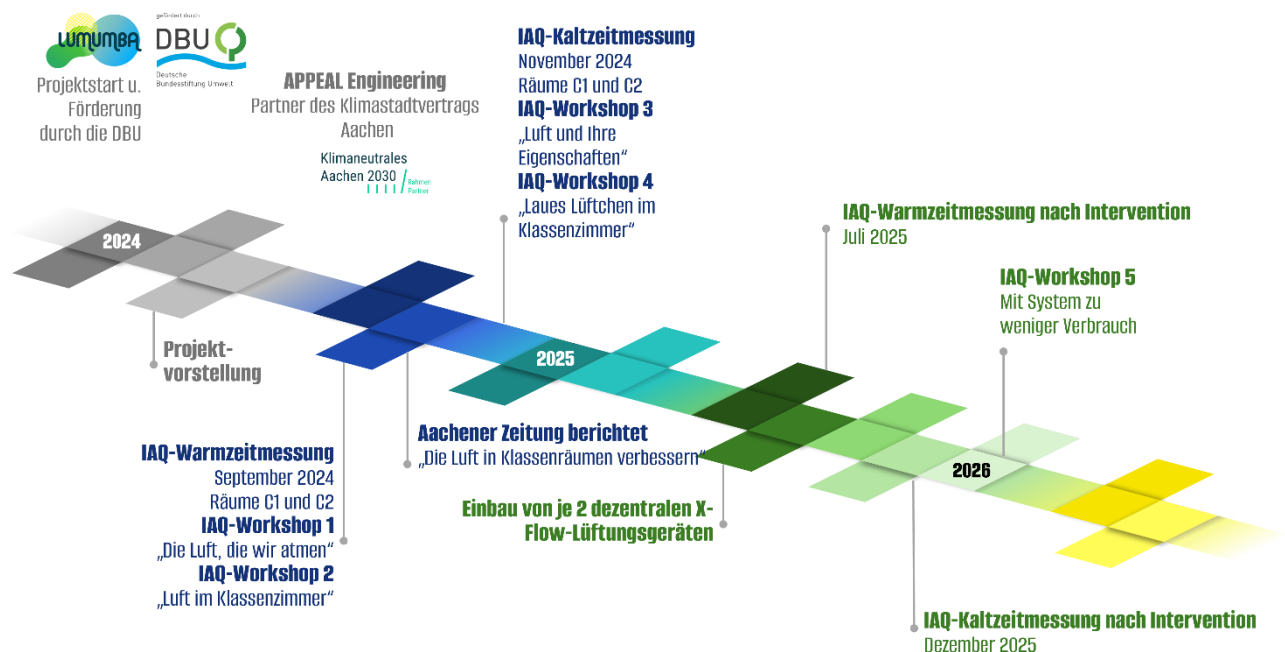


Abbildung 1: Exemplarischer Projektablauf dargestellt am Beispiel der teilnehmenden Einrichtung C.

2.2. Fördernde Umstände

Mehrere Rahmenbedingungen haben den Projekterfolg positiv beeinflusst:

Das bestehende Netzwerk von APPEAL Engineering zu Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen – aufgebaut u.a. im Rahmen der Vorarbeiten zu LUMUMBA – ermöglichte eine schnelle Einrichtungsgewinnung. Die im Projektantrag als Mindestrahmen definierten 3 Einrichtungen wurden auf 8 erweitert, was die Repräsentativität der Ergebnisse für den deutschen Bildungssektor deutlich erhöht.

Die gesellschaftliche Sensibilisierung für Innenraumluftqualität in Folge der COVID-19-Pandemie hat das Interesse der Einrichtungsleitungen an Luftqualitätsfragen erhöht und die Bereitschaft zur Projektbeteiligung begünstigt. Der Reallaboransatz mit unmittelbarem Nutzen für die Einrichtungen (individuelle Berichte, kostenlose Sensorik-

Installation, didaktisches Konzept für den Unterricht) erwies sich als attraktives Differenzierungsmerkmal bei der Einrichtungsgewinnung.

Die Vorarbeiten in den Projekten INDAIRPOLLNET [22], Net4CleanAir [23], DACBE1&2 und DACME [21,24] lieferten eine solide methodische Grundlage. Insbesondere die Typ-C-Liaison mit dem ISO/TC 146/SC 6 ermöglichte eine direkte Einbindung der LUMUMBA-Ergebnisse in laufende internationale Normungsverfahren. [25]

Die kostenlose Verfügbarkeit meteorologischer Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) haben die praktische Übertragbarkeit des entwickelten Planungs- und Entscheidungstools ohne zusätzlichen Kostenaufwand für die Einrichtungen gesichert.

2.3. Hemmende Umstände

Folgende Rahmenbedingungen haben den Projektverlauf erschwert oder zu Anpassungen geführt:

Bei der Identifikation geeigneter Modellräume stellte sich heraus, dass in einigen Einrichtungen die ursprünglich vorgesehenen Räume aus baulichen Gründen sich nicht für sinnvolle technische Interventionen eigneten. Dies begründeten die teilnehmenden Einrichtungen mit Kosten für Interventionen, die als nicht tragbar bewertet wurden. In diesen Fällen wurden Verbesserungsmaßnahmen durch Modellberechnungen abgeschätzt. Bauliche Interventionen wurden – wie vorgesehen – in drei Räumen in Einrichtungen C und D umgesetzt.

Die Koordination von Messkampagnen mit dem laufenden Schulbetrieb erwies sich als logistisch anspruchsvoll. Schulferien, Erkrankungswellen, kurzfristige Raumnutzungsänderungen und Prüfungsphasen schränkten die nutzbaren Messtage ein und erforderten eine flexible Anpassung der Messpläne. Insbesondere die Sicherstellung repräsentativer Messtage mit regulärer Raumbelastung stellte eine kontinuierliche organisatorische Herausforderung dar.

Die vorgesehene umfassende Messung von $PM_{2.5}$, und TVOC, neben CO_2 wurde in der Umsetzung auf CO_2 , Temperatur und relative Luftfeuchte als Schwerpunktparameter konzentriert. Hintergrund ist, dass CO_2 als validierter Leitparameter für die Raumluftqualitätsbewertung gilt und die zur Verfügung stehenden sensorbasierten Messgeräte für $PM_{2.5}$ und TVOC in der Praxis deutlich anfälliger für Querempfindlichkeiten und Kalibrierungsprobleme sind. Eine vollständige Auswertung von $PM_{2.5}$ und TVOC über alle Räume hinweg war daher methodisch nicht in der angestrebten Qualität realisierbar. Die wissenschaftliche Publikation und die Risikomatrix wurden konsequent auf die belastbaren CO_2 -Daten ausgerichtet. Diese Fokussierung ist zugleich die Stärke des entwickelten Ansatzes: CO_2 ist kostengünstig, robust messbar und als Leitwert normativ verankert.

Eine der im Untersuchungsrahmen enthaltenen Grundschulen (Einrichtung H) wünschte keine partizipativen Workshops. Diese Entscheidung wurde als legitimer institutioneller Entscheid respektiert; die Messkampagne wurde dennoch durchgeführt, um den Datensatz zu vervollständigen. Partizipative Workshops PW1 und PW2 deckten den Bedarf der Einrichtungen A und B.

3. Grundlagen des Luftqualitäts- und Umweltmanagements

3.1. Ausgangssituation

Der internationale Standard ISO 16000-40 (Indoor Air Quality Management System, IAQMS) stellt den umfassenden Rahmen für das Innenraumlufqualitätsmanagement bereit. Das IAQMS basiert auf einem prozessorientierten Ansatz, der am Plan-Do-Check-Act-Zyklus (PDCA) ausgerichtet ist. ISO 16000-40 definiert zentrale IAQ-Aspekte, Methoden zur Überwachung und Bewertung dieser Aspekte sowie Verfahren zur Integration der Raumlufqualitäts in das Facility-Management durch die Definition von IAQ-Risiken und IAQ-Risikoniveaus. Ein IAQ-Aspekt ist dabei ein Element des Standorts oder seiner Umgebung, von Aktivitäten und/oder Dienstleistungen einer Organisation (hier: Bildungseinrichtung), das mit der Raumlufqualitäts in Wechselwirkung treten kann. Ergänzend bietet ISO 16000-41 Leitlinien zur Leistungsbewertung von IAQ-Managementsystemen, mit Schwerpunkt auf Wirksamkeitsindikatoren und kontinuierlicher Verbesserung. Das standardisierte Umweltmanagement nach ISO 14001 ergänzt das IAQMS um eine umfassende Betrachtung der Umweltleistung von Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen.

Das IAQ-Risiko wird als kombinierte Wirkung von (i) den Konsequenzen schlechter IAQ (hier: das Ausmaß der Überschreitung eines anerkannten IAQ-Leitwerts) und (ii) der damit verbundenen Wahrscheinlichkeit des Auftretens (hier: die Häufigkeit der IAQ-Leitwert-Überschreitung) ausgedrückt.

Die COVID-19-Pandemie hat den Bedarf an systematischen Ansätzen zur Bewertung und Verbesserung der Raumlufqualitäts in Schulen und anderen Bildungseinrichtungen weiter verstärkt. Trotz des wachsenden Bewusstseins für die Bedeutung der Raumlufqualitäts ist die Umsetzung systematischer und standardisierter Raumlufqualitätsmanagementsysteme in Gebäuden des Bildungssektors nach wie vor begrenzt [26], abgesehen von wenigen herausragenden Ausnahmen in einzelnen Einrichtungen. [27–30] Die aktuelle Literatur zeigt die Verwendung strukturierter Risikomatrizen und semiquantitativer Bewertungsrahmen zur Charakterisierung von Risiken für die Innenraumlufqualitäts; diese Ansätze wurden jedoch bislang nur in engen Bereichen angewendet. Tangestani et al. [31] führten eine kombinierte Methode aus Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und Entscheidungsmatrix-Risikobewertung (DMRA) ein, um Risiken durch Feinstaub und Bioaerosole in Krankenhäusern zu identifizieren und zu priorisieren. Sie zeigten, dass eine auf Risikomatrizen basierende Priorisierung risikoreiche Innenraumumgebungen unterscheiden kann, doch ihr Ansatz bleibt auf Einrichtungen des Gesundheitswesens beschränkt und stützt sich stark auf die Bewertung anhand von Experten-Checklisten statt auf sensorbasierte Expositionsmessungen. Ebenso entwickelten Berrubé et al. [32] eine semiquantitative Matrix zur chemischen Risikobewertung für Gesundheitseinrichtungen, wobei sie Gefahren- und Expositionsklassen verwendeten, um Inhalationsrisiken abteilungsübergreifend einzustufen; auch hier ist der Ansatz sektorspezifisch und nicht mit einer kontinuierlichen Echtzeit-Umgebungsüberwachung oder Indikatoren für die Lüftungsleistung verknüpft.

Über matrixbasierte Methoden hinaus quantifiziert die IAQ-Forschung Schadstoffkonzentrationen, identifiziert Quellen (z. B. mittels positiver Matrixfaktorisierung) [33] und schätzt Gesundheitsrisiken für an Feinstaub gebundene Spurenelemente, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Phthalate oder Methylsiloxane in Schulen, Universitäten oder Wohngebäuden. [34–37] Frühere Studien zeigen signifikante gesundheitsrelevante Innenraumexpositionen und Beiträge von Innen- und Außenquellen auf [38], doch sie setzen ihre Ergebnisse nicht in operative Entscheidungshilfen wie Risikomatrizen um, die von Gebäudemanagern genutzt werden können. [39,40] Ebenso bieten Studien, die Maßnahmen zur Innenraumkontrolle modellieren oder optimieren – wie beispielsweise die Platzierung von tragbaren Luftreinigern zur Minimierung des Risikos luftübertragener Infektionen [41] – wertvolle mechanistische Einblicke, liefern jedoch keinen strukturierten Rahmen für die Integration von Expositionswahrscheinlichkeit, Schweregrad und energetischen Auswirkungen in die Managementpraxis.

Vor diesem Hintergrund befasst sich die vorliegende Studie mit mehreren seit langem bestehenden Forschungslücken. Erstens hat keine der bisherigen Studien einen auf einer Risikomatrix basierenden Bewertungsrahmen für die Innenraumlufqualitäts speziell für natürlich belüftete Bildungsgebäude entwickelt oder validiert – ein Sektor, der nachweislich eine sehr unterschiedliche Belüftungsleistung aufweist und in dem besonders gefährdete Nutzergruppen anzutreffen sind. Zweitens fehlt bei bisherigen matrixbasierten IAQ-Instrumenten und schadstoffspezifischen Risikoschätzungen die Einbeziehung kontinuierlicher CO₂-Sensordaten, insbesondere die Kombination der Überschreitungshäufigkeit (Wahrscheinlichkeit) mit den in EN 16798-1 definierten Schweregradklassen. [42] Die vorliegende Studie schließt diese Lücke durch die Erstellung einer 4×4-IAQ-Risikomatrix, die ausschließlich aus realen CO₂-Zeitreihen abgeleitet wurde und eine reproduzierbare, datenbasierte Alternative zu auf Expertenurteilen basierenden Matrizen darstellt. Drittens berücksichtigen bestehende Ansätze nicht den Energieverlust durch die Lüftung zur Gewährleistung einer hygienisch akzeptablen IAQ – trotz der Relevanz für natürlich belüftete Schulen, die während der Heizperiode betrieben werden. Das hier vorgestellte Rahmenwerk

verknüpft das CO₂-basierte Expositionsrisiko explizit mit dem flächenspezifischen Energieverlust durch Lüftung und ermöglicht so eine fundierte Priorisierung von IAQ und Energie, die in der bisherigen Literatur nicht vorhanden ist.

3.2. Handlungsfelder

Im Rahmen von LUMUMBA wurden vier IAQ-Aspekte definiert, die die Grundlage des IAQMS bilden und mit quantitativen Metriken und anerkannten Referenzwerten verknüpft sind (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: IAQ-Aspekte des implementierten IAQMS in LUMUMBA, verknüpft mit Metriken und Bewertungsrahmen.

IAQ-Aspekt	Beschreibung	Metrik / Bewertung
A	Notwendigkeit von IAQ-Verbesserungsmaßnahmen	AMEV 166 [43]: Raumvolumen je Person (V_{occ}), Fensteröffnungsfläche je Person für einseitige Lüftung (gekippte (A_{tos}) / geöffnete (A_{fos}) Fenster), Raumhüllöffnungsfläche für Querlüftung (gekippte (A_{tc}) / geöffnete (A_{fc}) Fenster)
B	Prozentualer Zeitanteil der vorherrschenden CO ₂ -Konzentration	EN 16798-1 Kategorien I–IV (CO ₂ über Außenluft) [42]: <550 ppm (Kat. I), 550–<800 ppm (Kat. II), 800–<1350 ppm (Kat. III), ≥1350 ppm (Kat. IV)
C	Nutzerspezifischer konvektiver Lüftungsvolumenstrom	UBA-Mindestwert ($\dot{V}_{occ}$) [44]: 25–30 m ³ h ⁻¹ Person ⁻¹ (bestimmt mittels CO ₂ -Abklingmethode)
D	Flächenspezifischer Lüftungswärmeverlust	BBSR-Referenz für Bildungsgebäude ($E_{comp, area, a}$) [45]: ~50 kWh m ⁻² a ⁻¹ (Heizperiode Oktober–März)

Die vier IAQ-Aspekte decken das gesamte Spektrum des Zielkonflikts zwischen hoher Raumluftqualität und energieeffizientem Gebäudebetrieb ab: IAQ-Aspekt A liefert die strukturelle und bauliche Einordnung; IAQ-Aspekt B die expositionsbasierte Qualitätsbewertung; IAQ-Aspekt C die hygienische Suffizienzbewertung; IAQ-Aspekt D die energetische Folgenabschätzung. Zusammen bilden sie den kohärenten Rahmen für die IAQ-Risikomatrix und die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen.

3.3. Didaktisches Konzept: Reallaboransatz & Bildung für Nachhaltige Entwicklung

Ein konstitutives Element von LUMUMBA ist das didaktische Konzept der partizipativen Workshops, das die wissenschaftlichen und technischen Methoden des IAQMS in einen Bildungskontext überführt. Dieses Konzept ist nicht additiv zum Messprogramm, sondern ist ein integraler Projektbestandteil: Die Stärkung von Nachhaltigkeitsbewusstsein und -handeln bei Lernenden in Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen ist eines der umweltrelevanten Ziele von LUMUMBA.

3.3.1. Reallabor als wissenschaftliche Methode

Reallabore (engl. real-world labs) sind ein etablierter Ansatz der Transformationsforschung und Nachhaltigkeitswissenschaft. Sie zeichnen sich durch drei Kernmerkmale aus: (i) die Nutzung realer sozialer und physischer Räume als Experimentierfeld, (ii) die transdisziplinäre Ko-Produktion von Wissen zwischen Wissenschaft und gesellschaftlichen Akteuren (hier: Lernende, Lehrende, Verwaltung der Bildungs- / Ausbildungseinrichtung), und (iii) die Ausrichtung auf soziale Innovation und gesellschaftlichen Wandel. Im LUMUMBA-Kontext ist das eigene Klassenzimmer das Reallabor: Die Lernenden erheben Messdaten in ihrer eigenen Umgebung, beobachten Zusammenhänge zwischen ihrem Lüftungsverhalten und der CO₂-Konzentration, berechnen die energetischen Konsequenzen und leiten daraus Handlungsoptionen ab.

3.3.2. Verknüpfung von PDCA-Zyklus und Lernzyklus

Das strukturgebende Element des didaktischen Konzepts ist die Homologie zwischen dem PDCA-Zyklus des Managementsystems (ISO 16000-40, ISO 14001) und dem Lernzyklus des erfahrungsbasierten Lernens. Beide Zyklen folgen der gleichen Vier-Phasen-Logik: Ausgangslage analysieren (Plan / Konkrete Erfahrung) → Maßnahmen umsetzen (Do / Reflektierende Beobachtung) → Ergebnisse überprüfen (Check / Abstrakte Begriffsbildung) → Ziele anpassen und verstetigen (Act / Aktives Experimentieren). Diese strukturelle Parallelität wurde im Konzept von LUMUMBA bewusst als didaktisches Prinzip genutzt (siehe Tabelle 3): Indem die Lernenden den PDCA-Zyklus als Lernmethode erleben, verinnerlichen sie gleichzeitig die Logik des betrieblichen Managementsystems, das nach Projektende eigenständig weitergeführt werden soll.

Tabelle 3: Didaktische Struktur der LUMUMBA-Workshops im PDCA-Zyklus des integrierten Managementsystems.

Workshop	PDCA-Phase	Didaktischer Kern	Kompetenzbereich (BNE)
PW1 – Lebensmittel Luft	Plan	Eigenständiges CO ₂ -Monitoring; Berechnung der Pro-Kopf-CO ₂ -Rate; Skalierung auf Gesellschaft	Systemkompetenz; Datenerhebung und -interpretation
PW2 – Mehr Wirbel	Check	Analyse jahreszeitlicher CO ₂ -Tagesgänge; Einordnung in UBA-Ampel; Vergleich Lüftungskonzepte	Antizipationskompetenz; kritisches Denken
PW3 – Save Energy	Do	Berechnung von Lüftungswärmeverlusten; Wärmetauscher; Energiebilanz des Klassenraums	Systemkompetenz; quantitatives Denken
PW4 – Mit System	Check	Vollständige PDCA-Analyse Beleuchtung; Amortisationsberechnung; Skalierung auf Gebäude	Gestaltungskompetenz; ökonomisches Denken
PW5 – Gesamtevaluation	Act	Managementsystem-Verankerung; einrichtungsspezifischer Maßnahmenplan; Übergabe an Institution	Gestaltungskompetenz; institutionelles Denken

3.3.3. Bezug zu UN Sustainable Development Goals

Das didaktische Konzept von LUMUMBA ist explizit in den Rahmen der UN SDGs eingebettet. Jeder Workshop enthält eine Reflexionsebene, die die lokalen Ergebnisse mit globalen Nachhaltigkeitszielen verknüpft: SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen), SDG 4 (Hochwertige Bildung), SDG 7 (Bezahlbare und saubere Energie), SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz). Diese Einbettung entspricht dem Ansatz der Nachhaltigkeitsbewertung, wie er im Konzept des LUMUMBA-Managementsystems (Abbildung 1) dargestellt ist: Vom Reallabor-Versuch über das betriebliche Managementsystem bis zum globalen Nachhaltigkeitsziel bildet LUMUMBA eine didaktisch und wissenschaftlich kohärente Kette.

4. Methodisches Vorgehen

4.1. Identifikation der Modellräume

Die Identifikation geeigneter Modellräume erfolgte auf Basis der baulichen und betrieblichen Gegebenheiten der zu untersuchenden Räumlichkeiten. Analysiert wurden: Platzbedarf für Messungen, Repräsentativität der Raumnutzung und -ausstattung für ähnliche Räumlichkeiten der jeweiligen Einrichtung, Möglichkeit zur Realisierung minimalinvasiver Interventionen sowie Verfügbarkeit des Raums während der gesamten Projektlaufzeit.

Im Projektverlauf konnte die ursprünglich geplante Mindestanzahl von drei Einrichtungen erreicht werden: An drei Räumen (C1, C2, D4) wurden minimalinvasive technische Maßnahmen zur energieeffizienten Bereitstellung hoher Raumluftqualität umgesetzt. Abbildung 2 zeigt die räumliche Situation der Modellräume C1 und C2 der teilnehmenden Einrichtung C.



Abbildung 2: Ansichten der Modellräume C1 (links) und C2 (rechts) der teilnehmenden Einrichtung C.

4.2. Messtechnische Charakterisierung der Modellräume

Die messtechnische Charakterisierung der Ist-Situation erfolgte mittels sensorbasierter Dauererfassung relevanter Raumluftparameter während laufender Unterrichtszeiten. Zentrale Messgrößen waren die Konzentration von CO_2 ($c(\text{CO}_2)$) sowie die Parameter relative Luftfeuchte (RH) und Temperatur (T). Darüber hinaus wurden in ausgewählten Räumen Feinstaub $c(\text{PM}_{2,5})$ und organische Spurenstoffe $c(\text{TVOC})$ erfasst; aufgrund der unter Praxisbedingungen begrenzten Messqualität dieser Sensoren wurden $\text{PM}_{2,5}$ und TVOC nicht in die quantitative Hauptauswertung einbezogen (vgl. Abschnitt 2.3). Tabelle 4 zeigt die technischen Daten der eingesetzten Messtechnik für die zentralen Messgrößen.

Tabelle 4: Technische Daten der eingesetzten Messtechnik für die zentralen Messgrößen.

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Ansprechzeit	Genauigkeit
T	Palas AQ Guard (Bosch BME280)	Diodenspannung	1 s	$\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
T	AirQ Science (Sensirion SHT3x)	CMOS	8 s	$\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
RH	Palas AQ Guard (Bosch BME280)	Kapazitive Detektion	1 s	$\pm 3 \text{ \% RH}$
RH	AirQ Science (Sensirion SHT3x)	CMOS	2 s	$\pm 2 \text{ \% RH}$ des Messwerts
$c(\text{CO}_2)$	Palas AQ Guard (SenseAir® CO2 Engine® K30 STA)	NDIR	20 s	$\pm 30 \text{ ppm}$, $\pm 3 \text{ \%}$ des Messwerts
$c(\text{CO}_2)$	AirQ Science (Tempus TES0903)	NDIR	30 s	$\pm 30 \text{ ppm}$, $\pm 3 \text{ \%}$ des Messwerts

Luftwechselraten wurden mittels CO_2 -Abklingmethode bestimmt. Die Luftwechselrate k gibt an, wie oft pro Zeiteinheit ein kompletter Luftaustausch im betrachteten Raum erzielt wird. Damit ist die Luftwechselrate k nach Gl. 1 ein Maß für den Zuluftvolumenstrom $\dot{V}$ bezogen auf das Raumvolumen V_R .

$$k = \frac{\dot{V}}{V_R} \quad \text{Gl. 1}$$

Die sogenannte Abklingmethode zur experimentellen Bestimmung der Luftwechselrate kann eingesetzt werden, wenn alle Personen nach der Nutzungsphase den Raum verlassen. Während der Raumnutzungsphase erhöht sich die CO_2 -Konzentration in der betrachteten Räumlichkeit durch das von den Raumnutzern ausgeatmete CO_2 . Sobald die Nutzer den Raum verlassen und der Raum mit Außenluft gelüftet wird, sinkt die CO_2 -Konzentration.

Die Luftwechselrate in einem Raum kann durch Messung des zeitlichen Abklingens der CO_2 -Konzentration bestimmt werden. Das lokale Abklingen der CO_2 -Konzentration in einem ideal durchmischten Raumvolumenelement folgt Gl. 2.

$$\frac{c}{c_0} = e^{-k \cdot (t - t_0)} \quad \text{Gl. 2}$$

In Gl. 2 repräsentiert t einen beliebigen Zeitpunkt, t_0 einen festgelegten Bezugszeitpunkt. c und c_0 sind die zu den jeweiligen Zeitpunkten gemessenen CO_2 -Konzentrationen. Die Abnahme der CO_2 -Konzentration in der Raumluft verläuft nach einer Exponentialfunktion der Zeit t . Die Abklingkurve $c = f(t)$ nähert sich für $t \rightarrow \infty$ einer Parallelen zur t -Achse an. Durch Logarithmieren kann Gl. 2 linearisiert werden:

$$\ln\left(\frac{c}{c_0}\right) = -k \cdot (t - t_0) \quad \text{Gl. 3}$$

Wählt man eine logarithmische Darstellung (siehe Abbildung 3), so folgen die Messwerte in guter Näherung einem linearen Verlauf. Die Luftwechselraten wurden mittels linearer Regression unter Verwendung von Gl. 3 aus den Steigungen der Regressionsgeraden bestimmt. Die Qualität der linearen Regressionsanalyse wurde über das Quadrat des Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizienten R^2 bewertet. Bei den zugrundeliegenden Messungen wurde CO_2 als inerter Leitparameter zur Abschätzung der Luftwechselrate zeitlich aufgelöst gemessen. Es wurde angenommen, dass es keine weiteren Senken für die CO_2 -Konzentration in den untersuchten Unterrichtsräumen gab. Des Weiteren wurde eine konstante CO_2 -Konzentration in der Außenluft vorausgesetzt.

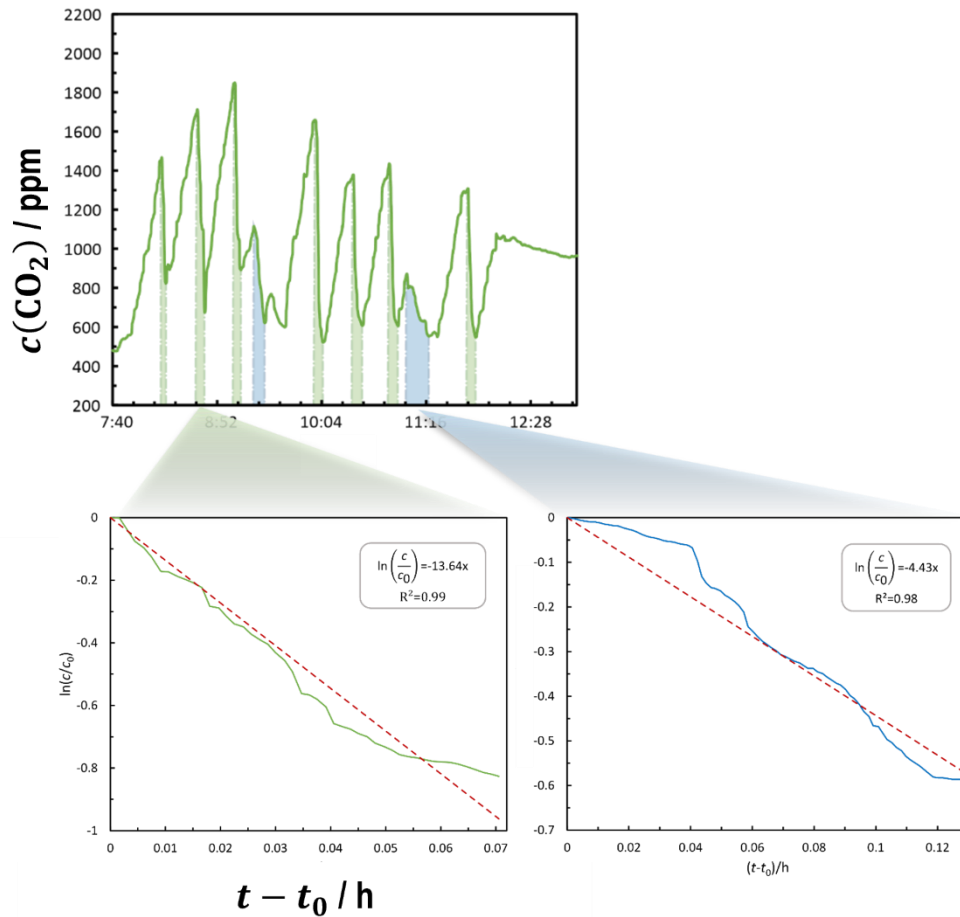


Abbildung 3: Typisches CO_2 -Konzentrationsprofil im Klassenzimmer D6 während eines Schultages. Die grün schattierten Bereiche unterhalb des CO_2 -Profils zeigen eine zeitweise Querlüftung durch vollständig geöffnete Fenster im belegten Klassenzimmer an. Die blau schattierten Bereiche heben Phasen einer kontinuierlichen einseitigen Lüftung durch gekippte Fenster bei Abwesenheit der Nutzer hervor. Der Teildatensatz für Einrichtung D wurde bereits als wissenschaftlicher Artikel beim Journal of Building Engineering veröffentlicht. [21]

Die einwöchigen Messungen erfolgten in jeder Räumlichkeit zweimal – einmal in der Heizperiode (Winterperiode, ca. Oktober–März) und einmal in der Sommerperiode. Eingesetzt wurden kalibrierte Mehrparameter-Messgeräte der Typen AQ-Guard (Palas GmbH) und AirQ Science. Alle Messungen wurden im realen Unterrichtsablauf und in Einrichtung D unter Vorgabe des UBA-empfohlenen Lüftungskonzepts (bei vorhandener Fensterlüftung) durchgeführt. [17] Die folgende Tabelle 5 gibt einen Überblick über die sechs Einrichtungen der quantitativen Auswertung.

Tabelle 5: Geometrie-, Aufstellungs-, Belegungs- und Lüftungsmerkmale der untersuchten passiv belüfteten Klassenzimmer in den teilnehmenden Einrichtungen.

		Einrichtung													
		A	B	C		D						E	F		
		A1	B1	C1	C2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	F1	F2	F3
Personen ⁽¹⁾	/ –	22	20	20	20	31	30	28	31	29	32	32	24	20	36
Raumabmessungen ⁽²⁾	/ m	7,8; 6,5; 2,8	7,3; 6,3; 2,5	9,3; 6,7; 3,3	9,3; 7,2; 3,3	7,7; 6,7; 3,7	7,3; 7,1; 3,2	9,0; 4,8; 2,9	9,3; 6,4; 3,6	9,9; 6,5; 3,3	8,7; 6,3; 2,8	9,4; 6,4; 3,5	9,1; 5,6; 4,2	8,4; 5,9; 2,6	7,7; 8,9; 3,4
Grundfläche	/ m ²	51	46	62	67	52	52	43	60	64	55	60	51	50	69
Raumvolumen	/ m ³	142	115	206	221	191	166	125	214	212	153	211	214	129	233
Türabmessungen ⁽³⁾	/ m	0,94; 1,97	0,83; 1,98	0,95 2,05	0,95; 2,05	0,93; 2,10	0,96; 2,10	0,80; 1,96	0,94; 2,04	0,93; 2,03	0,93; 1,96	1,01; 1,99	1,22; 2,14	1,16; 2,09	1,16; 2,06
Oberlichtfenster ⁽⁴⁾	/ –	—	2	4	4 [2] ⁽²⁾	2	2 [2] ⁽²⁾	—	—	—	3	6	—	—	—
Oberlichtfenster- abmessungen ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	/ m	—	0,90; 1,35	1,34; 0,61	1,03 [1,03]; 0,64 [0,64]	1,49; 0,78	1,27 [1,27]; 0,62 [0,62]	—	—	—	0,76; 0,27	1,08; 0,57	—	—	—
Oberlichtfenster- parameter ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	/ m	—	0,05; 0,135; 0,04	0,05; 0,15; 0,28	0,05 [0,05]; 0,15 [0,15]; 0,20 [0,20]	0,060; 0,10; 0,15	0,065 [0,065]; 0,09 [0,09]; 0,15 [0,15]	—	—	—	0,045; 0,12; 0,10	0,041; 0,11; 0,50	—	—	—
Fenster ⁽⁴⁾	/ –	2	2	4	4 [1] ⁽²⁾	2	2 [2] ⁽²⁾	3	4	8	6	6	4	3	3
Fensterabmessungen ⁽⁴⁾⁽⁷⁾	/ m	0,74; 2,41	0,90; 1,35	1,34; 1,39	1,03 [1,03]; 1,00 [1,00]	0,97; 1,97	0,78 [1,27]; 1,56 [1,44]	1,03; 1,03	0,81; 2,06	0,69; 1,47	0,80; 1,05	1,08; 1,60	0,60; 1,80	0,50; 1,80	0,60; 2,10
Fensterparameter ⁽⁴⁾⁽⁸⁾	/ m	0,06; 0,09; 0,03	0,05; 0,085; 0,63	0,05; 0,15; 0,28	0,05 [0,05]; 0,15 [0,15]; 0,20 [0,20]	0,060; 0,10; 1,04	0,065 [0,065]; 0,09 [0,09]; 0,89 [0,92]	0,035; 0,09; 0,07	0,06; 0,09; 0,07	0,065; 0,08; 0,59	0,045; 0,12; 0,78	0,041; 0,12; 0,50	0,07; 0,07; 0,15	0,04; 0,09; 0,15	0,05; 0,09; 0,15
Fassadenausrichtung der Fenster ⁽⁹⁾		O	SO	SO	SO	W	W	N	S	W	O	SO	NW	SW	SW
Querlüftung möglich?		Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Nein	Ja (über Flur)	Ja (über Flur)	Nein	Nein

⁽¹⁾ Maximal zulässige Belegung.

⁽²⁾ Umfasst die Raumbreite, die Raumbreite und die Raumhöhe.

⁽³⁾ Umfasst die Türbreite und die Türhöhe.

⁽⁴⁾ Zahlen in eckigen Klammern bezeichnen Angaben zu den (Oberlicht-)Fenstern an der Rückwand der Klassenzimmer C2 und D2.

⁽⁵⁾ Umfasst die Oberlichtfensterbreite und die Oberlichtfensterhöhe.

⁽⁶⁾ Die Oberlichtfensterparameter umfassen die Falztiefe, das Spaltmaß des gekippten Oberlichtfensters sowie den Laibungsabstand gemäß AMEV 166, wie in VDI 2078 näher beschrieben. [43,46]

⁽⁷⁾ Umfasst die Fensterbreite und die Fensterhöhe.

⁽⁸⁾ Die Fensterparameter umfassen die Falztiefe, das Spaltmaß des gekippten Fensters sowie den Laibungsabstand gemäß AMEV 166, wie in VDI 2078 näher beschrieben. [43,46]

⁽⁹⁾ N, O, SO, S, SW, W und NW bezeichnen die Himmelsrichtungen Nord, Ost, Südost, Süd, Südwest, West und Nordwest.

Alle untersuchten Räume sind ausschließlich natürlich belüftet. In nur einer der beiden Sekundarschulen (Einrichtung D) wurden explizite Vorgaben für die Durchführung der passiven Lüftung implementiert: Gemäß UBA-Empfehlungen wurden die Fenster alle 20 Minuten für ca. 5 Minuten zur Querlüftung vollständig geöffnet. [17]

4.3. Beurteilung des Potenzials zur Verbesserung der Raumlufthqualität

Die Beurteilung des strukturellen und betrieblichen Potenzials zur IAQ-Verbesserung (IAQ-Aspekt A) erfolgte durch Überprüfung der Konformität mit den AMEV-166-Planungskriterien. [43] Diese normative Empfehlung des Arbeitskreises Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen legt Mindestanforderungen für Raumvolumen je Person, Fensteröffnungsfläche je Person bei Kipp- und Querlüftung sowie flächenspezifische Raumhüllöffnungsflächen für vollständig geöffnete Fenster fest:

- $V_{occ} \geq 5 \text{ m}^3 \text{ Person}^{-1}$ (Raumvolumen je Person)
- $A_{tos} \geq 0,35 \text{ m}^2 \text{ Person}^{-1}$ (Fensteröffnungsfläche bei gekippten Fenstern, einseitige Lüftung)
- $A_{tc} \geq 0,20 \text{ m}^2 \text{ Person}^{-1}$ (Raumhüllöffnungsfläche bei gekippten Fenstern, Querlüftung)
- $A_{fos} \geq 1,05 \text{ m}^2 \text{ per } 10 \text{ m}^2$ (flächenspezifische Fensteröffnungsfläche, vollständig geöffnet, einseitig)
- $A_{fc} \geq 0,60 \text{ m}^2 \text{ per } 10 \text{ m}^2$ (flächenspezifische Raumhüllöffnungsfläche, vollständig geöffnet, Querlüftung)
- Wenn diese Kriterien nicht erfüllt sind, ist eine mechanische Lüftungsanlage erforderlich.

Die CO₂-basierte IAQ-Beurteilung (IAQ-Aspekt B) erfolgte durch kontinuierliche Erfassung der CO₂-Konzentrationsprofile und Einordnung in die vier Kategorien der EN 16798-1 (relativ zur Außenluftkonzentration von ca. 420 ppm). Für jede Kategorie wurde der prozentuale Zeitanteil während der Nutzungszeiten berechnet. Zusätzlich erfolgte die Beurteilung der realen Lüftungssituation (IAQ-Aspekt C) durch Ableitung der personenspezifischen Zuluftvolumenströme aus den gemessenen CO₂-Abklingkurven und Abgleich mit dem vom UBA empfohlenen Mindestwert von $\dot{V}_{occ} = 25 - 30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ Person}^{-1}$. [44]

4.4. Beurteilung des Potenzials zur Senkung des Gesamtenergiebedarfs

Die Beurteilung der energetischen Implikationen (IAQ-Aspekt D) erfolgte durch Berechnung der flächenspezifischen Lüftungswärmeverluste während der Heizperiode (1. Oktober bis 31. März). Der jährliche, flächenspezifische Energiebedarf zur Kompensation der Lüftungswärmeverluste $E_{comp, area, a}$ wurde gemäß VDI 2078 mit einer normierten Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10 \text{ K}$ zwischen Zu- und Abluft nach Gl. 4 berechnet [46]:

$$E_{comp, area, a} = \dot{V}_{occ} \cdot c_{p,air} \cdot \rho_{air} \cdot \Delta T \cdot \chi_V \cdot t_{day, heating} \quad \text{Gl. 4}$$

Dabei ist

$\dot{V}_{occ}$ der nutzerspezifische Lüftungsvolumenstrom ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ Person}^{-1}$),

$c_{p,air}$ die spezifische Wärmekapazität von Luft ($1,0 \text{ kJ (kg K)}^{-1}$),

ρ_{air} die Dichte von Luft ($1,2 \text{ kg m}^{-3}$),

ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluft,

χ_V der Lüftungszeitanteil von 0,2 (bedeutet 10 Minuten Lüftungszeit je 50 min gemäß UBA-Empfehlung) und

$t_{day, heating}$ die jährlichen Tagesbetriebsstunden der Heizperiode nach DIN/TS 18599-10 [47].

Die Ergebnisse wurden in Beziehung zum BBSR-Referenz-Heizenergiebedarf von ca. $50 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ für Bildungsgebäude gesetzt [45], um die relative Bedeutung der Lüftungswärmeverluste für den Gesamtenergieverbrauch zu verdeutlichen.

4.5. Ökonomische Bewertung der Krankheitskosten durch unzureichende Raumluftqualität

Ein weiteres Argument für Investitionen in die Verbesserung der Raumluftqualität – neben der Senkung des Gesamtenergiebedarfs – ist die ökonomische Bewertung der durch schlechte IAQ verursachten Krankheitskosten. Im Rahmen von LUMUMBA wurde ein Modell zur quantitativen Abschätzung der aus unzureichender Raumluftqualität resultierenden Krankheitskosten für Bildungseinrichtungen in Deutschland entwickelt, das auf den im Projekt erhobenen Messdaten aufbaut und erstmals eine systematische quantitative Abschätzung vornimmt.

Die Grundlage der Krankheitskostenschätzung bildet ein zweistufiges Modell, das (i) ein statistisches Raumluftqualitätsmodell zur Beschreibung der kumulativen Häufigkeitsverteilung von CO₂-Konzentrationen mit (ii) einem infektionsepidemiologischen Risikomodell (nach Rudnick & Milton [48]) verknüpft.

- Stufe 1 – Raumluftqualitätsbewertung: Die gemessenen CO₂-Konzentrationsdaten aus den LUMUMBA-Messkampagnen wurden anhand der EN-16798-1-Kategorien (I: <550 ppm, II: 550–800 ppm, III: 800–1350 ppm, IV: >1350 ppm über Außenluft) ausgewertet. Daraus wurden drei Bewertungskategorien abgeleitet: Kategorie A (gute Raumluftqualität, EN-Kat. I–II), Kategorie B (akzeptable Raumluftqualität, EN-Kat. II–III) und Kategorie C (nicht akzeptable Raumluftqualität, EN-Kat. IV).
- Stufe 2 – Infektionsepidemiologisches Risikomodell: Das Ansteckungsrisiko für luftgetragene Infektionserkrankungen (Influenza) wurde mittels der Basisreproduktionszahl nach dem Wells-Riley-Modell berechnet.

Die Grundlagen zur Quantifizierung des Risikos luftgetragener Infektionen in Innenräumen wurden von Wells [49] gelegt und später von Riley und Kollegen [50] weiterentwickelt. Aus dieser Arbeit entstand das heute als Wells–Riley-Modell bekannte Verfahren. Im Gegensatz zu Dosis-Wirkungs-Ansätzen, die die Infektionswahrscheinlichkeit auf Basis einer akkumulierten Pathogendosis abschätzen, beschreibt der Wells–Riley-Ansatz die komplementäre Wahrscheinlichkeit, dass keine Sekundärinfektionen auftreten. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, die kumulative Exposition zu bewerten – ein Aspekt, der insbesondere bei variierenden Belegungsmustern die Analyse erschweren kann. Die praktische Anwendbarkeit wurde durch Rudnick und Milton erweitert, die zeigten, dass sich das Infektionsrisiko direkt aus CO₂-Messungen ableiten lässt, sofern die Raumluft hinreichend gut durchmischt ist. [48]

Zur Quantifizierung des Einflusses der vorherrschenden IAQ auf die Wahrscheinlichkeit der luftgetragenen Infektionsübertragung wird jedem Innenraum ein kategoriespezifischer Risikofaktor zugeordnet, der aus den zuvor beschriebenen IAQ-Kategorien abgeleitet wird. Dieser Risikofaktor basiert auf dem von Rudnick und Milton eingeführten Ansatz der „wieder eingeatmeten Luftfraktion“ (rebreathed fraction), bei dem der Anteil zuvor ausgeatmeter Luft, der von den Nutzern wieder eingeatmet wird, als zentrale Größe für die Exposition gegenüber luftgetragenen Pathogenen dient.

Zunächst wird für jede IAQ-Kategorie die wieder eingeatmete Fraktion $\bar{f}$ mithilfe von Gl. 5 bestimmt:

$$\bar{f} = \frac{C - C_0}{C_a} \quad \text{Gl. 5}$$

Dabei ist:

C ist die CO₂-Konzentration im Innenraum (ppm),

$C_0 = 420$ ppm ist die CO₂-Konzentration der Außenluft und

$C_a = 37\,500$ ppm ist ein typischer Wert für die CO₂-Konzentration in ausgeatmeter Luft [48].

Die CO₂-Konzentration der Ausatemluft kann nicht als eindeutiger, fester Wert angegeben werden (siehe z. B. [51]). In dieser Studie wird daher der von Rudnick und Milton verwendete Wert herangezogen. [48]

Anschließend wird die kategoriespezifische wieder eingeatmete Fraktion in die von Rudnick und Milton formulierte Gleichung für die Basisreproduktionszahl in Innenräumen eingesetzt. Die innenräumliche Reproduktionszahl R_i wird gemäß Gl. 6 berechnet:

$$R_i = (n - 1)[1 - \exp(-\bar{f} q \frac{t}{n})]$$

Gl. 6

Dabei ist:

i ist der Index der jeweiligen IAQ-Kategorie (I, II oder III),

n ist die Anzahl der anwesenden Personen,

$\bar{f}$ ist die wieder eingeatmete Luftfraktion,

t ist die Expositionsdauer (in Stunden),

q ist die Quantenemissionsrate (Quanta h^{-1}).

Zur Vereinheitlichung wurden folgende repräsentative Parameter verwendet:

- $n = 30$ Personen (typische Klassengröße),
- $t = 4$ h (Expositionsdauer für influenzaähnliche Pathogene gemäß Rudnick und Milton [48]),
- $q = 100$ Quanta h^{-1} (repräsentatives Szenario mit hoher Emission für eine konservative Risikoabschätzung).

Die Reproduktionszahl R_i ist definiert als die erwartete Anzahl sekundärer Infektionen, die von einer infektiösen Person in eine vollständig empfängliche Gruppe (z. B. eine Schulklasse) eingebracht werden. Ein Erreger kann sich innerhalb der Gruppe ausbreiten, wenn $R_i > 1$; liegt $R_i < 1$, ist eine anhaltende Übertragung unwahrscheinlich.

Der Wert $q = 100$ Quanta h^{-1} repräsentiert ein hohes, jedoch in der Literatur gut belegtes Emissionsszenario, das häufig zur Modellierung influenzaähnlicher luftgetragener Übertragungen in Innenräumen verwendet wird. Dieser Wert basiert auf Rekonstruktionen von Ausbruchsgeschehen, bei denen alle Anwesenden als empfänglich angenommen wurden (z. B. Übertragungsereignisse in Flugzeugen oder Superspreading-Situationen in Innenräumen, wie sie von Rudnick und Milton sowie in Wells-basierten Quantenmodellen beschrieben wurden). Er stellt ein konservatives Szenario dar, das eine Abschätzung des maximalen Infektionsrisikos in dicht belegten Innenräumen ermöglicht.

Zur Sensitivitätsanalyse können alternative Quantenemissionsraten verwendet werden, beispielsweise:

- $q = 15\text{--}30$ Quanta h^{-1} für typische Sprechaktivität oder geringe Aktivität,
- $q = 50$ Quanta h^{-1} für erhöhte Emissionen bei intensiverer Lautäußerung,
- $q = 300$ Quanta h^{-1} oder höher für dokumentierte Superspreading-Bedingungen (z. B. Singen, Rufen oder besonders infektiöse Personen).

Die Verwendung niedrigerer q -Werte reduziert die absoluten Reproduktionszahlen, erhält jedoch die relativen Unterschiede zwischen den IAQ-Kategorien. Die abgeleiteten kategoriespezifischen Risikofaktoren bleiben somit gültig, solange q über alle Kategorien konstant gehalten wird.

Dies führt zu einer Reproduktionszahl für die Referenzbedingung (Kategorie I) R_I sowie zu separaten Werten R_{II} und R_{III} für die Kategorien II und III.

Abschließend werden kategoriespezifische Risikofaktoren $\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_{III}$ durch Normierung von R_{II} und R_{III} relativ zur Referenz-Reproduktionszahl gemäß Gl. 7 bestimmt:

$$\lambda_i = \frac{R_i}{R_I} \quad \text{Gl. 7}$$

Diese Faktoren quantifizieren die relative Zunahme des luftgetragenen Übertragungspotenzials, wenn ein Raum als Kategorie II oder III im Vergleich zu Kategorie I klassifiziert wird (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Modellparameter zur Abschätzung von Krankheitskosten durch unzureichende Raumluftqualität.

Kategorie	CO ₂ -Konzentration über Außenluftkonzentration / ppm	$\bar{f}$	R_i	λ_i
I	550	$1,47 \cdot 10^{-2}$	5,15	1
II	800	$2,13 \cdot 10^{-2}$	7,18	1,39
III	1350	$3,60 \cdot 10^{-2}$	11,06	2,15

Diese kategoriespezifischen Risikofaktoren dienen in den folgenden Analysen als Gewichtungskoeffizienten. Sie werden mit den gemessenen Zeitanteilen kombiniert, die ein Raum in den jeweiligen IAQ-Kategorien verbringt, um einen Gesamt-Risikowert für jede Bildungseinrichtung zu bestimmen. Dieser Wert bildet anschließend die Grundlage für die Abschätzung potenziell vermeidbarer krankheitsbedingter Fehltag.

4.6. Simulation von Modellräumen zur Erstellung digitaler Zwillinge

Für alle untersuchten Modellräume wurden digitale Zwillinge (3D-Modelle nach der BIM-Methodik, siehe Abbildung 4) erstellt. Hierbei wurde das INDALO-Plugin für die Software Autodesk Revit eingesetzt, das auf Basis des Copernicus Atmospheric Service arbeitet und Vorhersagen zu bodennahen Konzentrationen ausgewählter Spurenstoffe in der Außenluft bereitstellt. Als Modellszenarien wurden sowohl die messtechnisch erfasste Ist-Situation als auch die energieeffizient optimierte Soll-Situation implementiert. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden Raumbelegung und Lüftungsschema (z.B. Fensteröffnungsverhalten, Betriebszustände einer RLT-Anlage) als Hauptmodellparameter variiert.

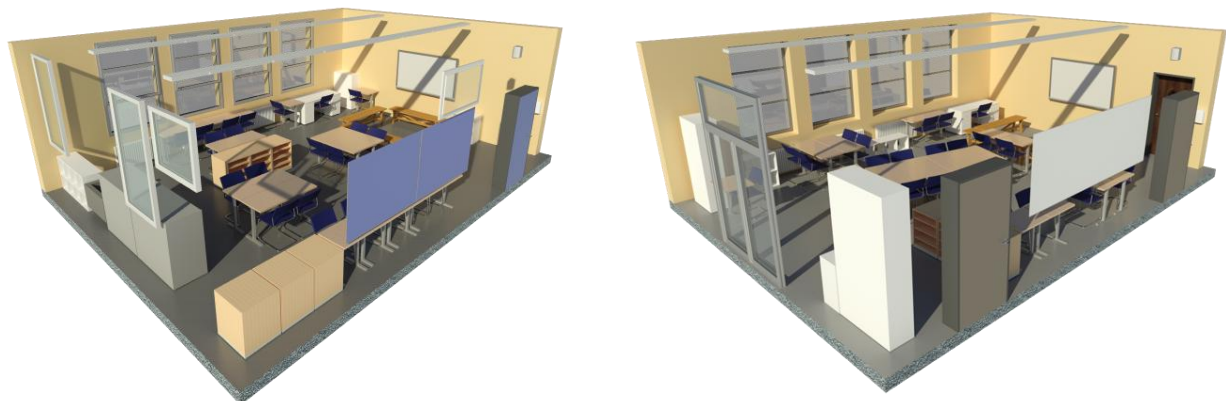


Abbildung 4: Visualisierung der digitalen Zwillinge der Modellräume C1 (links) und C2 (rechts) der teilnehmenden Einrichtung C.

Die Integration der BIM-Methodik in das IAQMS stellt eine wesentliche Innovation von LUMUMBA dar und schafft eine Schnittstelle zum Building Information Modeling als Planungswerkzeug für die Technische Gebäudeausrüstung. Bildungseinrichtungen können Autodesk Revit als Freeware einsetzen, und die meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind kostenlos zugänglich, was die langfristige Weiternutzung ohne zusätzlichen Kostenaufwand ermöglicht.

4.7. Planung, Installation und Validierung optimierter Lüftungssituationen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Messungen (AP1) und Simulationen (AP2) wurden für geeignete Räumlichkeiten minimalinvasive technische Maßnahmen zur energieeffizienten Bereitstellung hoher Raumluftqualität geplant und realisiert. Als minimalinvasive Interventionen gelten technische Änderungen mit kleinem Budget (ca. 3.500 € pro Einrichtung) und geringem handwerklichem Aufwand (wenige Arbeitstage).

Konkret wurden in Einrichtung D (Gymnasium) zwei dezentrale Lüftungsgeräte und in Einrichtung C (Grundschule) vier dezentrale Lüftungsgeräte installiert (siehe Abbildung 5). Technische Daten und Schalldaten der eingebauten dezentralen Lüftungsgeräte sind Tabelle 7 und Tabelle 8 zu entnehmen.



Abbildung 5: Schematische Darstellung des in den Modellräume C1, C2 und D4 eingebauten dezentralen Lüftungsgeräts.

Tabelle 7: Technische Daten der in Räumen C1, C2 und D4 eingebauten dezentralen Lüftungsgeräte.

Merkmal	Wert
Wandöffnung [Ø, mm]	2 x 180
Wandeinbauhülse [Ø, mm]	2 x 160
Luftvolumenstrom [m³/h]	50 – 180
Leistungsaufnahme (max.) [W]	33,4
Eingangsspannung [V AC, Hz]	230, 50
Spezifische Eingangsleistung (SEL) [W/(m³/h)]	0,15
Standby-Verbrauch [W]	< 1
Schalldruckpegel [dB(A)], 2 m	12 – 32
Wärmerückgewinnung [%]	87
Klappen	Automatisch schließend für Zu- und Abluft
Anwendung im Hochbau [m]	bis zu 80
Filter	ISO Coarse 45%
Sensoren	CO ₂ , Temperatur, Feuchte
Gewicht [kg]	40
Abmessungen [BxHxT, mm]	520x1945x202
Schutzklasse	I
Energieeffizienzklasse	A

Tabelle 8: Schalldaten der in Räumen C1, C2 und D4 eingebauten dezentralen Lüftungsgeräte.

Schalldaten			
LVS [m³/h]	L_WA [dB(A)]	L_pA in 1 m [dB(A)]	L_pA in 2 m [dB(A)]
50	26	18	12
126	40	32	27
180	46	38	32

Nach der Implementierung wurden einwöchige Messkampagnen zur Evaluierung der Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Für weitere Räume, in denen minimalinvasive Interventionen nicht ausreichend zur Realisierung der Optimierungsbedarfe wären, dient der digitale Zwilling als Planungs- und Entscheidungstool für zukünftige Investitionen sowie zur Kalkulation der zugehörigen Amortisationszeiten.

4.8. Ableitung allgemeiner Anforderungen an ein integriertes Managementsystem

Die Ableitung allgemeiner Anforderungen an ein integriertes Managementsystem unter Berücksichtigung von ISO 16000-40 und ISO 14001 erfolgte auf Basis der Ergebnisse der Messkampagnen und Simulationen. Für jede teilnehmende Einrichtung wurden die spezifischen Kosteneinsparpotenziale auf Basis realer Messdaten kalkuliert und vor dem Hintergrund ökonomischer und ökologischer Amortisationszeiten eingeordnet. Die Anforderungen umfassen: (i) Festlegung von Maßnahmen zur Zielerreichung (IAQ-Zielwerte nach EN 16798-1), (ii) Umsetzung von Maßnahmen (technische und organisatorische Interventionen), (iii) Feststellung von Soll-Ist-Abweichungen (kontinuierliches Monitoring), (iv) Einleitung von Verbesserungsmaßnahmen (PDCA-Zyklus).

4.9. Implementierung der partizipativen Workshops

Das didaktische Konzept von LUMUMBA basiert auf dem Reallabor-Ansatz als Methode der transformativen Nachhaltigkeitsforschung. Reallabore verbinden wissenschaftliche Methodik mit gesellschaftlicher Praxis, indem sie reale Lern- und Lebensräume als Experimentierfeld nutzen. Im Kontext von LUMUMBA wird das eigene Klassenzimmer bzw. der eigene Gruppenraum zum Labor: Die Lernenden forschen nicht über abstrakte Phänomene, sondern untersuchen unmittelbar ihre eigene Atemluft, messen die CO₂-Konzentration im laufenden Unterricht, leiten daraus Gesundheitsrisiken ab und entwickeln gemeinsam Lösungsstrategien. Dieser Ansatz steht in enger Verbindung mit etablierten Lerntheorien: Das erfahrungsbasierte Lernen nach Kolb (Experiential Learning Cycle) [52] und das forschende Lernen nach Dewey [53] bilden die kognitionspsychologische Grundlage. Beide Ansätze betonen, dass nachhaltige Lernprozesse durch die Verknüpfung von konkreter Erfahrung, reflektierender Beobachtung, abstrakter Begriffsbildung und aktivem Experimentieren entstehen – strukturell identisch mit dem PDCA-Zyklus des integrierten Managementsystems.

Die curriculare Einbettung des LUMUMBA-Konzepts ist bewusst fächerübergreifend angelegt. Die Workshopinhalte berühren Kernbereiche mehrerer Schulfächer: Naturwissenschaften (Chemie, Physik, Biologie), Mathematik, Geographie sowie politische Bildung/Sozialkunde. Dies erlaubt eine flexible Integration in bestehende Lehrpläne ohne strukturelle Änderungen des Schulbetriebs und erhöht die Übertragbarkeit auf andere Einrichtungen.

4.9.1. Aufbau und Inhalt der fünf partizipativen Workshops

Das didaktische Konzept der partizipativen Workshops ist als geschlossener Kreislauf im Sinne des PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) des integrierten Managementsystems nach ISO 16000-40 und ISO 14001 konzipiert. Alle fünf Workshops sind inhaltlich und didaktisch sequenziell aufgebaut und steigern die kognitive Komplexität systematisch. Die Workshop-Reihe trägt übergreifend den Titel 'Appealing Air in a Sustainable Building' und gliedert sich in thematische Cluster:

Workshop 1 (PW1) – Plan-Phase: 'Lebensmittel Luft'

PW1 leitet die Lernenden über die Metapher 'Lebensmittel Luft' in das Thema ein und nutzt dabei die didaktische Kraft des Bekannten: Die 'Survival Rule of 3s' (3 Minuten ohne Luft, 3 Tage ohne Wasser, 3 Wochen ohne Essen) verdeutlicht unmittelbar die biologische Priorisierung von Luft als Lebensgrundlage. Der tägliche Luftverbrauch eines Menschen (15,6 kg) kontrastiert eindrucksvoll mit dem Wasserverbrauch (1,5 kg) und dem Nahrungsverbrauch (1,5–2,5 kg) und schafft so eine emotionale Verbindung zum Thema. Der historische Exkurs über den Great Smog of London (1952) verdeutlicht die gesellschaftlichen Folgen von Luftverschmutzung. Im Kern vermittelt PW1 die Zusammensetzung der Luft (N_2 78 %, O_2 21 %, Ar <1 %, CO_2 0,04 %), die Gesundheitsrelevanz von Luftschadstoffen ($PM_{2.5}$, TVOC, CO_2) und die Grundlagen des NDIR- CO_2 -Messverfahrens (Lambert-Beer'sches Gesetz). Praktisch: Die Lernenden führen mit einem CO_2 -Sensor ein eigenes Monitoring durch, erheben alle 30 Sekunden den CO_2 -Wert über 10 Minuten, tragen die Daten in ein Koordinatensystem ein und berechnen die CO_2 -Bildungsrate aus der Geradensteigung ($f(x)=mx+b$). Aus realen Messdaten eines Gymnasiums (Anstieg von 1237 auf 1790 ppm in 570 s) berechnen die Lernenden die Pro-Kopf- CO_2 -Ausatemungsrate (~ 47 g/h = $\sim 1,13$ kg/Tag) und skalieren diesen Wert auf die Bevölkerung Deutschlands (84,6 Mio. Bürger = ~ 95.480 t CO_2 /Tag = ca. 15.913 Elefanten). Diese Verhältniszahl erweist sich als wirkungsvolles Kommunikationsinstrument.

Workshop 2 (PW2) – Check-Phase: 'Mehr Wirbel für frische Luft'

PW2 fokussiert auf die physikalischen Grundlagen der Konvektion und den jahreszeitlichen Charakter der Fensterlüftung. Kernkonzepte sind: Konvektion als Transport thermischer Energie durch Teilchenbewegung, freie/natürliche Konvektion durch Temperatur- und Dichteunterschiede sowie die temperaturdifferenzabhängige Triebkraft der Fensterlüftung (ΔT Winter $\gg$ ΔT Sommer $\rightarrow$ höhere Luftwechselrate im Winter). Die UBA-Ampel (grün: <1000 ppm = hygienisch unbedenklich; gelb: 1000–2000 ppm = hygienisch auffällig; rot: >2000 ppm = hygienisch inakzeptabel) wird als Bewertungsreferenz eingeführt. In der praktischen Übung analysieren die Lernenden CO_2 -Tagesgänge für Sommer- und Winterperiode, identifizieren Lüftungsereignisse, berechnen Steigungsdreiecke und diskutieren die Unterschiede im Temperatur- und CO_2 -Verlauf. Sie tragen die UBA-Leitwerte in echte Tagesprofilaten ein und schätzen ab, wie viele Minuten pro Schultag die Luftqualität im roten Bereich liegt (im ausgewerteten Beispiel: ca. 80 min rot, 105 min gelb, 145 min grün bei einem 330 min-Schultag). Ein direkter Vergleich zweier CO_2 -Profile – fenstergelüftet vs. maschinengestützt belüftet – macht den Nutzen technischer Lüftungsunterstützung erfahrbar.

Workshop 3 (PW3) – Do-Phase: 'Save Energy today for a brighter tomorrow!'

PW3 vertieft den Zielkonflikt zwischen Luftqualität und Energie und führt die thermodynamischen Grundlagen (Wärme als Prozessgröße, Temperatur als Zustandsgröße, spezifische Wärmekapazität in engem Bezug zum eigenen Klassenraum ein. Die Lernenden berechnen zunächst die Luftmasse ihres realen Modellraums (z.B. $8\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3,8\text{ m} = 215\text{ m}^3 \rightarrow 258\text{ kg}$ Luft) und die erforderliche Energie zur Erwärmung um 1 K ($Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 258\text{ kJ}$). Daraufhin berechnen sie den lüftungsbedingten Energieverlust für einen Schultag mit 9 UBA-empfohlenen Lüftungsereignissen (im Beispiel: $\sim 9.056\text{ kJ} \approx 2,51\text{ kWh} \approx 0,25\text{ m}^3$ Erdgas) und erkennen die monetäre Bedeutung dieser Verluste. Der Konnex zwischen natürlicher Lüftung, Wärmeverlust und Klimaschutz wird damit von den Lernenden eigenständig hergeleitet. Weiterhin wird das Konzept des Wärmetauschers (Kreuzstromwärmetauscher, $\eta \approx 60\%$) als technische Lösung zur Wärmerückgewinnung eingeführt. Der PDCA-Zyklus wird als Managementwerkzeug vorgestellt (Plan: Problembeschreibung, Analyse, Maßnahmenplanung; Do: Umsetzung, Dokumentation; Check: Überprüfung, Anpassung; Act: Standardisierung, Reflexion, neue Ziele).

Workshop 4 (PW4) – Check-Phase: 'Mit System zu weniger Verbrauch – Energie clever managen!'

PW4 verknüpft die energetischen Grundlagen mit einem konkreten Managementsystem-Ansatz. Am Beispiel der Beleuchtungsoptimierung des eigenen Modellraums führen die Lernenden eine vollständige PDCA-Analyse durch: Im Plan & Do-Schritt identifizieren sie Energieverbrauchsorte (Raumwärme, elektrische Energie, Warmwasserbereitung), ermitteln die Leistung bestehender Leuchtmittel (Philips MASTER TL-D Super 80, 58 W, 12 Stück) und berechnen den jährlichen Energieverbrauch der Beleuchtung (836 kWh/Raum/Jahr). Im Check & Act-Schritt vergleichen sie diesen mit dem Verbrauch nach Umrüstung auf LED (Philips T8 Master Ultra Output,

21,7 W: 312 kWh/Jahr) und berechnen die jährliche Energieersparnis (524 kWh → 157,20 € bei 0,30 €/kWh in NRW). Die Investitionskosten ($12 \times 14,45 \text{ €} = 173,40 \text{ €}$) und die monetäre Amortisation (ab dem zweiten Jahr) werden konkret ermittelt. Bei Übertragung auf ein 50-Räume-Gebäude ergibt sich eine jährliche Gesamtersparnis von 7.860 € ab dem zweiten Jahr. Dieser Transfer von der Einzelraumbetrachtung zur Gebäudeskala macht den skalierbaren Charakter des Managementsystem-Ansatzes erfahrbar und verankert das Konzept des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses.

Workshop 5 (PW5) – Act-Phase: Gesamtevaluation und Managementsystem-Verankerung

PW5 schließt den PDCA-Zyklus auf der übergeordneten Ebene des integrierten Managementsystems. Die Ergebnisse aller vorangegangenen Workshops sowie der Messkampagnen und technischen Optimierungsmaßnahmen werden zusammengeführt. Einrichtungsspezifische Kosteneinsparpotenziale werden auf Basis realer Messdaten kalkuliert, Amortisationszeiten für Investitionen bestimmt und Anforderungen an die Implementierung von Managementsystemen (ISO 16000-40, ISO 14001) für die jeweilige Einrichtung definiert. Der Workshop mündet in einen konkreten Fahrplan zur langfristigen Weiteranwendung des IAQMS.

4.9.2. Zielgruppenadaptivität und Ausdifferenzierung des didaktischen Konzepts

Ein zentrales Merkmal des didaktischen Konzepts von LUMUMBA ist seine Adaptivität hinsichtlich der Zielgruppe. Die Workshop-Reihe wurde für verschiedene Bildungsstufen konzipiert und entsprechend ausdifferenziert: Kindertagesstätten (Kinder 2–4 und 3–6 Jahre), Grundschule (Klasse 4), Gymnasium Sekundarstufe I und II (Jahrgangsstufen 9 und Oberstufe), Berufskolleg sowie Hochschule. Die curriculare Anknüpfung unterscheidet sich dabei in Abstraktionsniveau, mathematischer Komplexität und institutionellen Referenzrahmen erheblich: Während für die KiTas (Einrichtungen A und B) ein vereinfachter Ansatz aus PW1 und PW2 ausreicht, der sich auf sensorische Erfahrungen, Bildsprache und einfache Analogien stützt, werden an Gymnasien und der Hochschule vollständige quantitative Berechnungen, Regressionsanalysen und die Anbindung an Normwerke (EN 16798-1, ISO 16000-40) eingeführt. Die Workshop-Materialien – insbesondere die 'IAQ Testlabor Klassenzimmer'-Arbeitsblätter – enthalten gestufte Aufgaben ('Für die Denker unter euch!'), die Differenzierung im Unterricht ermöglichen. An der Hochschule (Einrichtung F) wurden die Workshops in den regulären Lehrkontext der Ingenieurausbildung integriert.

Die Einrichtung H (Grundschule) wünschte keine partizipativen Workshops, was als legitimer institutioneller Entscheid respektiert wurde und die Freiwilligkeit des Reallabor-Ansatzes unterstreicht.

4.9.3. Das didaktische Konzept als Beitrag zur Nachhaltigkeitsbildung

Das didaktische Konzept von LUMUMBA leistet einen nachweisbaren Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) in mehrfacher Hinsicht. Erstens adressiert es das Prinzip der Systemkompetenz: Lernende erkennen das Klassenzimmer als technisches System mit Stoff- und Energieströmen, Zielkonflikten (Luftqualität vs. Energiebedarf) und Rückkopplungsschleifen. Zweitens fördert es Antizipationskompetenz: Durch die Berechnung zukünftiger Energieeinsparungen und CO₂-Emissionsminderungen lernen Lernende, Konsequenzen von Handlungen quantitativ abzuschätzen. Drittens stärkt es Gestaltungskompetenz im engeren Sinne: Die Lernenden erfahren konkret, dass sie selbst durch informiertes Lüftungsverhalten die Raumluftqualität verbessern und durch Energieeffizienzmaßnahmen Kosten senken können. Diese drei Kompetenzdimensionen entsprechen den BNE-Kernkompetenzen der UNESCO (Systemdenken, antizipatorische Kompetenz, normative Kompetenz) [54] und sind im Nationalen Aktionsplan BNE der Bundesregierung [55] als zentrale Bildungsziele verankert.

Darüber hinaus schafft das didaktische Konzept einen institutionellen Rahmen für die Kontinuität: Durch die Verankerung im Managementsystem-Ansatz (PDCA-Zyklus) wird sichergestellt, dass die Wissensvermittlung nicht auf die Projektlaufzeit begrenzt bleibt. Lehrende werden befähigt, den Workshop-Zyklus in nachfolgenden Jahrgängen eigenständig zu wiederholen und an aktuelle Messdaten des eigenen Gebäudes anzupassen. Die technische Infrastruktur (Sensoren, ggf. dezentrale Lüftungsgeräte) verbleibt in den Einrichtungen und ermöglicht die Fortführung des IAQ-Monitorings im Schulbetrieb.

Didaktisches Konzept auf einen Blick: 5 Workshops im PDCA-Zyklus

- PW1 (Plan) – Lebensmittel Luft: Luftzusammensetzung, Gesundheitseffekte, NDIR-Messprinzip, CO₂-Monitoring praktisch
- PW2 (Check) – Mehr Wirbel: Konvektion, jahreszeitl. Lüftungseffizienz, UBA-Ampel, Vergleich Lüftungskonzepte
- PW3 (Do) – Energie sparen: Wärme/Temperatur, spez. Wärmekapazität, Lüftungsenergieverluste berechnen, Wärmetauscher
- PW4 (Check) – Mit System: PDCA-Zyklus, Energiemanagement, Beleuchtungsoptimierung als Fallstudie, Amortisationsberechnung
- PW5 (Act) – Gesamtevaluation: Managementsystem-Verankerung, einrichtungsspezifische Kostenplanung, Fahrplan ISO 16000-40
- Zielgruppenadaptiv für verschiedene Bildungsstufen: KiTa (2-4 J.) bis Hochschule (Erwachsene)
- Curriculare Anknüpfung: Chemie, Physik, Biologie, Mathematik, politische Bildung
- BNE-Kompetenzen: Systemkompetenz, Antizipationskompetenz, Gestaltungskompetenz (UNESCO-Rahmen)

5. Ergebnisse

5.1. Erreichung Projektziele

Die nachfolgende Tabelle 9 gibt einen Überblick über die im Projektantrag definierten Erfolgskriterien und den tatsächlichen Projektstand:

Tabelle 9: Soll-Ist-Vergleich für die LUMUMBA-Projektziele.

Ziel / Erfolgskriterium (laut Projektantrag)	Status	Bemerkung
Planungs- und Entscheidungstool für teilnehmende Einrichtungen	✓ Erreicht	CO ₂ -basierte Risikomatrix + Excel-Tool + Berichte
Mindestens 3 Einrichtungen untersucht	✓ Übertroffen	8 Einrichtungen, 19 Räume
Messkampagnen Winter- und Sommerperiode in Modellräumen	✓ Erreicht	14 Räume in 6 Einrichtungen quantitativ ausgewertet
Digitale Zwillinge (BIM/INDALO) für alle Modellräume	✓ Erreicht	Für alle untersuchten Räume erstellt
Realisierung minimalinvasiver Maßnahmen und Validierung	✓ Erreicht	Einrichtungen C und D; Nachmessung abgeschlossen
Partizipative Workshops PW1–PW5 in allen Einrichtungen	✓ Erreicht	PW1 und PW2 deckten den Bedarf der Einrichtungen A und B, Außer Einrichtung H (kein Workshop gewünscht)
Peer-reviewte Open-Access-Publikation	✓ Erreicht	Nehr et al. 2024, Journal of Building Engineering, veröffentlicht [21] Nehr et al. 2025, Indoor Environments, eingereicht [20]
New Work Item Proposal ISO/TC 146/SC 6	✓ Erreicht	Sascha Nehr auf Plenary Meeting Sep. 2025 zum Convenor zur Überarbeitung von ISO 16000-8 berufen [56]
VDI/DIN Normenausschuss "Planung von Innenraumlufthuntersuchungen"	✓ Erreicht	Sascha Nehr zum Mitglied berufen zur Überarbeitung von VDI 4300-9 [57]
Populärwissenschaftliche Publikation / Handlungsempfehlung	✓ Erreicht	Philologenverband NRW 2024 [58]; Umweltbundesamt 2024 [59]; Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 2025 [60]; Innenraumforum 2025 [61]
Kommunikation an politische Stakeholder (BSK, DPhV)	✓ Erreicht	Executive Summary und Publikation verbreitet

5.2. Planungs- und Entscheidungstool für die teilnehmenden Einrichtungen

5.2.1. Bewertung der strukturellen Lüftungsvoraussetzungen (IAQ-Aspekt A)

Die Überprüfung der AMEV-166-Konformität in Tabelle 10 zeigt, dass keiner der 14 untersuchten Räume alle fünf Planungskriterien der AMEV 166 erfüllt.

Tabelle 10: Notwendigkeit einer mechanischen Lüftungsanlage gemäß AMEV 166 Auslegungskriterien.

		Einrichtung													
		A	B	C		D						E	F		
		A1	B1	C1	C2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	F1	F2	F3
Spezifisches Raumvolumen je Nutzer $\dot{V}_{occ}^{(1), (2)}$	/ m³ Nutzer⁻¹	6,45	5,75	10,28	11,05	6,16	5,53	<u>4,47</u>	6,91	7,32	<u>4,80</u>	6,58	8,92	6,44	6,47
Fensteröffnungsfläche je Nutzer A_{tos} (gekippt, einseitige Lüftung) ^{(1), (2)}	/ m² Nutzer⁻¹	<u>0,03</u>	<u>0,04</u>	<u>0,14</u>	<u>0,15</u>	<u>0,03</u>	<u>0,05</u>	<u>0,02</u>	<u>0,03</u>	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>	<u>0,09</u>	<u>0,03</u>	<u>0,03</u>	<u>0,02</u>
Gebäudehüllen- Öffnungsfläche je Nutzer A_{tc} (gekippt, Querlüftung) ^{(1), (2)}	/ m² Nutzer⁻¹	<u>0,11</u>	<u>0,12</u>	0,24	0,25	<u>0,10</u>	<u>0,12</u>	<u>0,08</u>	<u>0,10</u>	<u>0,11</u>	<u>0,11</u>	<u>0,16</u>	<u>0,14</u>	<u>0,15</u>	<u>0,09</u>
Fensteröffnungsfläche je Grundfläche A_{fos} (vollständig geöffnet, einseitige Lüftung) ⁽¹⁾	/ m² 10 m⁻²	<u>0,70</u>	<u>0,67</u>	1,72	1,36	1,19	1,78	<u>0,74</u>	1,12	1,26	<u>1,03</u>	2,34	<u>0,85</u>	<u>0,55</u>	<u>0,55</u>
Gebäudehüllen- Öffnungsfläche je Grundfläche A_{fc} (vollständig geöffnet, Querlüftung) ⁽¹⁾	/ m² 10 m⁻²	1,07	1,03	2,03	1,65	1,57	2,17	1,10	1,44	1,55	1,36	2,67	1,36	1,03	0,90

⁽¹⁾ Falls die AMEV 166 Auslegungskriterien $\dot{V}_{occ} \geq 5 \text{ m}^3 \text{ Nutzer}^{-1}$, $A_{tos} \geq 0,35 \text{ m}^2 \text{ Nutzer}^{-1}$, $A_{tc} \geq 0,20 \text{ m}^2 \text{ Nutzer}^{-1}$, $A_{fos} \geq 1,05 \text{ m}^2 10 \text{ m}^{-2}$ und $A_{fc} \geq 0,60 \text{ m}^2 10 \text{ m}^{-2}$ nicht eingehalten werden, ist eine mechanische Lüftungsanlage erforderlich. Werte, die die AMEV 166 Kriterien nicht erfüllen, sind unterstrichen.

⁽²⁾ Nutzerspezifische Ergebnisse beziehen sich auf die maximal zulässige Belegung.

Da kein Raum alle fünf AMEV-166-Auslegungskriterien erfüllt, besteht für alle untersuchten Räume ein konditioneller Bedarf einer mechanischen Lüftungsanlage. Die Anzahl der jeweils erfüllten Kriterien variiert dabei erheblich: - Die Räume C1 und C2 erfüllen mit jeweils vier von fünf Kriterien die beste Performance im Vergleich. - Die Räume D1, D2, D4, D5 und E1 erfüllen jeweils drei Kriterien. - Die Räume A1, B1, F1, F2 und F3 erfüllen jeweils nur zwei Kriterien. - Die Räume D3 und D6 erfüllen mit nur einem Kriterium am wenigsten; beide unterschreiten zusätzlich das Mindest-Raumvolumen von 5 m³ je Person. Eine Querlüftung ist in den Räumen D6, F2 und F3 geometrisch nicht möglich. Die Auswertung der fensterflächenspezifischen Parameter zeigt, dass das Kriterium A_{tos} (Fensteröffnungsfläche je Person bei Kippfenstern) in nahezu allen Räumen nicht erreicht wird. Dies liegt daran, dass die Lüftung durch gekippte Fenster in Deutschland den Standardfall darstellt, die dabei wirksame Öffnungsfläche jedoch typischerweise weit unter dem AMEV-Mindestwert von 0,35 m² Person⁻¹ liegt (ermittelte Werte: 0,02–0,15 m² Person⁻¹).

5.2.2. CO₂-Konzentrationsprofile und IAQ-Kategorienbewertung (IAQ-Aspekt B)

Die kontinuierliche Erfassung der CO₂-Konzentrationsprofile während der Heizperiode offenbarte erhebliche Raum-zu-Raum-Variabilität sowohl im Ausmaß als auch in der Persistenz erhöhter CO₂-Konzentrationen. Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die mittleren CO₂-Konzentrationen und prozentualen Zeitanteile in den vier EN-16798-1-Kategorien für alle untersuchten Räume:

Tabelle 11: Vorherrschende CO₂-Konzentration, gruppiert in Kategorien (I bis IV) gemäß EN 16798-1. Die experimentellen Ergebnisse werden als gepoolte Mittelwerte und zugehörige gepoolte Standardabweichungen der CO₂-Konzentrationen angegeben, die an mehreren Messtagen bestimmt wurden. Zahlen in geschweiften Klammern bezeichnen die Anzahl der Messtage.

	Einrichtung													
	A			B		C			D		E		F	
	A1	B1	C1	C2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	F1	F2	F3
< 550 ppm über Außenluftkonzentration	257 ±123 {3}	259 ±166 {5}	372 ±116 {4}	356 ±126 {5}	233 ±189 {4}	383 ±104 {4}	373 ±123 {4}	353 ±110 {1}	364 ±153 {1}	293 ±131 {4}	286 ±147 {5}	302 ±127 {7}	341 ±132 {5}	360 ±123 {4}
550 bis <800 ppm über Außenluftkonzentration	677 ±64 {3}	689 ±72 {5}	656 ±64 {4}	691 ±70 {5}	667 ±68 {4}	672 ±72 {4}	687 ±76 {4}	660 ±68 {1}	679 ±64 {1}	679 ±75 {4}	659 ±72 {5}	654 ±61 {7}	665 ±59 {5}	666 ±52 {4}
800 bis <1350 ppm über Außenluftkonzentration	1026 ±142 {3}	1097 ±157 {5}	1002 ±141 {4}	1003 ±133 {5}	1062 ±156 {4}	964 ±124 {4}	1010 ±164 {4}	910 ±61 {1}	1048 ±159 {1}	995 ±153 {4}	984 ±158 {5}	1062 ±147 {7}	1040 ±151 {5}	998 ±129 {4}
≥ 1350 ppm über Außenluftkonzentration	1453 ±67 {3}	1745 ±317 {5}	1592 ±217 {4}	1800 ±249 {5}	1737 ±241 {4}	1473 ±94 {4}	2553 ±1079 {4}	– {–}	1607 ±172 {1}	2046 ±503 {4}	1409 ±45 {5}	1989 ±437 {7}	1823 ±375 {5}	1461 ±81 {4}

Tabelle 12: Prozentualer Zeitanteil der vorherrschenden CO₂-Konzentration, gruppiert in Kategorien (I bis IV) gemäß EN 16798-1. Die experimentellen Ergebnisse werden als Mittelwerte und zugehörige Standardabweichungen der prozentualen Zeitanteile angegeben, die an mehreren Messtagen bestimmt wurden. Zahlen in geschweiften Klammern bezeichnen die Anzahl der Messtage.

	Einrichtung													
	A	B	C		D					E	F			
	A1	B1	C1	C2	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	F1	F2	F3
< 550 ppm über Außenluftkonzentration	0,43 ±0,12 {3}	0,20 ±0,09 {5}	0,24 ±0,23 {4}	0,20 ±0,11 {5}	0,50 ±0,28 {4}	0,45 ±0,14 {4}	0,06 ±0,03 {4}	0,63 {1}	0,14 {1}	0,56 ±0,18 {4}	0,59 ±0,20 {5}	0,42 ±0,17 {7}	0,47 ±0,24 {5}	0,40 ±0,23 {4}
550 bis <800 ppm über Außenluftkonzentration	0,20 ±0,05 {3}	0,09 ±0,05 {5}	0,38 ±0,23 {4}	0,33 ±0,20 {5}	0,15 ±0,02 {4}	0,30 ±0,03 {4}	0,11 ±0,05 {4}	0,27 {1}	0,22 {1}	0,17 ±0,04 {4}	0,26 ±0,16 {5}	0,22 ±0,15 {7}	0,17 ±0,05 {5}	0,33 ±0,18 {4}
800 bis <1350 ppm über Außenluftkonzentration	0,29 ±0,14 {3}	0,28 ±0,10 {5}	0,26 ±0,15 {4}	0,32 ±0,18 {5}	0,13 ±0,11 {4}	0,24 ±0,11 {4}	0,24 ±0,13 {4}	0,10 {1}	0,42 {1}	0,21 ±0,07 {4}	0,13 ±0,13 {5}	0,25 ±0,18 {7}	0,23 ±0,15 {5}	0,21 ±0,21 {4}
≥ 1350 ppm über Außenluftkonzentration	0,08 ±0,05 {3}	0,44 ±0,11 {5}	0,11 ±0,19 {4}	0,16 ±0,17 {5}	0,13 ±0,14 {4}	0,01 ±0,01 {4}	0,59 ±0,20 {4}	0,00 {1}	0,22 {1}	0,09 ±0,15 {4}	0,01 ±0,01 {5}	0,11 ±0,20 {7}	0,12 ±0,12 {5}	0,07 ±0,13 {4}

Über die meisten Räume hinweg dominieren Bedingungen der Kategorien II und III mit kumulierten Zeitanteilen von 28–65 % der Nutzungszeiten, während Kategorie-I-Bedingungen (hygienisch unbedenklich) nur zeitweise mit Zeitanteilen von 6–63 % erreicht werden. Für Räume A1, C1, C2, D1, D2, D4, D6, E1, F1, F2 und F3 treten Kategorie-IV-Bedingungen (hygienisch inakzeptabel, ≥1350 ppm über Außenluft) nur sporadisch auf und machen weniger als 20 % der Nutzungszeit aus. Raum B1 (KiTa, Kinder 2–4 Jahre) zeigt mit einem Kategorie-IV-Zeitanteil

von 44 ± 11 % deutlich erhöhte Risikowerte. Raum D3 (Gymnasium D, bestes Querlüftungsgebäude) zeigt mit 59 ± 20 % den höchsten Zeitanteil in Kategorie IV, bedingt durch das sehr kleine Raumvolumen je Person.

5.2.3. Nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme und Energiebewertung (IAQ-Aspekte C und D)

Die mittels CO₂-Abklümmethode experimentell bestimmten Luftwechselraten k und die daraus berechneten nutzerspezifischen Lüftungsvolumenströme $\dot{V}_{occ}$ zeigen sehr unterschiedliche Lüftungsleistungen in den untersuchten Einrichtungen. Tabelle 13 fasst die Ergebnisse zusammen:

Tabelle 13: Luftwechselraten k , nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme $\dot{V}_{occ}$ und flächenspezifische Lüftungswärmeverluste $E_{comp, area, a}$. Angaben als Mittelwert $\pm$ Standardabweichung. Unterstrichene Werte unterschreiten den UBA-Mindestwert.

Raum	k / h^{-1}	$\dot{V}_{occ} / m^3 h^{-1} Person^{-1}$	$E_{comp, area, a} / kWh m^{-2} a^{-1}$
A1	$1,4 \pm 0,9$	<u>$9,3 \pm 6,1$</u>	$1,9 \pm 1,2$
B1	$0,8 \pm 0,4$	<u>$4,4 \pm 2,2$</u>	$0,9 \pm 0,5$
C1	$1,3 \pm 1,0$	<u>$13,1 \pm 10,2$</u>	$2,0 \pm 1,5$
C2	$1,0 \pm 0,4$	<u>$11,4 \pm 4,5$</u>	$1,6 \pm 0,6$
D1	$19,8 \pm 5,8$	$122,0 \pm 35,7$	$33,8 \pm 9,9$
D2	$13,2 \pm 3,6$	$73,0 \pm 19,9$	$19,6 \pm 5,3$
D3	$13,2 \pm 3,3$	$58,9 \pm 14,7$	$17,8 \pm 4,5$
D4	$10,1 \pm 2,3$	$69,7 \pm 15,9$	$16,7 \pm 3,8$
D5	25,7	187,9	39,5
D6	$14,9 \pm 4,0$	$71,2 \pm 19,1$	$19,3 \pm 5,2$
E1	$1,4 \pm 1,4$	<u>$9,4 \pm 9,4$</u>	$2,3 \pm 2,3$
F1	$2,7 \pm 1,8$	<u>$23,9 \pm 16,0$</u>	$5,2 \pm 3,5$
F2	$4,4 \pm 1,6$	$28,6 \pm 10,3$	$5,3 \pm 1,9$
F3	$3,0 \pm 1,5$	<u>$19,3 \pm 10,0$</u>	$4,7 \pm 2,4$

Einrichtungen mit niedrigen Luftwechselraten (A, B, C) erreichen nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme von nur $4\text{--}13 m^3 h^{-1} Person^{-1}$ – weit unter dem UBA-Mindestwert von $25\text{--}30 m^3 h^{-1} Person^{-1}$. Ähnliche Defizite zeigen sich bei E1, F1 und F3. Die Einrichtung D stellt eine bemerkenswerte Ausnahme dar: Durch explizite Lüftungsvorgaben (vollständiges Öffnen der Fenster alle 20 Minuten für 5 Minuten Querlüftung) werden nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme von $59\text{--}188 m^3 h^{-1} Person^{-1}$ erreicht – weit über dem hygienischen Mindestbedarf.

Die flächenspezifischen Lüftungswärmeverluste spiegeln diesen Dualismus wider: Räume mit unzureichender Lüftung zeigen sehr niedrige Verluste (typisch $\leq 5 kWh m^{-2} a^{-1}$), was jedoch direkt mit Unterlüftung und damit unzureichender Raumlufthausqualität verbunden ist. Räume mit hohen Luftwechselraten – insbesondere in D – weisen signifikant höhere Verluste auf ($16\text{--}40 kWh m^{-2} a^{-1}$), die bis zu 80 % des typischen Gesamtenergiebedarfs von Bildungsgebäuden (BBSR-Referenz: $\sim 50 kWh m^{-2} a^{-1}$) ausmachen können.

5.3. Neuartiger wissenschaftlicher Ansatz für die Branche der technischen Gebäudeausrüstung

5.3.1. CO₂-basierte IAQ-Risikomatrix

Als zentrales wissenschaftliches Ergebnis von LUMUMBA wurde eine CO₂-basierte 4×4-IAQ-Risikomatrix entwickelt, die als reproduzierbares Entscheidungsunterstützungswerkzeug für die Priorisierung von Lüftungsverbesserungen in natürlich belüfteten Bildungsgebäuden dient. Diese Matrix synthetisiert sensorbasierte CO₂-Monitoringdaten über alle quantitativ ausgewerteten Einrichtungen und integriert zwei Dimensionen:

- Zeilen der Matrix: Vier gleichmäßige Klassen des prozentualen Zeitanteils, während dem die gemessenen CO₂-Konzentrationen vorherrschen (Häufigkeit/Likelihood des IAQ-Szenarios)
- Spalten der Matrix: Vier IAQ-Szenarien nach den vier Kategorien der EN 16798-1 (Ausmaß/Severity der Abweichung)

Die Farbkodierung folgt dem Ampelsystem: Grüne Zellen unterhalb der Diagonale kennzeichnen Niedrig-Risiko-Szenarien (kein Handlungsbedarf); gelbe Zellen entlang der Diagonale stehen für moderates Risiko (Maßnahmen empfohlen, aber nicht zwingend); rote Zellen oberhalb der Diagonale markieren Hoch-Risiko-Szenarien mit sofortigem Handlungsbedarf. Der Bereich <550 ppm (Kategorie I, hygienisch unbedenklich) ist grundsätzlich grün, unabhängig vom Zeitanteil (siehe Abbildung 6).

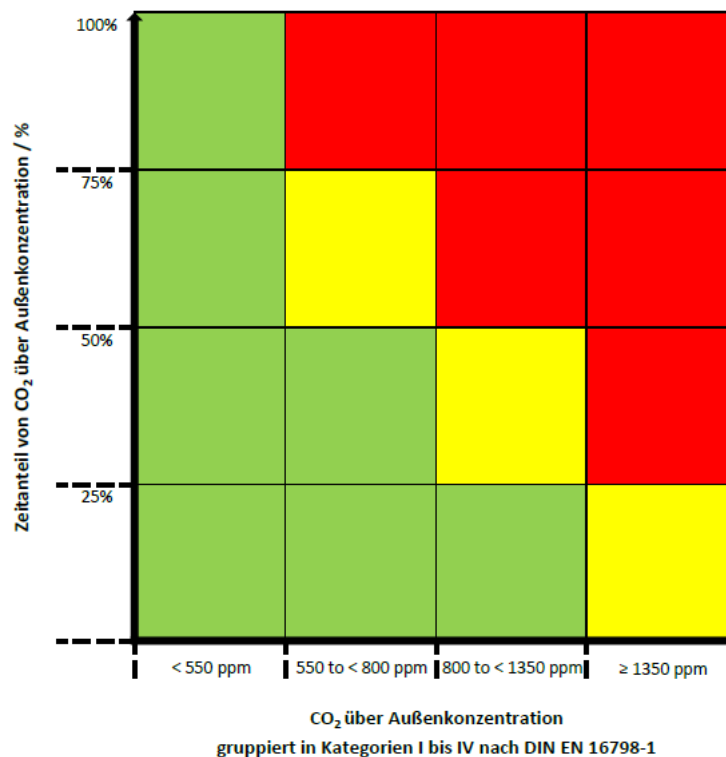


Abbildung 6: Die 4x4-CO₂-basierte Raumlufqualitäts-Risikomatrix kombiniert (i) die Wahrscheinlichkeit vorherrschender Raumlufqualitätsszenarien, ausgedrückt als zeitlicher Anteil der vorherrschenden CO₂-Konzentrationen über den Außenwerten (Zeilen), und (ii) die Schwere der Abweichung von einer hygienisch akzeptablen Raumlufqualität, dargestellt durch CO₂-basierte Kategorien gemäß EN 16798-1. Grüne Zellen unterhalb der Diagonalen kennzeichnen Szenarien mit geringem Risiko, die keine Maßnahmen erfordern; gelbe Zellen auf der Diagonalen stehen für moderate Risikostufen, bei denen Maßnahmen empfohlen, aber nicht zwingend erforderlich sind; und rote Zellen oberhalb der Diagonalen kennzeichnen Szenarien mit hohem Risiko, die Korrekturmaßnahmen erfordern. Der Bereich < 550 ppm entspricht einer hygienisch unbedenklichen Raumlufqualität und ist daher in allen Matrixzellen unabhängig von der Expositionsdauer grün markiert.

Die Einordnung der Messergebnisse aller 14 Räume in die Risikomatrix (siehe Abbildung 7) zeigt:

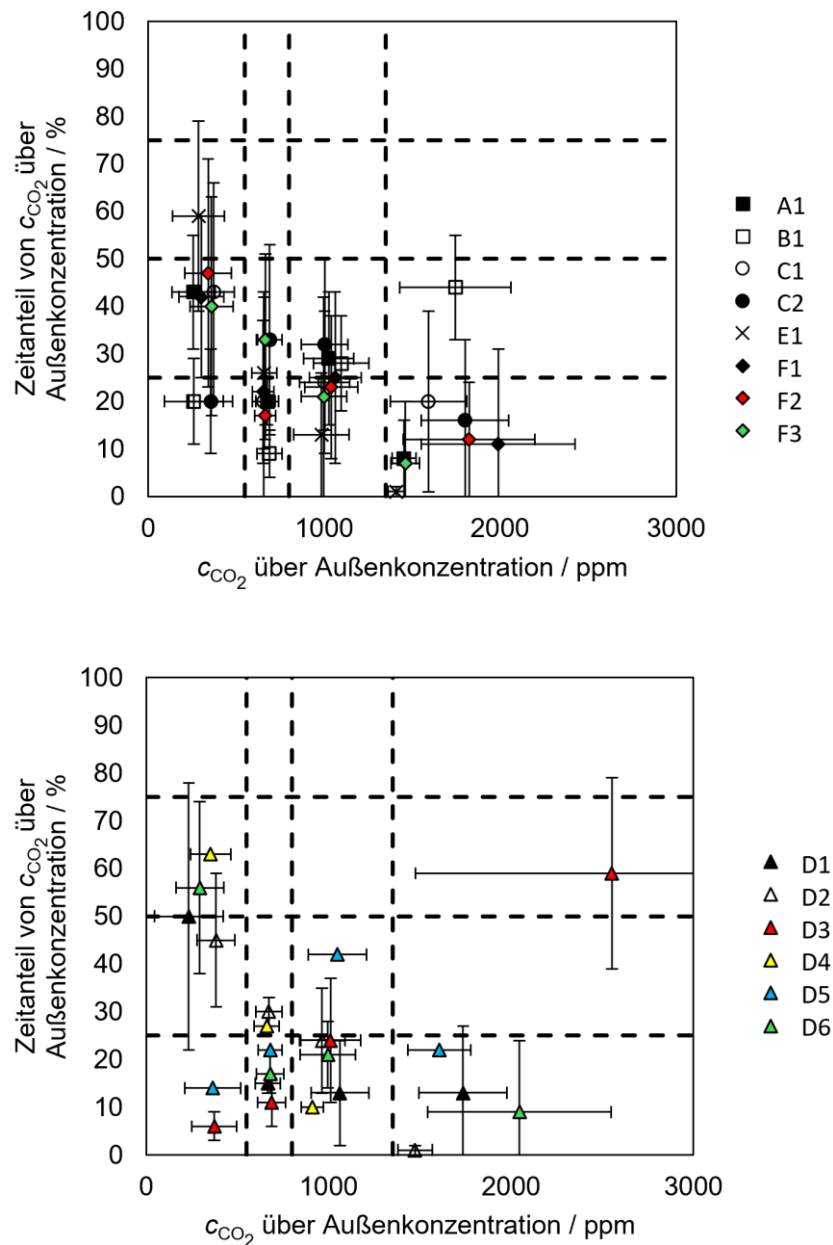


Abbildung 7: CO₂-basierte IAQ-Risikomatrix, die den Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der CO₂-Exposition – ausgedrückt als vorherrschende CO₂-Konzentrationen über den Außenwerten – und der Eintrittswahrscheinlichkeit, ausgedrückt als der Zeitanteil, in dem diese Konzentrationen vorherrschen, darstellt. Vertikale gestrichelte Linien stellen die Grenzen der Kategorien (I bis IV) gemäß EN 16798-1 dar. Horizontale gestrichelte Linien stellen Häufigkeitsklassen dar, die die Nutzungsdauer in vier gleich große Wahrscheinlichkeitsbereiche unterteilen. Gestrichelte Linien markieren die Zellen der 4x4-IAQ-Risikomatrix. Punkte unterhalb der Diagonalen der Zellen weisen auf ein geringes IAQ-Risiko hin (keine Maßnahmen erforderlich), Punkte entlang der Diagonalen der Zellen (mit Ausnahme der obersten Zelle in der ersten Spalte) weisen auf ein mäßiges Risiko hin (Maßnahmen empfohlen) und Punkte oberhalb der Diagonalen der Zellen weisen auf ein hohes IAQ-Risiko hin, das Maßnahmen erfordert. Die Datenpunkte zeigen gepoolte Mittelwerte und die entsprechenden gepoolten Standardabweichungen innerhalb der einzelnen Klassen der CO₂-Konzentrationshäufigkeitsverteilungen für alle untersuchten Räume in A, B, C, E und F (oberes Diagramm) sowie für die untersuchten Räume in D (unteres Diagramm).

- Mehrheit der Räume: Moderate CO₂-Erhöhungen über begrenzte bis moderate Zeitanteile – entspricht Risikozellen entlang oder knapp unterhalb der Matrixdiagonale (niedriges bis moderates IAQ-Risiko). Keine unmittelbare Intervention erforderlich, obwohl EN-16798-1-Konformität nicht vollständig erreicht wird.
- Teilmenge von Räumen (B1, C1, C2, D1, D3, D5, F1, F2): Deutlich höhere CO₂-Konzentrationen (ca. 1500–2500 ppm) bei verlängertem Auftreten (10–59 % der Nutzungszeit).
- Zwei Räume mit hohem IAQ-Risiko: B1 (KiTa, Kinder 2–4 Jahre) und D3 (Gymnasium) fallen klar oberhalb der Matrixdiagonale – hohes IAQ-Risiko mit schwerem und häufigem Überschreiten hygienisch akzeptabler Bedingungen. Diese Fälle erfordern gezielte Abhilfemaßnahmen.

Die erhebliche Streuung der Datenpunkte (horizontale und vertikale Fehlerbalken) veranschaulicht die große Variabilität in Schweregrad und zeitlicher Exposition, die den Einfluss von gebäudespezifischem Lüftungsverhalten, Raumgeometrie, Nutzungsprofilen und der Einhaltung empfohlener Lüftungsstrategien widerspiegelt.

5.3.2. Integration in das BIM-basierte Planungswerkzeug

Die Erstellung digitaler Zwillinge für alle untersuchten Modellräume nach der BIM-Methodik unter Verwendung des INDALO-Plugins für Autodesk Revit ermöglichte die räumliche Visualisierung von Immissionsszenarien und die Ableitung gebäudespezifischer Optimierungsmaßnahmen. Numerisch wurden die Haupteinflussfaktoren für die vorherrschende Immissionssituation bestimmt und Konzepte zur Verbesserung der Raumluftqualität unter der Maßgabe der Energieeffizienz ermittelt (siehe Ausführungsbeispiel in Anlage A1 für Einrichtung C).

Die Integration der CO₂-basierten IAQ-Risikomatrix mit den komplementären IAQ-Aspekten (AMEV-166-Analyse, nutzerspezifischer Lüftungsvolumenstrom, Energiebilanz) erlaubt eine kohärente Bewertung der IAQ-Performance, die Identifikation kritischer Räume und die leitlinienbasierte Auswahl und Priorisierung machbarer und energieeffizienter Interventionsstrategien. Dieser Ansatz überwindet zentrale Limitationen bisheriger IAQ-Bewertungsrahmen:

- Bisher fehlende Operationalisierung von ISO 16000-40 durch quantitative Metriken
- Fehlende skalierbare und reproduzierbare Methodik für die praktische IAQMS-Implementierung in Bildungsgebäuden
- Fehlende Integration der Energiemehrkosten der Lüftung für hygienisch akzeptable IAQ

5.4. Generischer Leitfaden zur Steuerung der Innenraumluftqualität und der Umweltleistung

Das Projekt LUMUMBA hat einen generischen, skalierbaren Ansatz für lernende Organisationen – hier Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen – zur energieeffizienten Gebäudelüftung erarbeitet, der über ein Managementsystem-Konzept auch auf andere Gebäude übertragbar ist.

Der Leitfaden folgt dem PDCA-Zyklus des integrierten Managementsystems (ISO 16000-40 / ISO 14001) und umfasst (siehe Tabelle 14):

Tabelle 14: Eckpunkte des Leitfadens gemäß PDCA-Zyklus eines integrierten Managementsystems nach ISO 16000-40 / ISO 14001.

PDCA-Phase	Inhalt im LUMUMBA-Ansatz
Plan	IAQ-Aspekte definieren (A–D); Bewertungskriterien festlegen (EN 16798-1, UBA, AMEV 166); Messstrategie planen; Zielwerte für IAQ und Energieverbrauch definieren
Do	Sensorbasiertes CO ₂ -Monitoring durchführen; Luftwechselraten bestimmen (CO ₂ -Abklingmethode); Digitale Zwillinge erstellen (BIM/INDALO); Verbesserungsmaßnahmen implementieren
Check	CO ₂ -Konzentrationsprofile auswerten; EN-16798-1-Kategorien bestimmen; IAQ-Risikomatrix befüllen; Energie-Soll-Ist-Vergleich durchführen; Partizipative Workshops zur gemeinsamen Auswertung
Act	Kosteneinsparpotenziale kalkulieren; Amortisationszeiten bestimmen; Managementsystem verankern; Ergebnisse in Standardisierung und Öffentlichkeit kommunizieren

Das resultierende Planungs- und Entscheidungstool besteht aus einer Berechnungs- und Bewertungshilfe (unter Verwendung von MS Excel) für die energieeffiziente Bereitstellung hoher Innenraumluftqualität sowie einer ausgearbeiteten Dokumentation zur Nutzung der Ergebnisse im Rahmen eines integrierten Managementsystems. Teilnehmende Einrichtungen werden befähigt, die zentrale Software zur Gebäudesimulation (Autodesk Revit, für Bildungseinrichtungen als Freeware verfügbar) zu nutzen. Die meteorologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes sind ebenfalls kostenlos zugänglich. Die technische Infrastruktur (Sensorik, ggf. dezentrale Lüftungsgeräte) verbleibt nach Projektende im Besitz der Einrichtungen.

5.5. Stärkung von Nachhaltigkeitsbewusstsein und -handeln

Der partizipative Reallabor-Ansatz hat in den teilnehmenden Einrichtungen nachweisbare didaktische Wirkungen erzielt. Die Rückmeldungen aus den Workshops zeigen, dass der Bezug zum eigenen Klassenraum und zur eigenen Atemluft eine hohe intrinsische Motivation erzeugt. Lernende erleben sich nicht als passive Beobachtende eines Gesundheitsproblems, sondern als aktive Mitgestaltende ihrer Lernumgebung. Drei Wirkungsebenen lassen sich unterscheiden:

- Kognitiv-konzeptuell: Die Lernenden verstehen die Zusammenhänge zwischen CO₂-Konzentration, Lüftungsverhalten, Energieverbrauch und globalen Nachhaltigkeitszielen. Das NDIR-Messprinzip, die Berechnung von CO₂-Bildungsraten, Konvektionseffekte und thermodynamische Grundgrößen werden im eigenen Kontext erarbeitet und verankert.
- Affektiv-motivational: Die 'Survival Rule of 3s', historische Fallbeispiele (Great Smog of London 1952) und die Skalierung individueller CO₂-Ausatemungsraten auf die Bevölkerung Deutschlands (~95.480 t CO₂/Tag = ca. 15.913 Elefanten) schaffen emotionale Resonanz. Der konkrete Bezug auf die eigene Schule – 'Wie lange steht die Ampel bei uns auf Rot?' – erzeugt eine authentische Betroffenheit, die abstrakte Bildungsbotschaften nicht erzeugen können.
- Handlungsbezogen-kompetenzorientiert: Die Lernenden erfahren konkret, dass sie durch informiertes Lüftungsverhalten (UBA-Schema: alle 20 Minuten für 5 Minuten querlüften) und durch systematisches Energiemanagement (PDCA-Zyklus) ihre Umgebung verbessern und einen Beitrag zu UN-Nachhaltigkeitszielen leisten können. Die Beleuchtungsoptimierungs-Fallstudie in PW4 (jährliche Einsparung von 524 kWh = 157 €/Raum; ab Jahr 2 bei 50 Räumen: 7.860 €/Jahr) vermittelt dabei explizit die ökonomische Dimension nachhaltigen Handelns.

Die vollständige Durchführung des PDCA-Workshop-Zyklus hat zudem gezeigt, dass Lehrende durch die strukturierte Auseinandersetzung mit den Messdaten ihres eigenen Gebäudes selbst zu Multiplikatoren des Nachhaltigkeitswissens werden. Das Konzept der 'lernenden Organisation' wird damit institutionell verankert: Die

Einrichtungen erwerben nicht nur technisches Wissen über Luftqualität und Energie, sondern die organisationale Fähigkeit zur kontinuierlichen Selbstreflexion und -verbesserung im Bereich Umweltleistung.

Die LUMUMBA-Workshop-Reihe ist für verschiedene Bildungsstufen konzipiert und in entsprechend adaptierten Materialien dokumentiert. Für die Kindertagesstätten (Einrichtungen A und B) wurde auf die Workshops PW1 und PW2 in vereinfachter Form fokussiert, da diese dem Entwicklungsstand der 2- bis 6-jährigen Kinder entsprechen. An den Gymnasien und der Hochschule wurden quantitative Berechnungen bis hin zur Amortisationsanalyse und zur Normwerkanbindung (EN 16798-1, ISO 16000-40) eingeführt. Am Berufskolleg (Einrichtung G) bot sich eine besondere Anknüpfungsmöglichkeit an die berufliche Ausbildung im Bereich Technischer Gebäudeausrüstung.

Die gesellschaftliche Breitenwirkung des didaktischen Konzepts dokumentiert sich in der Medienberichterstattung der Aachener Zeitung und der Rhein-Zeitung über die LUMUMBA-Aktivitäten in der Koblenzer Region sowie in den selbst erstellten Projektwebseiten mehrerer teilnehmender Schulen. Diese außerschulische Kommunikation zeigt, dass das Thema Innenraumluftqualität durch den Reallabor-Ansatz eine gesellschaftliche Relevanz und Sichtbarkeit entfaltet, die es als rein wissenschaftliches Thema nicht hätte.

5.6. Krankheitskosten durch unzureichende Innenraumluftqualität

Für jede Bildungseinrichtung wurde ein Gesamtrisikofaktor σ berechnet (siehe Gl. 8), indem die kategorienspezifischen Teilrisikofaktoren $\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_{III}$ mit den entsprechenden Zeitanteilen gewichtet wurden. Die resultierende Kennzahl integriert sowohl die Expositionsintensität (Kategorie) als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit (Zeitanteil) und wird zur Abschätzung potenziell vermeidbarer Fehlzeiten sowie der damit verbundenen wirtschaftlichen Kosten verwendet.

Der Gesamtrisikofaktor dient somit als Grundlage zur Abschätzung der Anzahl potenziell vermeidbarer Fehltag aufgrund akuter Infektionen der oberen Atemwege. Durch eine Verbesserung der Innenraumluftqualität – insbesondere durch die Reduktion der Exposition gegenüber den Kategorien II und III – können diese vermeidbaren Fehlzeiten in wirtschaftliche Einsparungen umgerechnet werden, beispielsweise in Form vermiedener Verluste der Bruttowertschöpfung auf gesamtgesellschaftlicher Ebene.

Über alle untersuchten LUMUMBA-Räume hinweg ergab die Auswertung folgende Verteilung: Kategorie A: 45 % der Messzeit; Kategorie B: 27 % der Messzeit; Kategorie C: 28 % der Messzeit. Dieser Befund bestätigt quantitativ, dass in 55 % der Messzeit Handlungsbedarf empfohlen oder sogar hygienisch erforderlich ist.

$$\sigma = 0,45 \cdot (\lambda_I - \lambda_I) + 0,27 \cdot (\lambda_{II} - \lambda_I) + 0,28 \cdot (\lambda_{III} - \lambda_I) \quad \text{Gl. 8}$$
$$\sigma = 0,43$$

Unter Berücksichtigung von 5 krankheitsbedingten Fehltagen pro Lehrkraft und Jahr aufgrund von Atemwegserkrankungen [62–64] ergibt sich nach Gl. 9 eine Anzahl zusätzlicher, durch schlechte Raumluftqualität verursachter Fehltag von:

$$\text{Zusätzliche Fehltag} = 5 \text{ Tage} \cdot 0,43 = 2 \text{ Tage} \quad \text{Gl. 9}$$

Bei einem Ausfalltag-Kostenansatz von 135 € je Lehrkraft und Tag [65] und 100 Lehrkräften je Schule ergeben sich folgende Krankheitskosten nach Gl. 10 und Gl. 11:

$$\text{Jährliche Kosten pro Lehrkraft} = 2 \text{ Tage} \cdot 135 \text{ € pro Tag} = 270 \text{ €} \quad \text{Gl. 10}$$

$$\text{Kosten je Schule mit 100 Lehrkräften} = 270 \text{ €} \cdot 100 = 27000 \text{ €} \quad \text{Gl. 11}$$

Diese Abschätzung bezieht sich ausschließlich auf direkte Kosten durch Produktivitätsverlust der Lehrenden. Indirekte Kosten durch Fehlzeiten von Schülerinnen und Schülern (Arztbesuche, Medikamente, Eltern-Ausfalltag) sind in dieser Berechnung nicht enthalten und würden die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten erheblich erhöhen. Der Wert von 27.000 € je Schule und Jahr kann damit als konservative Untergrenze der vermeidbaren Krankheitskosten verstanden werden.

Die Krankheitskostenberechnung liefert für LUMUMBA drei zentrale Beiträge zur Zielerreichung:

Ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit (SDG 3, 8): Die Zahl von 27.000 € vermeidbarer Krankheitskosten je Schule und Jahr schafft ein konkretes wirtschaftliches Argument für Investitionen in Lüftungsverbesserungen. In Abschnitt 4.7 werden Investitionen in dezentrale Lüftungsgeräte (ca. 3.500 € je Einrichtung) mit dieser Kostenperspektive verknüpft: Die Amortisationszeit liegt damit weit unter einem Jahr, wenn Krankheitskosten in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einbezogen werden.

Evidenzbasis für politische Kommunikation: Die quantifizierte Krankheitskostenabschätzung liefert genau das Argument, das die politischen Adressaten von LUMUMBA (Bundesschülerkonferenz, Philologenverband, Schulministerien) benötigen, um Investitionen in die Innenraumluftqualität von Bildungsgebäuden politisch zu begründen. Schlechte Raumluftqualität ist kein abstraktes Gesundheitsrisiko, sondern verursacht messbare und volkswirtschaftlich relevante Kosten.

Wissenschaftlicher Beitrag zur Lücke in der Literatur: Die Ergebnisse von LUMUMBA schließen eine explizit identifizierte Forschungslücke: Während die theoretische Notwendigkeit regelmäßiger Lüftung bekannt ist, fehlten bisher quantitative Datensätze, die das Ausmaß der Grenzwertüberschreitungen im deutschen Bildungssektor beschreiben, und es fehlte eine ökonomische Bewertung der daraus resultierenden Krankheitskosten. Diese Arbeit liefert beides erstmals auf Basis realer Betriebsmessdaten.

Methodisch ist die Krankheitskostenberechnung als Abschätzung mit den inhärenten Unsicherheiten eines Wells-Riley-Modells zu verstehen. Das Modell nimmt vollständige Durchmischung der Innenraumluft an – eine Annahme, die nach den Erkenntnissen der ISO-16000-8 in natürlich belüfteten Bildungsgebäuden systematisch verletzt wird. Dies bedeutet, dass das tatsächliche Infektionsrisiko lokal (in der Nähe von Infektionsquellen) höher und global (raumgemittelt) möglicherweise niedriger sein kann als das Modell schätzt. Die Gesamtgrößenordnung der Krankheitskosten bleibt dennoch als Orientierungsgröße für Entscheidungsträger aussagekräftig.

Krankheitskosten durch schlechte IAQ – Kernbefunde

- 45 % aller LUMUMBA-Messtage: Kategorie A (gute IAQ, EN-Kat. I-II, Risikofaktor 1,0)
- 27 % aller LUMUMBA-Messtage: Kategorie B (akzeptable IAQ, Risikofaktor 1,39)
- 28 % aller LUMUMBA-Messtage: Kategorie C (inakzeptable IAQ, Risikofaktor 2,15)
- Gewichteter Gesamtrisikofaktor: 0,43 (Zunahme gegenüber optimaler IAQ)
- Zusätzliche Fehltage durch Atemwegserkrankungen: ~2 Fehltage / Lehrkraft / Jahr
- Direkte Krankheitskosten: ca. 27.000 € / Schule / Jahr (konservative Schätzung, nur Lehrende)
- Amortisationszeit dezentraler Lüftungsgeräte (3.500 €): < 2 Monate bei Einbeziehung der Krankheitskosten
- Indirekte Kosten (Schüler, Eltern) nicht enthalten – reale Gesamtkosten deutlich höher

6. Nachhaltige Ergebnisverwertung

6.1. Fachöffentlichkeit

Die Ergebnisse von LUMUMBA wurden über mehrere Kanäle der wissenschaftlichen Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht (siehe Tabelle 15):

Tabelle 15: Übersicht der Veröffentlichungen und des Wissenstransfers im Rahmen des LUMUMBA-Projekts.

Art	Titel / Ort	Jahr	Link / Bemerkung
Peer-reviewed Journal (Open Access)	Nehr, S.; Çınar, H.; Baus, L.: Indoor environmental quality assessment in passively ventilated classrooms in Germany and estimation of ventilation energy losses. Journal of Building Engineering.	2024	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224025051
Peer-reviewed Journal (Open Access)	Nehr, S.; Baus, L.; Çınar, H.: CO ₂ -based risk matrix for indoor air quality management in naturally ventilated educational sector buildings in Germany.	2026	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950362026000287
Peer-reviewed Journal (eingereicht)	Nehr, S.; Hurraß, J.: ISO 16000-8 and Ventilation Performance: A Critical Review. Standards (MDPI).	2026	Eingereicht, Begutachtung läuft – Grundlage der Normungsinitiative ISO 16000-8 Revision
Populärwiss. (Philologenverband NRW)	Publikation in 'Bildung aktuell' des Philologenverbands NRW	2024	https://phv-nrw.de/leistungen-service/bildung-aktuell/#flipbook-df_18444/9/
Fachzeitschrift (VDI/DIN KRdL)	Nehr et al.: Publikation in 'Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft'	2025	https://www.ingenieur.de/wp-content/uploads/2025/04/Gefahrstoffe_03-04_2025_Beleg.pdf
Konferenzbeitrag (Poster)	Posterpräsentation bei Tagung Innenraumluft 2024 (IRL2024)	2024	IRL2024 – P08 Umweltbundesamt
Konferenzbeitrag (Vortrag)	Vortrag beim Innenraumforum 2025	2025	https://www.ghup.de/wp-content/uploads/2025/09/Ko08_Einladung_Zweites_Koelner_Innenraum-Forum_20250917_clmu.pdf

6.2. Allgemeine Öffentlichkeit

Zur Verbreitung der Erkenntnisse in die allgemeine Öffentlichkeit wurden folgende Kanäle genutzt:

- Philologenverband NRW / Deutscher Philologenverband (DPhV): Populärwissenschaftliche Publikation in der Mitgliederzeitschrift 'Bildung aktuell', die die Interessen der Lehrerinnen und Lehrer an Gymnasien und Gesamtschulen vertritt.
- Bundesschülerkonferenz (BSK) / Landesschüler*innenvertretung NRW: Einlassung (Executive Summary) in politische Kommunikationskanäle für Schülerinnen und Schüler.
- Medienberichterstattung: Die Aktivitäten wurden durch die Aachener Zeitung und die Rhein-Zeitung aufgegriffen, was die Breitenwirkung des Projekts illustriert.
- Projektwebseiten der teilnehmenden Einrichtungen: Einige Einrichtungen haben temporär eigene Webseiten zu ihrer LUMUMBA-Beteiligung eingerichtet.

6.3. Technische Regelsetzung

6.3.1. Beitrag zur Revision der ISO 16000-8 und der VDI 4300-9

Im Rahmen von LUMUMBA wurde eine kritische Literaturübersicht zur Modernisierung von ISO 16000-8 erarbeitet. ISO 16000-8 standardisiert die Bestimmung des lokalen Luftalters in Gebäuden mittels Tracergas-Techniken und bildet seit ihrer Erstveröffentlichung im Jahr 2007 die methodische Referenz für die Charakterisierung der Lüftungsleistung in Innenräumen. Der direkte Bezug zu LUMUMBA ergibt sich daraus, dass die im Projekt eingesetzten CO₂-Abklingmessungen (CO₂-Decay-Methode) zur Bestimmung von Luftwechselraten das experimentelle Kernverfahren darstellen, das ISO 16000-8 als eines von drei Tracergas-Verfahren (Abklingmethode, aktive homogene Emissionsmethode, passive homogene Emissionsmethode) definiert.

Die Literaturübersicht basiert auf einer strukturierten Datenbankrecherche (Web of Science, Google Scholar) mit dem Schlüsselwort 'ISO 16000-8' im Zeitraum 2007–2026 und identifizierte 76 wissenschaftliche Studien, die anhand eines PRISMA-Rahmens in drei Analysegruppen klassifiziert wurden: (I) leistungsorientierte Lüftungsbewertung (n = 47 Studien, >60 %), (II) methodische Konvergenz zwischen Messung und Simulation (n = 20 Studien) und (III) Standardisierungs- und Harmonisierungsdiskurs (n = 24 Studien). Die Synthese dieser 76 Studien liefert die folgende evidenzbasierte Begründung für die Modernisierung von ISO 16000-8:

- Die konzeptuellen Grundlagen von ISO 16000-8 (Luftalter, Lüftungseffektivität, Luftaustauscheffizienz) bleiben wissenschaftlich valide, aber die Annahmen homogener Durchmischung und stationärer Randbedingungen werden in realen Gebäuden systematisch verletzt. Feldstudien zeigen Lüftungseffektivitäten von 0,73–0,82 in Klassenräumen (statt des theoretischen Idealwerts ≈ 1 für perfekte Durchmischung) sowie 0,5–1,4 in verschiedenen Innenräumen.
- Natürlich belüftete, hybride und dezentrale Lüftungssysteme – die in deutschen Bildungsgebäuden und im LUMUMBA-Projekt vorherrschende Systemkategorie – weichen systematisch von den Annahmen der Norm ab. Windgetriebene zeitveränderliche Infiltration und variable Fensteröffnungs konfigurierungen führen zu inkonsistenten τ LMA-Werten.
- Die Fragmentierung zwischen Lüftungsleistungsnormen (ISO 16000-8) und IAQ-Regulierung (EN 16798-1, ASHRAE 129) schränkt die praktische Anwendbarkeit ein. ISO 16000-8 nimmt im ISO-16000-Normfamilien eine mehrdeutige Position ein: Sie wird in der Forschung häufig zitiert, aber selten in konformitätsbezogenen IAQ-Untersuchungen oder Planungsnormen operationalisiert.
- Aufkommende Methoden – kontinuierliches CO₂-Monitoring, dezentrale Sensornetzwerke, KI-gestützte Vorhersage von τ LMA-Feldern, CFD-Validierung, optische Luftwechselratenmessung – sind in der Praxis verbreitet, aber nicht mit ISO 16000-8 harmonisiert.

Auf dieser Grundlage formuliert die Übersichtsarbeit sieben konkrete Modernisierungsvorschläge für ISO 16000-8:

- Erweiterung des Anwendungsbereichs (Clause 1) auf natürlich belüftete, hybride und dezentrale Systeme
- Präzisierung der Begriffsdefinitionen (Clause 3) für lokales vs. raumgemitteltes Luftalter und Lüftungseffektivität
- Einführung transienter Messprozeduren (Clauses 4–5) für zeitaufgelöste Lüftungscharakterisierung unter nicht-stationären Randbedingungen
- Leitlinien für Mehrpunkt-Messstrategien (Clauses 6–7) zur Erfassung räumlicher Heterogenität
- Einführung nutzerzentrierter Lüftungsmetriken (Clause 8) bezogen auf die Atemzone, relevanter für Infektionsschutz und Expositionsabschätzung
- Integration numerischer Methoden (CFD) und hybrider Ansätze (Clause 8–9) mit strukturierten Anforderungen an Validierung und Unsicherheitsquantifizierung
- Harmonisierung mit EN 16798-3, ASHRAE 129 und der ISO-16000-Familie durch informative Anhänge

Der Bezug zu LUMUMBA ist dabei unmittelbar und mehrdimensional: Erstens liefern die in LUMUMBA durchgeführten CO₂-Abklingmessungen in natürlich belüfteten Bildungsgebäuden genau die Datenbasis, die in

der Norm als inhärent unsicher und standardisierungsbedürftig identifiziert wird. Die in LUMUMBA beobachteten inkompletten Durchmischungsbedingungen (Lüftungseffektivitäten unter 1 in Klassenräumen) sowie die starke Streuung von Luftwechselraten ($0,8\text{--}25,7\text{ h}^{-1}$) bestätigen die von der Übersichtsarbeit diagnostizierten Limitationen von ISO 16000-8. Zweitens stellt die CO_2 -Abklingmethode das Kernverfahren dar, das LUMUMBA zur Bestimmung nutzerspezifischer Lüftungsvolumenströme einsetzt; eine modernisierte ISO 16000-8 würde dieses Verfahren methodisch absichern und die LUMUMBA-Ergebnisse in einem international anerkannten Normrahmen verorten. Drittens zielt der Normungsvorschlag (New Work Item Proposal beim ISO/TC 146/SC 6) auf eine Harmonisierung von ISO 16000-8 mit ISO 16000-40 (IAQMS) – dem Managementsystem-Standard, der das strukturgebende Rahmenwerk von LUMUMBA bildet.

Beim Plenary Meeting des ISO/TC 146/SC 6 am 26.09.2024 wurde der Projektvorschlag zur Revision von ISO 16000-8 diskutiert und angenommen. Parallel dazu wurden die Erkenntnisse in die VDI-Richtlinienarbeit VDI 4300 Blatt 9 'Messstrategie für Kohlendioxid (CO_2)' im Normenausschuss 'NA 134-04-04-01 Planung von Innenraumuntersuchungen' eingebracht. Diese Doppelstrategie – internationale ISO-Ebene und nationale VDI-Ebene – maximiert die Reichweite des wissenschaftlichen Wissenstransfers und sichert, dass die LUMUMBA-Erkenntnisse sowohl in der deutschen als auch in der internationalen technischen Regelsetzung verankert werden.

6.3.2. Weitere Beiträge zur technischen Regelsetzung

Die Ergebnisse von LUMUMBA wurden in weitere nationale und internationale technische Regelsetzungsprozesse eingebracht:

- EU COST-Action CA23139 'Net4CleanAir': Beteiligung im Management Committee zur Dissemination der wissenschaftlichen Ergebnisse aus dem LUMUMBA-Projekt. Die COST-Action vernetzt europäische Forschungsgruppen im Bereich sauberer Innenraumluft und bietet eine institutionelle Plattform für den Transfer von LUMUMBA-Erkenntnissen in den europäischen Forschungs- und Politikkontext.
- Typ-C-Liaison mit ISO/TC 146/SC 6: Die institutionalisierte Verbindung über das europäische Netzwerkprojekt Net4CleanAir sichert den dauerhaften Kanal für den Wissenstransfer zwischen LUMUMBA-Ergebnissen und der internationalen ISO-Normungsarbeit.

7. Fazit

Das Projekt LUMUMBA hat erfolgreich gezeigt, dass ein standardisiertes Innenraumluftqualitäts-Managementsystem (IAQMS) nach ISO 16000-40 – verknüpft mit Umweltmanagement nach ISO 14001 – in deutschen Bildungs- und Ausbildungseinrichtungen praxistauglich implementiert werden kann. Der partizipative Reallabor-Ansatz hat sich als wirksames didaktisches Konzept zur Stärkung von Nachhaltigkeitsbewusstsein und -handeln der Lernenden bewährt und dabei drei zentrale Innovationsebenen verbunden: die wissenschaftlich-technische, die institutionell-managementorientierte und die pädagogisch-gesellschaftliche.

Die messtechnischen Ergebnisse belegen strukturelle Defizite in der natürlichen Lüftung von Bildungsgebäuden: Keiner der 14 im Fokus der quantitativen Auswertung untersuchten Räume erfüllt alle AMEV-166-Planungskriterien; 7 von 14 Räumen erreichen den UBA-Mindestwert für nutzerspezifische Lüftungsvolumenströme von $25\text{--}30\text{ m}^3\text{ h}^{-1}\text{ Person}^{-1}$ nicht. Der entwickelte wissenschaftliche Ansatz – die CO_2 -basierte 4x4-IAQ-Risikomatrix – stellt ein reproduzierbares Entscheidungsunterstützungswerkzeug dar, das Schweregrad und Häufigkeit von CO_2 -Überschreitungen vereint und mit IAQ-Verbesserungsmaßnahmen verknüpft.

Die Ergebnisse belegen den inhärenten Zielkonflikt zwischen hygienisch unbedenklicher Raumluftqualität und energieeffizientem Gebäudebetrieb: Räume mit ausreichender natürlicher Lüftung erzielen dies nur unter Inkaufnahme erheblicher Lüftungswärmeverluste von bis zu $40\text{ kWh m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ – was bis zu 80 % des BBSR-Referenz-Heizbedarfs von Bildungsgebäuden entspricht. Die Installation dezentraler Lüftungsgeräte als minimalinvasive Maßnahme (Einrichtungen C und D) hat gezeigt, dass dieser Zielkonflikt technisch lösbar ist.

LUMUMBA hat alle Meilensteine des Projektantrags erreicht und den Untersuchungsrahmen signifikant über das ursprünglich geplante Minimum von drei Einrichtungen hinaus erweitert (8 statt 3 Einrichtungen, 19 statt 3 Räume). Darüber hinaus wurden zwei weitere wissenschaftliche Beiträge geleistet, die die Reichweite des Projekts erheblich erweitern: LUMUMBA-Messdaten aus dem Gebäude-Realbetrieb liefern erstmals eine quantitative ökonomische Bewertung der durch unzureichende Raumluftqualität verursachten Krankheitskosten in deutschen Bildungsgebäuden (~27.000 € vermeidbare direkte Krankheitskosten je Schule und Jahr). Die Übersichtsarbeit zur Modernisierung von ISO 16000-8 (Nehr & Hurraß 2026) liefert auf Basis von 76 systematisch analysierten Studien sieben konkrete Modernisierungsvorschläge für die seit 2007 unveränderte internationale Norm und positioniert LUMUMBA als Wissensgeber für die internationale Regelsetzung. Das Projekt leistet damit direkte Beiträge zur technischen Regelsetzung (ISO 16000-8, VDI 4300 Blatt 9), zur Stärkung des gesellschaftlichen Bewusstseins für Innenraumluftqualität als Gesundheits- und Nachhaltigkeitsthema sowie zur Etablierung eines praxistauglichen didaktischen Konzepts für die Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) im schulischen Alltag.

Zentrale Projektergebnisse auf einen Blick

- 8 Einrichtungen mit 19 Räumen untersucht (übertrifft Minimalziel von 3 deutlich)
- 14 Räume in 6 Einrichtungen: quantitative Auswertung mit jahreszeitlicher Variation
- CO_2 -basierte 4x4-IAQ-Risikomatrix entwickelt – reproduzierbares Entscheidungsunterstützungswerkzeug
- 7 von 14 Räumen unterschreiten UBA-Mindestwert für Lüftungsvolumenstrom
- Zwei Räume (B1, D3) mit hohem IAQ-Risiko identifiziert
- Dezentrale Lüftungsgeräte in Einrichtungen C und D erfolgreich installiert und evaluiert
- Digitale Zwillinge (BIM, Autodesk Revit / INDALO) für alle Modellräume erstellt
- 5-stufiges didaktisches Konzept (PW1-PW5) im PDCA-Zyklus für verschiedene Bildungsstufen entwickelt und erprobt
- BNE-Kompetenzen adressiert: Systemkompetenz, Antizipationskompetenz, Gestaltungskompetenz (UNESCO)
- Krankheitskosten durch schlechte IAQ quantifiziert: ~27.000 EUR / Schule / Jahr (nur Lehrende)
- Revision ISO 16000-8: Kritische Literaturuebersicht (76 Studien, PRISMA-Rahmen), 7 Modernisierungsvorschlaege
- New Work Item Proposal ISO 16000-8 beim ISO/TC 146/SC 6 eingereicht und diskutiert
- VDI 4300 Blatt 9 (CO_2 -Messstrategie): Nationale Normungsunterstuetzung
- EU COST-Action CA23139 Net4CleanAir: Management Committee-Beteiligung
- 2 peer-reviewte Publikationen, 2 populärwiss. Publikationen, 2 Konferenzbeiträge

Literatur

1. Klepeis, N.E.; Nelson, W.C.; Ott, W.R.; Robinson, J.P.; Tsang, A.M.; Switzer, P.; Behar, J.V.; Hern, S.C.; Engelmann, W.H. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol* **2001**, *11*, 231–252, doi:10.1038/sj.jea.7500165.
2. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide;
3. Household Air Pollution Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> (accessed on 7 April 2026).
4. *Clean Air and Healthy Lungs : Enhancing the World Bank's Approach to Air Quality Management*; World Bank, Washington, DC, 2015;
5. Energy Performance of Buildings Directive Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (accessed on 7 April 2026).
6. Frequently Asked Questions (FAQs) - U.S. Energy Information Administration (EIA) Available online: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1> (accessed on 7 April 2026).
7. Holgate, S.; Grigg, J.; Arshad, H.; Carslaw, N.; Cullinan, P.; Dimitroulopoulou, S.; Greenough, A.; Holland, M.; Jones, B.; Linden, P.; et al. Health Effects of Indoor Air Quality on Children and Young People. **2020**, doi:10.1039/9781839160431-00151.
8. Sadrizadeh, S.; Yao, R.; Yuan, F.; Awbi, H.; Bahnfleth, W.; Bi, Y.; Cao, G.; Croitoru, C.; de Dear, R.; Haghighat, F.; et al. Indoor Air Quality and Health in Schools: A Critical Review for Developing the Roadmap for the Future School Environment. *Journal of Building Engineering* **2022**, *57*, 104908, doi:10.1016/j.jobe.2022.104908.
9. Murphy, J.; Tharumakunarat, R.; Holden, K.A.; King, C.; Lee, A.R.; Rose, K.; Hawcutt, D.B.; Sinha, I.P. Impact of Indoor Environment on Children's Pulmonary Health. *Expert Rev Respir Med* **2023**, *17*, 1249–1259, doi:10.1080/17476348.2024.2307561.
10. Honan, D.; Gallagher, J.; Garvey, J.; Littlewood, J. Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Primary Schools: A Systematic Review of the Assessment & Impacts of CO₂ Levels. *Buildings* **2024**, *14*, doi:10.3390/buildings14124003.
11. Mendell, M.J.; Eliseeva, E.A.; Davies, M.M.; Spears, M.; Lobscheid, A.; Fisk, W.J.; Apte, M.G. Association of Classroom Ventilation with Reduced Illness Absence: A Prospective Study in California Elementary Schools. *Indoor Air* **2013**, *23*, 515–528, doi:10.1111/ina.12042.
12. Wargocki, P. Ventilation, Indoor Air Quality and Learning in Schools.; September 30 2015.
13. Wargocki, P.; Porras-Salazar, J.A.; Contreras-Espinoza, S.; Bahnfleth, W. The Relationships between Classroom Air Quality and Children's Performance in School. *Building and Environment* **2020**, *173*, doi:10.1016/j.buildenv.2020.106749.
14. Fisk, W.J. The Ventilation Problem in Schools: Literature Review. *Indoor Air* **2017**, *27*, 1039–1051, doi:10.1111/ina.12403.
15. Vorländer, J. Marshallplan für die Schullüftung. *SBZ* **2021**, *1*, 8–10.
16. - Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsbl.* **2008**, *51*, 1358–1369, doi:10.1007/s00103-008-0707-2.
17. Birmili, W.; Selinka, H.-C.; Moriske, H.-J.; Daniels, A.; Straff, W. Lüftungskonzepte in Schulen Zur Prävention Einer Übertragung Hochinfektöser Viren (SARS-CoV-2) Über Aerosole in Der Raumluft | Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz | Springer Nature Link Available online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00103-021-03452-4> (accessed on 7 April 2026).
18. ISO 16000-40:2019 Available online: <https://www.iso.org/standard/70424.html> (accessed on 7 April 2026).
19. ISO 14001:2015 Available online: <https://www.iso.org/standard/60857.html> (accessed on 7 April 2026).
20. Nehr, S.; Baus, L.; Çınar, H. CO₂-Based Risk Matrix for Indoor Air Quality Management in Naturally Ventilated Educational Sector Buildings in Germany , submitted for publication.
21. Nehr, S.; Baus, L.; Çınar, H.; Elsen, I.; Frauenrath, T. Indoor Environmental Quality Assessment in Passively Ventilated Classrooms in Germany and Estimation of Ventilation Energy Losses. *Journal of Building Engineering* **2024**, *97*, 110937, doi:10.1016/j.jobe.2024.110937.
22. INDAIRPOLLNET Available online: <https://indairpollnet.york.ac.uk/home> (accessed on 8 April 2026).
23. Net4CleanAir Available online: <https://net4cleanair.eu/> (accessed on 8 April 2026).
24. Baus, L.; Nehr, S. Potentials and Limitations of Direct Air Capturing in the Built Environment. *Building and Environment* **2022**, *208*, 108629, doi:10.1016/j.buildenv.2021.108629.
25. ISO/TC 146/SC 6 - Indoor Air Available online: <https://www.iso.org/committee/52822.html> (accessed on 8 April 2026).

26. Lovrić, M.; Gajski, G.; Fernández-Agüera, J.; Pöhlker, M.; Gursch, H.; EDIAQI Consortium; Borg, A.; Switters, J.; Mureddu, F. Evidence Driven Indoor Air Quality Improvement: An Innovative and Interdisciplinary Approach to Improving Indoor Air Quality. *Biofactors* **2025**, *51*, e2126, doi:10.1002/biof.2126.
27. Elmualim, A.A.; Zhang, Y.; Azuma, K.; Uchiyama, I.; Ikeda, K. The Risk Management for Indoor Air Pollution Caused by Formaldehyde in housing The Historical Perspectives on Early Warnings and Actions. *Facilities* **2006**, *24*, 420–429, doi:10.1108/02632770610684909.
28. Marquez-Zepeda, M.J.; Santos-Ruiz, I.; Pérez-Pérez, E.-J.; Navarro-Díaz, A.; Delgado-Aguíñaga, J.-A. Internet-of-Things-Based CO₂ Monitoring and Forecasting System for Indoor Air Quality Management. *Mathematical and Computational Applications* **2025**, *30*, doi:10.3390/mca30020036.
29. Rosa-Bilbao, J.; Butt, F.S.; Merkl, D.; Wagner, M.F.; Schäfer, J.; Boubeta-Puig, J. IoT-Based Indoor Air Quality Management System for Intelligent Education Environments. *IEEE Internet of Things Journal* **2025**, *12*, 18031–18041, doi:10.1109/JIOT.2025.3539886.
30. Oswin, H.P.; Glachant, L.; Lekamge, S.A.; Alinaghipour, B.; Khan, S.B.; Morawska, L. Using Indoor CO₂ Concentration Thresholds to Understand and Improve the Air Quality of Public Buildings: A Practical Approach. *Energy and Buildings* **2025**, *347*, 116254, doi:10.1016/j.enbuild.2025.116254.
31. Tangestani, M.; Jonidi Jafari, A.; Kermani, M.; Rezaei Kalantary, R. Development Application of FMEA Risk Assessment Model for Indoor Air Pollutants in Healthcare Organizations: Focus on Suspended Particles and Bioaerosols in Hospitals. *MethodsX* **2025**, *14*, 103342, doi:10.1016/j.mex.2025.103342.
32. Berrubé, A.; Mosqueron, L.; Cavereau, D.; Gangneux, J.-P.; Thomas, O. Methodology for Semi-Quantitative Chemical Risk Assessments in Healthcare Facilities. *Environnement, Risques & Santé* **2013**, *12*, 508–520, doi:10.1684/ers.2013.0659.
33. Xu, Z.-J.; Zhu, H.-B.; Shu, L.-Y.; Lai, X.-X.; Lu, W.; Fu, L.; Jiang, B.; He, T.; Wang, F.-P.; Li, Q.-S. Estimation of the Fraction of Soil-Borne Particulates in Indoor Air by PMF and Its Impact on Health Risk Assessment of Soil Contamination in Guangzhou, China. *Environ Pollut* **2022**, *308*, 119623, doi:10.1016/j.envpol.2022.119623.
34. Obradović, J.; Jovašević-Stojanović, M.; Obradović, M.; Onjia, A. Source-Specific Probabilistic Exposure to PM_{2.5}-Bound Trace Elements in a School Environment. *Building and Environment* **2025**, *270*, 112509, doi:10.1016/j.buildenv.2024.112509.
35. Ji, W.; Zeng, J.; Zhao, K.; Liu, J. Source Apportionment and Health-Risk Assessment of PM_{2.5}-Bound Elements in Indoor/Outdoor Residential Buildings in Chinese Megacities. *Building and Environment* **2025**, *267*, 112250, doi:10.1016/j.buildenv.2024.112250.
36. Ouyang, R.; Yang, S.; Xu, L. Analysis and Risk Assessment of PM_{2.5}-Bound PAHs in a Comparison of Indoor and Outdoor Environments in a Middle School: A Case Study in Beijing, China. *Atmosphere* **2020**, *11*, doi:10.3390/atmos11090904.
37. Guo, J.; Zhou, Y.; Sun, M.; Cui, J.; Zhang, B.; Zhang, J. Methylsiloxanes in Plasma from Potentially Exposed Populations and an Assessment of the Associated Inhalation Exposure Risk. *Environ Int* **2020**, *143*, 105931, doi:10.1016/j.envint.2020.105931.
38. Hartiala, M.; Elenius, V.; Pesquera, A.A.; Androulakis, S.; Annesi-Maesano, I.; Badyda, A.; Brandsma, S.; Chatziprodromidou, I.; Gajski, G.; Garcia-Aymerich, J.; et al. Exposures in Indoor Air Affecting Health. *Allergy* **2026**, *81*, 700–719, doi:10.1111/all.70179.
39. Tsapalov, A.; Kovler, K. Temporal Uncertainty versus Coefficient of Variation for Rational Regulation of Indoor Radon. *Indoor Air* **2022**, *32*, e13098, doi:10.1111/ina.13098.
40. Ronalter, L.M.; Poltronieri, C.F.; Gerolamo, M.C. ISO Management System Standards in the Light of Corporate Sustainability: A Bibliometric Analysis. *The TQM Journal* **2023**, *35*, 256–298, doi:10.1108/TQM-09-2022-0279.
41. Dai, H.; Zhao, B. Reducing Airborne Infection Risk of COVID-19 by Locating Air Cleaners at Proper Positions Indoor: Analysis with a Simple Model. *Build Environ* **2022**, *213*, 108864, doi:10.1016/j.buildenv.2022.108864.
42. DIN EN 16798-1 - 2022-03 - DIN Media Available online: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-16798-1/349622591> (accessed on 8 April 2026).
43. RLT-Anlagen Available online: <https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Planen/Maschinenbau-und-Versorgungstechnik/RLT-Anlagen/> (accessed on 8 April 2026).
44. Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden Available online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fuer-innenraumhygiene-in-schulgebaeuden> (accessed on 9 April 2026).
45. BBSR - Veröffentlichungen - Vergleichswerte Für Den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden Available online: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-37-2021.html> (accessed on 8 April 2026).

46. VDI 2078 Available online: <https://www.vdi.de/mitgliedschaft/vdi-richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-2078> (accessed on 9 April 2026).
47. DIN/TS 18599-10 - 2025-10 - DIN Media Available online: <https://www.dinmedia.de/de/bauwesen/BVFR000> (accessed on 9 April 2026).
48. Rudnick, S.N.; Milton, D.K. Risk of Indoor Airborne Infection Transmission Estimated from Carbon Dioxide Concentration. *Indoor Air* **2003**, *13*, 237–245, doi:10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x.
49. Wells, W. *Airborne Contagion and Air Hygiene : An Ecological Study of Droplet Infections* - University of Edinburgh; Harvard University Press, 1955;
50. Riley, E.C.; Murphy, G.; Riley, R.L. Airborne Spread of Measles in a Suburban Elementary School. *Am J Epidemiol* **1978**, *107*, 421–432, doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a112560.
51. Raczek, B.; Adamczyk, B. Concentration of Carbon Dioxide in Exhaled Air in Fluent and Non-Fluent Speech. *Folia Phoniatr Logop* **2004**, *56*, 75–82, doi:10.1159/000076059.
52. Kolb, D.A. *Experiential Learning. Experience as the Source of Learning and Development*. 1984.
53. Dewey, J. *How We Think.*; D C Heath: Lexington, 1910;
54. Das UNESCO-Programm “BNE 2030” in Deutschland (2020 - 2030) - BNE-Portal Kampagne Available online: https://www.bne-portal.de/bne/de/bundesweit/bne-2030/bne-2030_node.html (accessed on 10 April 2026).
55. Nationaler Aktionsplan - BNE-Portal Kampagne Available online: https://www.bne-portal.de/bne/de/nationaler-aktionsplan/nationaler-aktionsplan_node.html (accessed on 10 April 2026).
56. ISO/TC 146/SC 6 - Indoor Air Available online: <https://www.iso.org/committee/52822.html> (accessed on 10 April 2026).
57. VDI 4300 Blatt 9 - Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Messstrategie für Kohlendioxid (CO<(Index)2>); 2005;
58. Baus, L.; Nehr, S.; Çınar, H. Bildung aktuell. *PhV NRW*.
59. IRL2024 - P08 Available online: <https://www.umweltbundesamt.de/irl2024-p08> (accessed on 10 April 2026).
60. Nehr, S.; Baus, L.; Çınar, H. Gute Luft in Schulen - Ein Balanceakt zwischen Gesundheitsschutz und Energieeffizienz. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* **2025**, *85*, 77–80, doi:10.37544/0949-8036-2025-03-04-77.
61. Nehr, S.; Baus, L.; Çınar, H. Lüftung in Bildungseinrichtungen, 29. Oktober 2025, Köln. In *2. Kölner Innenraum-Forum*; HYGIUM – Zentrum für Hygiene und Umweltmedizin GmbH, 2025.
62. BARMER Gesundheitsreport Available online: <https://www.bifg.de/publikationen/gesundheitsreport> (accessed on 10 April 2026).
63. Gesundheitsreport 2025 | Die Techniker - Firmenkunden Available online: <https://www.tk.de/firmenkunden/service/gesund-arbeiten/gesundheitsberichterstattung/gesundheitsreport-2025-2033772> (accessed on 10 April 2026).
64. DAK-Gesundheitsreport 2025: Generation Z in der Arbeitswelt Available online: https://www.dak.de/dak/unternehmen/reporte-forschung/gesundheitsreport-2025_142376 (accessed on 10 April 2026).
65. BAuA - Zahlen | Daten | Fakten - Volkswirtschaftliche Kosten Durch Arbeitsunfähigkeit - Bundesanstalt Für Arbeitsschutz Und Arbeitsmedizin Available online: <https://www.baua.de/DE/Themen/Monitoring-Evaluation/Zahlen-Daten-Fakten/Kosten-der-Arbeitsunfaehigkeit> (accessed on 10 April 2026).