

Nutzerorientierte, dezentrale und einfache MSR und TGA

Tatsächliche Energieeffizienz im Betrieb durch einen neuen Ansatz für MSR /
TGA und robuste Optimierung zur Reduzierung der Performance Gap

Phase 1: Konzept

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 37023/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer,
David Briels M.Sc., Dr.-Ing. Karl Martin Heißler,
Dipl.-Ing. Tobias Eder, Martin Gabriel M.Sc.

München, November 2022

Projektkennblatt

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	37023/01	Referat	25	Fördersumme	108.100 €
Antragstitel		Tatsächliche Energieeffizienz im Betrieb durch einen neuen Ansatz für MSR / TGA und robuste Optimierung zur Reduzierung der Performance Gap			
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
18 Monate		01.01.2021		30.06.2022	
		Projektphase(n)			
		1			
Zwischenberichte		halbjährlich			
Bewilligungsempfänger		Zweckverband Staatliche weiterführende Schulen im Osten des Landkreises München Rätestraße 26 85551 Kirchheim b. München		Tel +49 89 90909 5602 Fax +49 89 90909 5603 Projektleitung Bearbeiter	
Kooperationspartner		Technische Universität München Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer 80333 München Eniano GmbH Tobias Eder 80336 München			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Die Diskrepanz zwischen geplanter und tatsächlicher Energieeffizienz von Gebäuden (Performance Gap) zeigt, dass aktuelle Ansätze zur Umsetzung von ambitionierten Energieeffizienzzielen durch immer komplexer werdende Gebäude- und Regelungstechnik nur eingeschränkt zielführend sind.</p> <p>Im Rahmen dieses Vorhabens wird daher ein neuer Ansatz für eine nutzerorientierte, dezentrale und einfache MSR (Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik) und TGA (Technische Gebäudeausrüstung) entwickelt und exemplarisch als Modellvorhaben bei der Neuplanung des Schulcampus Aschheim umgesetzt.</p> <p>Ziel dieses neuen Ansatzes ist ein robuster und damit tatsächlich energieeffizienter Gebäudebetrieb:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduzierung der Performance Gap • Optimierte Nutzerzufriedenheit • Verlängerte Lebensdauer 					
<p>Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190 ● http://www.dbu.de</p>					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In der **ersten Projektphase** werden zunächst **Konzepte** für eine **robuste TGA und MSR** sowie einen **nutzerorientierten Gebäudebetrieb** entwickelt. Durch die enge und frühe Einbindung in den integralen Planungsprozess des „Schulcampus Aschheim“ können konzeptionelle Ansätze in Form eines Modellvorhabens in die Planung einfließen, anschließend in der Bauphase **implementiert (Phase 2)** sowie später im Betrieb über ein **Monitoring** getestet und validiert werden

Dadurch wird die tatsächliche Effektivität dieses neuen Ansatzes überprüft und eine **Übertragbarkeit** auf Nichtwohngebäude unterschiedlicher Nutzung sichergestellt. Die Ansätze für eine **robuste TGA und MSR** beinhalten insbesondere **dezentrale Lüftungskonzepte** sowie eine **dezentralisierte Gebäudeleittechnik**. Für einen **nutzerorientierten Gebäudebetrieb** wird über die drei Aspekte **Nutzer-Interaktion, Nutzer-Verhalten und Nutzer-Bewusstsein** der Nutzenden in den Mittelpunkt für Planung und Auslegung von TGA und MSR gestellt.

Zur Konzeptentwicklung und -überprüfung werden dynamisch-thermische Gebäude- und Anlagensimulationen durchgeführt. Zudem werden in einem existierenden Bestandsgebäude des Schulcampus der Ansatz dezentraler Lüftungsgeräte in Kombination mit einer optimierten und nutzerorientierten Regelung mit vereinfachter Nutzerinteraktion prototypisch umgesetzt und getestet, wobei die Ergebnisse dieser ersten Messreihen für eine erste Konzeptvalidierung dienen.

Ergebnisse und Diskussion

Die optimierten Regelstrategien zeigen eine maßgebliche Reduktion des Energieverbrauches des Lüftungsgerätes im Vergleich zur Standardkonfiguration von bis zu 57 % ohne Nutzerinteraktionsmöglichkeit sowie bis zu 48 % Reduktion mit Nutzerinteraktionsmöglichkeit. Die Nutzerakzeptanz kann durch die Interaktionsmöglichkeit deutlich gesteigert werden und führte zu einem starken Rückgang der Fensteröffnungen. Darüber hinaus können aus dem Vergleich von Simulation und Messung deutliche Einsparpotenziale und Potentiale für eine weitere Optimierung der dezentralen Regelungsstrategien identifiziert werden, die in der laufenden Bauphase nun umgesetzt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

01.12.2020: Projektvorstellung im Rahmen einer Sitzung des Bauausschusses des Landratsamts München

30.05.2022: Vorstellung der vorläufigen Projektergebnisse im Rahmen einer Verbandsversammlung des Zweckverbands Staatliche weiterführende Schulen im Osten des Landkreises München

20.10.2022: Vorstellung der Projektergebnisse im Rahmen einer Sitzung des Bauausschusses des Landratsamts München

Fazit

Die Ergebnisse zeigen das Potenzial neuer, dezentraler Regelstrategien mit vereinfachten Interaktionsmöglichkeiten beim Einsatz von dezentralen Lüftungsgeräten im Schulbetrieb, mit positiven Auswirkungen auf Nutzerzufriedenheit und der Reduktion des Energieeinsatzes. Die Erkenntnisse werden im Rahmen eines Folgeprojektes tiefergehend validiert und für eine breite Umsetzung in der Praxis des Schulbaus aber auch für weitere Gebäudenutzungen aufbereitet.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Definitions- und Begriffsverzeichnis	XI
Zusammenfassung	XII
1. Einleitung.....	1
2. Hauptteil	5
2.1. Konzeptentwicklung robuste TGA und MSR.....	8
2.1.1. Hybrides, dezentrales Lüftungskonzept	8
2.1.2. Konzeptentwicklung dezentraler Regelungsansatz	9
2.2. Mess- und Monitoringkonzept	11
2.2.1. Wetterstation	12
2.2.2. Schulgebäude.....	12
2.2.3. Typräume	13
2.3. Prototypische Umsetzung und Versuchsreihe (ENIANO)	16
2.3.1. Konzeption, Versuchsaufbau und Messprogramm.....	17
2.3.2. Messgrößen und Indikatoren	20
2.3.3. Versuchsreihe „Natürliche Lüftung“	24
2.3.4. Versuchsreihe „Standardbetrieb“	26
2.3.5. Versuchsreihe „Minimalkomfort“	30
2.3.6. Versuchsreihe „Minimalkomfort und Interaktion“	34
2.3.7. Ergebnis Versuchsreihen.....	38
2.4. Modellierung & Simulation.....	40
2.4.1. Modellaufbau	40
2.4.2. Simulation „Natürliche Lüftung“	41
2.4.3. Simulation „Standardbetrieb“	43
2.4.4. Simulation „Minimalkomfort“	44
2.5. Schlussfolgerung Vergleich Simulation und Test-Messung	45
2.5.1. Vergleich Simulation und Bestandsmessung	45
2.5.2. Energieeinsparung Reduzierte Leistung	49

2.5.3. Energieeinsparung Stand-By Abschaltung.....	51
2.5.4. Occupancy.....	52
2.5.5. Zeitschritte Messdatenerfassung	52
2.5.6. Detaillierte Leistungserfassung	52
3. Fazit.....	53
Literaturverzeichnis.....	55
A. Anhang Tabellen.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Performance Gap bei Schulen und Bürogebäuden in Großbritannien; dargestellt ist die Verteilung der äquivalenten CO ₂ -Emissionen für den spezifischen Energieverbrauch pro Fläche und Jahr laut Planung und im Vergleich dazu gemäß tatsächlicher Verbrauchswerte (CarbonBuzz 2020)	1
Abbildung 1-2: Performance Gap vom Entwurf hin zur Ausführung sowie zum Gebäudebetrieb durch die Einflüsse von Nutzerverhalten und TGA-Betrieb. (eigene Darstellung; vgl. Delzende et al. 2017).....	2
Abbildung 1-3: Robuster Gebäudebetrieb durch nutzerorientierte, dezentrale Low-Tech Ansätze für TGA und MSR. (eigene Darstellung)	3
Abbildung 2-1: Foto des Architekturmodells des Siegerentwurfs für den Schulcampus Aschheim (köhler architekten + beratende ingenieure Gmbh).....	5
Abbildung 2-2: Unterschied zwischen einem globalen und einem robusten Optimum (Auer und Franke 2019 nach Rhein 2014)	6
Abbildung 2-3: Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Regelungsansatz	10
Abbildung 2-4: Übersicht Typräume (köhler architekten + beratende ingenieure Gmbh 2021)	13
Abbildung 2-5: Verortung der Typräume SO, SW und NW im 2. OG (köhler architekten + beratende ingenieure Gmbh 2021)	14
Abbildung 2-6: Sensorpositionen Typraum	15
Abbildung 2-7: Schematisches Messtechnikkonzept im Bestandsgebäude.....	18
Abbildung 2-8: Innentemperatur abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der Innentemperatur in Woche 1 (rechts).....	20
Abbildung 2-9: CO ₂ -Konzentration (Innenraum) abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der CO ₂ -Konzentration (Innenraum) in Woche 1 (rechts)	21
Abbildung 2-10: Feinstaubkonzentration (Innenraum) abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der Feinstaubkonzentration (Innenraum) in Woche 1 (rechts).....	22
Abbildung 2-11: Elektrische Leistungsaufnahme der dezentralen Lüftungsgeräte abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der elektrische Leistungsaufnahme der dezentralen Lüftungsgeräte in Woche 3 (rechts).....	23

Abbildung 2-12: Anzahl der Fensteröffnungen abhängig von der Außentemperatur in Woche 1 (links); Anzahl der Fensteröffnungen abhängig von der CO ₂ -Konzentration in Woche 1 (rechts)	23
Abbildung 2-13: Außentemperaturverlauf.....	24
Abbildung 2-14: Verlauf der Innenraumtemperatur (grün) und Fensteröffnungen (orange)	25
Abbildung 2-15: Verlauf der CO ₂ -Konzentration (grün) und Fensteröffnungen (orange)	25
Abbildung 2-16: Verlauf der Feinstaubkonzentration (grün) und Fensteröffnungen (orange)	26
Abbildung 2-17: Außentemperaturverlauf in Woche 3 und 4	27
Abbildung 2-18: Innentemperaturverlauf (grün) und Fensteröffnung (orange)	28
Abbildung 2-19: Verlauf der CO ₂ -Konzentration (grün) und Ventilationsstufen des Lüftungsgerätes (gelb)	28
Abbildung 2-20: Verlauf der CO ₂ -Konzentration (grün) und Fensteröffnungen (gelb / blau).....	29
Abbildung 2-21: Verlauf der Feinstaubkonzentration (grün) und Fensterlüftungen (gelb / blau).....	29
Abbildung 2-22: Außentemperaturverlauf (grün) und Leistungsaufnahme Lüftungsgerät (orange)	30
Abbildung 2-23: Außentemperaturverlauf.....	31
Abbildung 2-24: Innentemperaturverlauf (grün) und Fensteröffnung (orange)	31
Abbildung 2-25: Verlauf der CO ₂ -Konzentration (grün) und Fensteröffnung (orange)..	32
Abbildung 2-26: Verlauf der Feinstaubkonzentration (grün) und Fensteröffnungen (blau gelb).....	33
Abbildung 2-27: Verlauf der Leistungsaufnahme des Lüftungsgerätes (gelb) und der CO ₂ -Konzentration (grün).....	33
Abbildung 2-28: Außentemperaturverlauf.....	35
Abbildung 2-29: Innentemperaturverlauf (grün), Fensteröffnung (orange) und Nutzerinteraktion „zu warm“ (rot).....	35
Abbildung 2-30: Verlauf der CO ₂ -Konzentration (grün) und Nutzerinteraktion „lüften“ (gelb).....	36
Abbildung 2-31: Verlauf der Feinstaub-Konzentration (grün) und Fensteröffnung (gelb, blau).....	37
Abbildung 2-32: Verlauf der CO ₂ -Konzentration (grün), Leistungsaufnahme (gelb) und Nutzerinteraktion „lüften“ (blau)	38

Abbildung 2-33: 1-Zonen-Modell des Klassenraums im Bestandsgebäude.....	40
Abbildung 2-34: Außentemperaturen gemessen in Aschheim (T_mess_Asch) und am Messstandort München Theresienstr. (T_LMU_Muc).....	41
Abbildung 2-35: Außentemperatur und operative Temperatur des Klassenraums in Woche 1.....	42
Abbildung 2-36: CO ₂ -Konzentration im Klassenraum in Woche 1	42
Abbildung 2-37: Gemessene Außentemperatur und simulierte operative Temperatur des Klassenraums in Woche 3.....	43
Abbildung 2-38: Simulierte CO ₂ -Konzentration im Klassenraum in Woche 3	44
Abbildung 2-39: Gemessene Außentemperatur und simulierte operative Temperatur des Klassenraums in Woche 5.....	44
Abbildung 2-40: Simulierte CO ₂ -Konzentration im Klassenraum in Woche 5	45
Abbildung 2-41: Gemessene und simulierte CO ₂ -Konzentration im Fall „Natürliche Lüftung“.....	46
Abbildung 2-42: Gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Natürliche Lüftung“ .	46
Abbildung 2-43: Gemessene und simulierte CO ₂ -Konzentration im Fall „Standardbetrieb“	47
Abbildung 2-44: Gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Standardbetrieb“.....	48
Abbildung 2-45: Gemessene und simulierte CO ₂ -Konzentration im Fall „Minimalkomfort“	48
Abbildung 2-46: Gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Minimalkomfort".....	49
Abbildung 2-47: Gemessene und simulierte elektrische Leistungsaufnahme im Fall „Standardbetrieb“ in Woche 3	50
Abbildung 2-48: Gemessene und simulierte elektrische Leistungsaufnahme im Fall „Minimalbetrieb"	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Angestrebte Messgrößen, Messbereiche und Messgenauigkeit der Wetterstation	12
Tabelle 2-2: Am Bestandsgebäude aufgezeichnete Außentemperaturen	19
Tabelle 2-3: Außentemperaturen in Woche 1 und 2	24
Tabelle 2-4: Außentemperaturen in Woche 3 und 4	27
Tabelle 2-5: Außentemperaturen in Woche 5 bis 8	30
Tabelle 2-6: Außentemperaturen in Woche 9 bis 11	34
Tabelle 2-7: Einsparpotentiale Strombedarf durch optimierte Regelung im Vergleich zur Standardregelung basierend auf vorläufigen Messergebnissen zweier Wochen	39
Tabelle A-1: Messorte und Messparameter Schulgebäude	57
Tabelle A-2: Messorte und Messparameter Typräume	58

Definitions- und Begriffsverzeichnis

CO2_mess	Gemessene CO ₂ -Konzentration [ppm]
CO2_sim	Simulierte CO ₂ -Konzentration [ppm]
GLT	Gebäudeleittechnik
Leistung_mess	Gemessene elektrische Leistung [W]
Leistung_sim	Simulierte elektrische Leistung [W]
MIN	Versuchsreihe „Minimalkomfort“
MIN-INT	Versuchsreihe „Minimalkomfort und Interaktion“
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
NL	Versuchsreihe „Natürliche Lüftung“
RLT	Raumluftechnik
SR	Versuchsreihe „Standardbetrieb“
T_AUL	Außenlufttemperatur [°C]
T_LMU_Muc	Gemessene Außenlufttemperatur an der LMU in München [°C]
T_mess	Gemessene Temperatur [°C]
T_mess_Asch	Gemessene Außenlufttemperatur in Aschheim [°C]
T_op_sim	Operative Temperatur [°C]
TGA	Technische Gebäudeausrüstung

Zusammenfassung

In einer kombinierten Untersuchung aus thermisch-dynamischen Raumklimasimulationen und einer 11-wöchigen Praxisstudie wurden für ein Klassenzimmer im Bestandsgebäude der Realschule Aschheim vier Versuchsreihen zum Einsatz dezentraler Lüftungsgeräte in Schulen durchgeführt und bewertet. Über ein temporäres, prototypisches Monitoringsystem wurde eine Datenbasis geschaffen, die als Grundlage für die Auswertungen von Komfort, Luftqualität und Energienachfrage diente. Ziel der Untersuchungen war es, vorab optimierte Regelstrategien im Reallabor und in Simulationen zu erproben, die einen definierten „Minimalkomfort“ im Klassenraum realisieren lassen, der sich an natürlich belüfteten Räumen orientiert und gleichzeitig wesentliche Energieeinsparungen bei Konditionierung und Lüftung ermöglicht. Die Erkenntnisse hieraus dienen als Grundlage für eine zweite Projektphase, einer Ausrüstung und detaillierten Untersuchung von 5 Typräumen als Reallabor in den Neubauten des Schulcampus Aschheim. Vier Betriebsvarianten wurden zu diesem Zweck in Versuchsreihen und Simulationen abgebildet. Resultierend konnte gezeigt werden, dass die optimierten Regelstrategien eine maßgebliche Reduktion des Energieverbrauches des Lüftungsgerätes im Vergleich zur Standardkonfiguration von bis zu 57 % ohne Nutzerinteraktionsmöglichkeit sowie bis zu 48 % Reduktion mit Nutzerinteraktionsmöglichkeit erlauben. Die abgeleitete Nutzerakzeptanz konnte durch die Interaktionsmöglichkeit deutlich gesteigert werden und führte zu einem starken Rückgang der Fensteröffnungen. Darüber hinaus konnten aus dem Vergleich von Simulation und Messung deutliche Einsparpotenziale identifiziert werden, die in der laufenden Bauphase nun umgesetzt werden. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial neuer Regelstrategien und Interaktionsmöglichkeiten beim Einsatz von Lüftungsgeräten im Schulbetrieb, mit positiven Auswirkungen auf Nutzerzufriedenheit und der Reduktion des Energieeinsatzes. Die Erkenntnisse sollten daher im Rahmen eines Folgeprojektes tiefergehend validiert und für eine breite Umsetzung in der Praxis des Schulbaus aufbereitet werden.

Das Projekt wurde vom Zweckverband „Staatliche weiterführende Schulen im Osten des Landkreises München“ beantragt und gemeinsam mit zwei Forschungspartnern durchgeführt: die Technische Universität München mit dem Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen sowie die ENIANO GmbH.

Das Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 37023/01.

1. Einleitung

Die ambitionierten Energieeffizienzziele haben dazu geführt, dass die Anforderungen an den Primärenergiebedarf für Gebäude immer weiter steigen, und man aktuell mit den sogenannten Effizienzhäusern Plus sogar negative Bilanzen für Primär- sowie Endenergiebedarf vorgibt. Diese Werte beruhen jedoch immer auf theoretisch ermittelten Bedarfswerten und nicht auf realen Verbrauchswerten.

In den letzten Jahren haben zahlreiche Studien eine hohe Diskrepanz zwischen geplanter und tatsächlicher Energieeffizienz von Gebäuden aufgezeigt (vgl. BINE 2015; OBB 2017; Delzende et al. 2017), was als **Performance Gap** bezeichnet wird. Eine umfangreiche Studie untersuchte knapp 60.000 Bildungseinrichtungen in Großbritannien – einschließlich 85 % aller nationalen Schulen (UK) – mit dem Ergebnis, dass 95 % den vorhergesagten Energiebedarf nicht einhalten (vgl. Delzende et al. 2017).

In Abbildung 1-1 sind exemplarisch Werte einer weiteren Studie aus Großbritannien dargestellt, welche die Abweichungen tatsächlicher Verbrauchswerte von geplanten, errechneten Werten für zahlreiche untersuchte Schul- und Bürogebäude zeigen. Umgerechnet in äquivalente CO₂-Emissionen werden hier die angestrebten Werte im Schnitt um 48 % bei Schulen bzw. 45 % bei Büros überschritten (CarbonBuzz 2020).

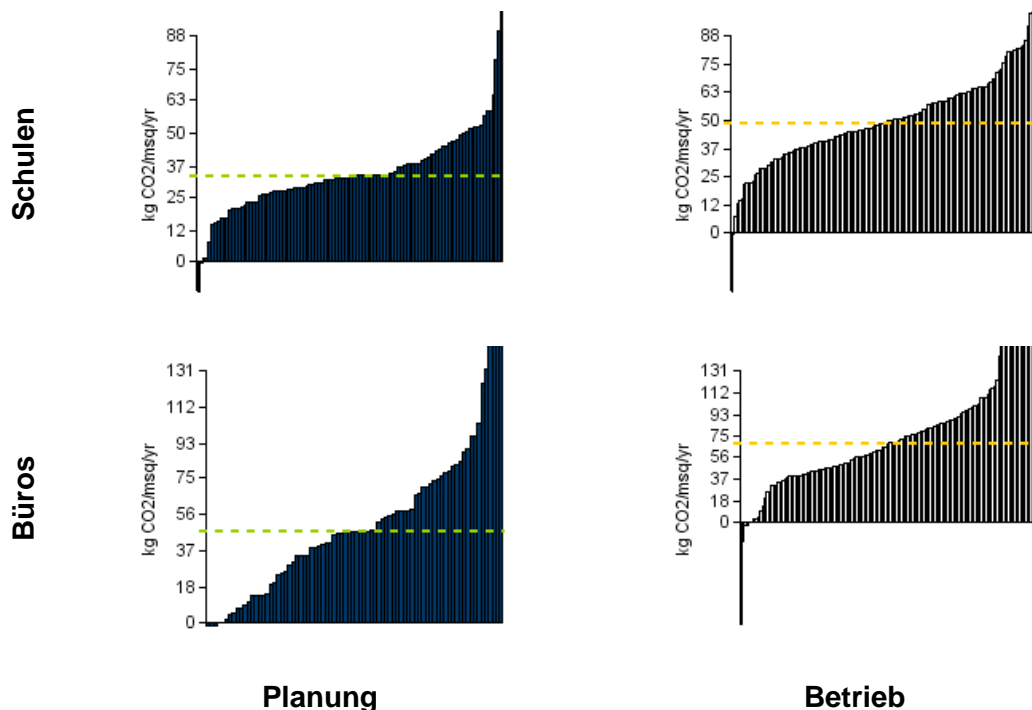


Abbildung 1-1: Performance Gap bei Schulen und Bürogebäuden in Großbritannien; dargestellt ist die Verteilung der äquivalenten CO₂-Emissionen für den spezifischen Energieverbrauch pro Fläche und Jahr laut Planung und im Vergleich dazu gemäß tatsächlicher Verbrauchswerte (CarbonBuzz 2020)

Diese Abweichungen können zum Teil auf Diskrepanzen zwischen geplanter und gebauter Realität (siehe Abbildung 1-2) zurückgeführt werden (vgl. Delzende et al. 2017). Zudem sind im Gebäudebetrieb eine fehlerfrei funktionierende Gebäudetechnik (z.B. Betriebsfehler) sowie das Nutzerverhalten (z.B. Lüftungsverhalten) zwei unsichere Eingangsgrößen in einem komplexen System, welche wiederum zu erheblichen Schwankungen in der Zielgröße Energieeffizienz und dadurch zur Performance Gap beitragen können.

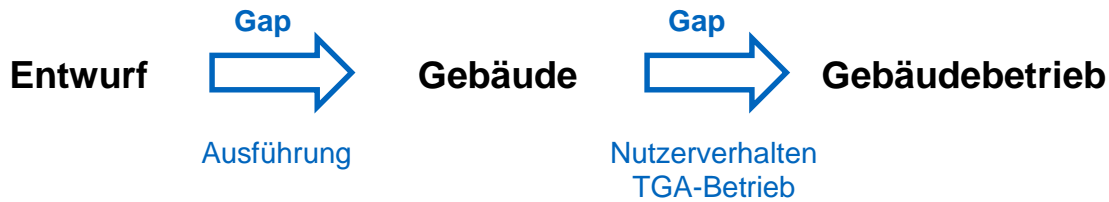


Abbildung 1-2: Performance Gap vom Entwurf hin zur Ausführung sowie zum Gebäudebetrieb durch die Einflüsse von Nutzerverhalten und TGA-Betrieb. (eigene Darstellung; vgl. Delzende et al. 2017)

Bei den üblichen, hochambitionierten und technologisch orientierten Ansätzen wird in der Regel versucht, ein globales Optimum einer theoretischen Energieeffizienz zu erreichen, ohne Schwankungen unsicherer Eingangsgrößen wie beispielsweise dem Nutzerverhalten im Betrieb zu berücksichtigen. Dahingegen werden bei einer Optimierung im Sinne der sogenannten **Robustheit** Schwankungen von Eingangsgrößen (z.B. Nutzerverhalten) und deren Einfluss auf die Zielgröße (z.B. Energieverbrauch) berücksichtigt (vgl. Auer und Franke 2019; Rhein 2014).

Bei steigender Komplexität der Technik, die mit den klassischen Ansätzen zur Steigerung der Energieeffizienz einhergeht, verstärkt sich der Effekt der Performance Gap sogar häufig. Untersuchungen zeigen, dass die angestrebte Energieeffizienz im Betrieb – wenn überhaupt – erst nach einer aufwendigen und kostspieligen Einregulierungsphase erzielt wird (vgl. Jazizadeh et al. 2013) und Betriebsfehler häufig sehr spät oder gar nicht aufgedeckt und behoben werden (vgl. Auer et al. 2020). Dazu sind jedoch ein Monitoring und iteratives Optimieren durch Experten nach Inbetriebnahme nötig, was leider nur selten stattfindet und mit hohem Zeitaufwand und Kosten verbunden ist. Des Weiteren bringt eine aufwendige Gebäudetechnik einen hohen Platzbedarf sowie eine große Menge an grauer Energie mit sich und weist eine vergleichsweise geringe Lebensdauer bei hohen Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten auf. Dies zeigt, dass aktuelle Ansätze zur Umsetzung der ambitionierten Energieeffizienzziele – insbesondere durch immer komplexer werdende Gebäude- und vor allem Regelungstechnik – gescheitert sind.

Überträgt man die Werte für die Performance Gap aus der UK-Studie (siehe Abbildung 1-1) nur auf die 25 weiterführenden Schulen im Landkreis München, lässt dies ein enormes Einsparpotential für Energieverbrauch, CO₂-Emissionen sowie Kosten vermuten. Mit dieser Motivation wurde durch den zuständigen Schulzweckverband und dem beteiligten Landratsamt München für die Planung des neuen Schulcampus Aschheim eine DBU-geförderte wissenschaftliche Begleitung initiiert. In diesem Rahmen sollen die klassischen Herangehensweisen grundlegend hinterfragt und durch einen neuen, alternativen Ansatz ersetzt werden, um die Lücke zwischen geplanter und tatsächlicher Energieeffizienz zu schließen. Dies wird ermöglicht, indem konzeptionelle Ansätze zur Überwindung der Performance Gap nicht nur theoretisch entwickelt, sondern im Rahmen des Schulcampus Aschheim auch beispielhaft als Modellvorhaben in die Planung mit einfließen und an einem Realobjekt überprüft werden können.

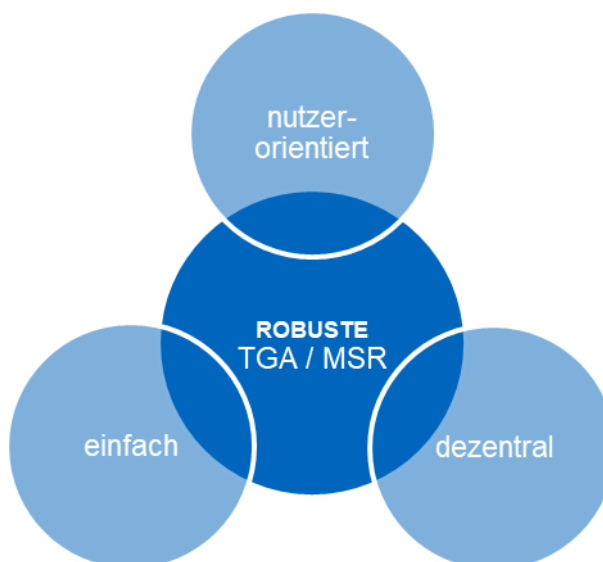


Abbildung 1-3: Robuster Gebäudebetrieb durch nutzerorientierte, dezentrale Low-Tech Ansätze für TGA und MSR. (eigene Darstellung)

In diesem Rahmen wurde ein neuartiger Ansatz basierend auf **nutzerorientierten** und **dezentralen Low-Tech Strategien** für TGA (Technische Gebäudeausrüstung) und MSR (Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik) entwickelt. Damit soll die potentielle Performance Gap reduziert und ein robuster und dadurch auch tatsächlich energieeffizienter Gebäudebetrieb sichergestellt werden (vgl. Abbildung 1-3).

Hierbei werden insbesondere die Wechselwirkungen und das Zusammenspiel zwischen Gebäude, Haustechnik und Nutzende mit einbezogen. Kern dieses Konzeptes ist eine reduzierte, dezentralisierte und nutzerorientierte Gebäude- bzw. Raumautomation. Dies bedingt auch eine Neuausrichtung der Gebäudetechnik allgemein. Wichtiger Baustein hierbei ist der Einsatz von dezentralen raumluftechnischen (RLT) Anlagen in Form von Fassadenlüftungsgeräten mit hohem Wärmerückgewinnungsgrad zur Be- und Entlüftung sowie ggf. als zusätzliche Möglichkeit zum Heizen und Kühlen.

Ein zentraler Aspekt bei diesem Ansatz ist zudem, den Nutzenden wieder in den Mittelpunkt der Planung und Auslegung von TGA, Gebäudeautomation und Raumklimatisierung zu stellen. Diese Nutzerorientierung baut auf die drei Prinzipien *Nutzer-Interaktion*,

-Verhalten und *-Bewusstsein* auf. Die Möglichkeit für die Nutzenden, selbst interagieren und das Raumklima beeinflussen zu können, hat eine erhebliche Auswirkung auf die subjektive Wahrnehmung und damit auf das Behaglichkeitsempfinden des Nutzers (vgl. Kalz und Pfafferott 2014; Hellwig 2005).

Hier werden im Projekt zum einen die Interaktionsmöglichkeiten im Klimakonzept (z.B. natürliche Lüftung) betrachtet, aber vor allem auch die Möglichkeit als Nutzender dezentral Einfluss auf die MSR zu nehmen. Dies wird über eine dezentralisierte Regelungslogik realisiert, welche eine stark vereinfachte Einflussnahme durch die Nutzenden ermöglicht und intelligent in Stellgrößen für die dezentrale TGA übersetzt.

Das Nutzerverhalten (z.B. Lüftungsverhalten, Raumthermostate etc.) hat erhebliche Auswirkungen auf die tatsächliche Energieeffizienz des Gebäudes. Daher ist es elementar, das Nutzerverhalten von Beginn an in die Konzeptionierung, Auslegung und Planung der TGA, Gebäudeautomation und Raumklimatisierung im Sinne eines robusten Gebäudebetriebs zu berücksichtigen, sodass von der Planung abweichendes Nutzerverhalten möglichst geringe negative Auswirkungen auf den realen Energieverbrauch hat. Durch die Interaktionsmöglichkeit der Nutzenden auf die dezentral geregelte TGA kann das Nutzerverhalten indirekt durch die Analyse der Interaktionen automatisiert in der Regelungslogik berücksichtigt werden.

Durch die starke Nutzerorientierung und ein raum aufgelöstes Monitoring wird das Bewusstsein des Nutzenden für Wechselwirkungen zwischen Gebäude, Haustechnik und Nutzenden sowie für Auswirkungen auf den Energieverbrauch gestärkt. Dies wird durch einen bilateralen Informationsfluss und die aktive Nutzerinteraktion mittels dezentralisierter Gebäudeautomation und Nutzerinterface ermöglicht. In Form eines raumweisen Dashboards wird unter anderem eine Rückkoppelung zum Nutzenden (z.B. aktueller Energieverbrauch, Raumklimawerte, Handlungsempfehlungen etc.) abgebildet. Zudem bietet die Umsetzung dieses neuartigen Ansatzes im Rahmen einer Schule die Möglichkeit, durch eine spielerische Integration des Konzeptes in den Unterricht das Bewusstsein der Nutzenden zu stärken.

2. Hauptteil

In der ersten Projektphase, wurde ein Konzept für einen robusten Gebäudebetrieb durch nutzerorientierte, dezentrale und einfache TGA / MSR sowie Ansätze für einen nutzerorientierten Gebäudebetrieb und eine dezentrale Gebäudeautomation entwickelt.

Die enge Kopplung einer wissenschaftlichen Projektbegleitung und eines integralen Planungsansatzes von Beginn der Planungsphase an ermöglichte, Ansätze des Konzepts (nutzerorientierter Gebäudebetrieb, robuste TGA / MSR und Energie-/ Klimakonzept) und Handlungsempfehlungen durch die Beteiligung von FachplanerInnen und ArchitektInnen direkt in die Planung eines Realobjekts mit einfließen zu lassen. So wird sichergestellt, dass die Konzepte von Anfang an praxisnah gedacht und entwickelt werden und später in der zweiten Projektphase in die bauliche Umsetzung implementiert werden können.

Der Schulcampus Aschheim umfasst die Erweiterung der bestehenden dreizügigen St. Emmeram Realschule um zwei Züge, sowie dem Neubau eines vierzügigen Gymnasiums, einer Mensa und einer Dreifachsporthalle mit Schwimmbad (siehe Abbildung 2-1). Aktuell befindet sich das Projekt noch in der Planung, zum Schuljahr 2025 / 2026 soll der Schulcampus dann in Betrieb genommen werden. Das betroffene Grundstück befindet sich im Süd-Osten des Gemeindegebiets Aschheim, östlich der Stadt München.

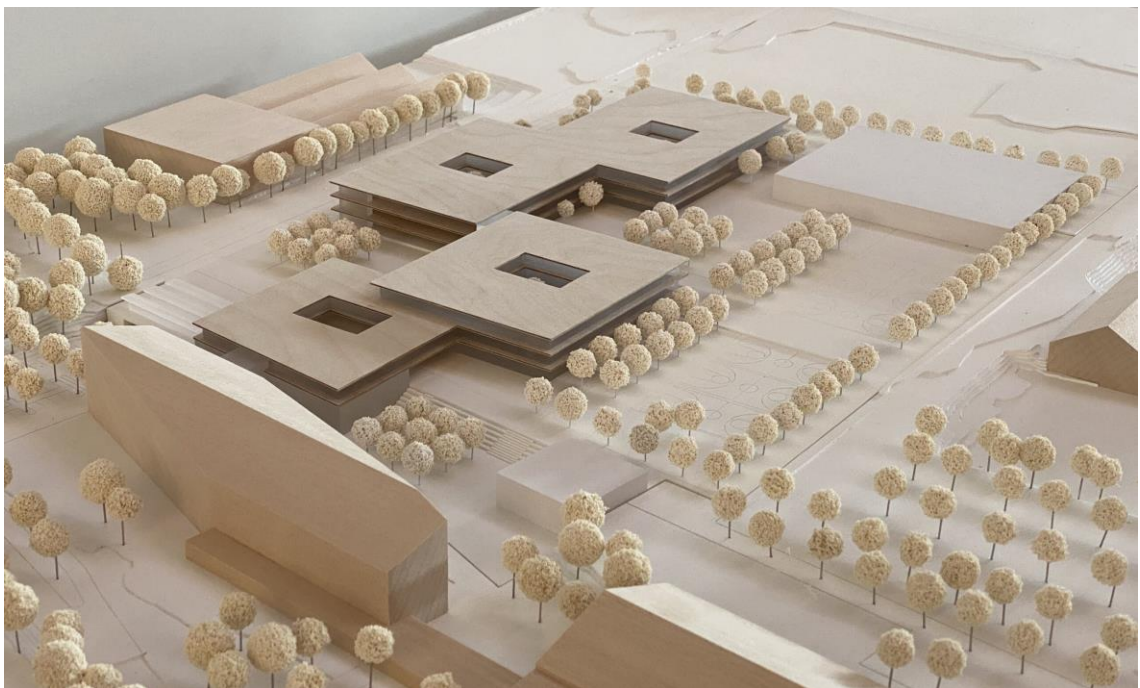


Abbildung 2-1: Foto des Architekturmodells des Siegerentwurfs für den Schulcampus Aschheim (köhler architekten + beratende ingenieure GmbH)

Schon in der Auslobung des Vorhabens wurde großer Wert gelegt auf die Konzeptionierung von umwelt- und gesundheitsverträglichen Gebäuden, angelehnt an Richtlinien für nachhaltigen Schulbau des Landratsamtes München. So war insbesondere eine Holzhybridbauweise erwünscht, sowie der Standard Energieeffizienzhaus Plus vorgegeben. Zudem wurden insbesondere auf eine kompakte Bauweise, energetisch sinnvolle Orientierung und Zonierung, moderate Fensterflächenanteile, möglichst hohe Wärmespeicherkapazitäten der Bauteile sowie eine hohe Tageslichtverfügbarkeit hingewiesen. Ergänzend war schon hier die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, beispielsweise durch die Einbindung in den Rücklauf eines bestehenden Geothermie-Fernwärmenetzes, und einer möglichst maximierten Photovoltaiknutzung festgelegt.

Bei der tatsächlichen Energieeffizienz im Gebäudebetrieb spielen Faktoren, wie das Nutzerverhalten oder ein möglichst fehlerfreier Betrieb von TGA und MSR eine große Rolle und wirken sich erheblich auf den Energieverbrauch aus. Bei klassischen Energieeinsparmaßnahmen wird häufig versucht, ein globales Optimum (siehe Abbildung 2-2) einer theoretischen Energieeffizienz zu erreichen, ohne Schwankungen unsicherer Eingangsgrößen wie beispielsweise dem Nutzerverhalten im Betrieb zu berücksichtigen. Dies ist eine der Ursachen für die Performance Gap, also der Diskrepanz zwischen geplanter und tatsächlicher Energieeffizienz. Dahingegen werden bei einem robusten Optimum Schwankungen von Eingangsgrößen (z.B. Nutzerverhalten) und deren Einfluss auf die Zielgröße (z.B. Energieverbrauch) berücksichtigt (vgl. Abbildung 2-2).

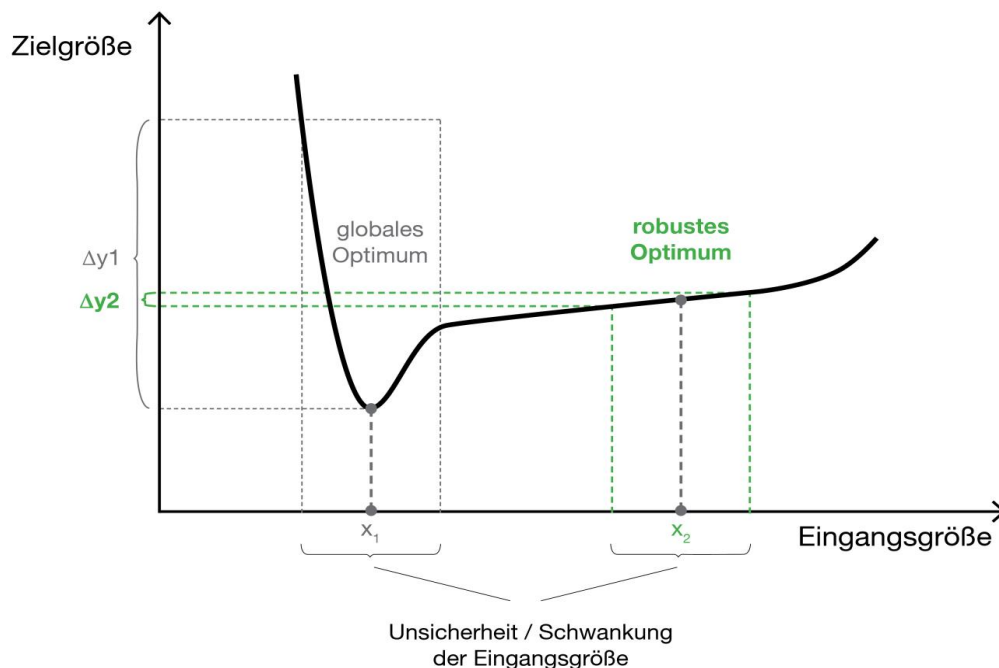


Abbildung 2-2: Unterschied zwischen einem globalen und einem robusten Optimum (Auer und Franke 2019 nach Rhein 2014)

Unter diesem Gesichtspunkt wird im Rahmen dieses Projektes ein robuster Gebäudebetrieb angestrebt, indem unsichere Eingangsgrößen wie das Nutzerverhalten und der tatsächliche Betrieb der TGA in den Mittelpunkt gestellt werden. Dies soll durch einen *nutzerorientierten, dezentralen Low-Tech Ansatz* für MSR und TGA ermöglicht werden.

Mittels dynamischer Gebäudesimulationen in der frühen Projektphase wurden und werden Sensitivitätsanalysen zu diesen Aspekten durchgeführt, worauf dann eine robuste Optimierung aufbaut. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse sind wiederum in die Konzeptionierung einer dezentralen, nutzerorientierten und einfachen MSR und TGA für den Schulcampus Aschheim eingeflossen und dienen in Phase 2 zur weiteren Optimierung von Regelungsstrategien. Nach erfolgreicher Implementierung und Validierung können die Ergebnisse abschließend für allgemeine Handlungsempfehlungen für Nichtwohngebäude übertragen und technische Lösungen ausgerollt werden.

2.1. Konzeptentwicklung robuste TGA und MSR

Im Rahmen des Projektes wird unter einer robusten TGA und MSR eine Neuausrichtung, Vereinfachung und Dezentralisierung der TGA sowie der Gebäude- bzw. Raumautomation verstanden. Während Vereinfachung und Dezentralisierung naheliegende und nahezu selbsterklärende Konzepte sind, bezieht sich die Neuausrichtung auf die tatsächlichen, jeweils aktuellen Anforderungen der Nutzenden, die in den Mittelpunkt von Auslegung und Betrieb der Raumkonditionierung gestellt werden.

2.1.1. Hybrides, dezentrales Lüftungskonzept

Nicht zuletzt durch Covid-19 sind die Frischluftversorgung und das Lüftungsverhalten von Räumen und dessen Einfluss auf das Wohlbefinden und in diesem Fall auch auf die Gesundheit wieder stärker in den Fokus gerückt. Eine ausreichende Versorgung mit Frischluft ist eines der zentralen Themen bei der Planung der meisten Nichtwohngebäude. Eine hohe Belegungsdichte auf begrenztem Raum (z.B. in Großraumbüros und Schulen) hat eine rasche Erhöhung der CO₂-Konzentration zur Folge. Noch immer kommen verschiedene Studien zu unterschiedlichen Aussagen, ab welchen Schwellwerten der CO₂-Konzentration eine physische Beeinträchtigung des Menschen erfolgt (vgl. Auer et al. 2020). Dennoch sind Schwellwerte der CO₂-Konzentration in der Normung vorhanden und fließen im Rahmen der DIN EN 16798-1 in die Auslegung der Außenluftvolumenströme von maschinell belüfteten Nichtwohngebäuden mit ein. Da die Einhaltung durch ausschließlich natürliche Lüftung - vor allem bei kalten Außenlufttemperaturen – nicht ohne weiteres möglich ist, wird ab einer gewissen Belegungsdichte meist eine mechanische Lüftung als Lösungsweg herangezogen und der Betrieb auf ebenjene CO₂-Schwellenwerte und auf die maximale Belegungsdichte ausgelegt und dadurch häufig überdimensioniert.

Zudem zeigen Studien eine hohe Diskrepanz zwischen den objektiv gemessenen Konzentrationen und dem subjektiven Empfinden der Raumluftqualität, insbesondere da die CO₂-Konzentration selbst keine objektiven Informationen über die Raumluftqualität liefert, sondern vielmehr als Indikator für andere Luftverunreinigungen dient: unangenehme Gerüche, flüchtige organische Verbindungen (VOCs) oder Feinstaub (particulate matter - PM) (vgl. Auer et al. 2020).

Eine rein mechanische Lüftung ohne Möglichkeit der individuellen Einflussnahme wird von den Nutzenden in der Regel abgelehnt. Durchgeführte Umfragen in Schulen (vgl. Djahanschah et al. 2017) zeigen, dass die Nutzenden durch das Empfinden, in einem geschlossenen Raum ohne Verbindung nach außen zu sein, die Raumluftqualität oft als

“stickig“ und “verbraucht“ einschätzen. Darüber hinaus hat der Einsatz einer zentralen mechanischen Lüftungsanlage einen weitreichenden Planungs-, Kosten- und Unterhaltsaufwand zur Folge und kommt in der Regel mit einer sehr komplexen und daher sehr fehleranfälligen Regelungstechnik, welche dem Nutzenden kaum Einflussmöglichkeiten bietet. Bereits in vorhergehenden Forschungsprojekten haben sich hier dezentrale Lüftungsgeräte als ein möglicher Ansatz bewährt (vgl. Mahler und Himmler 2008).

Die verfolgte Strategie eines hybriden, dezentralen Lüftungskonzepts bietet damit einen guten Kompromiss: die Möglichkeit zur natürlichen Lüftung über manuell öffnbare Fensterflügel (nur Schwenköffnung, Kippöffnung bauseitig unterbunden) und zur mechanischen Lüftung über dezentrale Zu- und Abluftgeräte mit hocheffizienten Rotations-Wärmetauschern sowie zusätzlichen elektrischen Nachheizregistern. Hauptwärmequelle ist jedoch die Fußbodenheizung. So wird den Nutzenden eine weitreichende individuelle Einflussnahme ermöglicht und eine komplexe, zentrale RLT-Anlage, die dafür nötige Schachtführung und Trassierung sowie sämtliche dadurch bedingten hygienischen, stofflichen und energetischen Anforderungen vermieden.

In der kalten Jahreszeit soll durch einen minimierten mechanischen Volumenstrom in Kombination mit manuellem Stoß- bzw. mechanischem Boosterlüften, z.B. in Pausen, ein ausreichender Luftaustausch bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz sichergestellt werden. Bei steigenden Außenlufttemperaturen ist geplant ab einem bestimmten Niveau zu einer ausschließlich natürlichen Lüftung über Fensteröffnungen überzugehen. An Hitzetagen ermöglicht die Wärmerückgewinnung der dezentralen Lüftungsgeräte einen verzögerten Wärmeeintrag von außen durch „Kälterückgewinnung“ aus der Innenraumluft. Zudem ermöglichen Bypass klappen unter bestimmten Außen- und Innenraumklimabedingungen eine gewisse Kühlwirkung durch Umgehen des Wärmetauschers und Einbringen von unkonditionierter Außenluft, welche kühler als die Innenluft ist.

2.1.2. Konzeptentwicklung dezentraler Regelungsansatz

Neben dem dezentralen TGA-Ansatzes für die Lüftung wurde gemeinsam mit den Fachplanern auch die MSR-Planung dahingehend konzipiert, einen nutzerorientierten, dezentralen und vereinfachten Betrieb zu ermöglichen. Grundlage war hier zunächst die Wahl von herstellernerutralen Feldbus-Protokollen (z.B. KNX und DALI) für Sensorik und Aktorik, aber insbesondere auch die Wahl eines herstellerunabhängigen Netzwerkprotokolls für die Gebäudeautomation. Dabei fiel die Wahl auf das standardisierte BACnet welches die zwingend notwendige Interoperabilität sicherstellt. Damit sollen insbesondere herstellerabhängige, proprietäre Lösungen vermieden werden, wie sie die Regel für eine zentrale GLT üblich sind.

Den eigentlichen Kern des entwickelten Ansatzes stellt ein dezentraler Regelungsansatz in den Pilot-Klassenräumen (Bottom-Up) im Vergleich zu einer zentralen Gebäudeautomation (Top-Down) in den Standard-Klassenräumen dar. Abbildung 2-3 zeigt eine Konzeptskizze zur Umsetzung einer nutzerorientierten, dezentralen und einfachen Raumautomation über eine Schnittstelle zwischen der übergeordneten Gebäudeautomation (GLT) und den dezentralen Lüftungsgeräten.

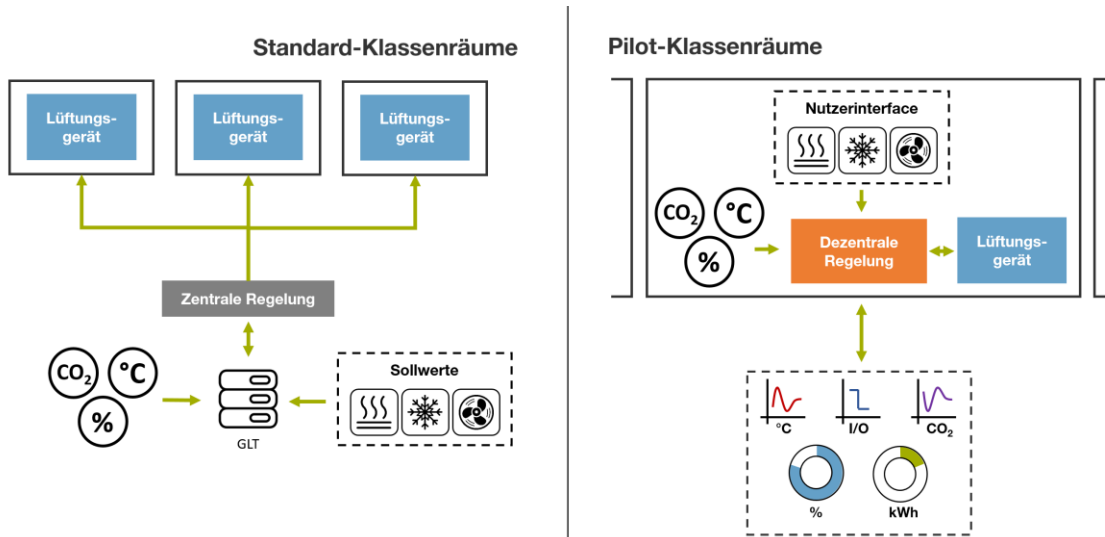


Abbildung 2-3: Gegenüberstellung zentraler und dezentraler Regelungsansatz

Anstatt zentral über die GLT Sollwerte vorzugeben und diese an die Steuereinheiten in den Lüftungsgeräten zu schicken ohne dem Nutzenden eine Einflussmöglichkeit zu überlassen (siehe Abbildung 2-3 links), wird eine neue dezentrale Regelungseinheit an die Aktorik gekoppelt (siehe Abbildung 2-3 rechts).

Im Schulcampus Aschheim wird dies über ein Gateway zur Steuereinheit des dezentralen Lüftungsgerätes realisiert. Damit entsteht eine bidirektionale Schnittstelle, welche ein Auslesen aktueller Betriebsparameter und raumklimatischer Messgrößen ermöglicht sowie die Ansteuerung einzelner Komponenten des Gerätes und dadurch den Betrieb über neuartige Regelstrategien zu optimieren. Dies wurde in einer ersten Versuchsreihe schon praktisch umgesetzt und getestet (siehe 2.3)

Grundidee der bedarfsgerechten, nutzerorientierten und interaktiven Regelstrategie ist ein definierter «Minimalkomfort», insbesondere eine reduzierte Grundlast der dezentralen Lüftungsgeräten von den üblichen 30 m³/h pro Person auf 15 m³/h und Person, welche zudem über Anwesenheitssensoren bzw. eine Personenzählung individuell angepasst und nicht wie sonst üblich auf eine maximal zu erwartende Auslastung ausgelegt und dadurch überdimensioniert wird. Ziel dabei ist durch die reduzierte Fördermenge den Bedarf an elektrischer Energie der Lüfter zu verringern, die Lüftungswärmeverluste und ggf. die Energieaufnahme des Nachheizregisters zu senken.

Den Nutzenden wird dann in einer vorgegebenen Bandbreite ermöglicht, in diese dezentrale Regelung eingreifen und mit ihr interagieren zu können. Die Interaktion ist stark vereinfacht auf drei Optionen: «zu warm», «zu kalt» und «Lüften». Hintergrund ist hierbei, dass selbst eine Eingabe von Sollwerten (z.B. Lufttemperatur oder Luftvolumenstrom) für den Nutzenden schwer greifbar ist, insbesondere wie diese Sollwerte die Aufenthaltsqualität und den Energieverbrauch beeinflussen. Zunächst wird dieser Eingriff über einfache Schalter bzw. Fernbedienungen ermöglicht. In einem nächsten Schritt ist die Einbindung eines einfachen Nutzerinterfaces geplant, welches in ein vorhandenes Bedientableau der Raumautomation integriert werden soll. Darüber hinaus ist über ein Dashboard eine aufbereitete Darstellung der aktuellen Raumklima- und Energieparameter geplant, um den Nutzenden Feedback über die Auswirkungen ihrer Nutzerinteraktion auf die og. Parameter zu geben. Weiter ist geplant, das Feedback der Nutzenden von einer dezentralen Regelungslogik unter Einbeziehung der jeweiligen Messwerte der verknüpften Sensorik in den Kontext der aktuellen Bedingungen (Innen- und Außenklimabedingungen, Nutzerverhalten, Anlagenparameter, etc.) zu stellen. Über eine intelligente Regelungslogik werden die Informationen in Stellwerte für die Aktorik im Sinne eines robusten Betriebs übersetzt. Nach einer definierten Zeit bzw. bei ungenutztem Raum fällt das System zurück in den effizienten Betriebsmodus «Minimalkomfort».

Darüber hinaus ist geplant die Wechselwirkungen des dezentralen Ansatzes mit der trägen, effizienten Fußbodenheizung bzw. -kühlung zu betrachten und dies in die Optimierung mit einfließen zu lassen. Hier sind insbesondere Regelungsstrategien zum Abfedern von Spitzenlasten angedacht (sowohl Heizen als auch Kühlen). Potenzial bieten hierbei beispielsweise die elektrischen Nachheizregister der dezentralen Lüftungsgeräte oder aber durch eine Nachtauskühlung unter Umgehung der Wärmerückgewinnung per Bypass.

Der dezentralisierte Ansatz ermöglicht dabei erst die Umsetzung von bedarfsgerechten und interaktiven Regelstrategien zur robusten Optimierung des Betriebs. Zielparameter sind dabei insbesondere ein energieeffizienter Anlagenbetrieb, der Innenraumkomfort, die Luftqualität sowie die Nutzerzufriedenheit.

2.2. Mess- und Monitoringkonzept

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die Planung der Messungen, zu geplanten Messgrößen und Messorten für die Neubauten am Schulcampus Aschheim. Die prototypischen Messungen im Bestandsgebäude der Realschule Aschheim werden in

2.3 vorgestellt und analysiert. Um die zentrale Messaufgabe, die Bestimmung des Innenraumkomforts in Klassenräumen erfüllen zu können, ist die Erfassung verschiedener Messgrößen über das gesamte Schulgebäude hinweg erforderlich. Hauptmessplätze sind ausgewählte Typräume, vier reguläre Klassenzimmer und ein Fachklassenraum. Um die Energiebilanzen dieser Typräume vollständig erstellen zu können werden weitere Messgrößen der zentralen Schulinfrastruktur, wie beispielsweise der Wärmepumpe oder der Fußbodenheizung und –kühlung erfasst. Weitere Messgrößen mit großem Einfluss auf die Energiebilanz der Typräume sind die Wetterdaten, die in einer Aufdach-Wetterstation erfasst werden. Alle Sensoren werden über die Gebäudeleittechnik an einen zentralen Server angebunden, der als Datenlogger fungiert und die Messdaten verfügbar macht. Dieser Abschnitt bezieht sich jedoch rein auf die Messplanung.

2.2.1. Wetterstation

Am Schulgebäude ist eine Aufdach-Konstruktion an einem Mast geplant, die die Messgrößen Temperatur, Einstrahlung, Feuchte, Luftdruck, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Windrichtung erfasst. Diese Messdaten sind zukünftig die Grundlage der Komfortbewertung der Innenräume. Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der angestrebten Messgrößen, Messbereiche und Messgenauigkeiten.

Tabelle 2-1: Angestrebte Messgrößen, Messbereiche und Messgenauigkeit der Wetterstation

Messgröße	Messbereich	Messgenauigkeit
Lufttemperatur	-40...+70°C	±0,1 K (0...60 °C) • ± 0,2 K (-40...0 °C)
Globalstrahlung	-400...4000 W/m ²	< ± 0,2 % (100...1000 W/m ²)
Rel. Feuchte	0... 100 % r. F.	± 1,5 % (0...80 %) r. F. - ± 2 % (> 80 %) r. F.
Luftdruck	500... 1100 hPa	± 2 hPa (-30...+70 °C) - ± 1 hPa (-10...+60 °C)
Niederschlag	0,0025...∞ mm	0,1 mm bzw. 6 mm/h
Windgeschwindigkeit	0,7...50 m/s	0,5 m/s bei 0,7... 5 m/s und 2 % bei 5,02... 50 m/s
Windrichtung	0...360°	2°

Da aktuell noch keine lokalen Wetterdaten vorhanden sind, werden für die Simulationen die gemessenen Wetterdaten der Meteorologie der LMU München (Zinner und Garhammer 2022) des ersten Halbjahres 2022 vom Messstandort München verwendet.

2.2.2. Schulgebäude

Für die Schulgebäude wurde in Abstimmung mit den Planern ein Zählerkonzept entworfen um die zukünftigen Energie- und Wärmeströme in den Gebäuden nachvollziehen

und analysieren zu können. Tabelle A-1 listet die geplanten Sensoren im Schulgebäude auf. Neben der Übergabestation der Fernwärme, der Wärmepumpe und der Grundwasserkühlung werden auch die Erträge der PV-Anlage, sowie Eigennutzung und Einspeisung erfasst.

2.2.3. Typräume

Um die beschriebenen Ansätze als Modellprojekt im Schulcampus Aschheim realisieren und anschließend in einer nächsten Projektphase validieren zu können, wurden gemeinsam mit den Fachplanern und der Bauherrin fünf Typräume im Projekt ausgewählt, welche mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet werden. Dazu wurde in intensivem Austausch über das geforderte Bausoll hinaus ein Konzept für die notwendigen Messpunkte und ein umfangreiches Monitoringkonzept entwickelt, welches schon in die Planung eingeflossen ist. Insbesondere betrifft dies die Innen- und Außenklimabedingungen, das Nutzerverhalten (z.B. Fensterkontakte) und ein raum aufgelöstes Energiemonitoring.

Diese zusätzliche Technik ist nicht in erster Linie für die Umsetzung bzw. den Betrieb der entwickelten Ansätze notwendig, sondern dient vielmehr dazu deren Effektivität überprüfen und validieren zu können. Somit ist sichergestellt, dass der verfolgte Ansatz auch ohne großen Aufwand in Zukunft nach Evaluierung der Funktionalität und Effektivität auf das gesamte Gebäude angewandt werden könnte und auch auf andere Bestandsobjekte anwendbar und nachrüstbar ist.

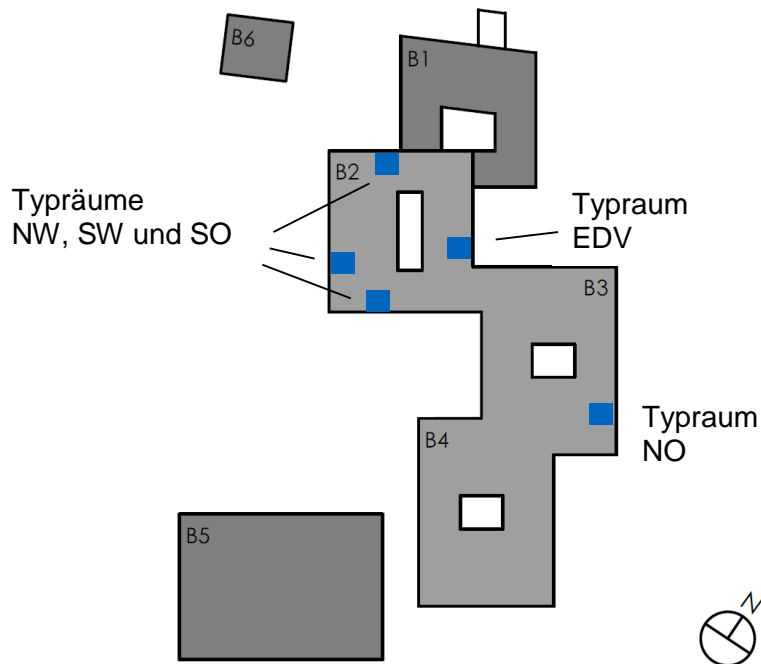


Abbildung 2-4: Übersicht Typräume (köhler architekten + beratende ingenieure GmbH 2021)

Auswahl

Als Typräume wurden vier reguläre Klassenräume und ein Fachklassenraum ausgewählt. Die vier Klassenräume sind dabei von nahezu gleicher Grundfläche. Die Fenster der Räume sind in die vier unterschiedlichen Himmelsrichtungen des Gebäudes ausgerichtet: SW, SO, NO und NW.

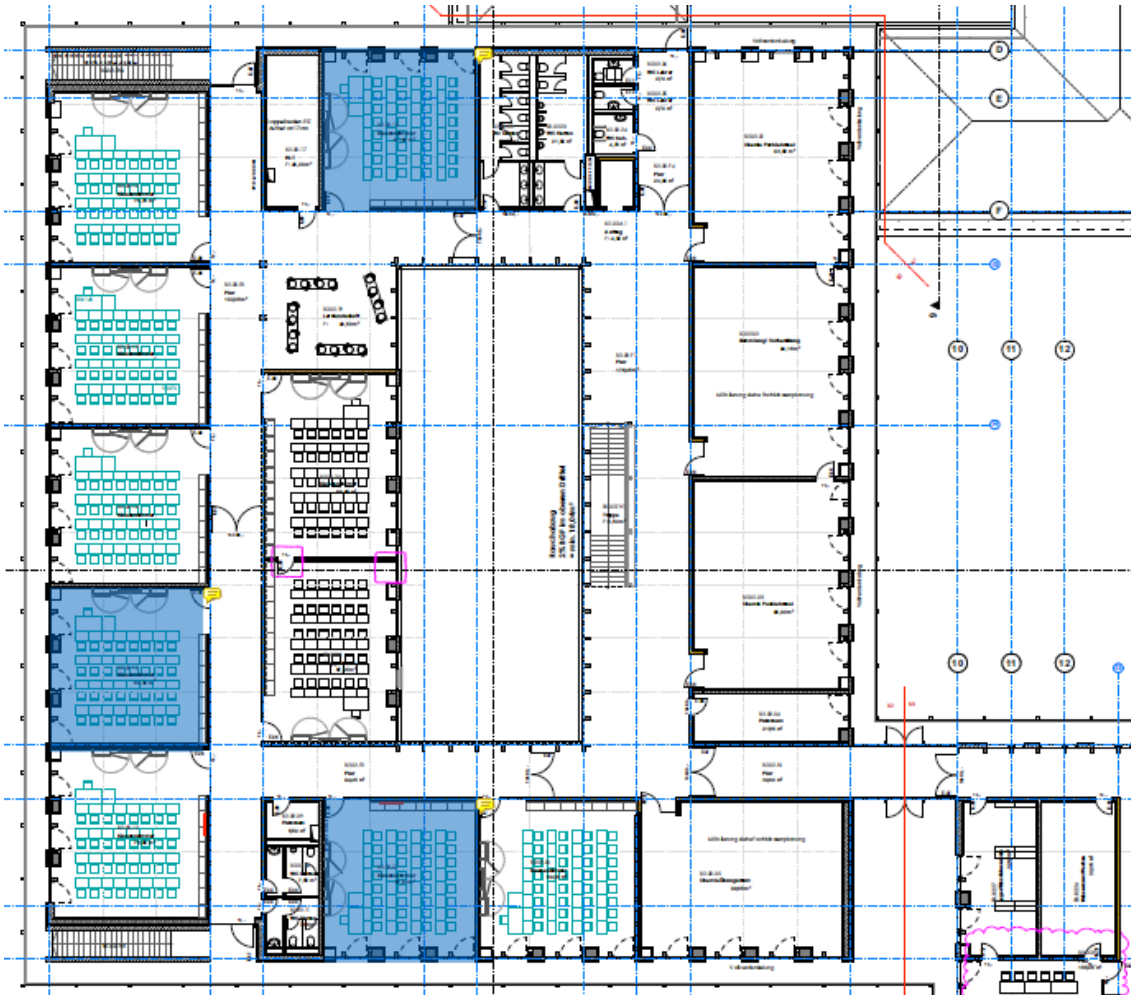


Abbildung 2-5: Verortung der Typräume SO, SW und NW im 2. OG (köhler architekten + beratende ingenieure GmbH 2021)(köhler architekten + beratende ingenieure GmbH 2021)

Der Fachklassenraum besitzt Fenster in NO-Ausrichtung. Weiter wurde darauf geachtet, die Räume in den oberen Stockwerken zu verorten um eine Teilverschattung und damit eine Verfälschung der Messwerte durch Gebüsch und Sträucher als auch durch Nachbargebäude so weit wie möglich zu vermeiden. Als größtes Problem bei der Auswahl der Räume stellt sich jedoch die gestaffelte Inbetriebnahme des Gebäudes heraus. Zu Beginn des ersten Schuljahres nach Errichtung werden voraussichtlich nicht alle Klassen in Realschule und Gymnasium besetzt sein. Daher ergibt sich als weiteres Kriterium die tatsächliche Besetzung des jeweiligen Raumes zu Beginn des ersten Schuljahres nach

Errichtung. Leider konnten auf Grund dieser Kriterien nicht alle Räume im gleichen Geschoss oder Gebäudeteil verortet werden. Die Räume SO, SW, und NW liegen im zweiten Obergeschoss, der Raum NO und Fachklassenraum im ersten Obergeschoss.

Planung Messkonzept

Der Kern zukünftiger Auswertungen sind Messdaten, die Aussagen zu Nutzerkomfort, Energieströmen, Temperaturen und Korrelationen zwischen diesen Größen ermöglichen. Hierfür ist die messtechnische Erfassung aller relevanten Messgrößen in den Typräumen geplant. Abbildung 2-6 zeigt die vorgesehenen Messplätze und -größen.

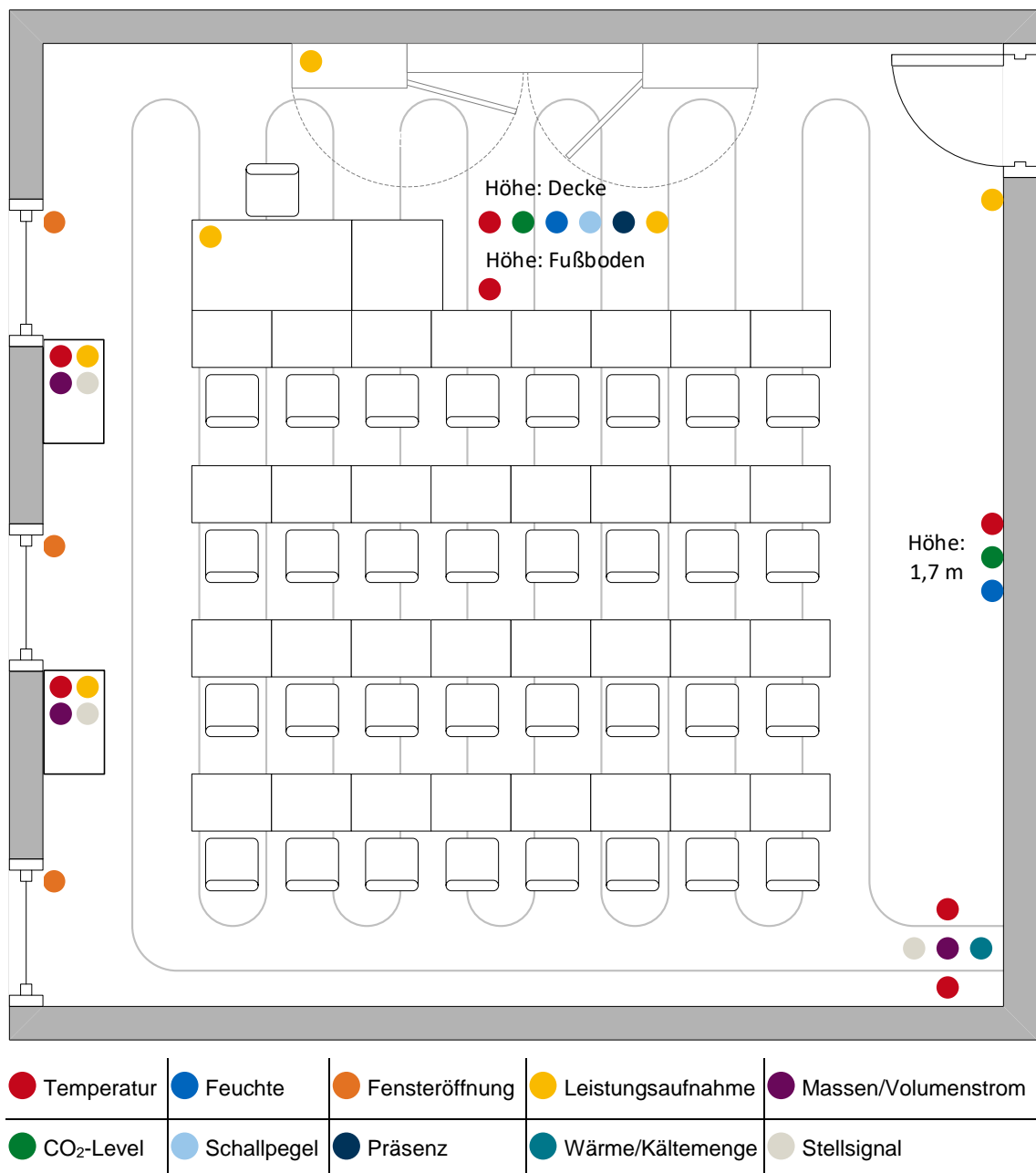


Abbildung 2-6: Sensorpositionen Typraum

Aufbauend auf diesen Messgrößen können Energie- und Wärmebilanzen erstellt und in Kontext zu den Nutzerdaten gestellt werden. In Kombination mit Wetter-, Betriebs-, und Nutzerdaten können so Regelstrategien optimiert werden. Eine detaillierte Auflistung aller geplanten Sensoren findet sich in Tabelle A-2.

2.3. Prototypische Umsetzung und Versuchsreihe (ENIANO)

Zusätzlich zur Entwicklung des Mess- und Monitoringkonzepts für das Reallabor in den Neubauten des Schulcampus Aschheim (Abschnitt 2.2) wurde eine Praxisstudie initiiert, die prototypisch vorab optimierte Regelstrategien im Bestand erprobt. Diese lassen einen definierten „Minimalkomfort“ im Klassenraum realisieren, der sich an natürlich belüfteten Räumen orientiert und gleichzeitig wesentliche Energieeinsparungen bei Konditionierung und Lüftung ermöglicht.

Hierzu wurden Anfang 2022 zwei dezentrale Lüftungsgeräte, baugleich wie es auch in der Planung für den Neubau vorgesehen ist, in einem bestehenden Klassenraum der benachbarten Bestandsschule installiert. Um sowohl das Lüftungsgerät und dessen Leistungsaufnahme sowie auch den Komfort, die Luftqualität und die Nutzung des Klassenraumes und darüber hinaus das Außenklima detailliert zu erfassen, wurde im Bestand ein umfangreiches, reversibles Monitoringsystem installiert.

Das Lüftungsgerät wurde über seine verfügbaren Schnittstellen in das System eingebunden. Dies ermöglicht sowohl das Auslesen aktueller Betriebsparameter und raumklimatischer Messgrößen als auch die Ansteuerung einzelner Komponenten des Gerätes. In der Praxisstudie wurden sowohl die herstellerseitig verfügbaren Betriebsmodi untersucht, als auch einzelne Anlagenkomponenten gezielt in ihrer Leistung variiert oder gänzlich deaktiviert. Ziel war dabei den Beitrag der Komponenten als auch den Effekt eigener Regelungsstrategien zu untersuchen und eine Identifikation von Optimierungspotenzialen zu erlauben.

Zum einen ermöglicht dies die Überprüfung technischer Fragestellungen zur Umsetzung der beschriebenen MSR-Ansätze und zum andern dient diese zusätzliche Iterationschleife dazu, diese Ansätze und die Regelungsstrategien weiterzuentwickeln und zu optimieren. Weiter kann mit Hilfe der gewonnenen Messwerte das Simulationsmodell, welches auch für den Testraum im Bestand erstellt wurde, untersucht und kalibriert werden.

2.3.1. Konzeption, Versuchsaufbau und Messprogramm

Die zwei dezentralen Lüftungsgeräte im Bestandsgebäude der Realschule Aschheim, deren Regelung identisch ist, werden, um die nach gängiger Auslegungspraxis erforderlichen Luftwechsel zu realisieren, im Master-Slave Prinzip betrieben. Die Spezifikation der Geräte ist wie folgt:

- Rotations-Wärmetauscher (75% Wirkungsgrad)
- Elektroheizregister mit 1500 W Heizleistung je Gerät
- Luftfilter Filterklasse EPM1 65% und Abluft ISO Coarse 50%
- Maximaler Volumenstrom von 400 m³/h je Gerät

Zur Regelung verwendet das dezentrale Lüftungsgerät integrierte Sensorik. Das verwendete Gerät verfügt über folgende Sensorsysteme:

- CO₂-Sensor zur Messung der CO₂-Konzentration in der Abluft zur automatischen Anpassung des Zuluftvolumens
- Zulufttemperatursensor im Zuluftkanal zur Regelung des Wärmetauschers sowie des Heizregisters, um die Soll-Zulufttemperatur einzuhalten
- Außentemperaturfühler an der Außenluftansaugung zur Messung der Außenlufttemperatur

Um sowohl das Lüftungsgerät und dessen Leistungsaufnahme als auch den Komfort, die Luftqualität und die Nutzung des Klassenraumes und darüber hinaus das Außenklima detailliert zu erfassen, wurde ein Monitoringsystem installiert. Das Lüftungsgerät wurde über verfügbaren Schnittstellen des Steuergerätes in das Monitoringsystem eingebunden, um alle Daten zentral zu erfassen. Diese Schnittstelle ermöglicht sowohl das Auslesen aktueller Betriebsparameter und raumklimatischer Messgrößen als auch die Ansteuerung einzelner Komponenten des Gerätes.

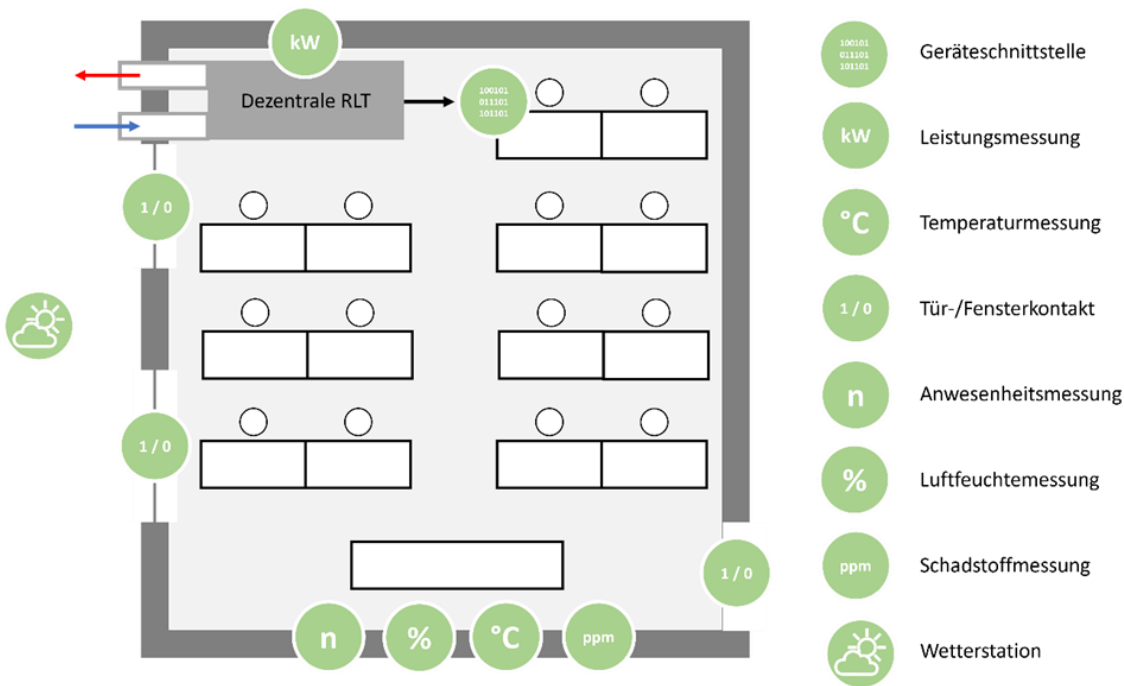


Abbildung 2-7: Schematisches Messtechnikkonzept im Bestandsgebäude

Abbildung 2-7 zeigt das schematische Messtechnikkonzept im Klassenraum sowie die erfassten Datenpunkte. Insgesamt wurden 4 Versuchsreihen durchgeführt, in deren Rahmen jeweils spezifische Regelstrategien hinsichtlich ihres Einflusses auf Kosten, Energieeinsatz, Komfort, Luftqualität und Nutzerzufriedenheit untersucht wurden. Die vier Regelstrategien sind:

1. Natürliche Lüftung (NL):

Die Versuchsreihe NL wird als Referenz herangezogen und erfasst Innenraumkomfort, Innenluftqualität und Nutzerverhalten ohne den Einsatz der Lüftungsgeräte, d.h. bei alleiniger Fensterlüftung. Der Klassenraum wird dabei ausschließlich über die Fußbodenheizung beheizt, die Frischluftzufuhr erfolgt manuell gesteuert über 2 öffnbare Fenster und eine Tür.

2. Standardbetrieb (SR):

Die Versuchsreihe SR untersucht Innenraumkomfort, Innenluftqualität, Nutzerverhalten und Energieverbrauch des Lüftungsgerätes. Das Lüftungsgerät wurde hierbei in der vom Hersteller vorgegebenen Standard-Konfiguration betrieben. Zusätzlich zur mechanischen Lüftung hatten die Nutzenden weiterhin die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen und natürlich zu lüften.

3. Minimalkomfort (MIN):

Die Versuchsreihe MIN passt die Regelung des dezentralen Lüftungsgerätes an, sodass dieses nur einen definierten „Minimalkomfort“ im Klassenraum realisiert. Zudem schaltet sich das Lüftungsgerät nur nach Bedarf während der Anwesenheit von Personen im Raum zu.

4. Minimalkomfort + Interaktion (MIN-INT):

Die Versuchsreihe MIN-INT baut auf der Regelstrategie MIN auf. Die Nutzerinteraktion bietet eine kurzzeitig wirksame Interventionsmöglichkeit, durch die die Nutzenden die Luftqualität und den thermischen Komfort aktiv an die aktuellen Bedürfnisse anpassen können. Dem Nutzenden bieten hierbei die einfachen Interventionsmodi „Lüften“, „Heizen“ oder „Kühlen“ unmittelbar und kurzfristige Eingriffsmöglichkeiten. Nach einer definierten Zeit bzw. bei ungenutztem Raum fällt das System zurück in den effizienten Betriebsmodus „Minimalkomfort“.

Die Messungen wurden im Zeitraum von 11 Wochen (Tabelle 2-2) in der Übergangsjahreszeit (Monate März, April und Mai) durchgeführt.

Tabelle 2-2: Am Bestandsgebäude aufgezeichnete Außentemperaturen

Woche	Variante	Außentemperatur			Anmerkung
		Mittel	Min	Max	
1	NL	3,8 °C	-4,1 °C	16,3 °C	
2	NL	7,6 °C	1,0 °C	16,9 °C	
3	SR	10,9 °C	0,7 °C	20,8 °C	
4	SR	6,7 °C	-1,5 °C	21,5 °C	
5	MIN	7,5 °C	-2,2 °C	17,0 °C	
6	MIN	11,4 °C	1,2 °C	23,7 °C	Schulferien
7	MIN	9,6 °C	1,1 °C	16,5 °C	Schulferien
8	MIN	10,5 °C	5,0 °C	19,1 °C	
9	MIN-INT	13,1 °C	6,4 °C	20,3 °C	
10	MIN-INT	18,5 °C	10,5 °C	27,7 °C	
11	MIN-INT	18,1 °C	13,7 °C	25,1 °C	

Ausgewählt und analysiert wurden zwei repräsentative Wochen je Versuchsreihe. Die Analysen beziehen sich jeweils auf den Zeitraum 8:00 bis 18:00 Uhr an Schultagen.

2.3.2. Messgrößen und Indikatoren

Im Folgenden werden die betrachteten Messgrößen und Indikatoren anhand exemplarischer Wochendarstellungen erläutert.

Thermischer Komfort

Abbildung 2-8 zeigt die Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur (links) sowie der zeitliche Verlauf der Innentemperatur (rechts) in Woche 1.

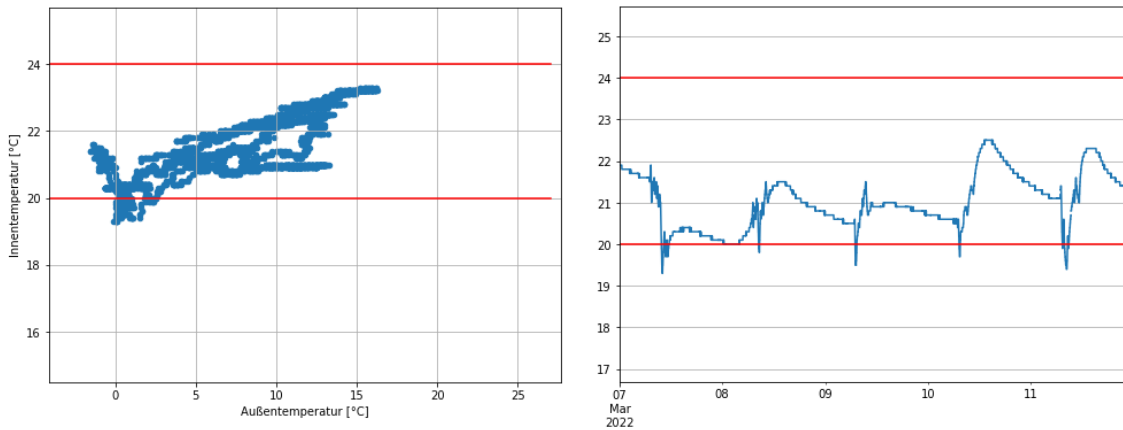


Abbildung 2-8: Innentemperatur abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der Innentemperatur in Woche 1 (rechts)

In Rot sind die Grenzen des in DIN EN 15251 definierten Komfortbandes aufgetragen. Dargestellt sind alle Messpunkte innerhalb der Nutzungszeit (8:00 bis 18:00 Uhr) an Schultagen. Punkte außerhalb des Komfortbandes werden in der Regel als unkomfortabel empfunden. Ein Indikator zur Evaluation des Komforts bildet die Überschreitungsdauer des Komfortbandes in Stunden.

Die Temperatur im Innenraum wird über der Tafel in der Mitte des Klassenraumes erfasst. Die Außentemperatur wird verschattet im Laubengang vor dem Klassenzimmer gemessen.

Die Innentemperatur ist abhängig von der zugeführten Heizleistung über die Fußbodenheizung, der Anzahl der Nutzenden sowie deren Aktivität und der Menge an zugeführter Frischluft in Abhängigkeit der Wärmerückgewinnungseffizienz des Lüftungsgerätes bzw. der Außentemperatur bei Fensterlüftung.

Innenluftqualität (CO₂-Konzentration)

Abbildung 2-9 zeigt die CO₂-Konzentration im Innenraum in parts-per-million (ppm) in Abhängigkeit zur Außentemperatur (links) sowie deren zeitlichen Verlauf (rechts) in Woche 1.

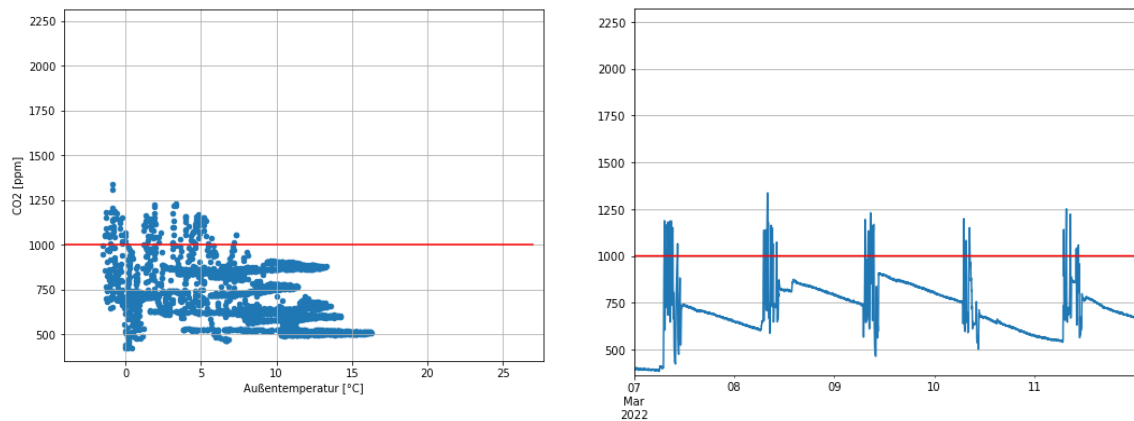


Abbildung 2-9: CO₂-Konzentration (Innenraum) abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration (Innenraum) in Woche 1 (rechts)

In Rot ist die sogenannte Pettenkofer-Zahl von 1.000 ppm als Komfortwert aufgetragen. Sie markiert die Grenze, ab welcher der CO₂-Gehalt zu psychologischen und physiologischen Beeinträchtigungen führen kann. Eine CO₂ Konzentration zwischen 1.000 und 2.000 ppm ist hygienisch bedenklich und sollte durch Erhöhung des Zuluftvolumens gesteuert werden. CO₂ Konzentrationen über 2.000 ppm sind zu vermeiden.

Die CO₂-Konzentration wird über ein optisches Messverfahren ermittelt und über der Tafel in der Mitte des Klassenraumes gemessen.

Als Indikator zur Evaluation der Innenluftqualität dient die Überschreitungsdauer in Stunden.

Die CO₂-Konzentration ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Nutzenden, deren Aktivität sowie der Menge an zugeführter Frischluft.

Innenluftqualität (Feinstaub)

Abbildung 2-10 zeigt die gemessene Feinstaubkonzentration im Innenraum in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Abhängigkeit zur Außentemperatur (links) sowie deren zeitlichen Verlauf (rechts) in Woche 1.

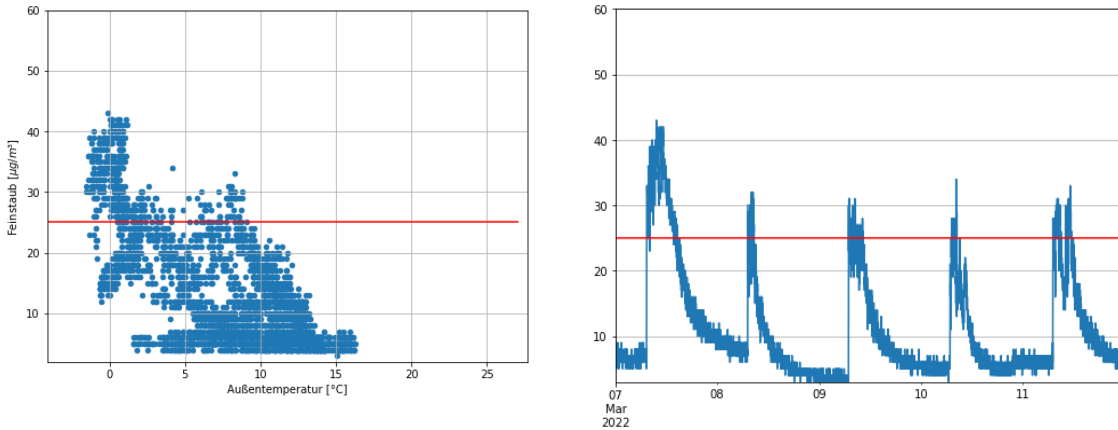


Abbildung 2-10: Feinstaubkonzentration (Innenraum) abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der Feinstaubkonzentration (Innenraum) in Woche 1 (rechts)

In Rot ist der von der WHO Grenzwert von $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aufgetragen. Eine erhöhte Feinstaubkonzentration kann langfristig zu Erkrankungen der Atemwege führen. Die Feinstaubkonzentration wird über ein optisches Messverfahren ermittelt und über der Tafel in der Mitte des Klassenraumes gemessen. Als Indikator zur Evaluation der Innenluftqualität dient die Überschreitungsdauer in Stunden.

Die Feinstaubkonzentration ist sowohl abhängig von internen Faktoren wie der Aktivität der Nutzenden oder dem Betrieb von emittierenden Geräten wie etwa Druckern, als auch von der Feinstaubbelastung im Außenraum, die durch Lüftung in den Innenraum eingetragen wird.

Leistungsaufnahme Lüftungsgerät

Abbildung 2-11 zeigt die elektrische Leistungsaufnahme der dezentralen Lüftungsgeräte in Watt [W] in Abhängigkeit von der Außentemperatur (links) sowie deren zeitlichen Verlauf in Woche 3 (rechts).

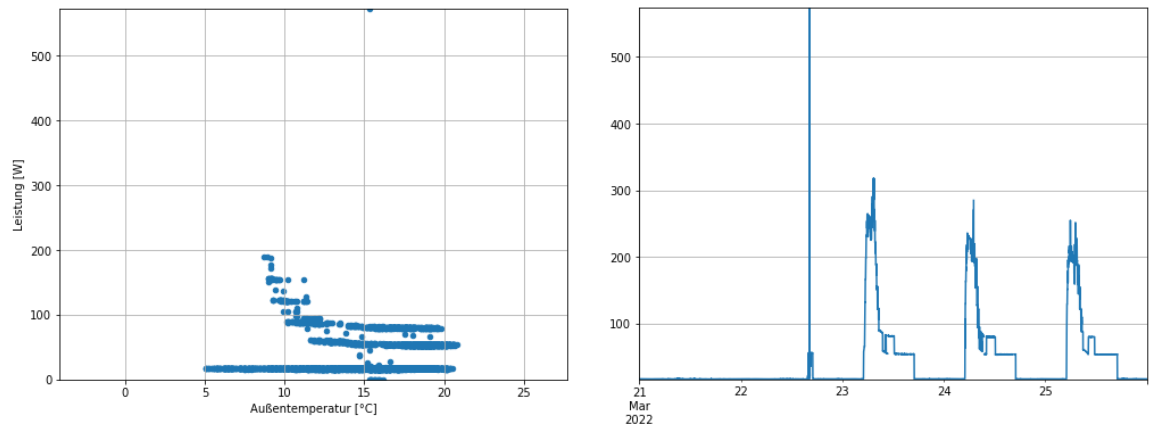


Abbildung 2-11: Elektrische Leistungsaufnahme der dezentralen Lüftungsgeräte abhängig von der Außentemperatur (links); Zeitlicher Verlauf der elektrische Leistungsaufnahme der dezentralen Lüftungsgeräte in Woche 3 (rechts)

Die Leistung setzt sich zusammen aus der individuellen Leistung der beiden synchronisierten Einzelgeräte (Master, Slave) und wird über Einphasen-Energiezähler in einem Verteilerschrank erfasst.

Die Leistungsaufnahme der Lüftungsgeräte ist abhängig vom Zuluftvolumenstrom (Lüfterbetrieb) sowie der Leistung des Heizregisters, das in Abhängigkeit von der aktuell gemessenen Außentemperatur zugeschaltet wird.

Fensteröffnungen

Abbildung 2-12 zeigt die Anzahl der Fensteröffnungen in Abhängigkeit zur Außentemperatur in 5 Kelvin Schritten (links) und in Abhängigkeit zur CO₂-Konzentration (rechts).

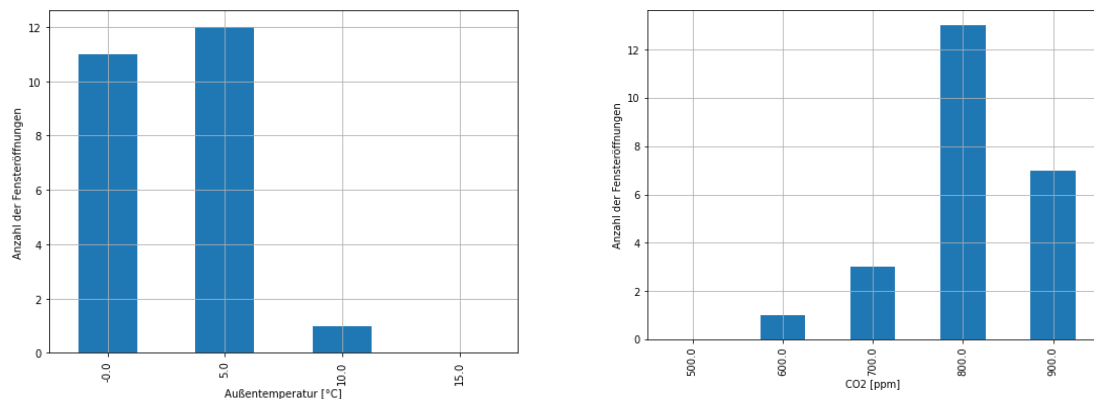


Abbildung 2-12: Anzahl der Fensteröffnungen abhängig von der Außentemperatur in Woche 1 (links); Anzahl der Fensteröffnungen abhängig von der CO₂-Konzentration in Woche 1 (rechts)

Die Fensterstellung wird über Reed-Relais an jedem einzelnen Fenster erfasst. Die Anzahl der Fensteröffnungen könnte als Indikator für die Zufriedenheit der Nutzenden zusammen mit der Innenluftqualität und Innentemperatur dienen, wurde jedoch innerhalb des gegebenen Messzeitraumes zusätzlich durch die im Klassenraum installierte „Corona-Ampel“ beeinflusst.

2.3.3. Versuchsreihe „Natürliche Lüftung“

Die Versuchsreihe „natürliche Lüftung“ (NL) untersucht Innenraumkomfort, Innenluftqualität und Nutzerverhalten ohne den Einsatz des Lüftungsgerätes, d.h. bei alleiniger Fensterlüftung. Hierzu wurde das bereits verbaute Lüftungsgerät deaktiviert und die Nutzenden entsprechend eingewiesen. Die Versuchsreihe dient als Referenz für die Evaluation des Optimierungspotentials. Der Klassenraum wurde hierbei ausschließlich über die Fußbodenheizung mit Wärme und über 2 öffnbare Fenster und eine Tür mit Frischluft versorgt.

Bezüglich der am Standort gemessenen Außentemperaturen ergeben sich über die zwei betrachteten Wochen dauernde Versuchsreihe folgende Minimal-, Maximal- und Mittelwerte (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Außentemperaturen in Woche 1 und 2

Woche	Außentemperatur		
	Mittel	Min	Max
1	3,8 °C	-4,1 °C	16,3 °C
2	7,6 °C	1,0 °C	16,9 °C

Woche 1 verzeichnet starke Temperaturschwankungen und niedrige Außentemperaturen, Woche 2 stellt sich weitaus gemäßigter, mit geringeren Temperaturschwankungen dar (Abbildung 2-13).

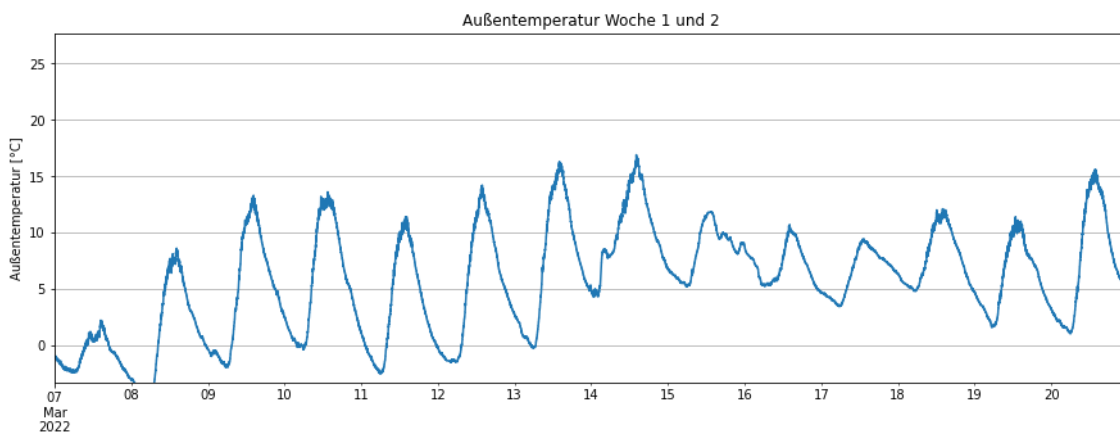


Abbildung 2-13: Außentemperaturverlauf

Die Innentemperaturen (Abbildung 2-14) bewegten sich über beide Wochen hinweg im unteren Spektrum des Komfortbandes mit je zwei Stunden der Unterschreitung. Die Un-

terschreitungen sind der natürlichen Lüftung über die Fenster bei kalten Außentemperaturen zuzuschreiben (siehe Abbildung). Bei Außentemperaturen von über 10 °C wurde das Komfortband in der Regel nicht mehr unterschritten.

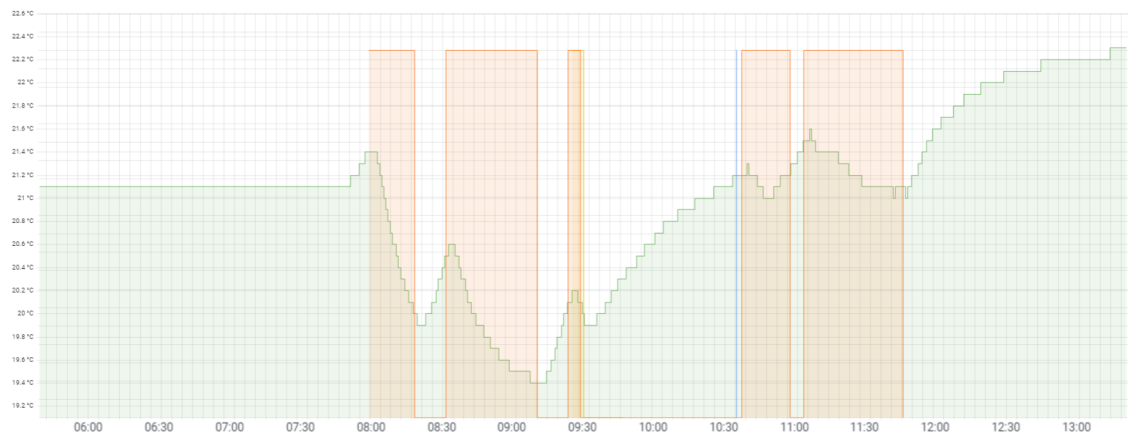


Abbildung 2-14: Verlauf der Innenraumtemperatur (grün) und Fensteröffnungen (orange)

Die CO₂-Konzentration im Klassenraum überstieg regelmäßig den Komfortwert von 1.000 ppm. Woche 1 verzeichnete eine Überschreitung von insgesamt 2 Stunden, in Woche 2 wurden die 1.000 ppm während 14 Stunden überschritten. Aufgrund der im Klassenraum eingesetzten „Corona-Ampel“ ist im Normalbetrieb mit nochmals deutlich höherer Überschreitungshäufigkeit zu rechnen, da die akustische Alarmierung oberhalb von 1.000 ppm entfällt. Abbildung 2-15 zeigt dieses Verhalten anschaulich. Die CO₂-Konzentration im Raum baut sich während des Unterrichtes stetig auf, bis sie durch die Öffnung der Fenster wieder reduziert wird.

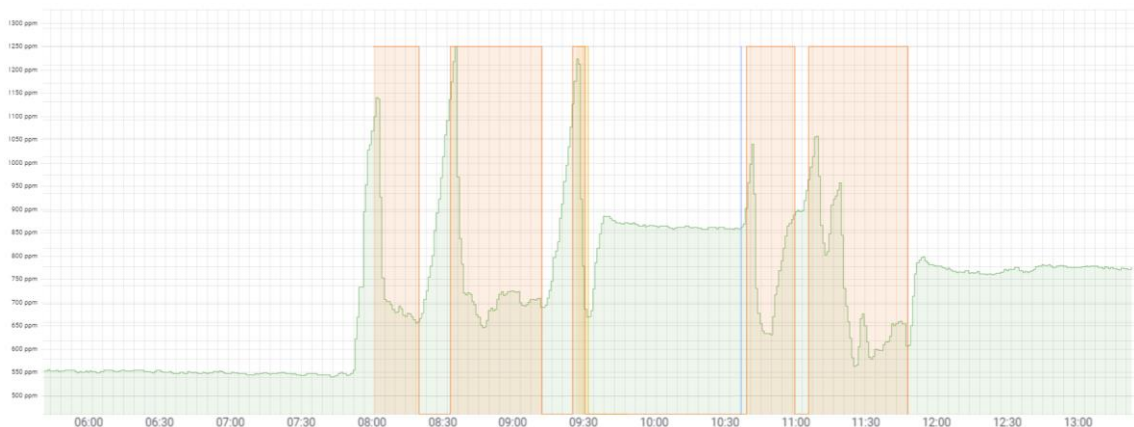


Abbildung 2-15: Verlauf der CO₂-Konzentration (grün) und Fensteröffnungen (orange)

Entgegengesetzt verhält sich der Verlauf der Feinstaubkonzentration im Raum (Abbildung 2-16). Da die primäre Quelle für Feinstaubeintrag der Außenraum ist, steigt die

Belastung bei Öffnung der Fenster schlagartig an. Die Feinstaubkonzentration überschreitet den Grenzwert von $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für 9 Stunden in Woche 1 und für 15 Stunden während Woche 2.

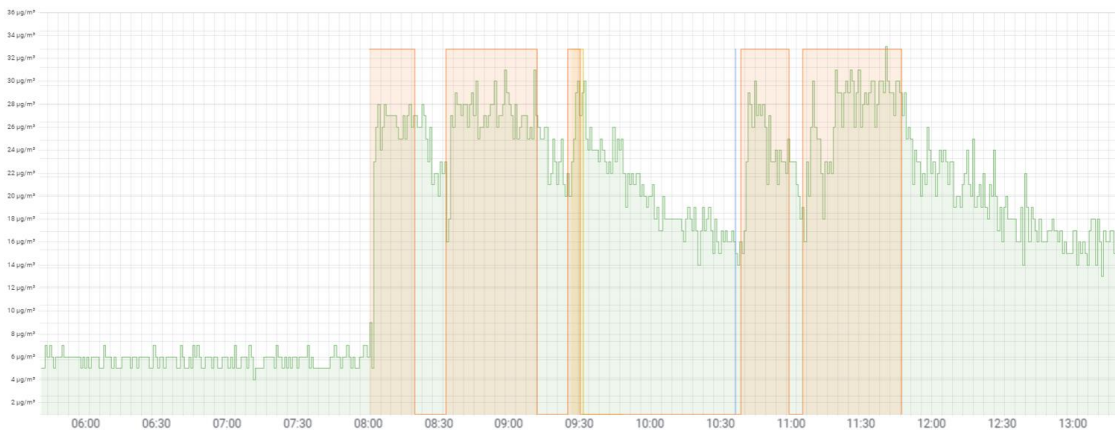


Abbildung 2-16: Verlauf der Feinstaubkonzentration (grün) und Fensteröffnungen (orange)

Das Lüftungsgerät war über die gesamte Versuchsreihe hinweg nicht in Betrieb, daher war kein Energieverbrauch gegeben.

Das Lüftungsverhalten in Woche 1 und 2 war vorrangig CO_2 -getrieben. Der Einfluss zeitweise höherer Außentemperaturen auf eine verlängerte Fensterlüftung wird über die Versuchsreihe hinweg als geringfügig erachtet.

2.3.4. Versuchsreihe „Standardbetrieb“

Die Versuchsreihe „Standardbetrieb“ (SR) betrachtet Innenraumkomfort, Innenluftqualität, Nutzerverhalten und Energieverbrauch des Lüftungsgerätes in Woche 3 und 4. Das Lüftungsgerät wurde hierbei in der vom Hersteller vorgegebenen Standard-Konfiguration betrieben. Dies umfasst einen vordefinierten Zeitplan, der das Lüftungsgerät zwischen 8:00 und 18:00 Uhr aktiviert, sowie eine CO_2 -geführte Regelung der Zuluftmenge. Weiterhin wird das Heizregister nach Bedarf zugeschaltet, sollte die Zulufttemperatur unter den Grenzwert von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ fallen. Zusätzlich zur mechanischen Lüftung hatten die Nutzenden weiterhin die Möglichkeit, die Fenster zu öffnen und natürlich zu lüften.

Bezüglich der am Standort gemessenen Außentemperaturen ergeben sich über die zwei Wochen dauernde Versuchsreihe folgende Minimal-, Maximal- und Mittelwerte (Tabelle 2-4):

Tabelle 2-4: Außentemperaturen in Woche 3 und 4

Woche	Außentemperatur		
	Mittel	Min	Max
3	10,9 °C	0,7 °C	20,8 °C
4	6,7 °C	-1,5 °C	21,5 °C

Die Temperaturverläufe sind nahezu vergleichbar mit jenen der Woche 2 aus Versuchsreihe NL (Abbildung 2-17).

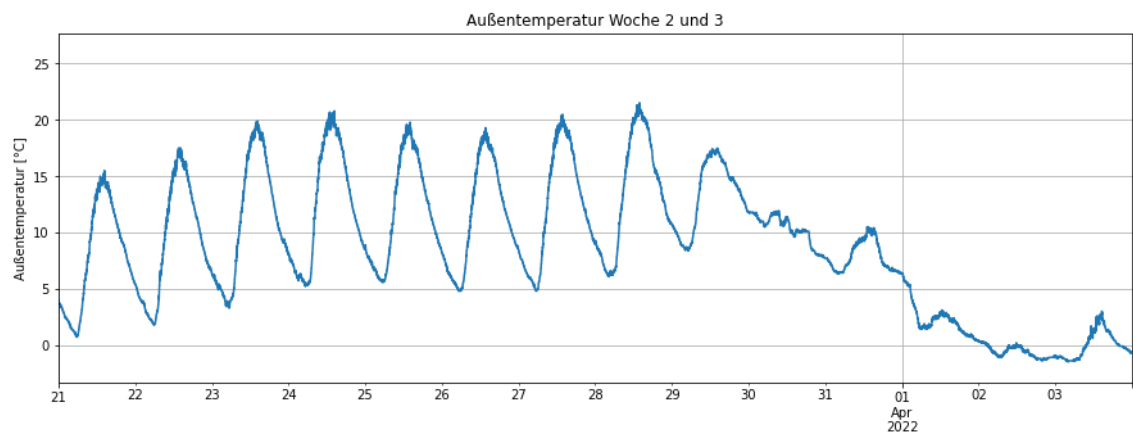


Abbildung 2-17: Außentemperaturverlauf in Woche 3 und 4

Woche 3 verzeichnet keine Unter- oder Überschreitungen der thermischen Komfortgrenzen (zwischen 20 °C und 24 °C). In Woche 4 wird für 19 Stunden die Grenze von 20 °C unterschritten. In Abbildung 2-18 wird ersichtlich, dass diese Unterschreitung vorrangig einem für 24 Stunden geöffneten Fenster zuzuschreiben ist und die Raumtemperatur dadurch, trotz gegensteuern des Lüftungsgerätes, auf 15 °C gesunken ist.

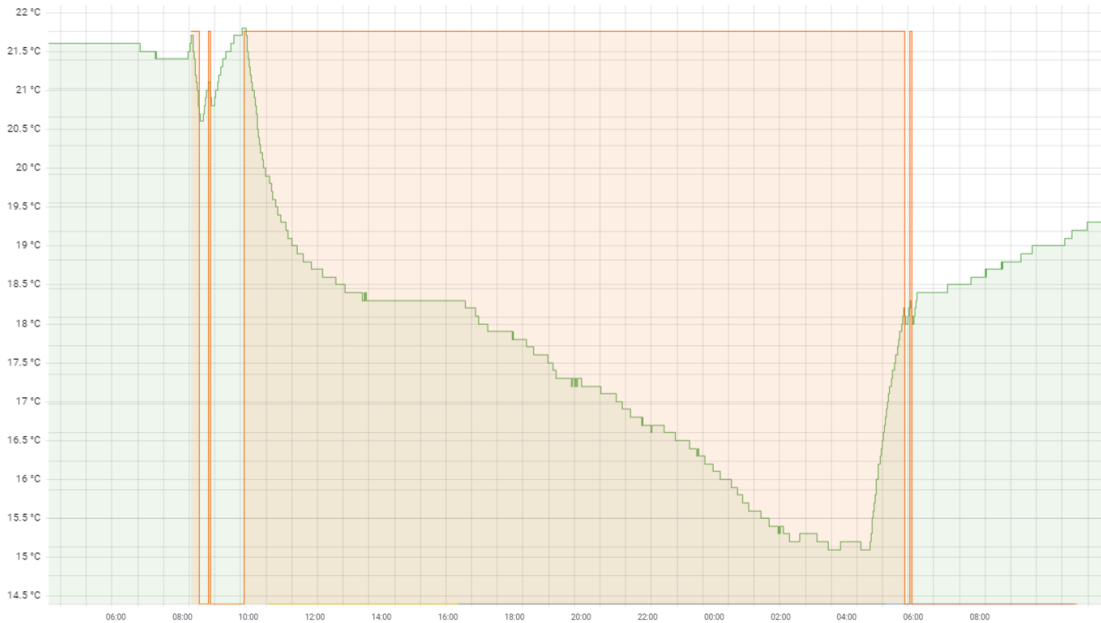


Abbildung 2-18: Innentemperaturverlauf (grün) und Fensteröffnung (orange)

Der Komfortwert von 1.000 ppm für die CO₂-Konzentration wurde in Woche 3 für insgesamt 5 Stunden überschritten, in Woche 4 lediglich für eine Stunde. Die Standard-Regelstrategie des Lüftungsgerätes wirkt dementsprechend effektiv einer erhöhten CO₂-Konzentration entgegen. Wie in Abbildung 2-19 zu sehen, folgen die Ventilatorstufen des Lüftungsgerätes direkt der CO₂-Konzentration im Raum. Allerdings zeigt untenstehende Abbildung auch, dass zusätzlich zur mechanischen Lüftung regelmäßig die Fenster geöffnet wurden (Abbildung 2-20) und dies maßgeblich zu Senkung der CO₂-Konzentrationen beigetragen hat.



Abbildung 2-19: Verlauf der CO₂-Konzentration (grün) und Ventilationsstufen des Lüftungsgerätes (gelb)

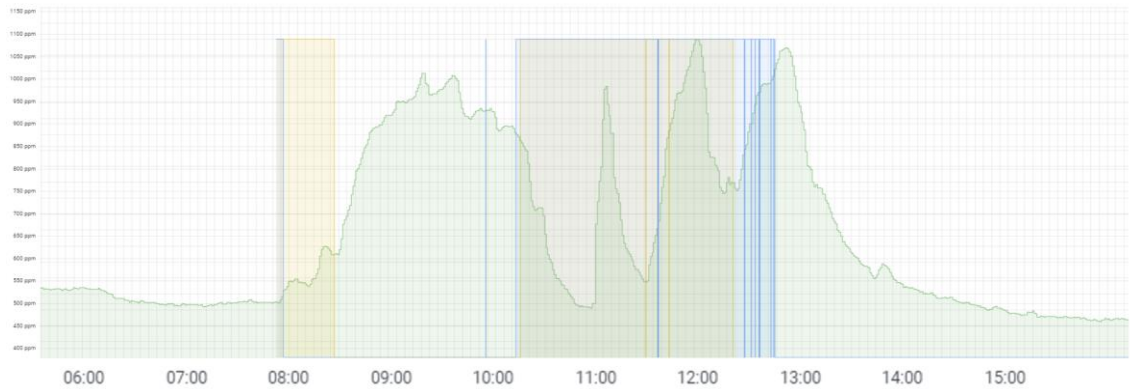


Abbildung 2-20: Verlauf der CO₂-Konzentration (grün) und Fensteröffnungen (gelb / blau)

Der Feinstaubgrenzwert wird in Woche 3 und 4 geringfügig seltener überschritten als in Woche 1 und 2. Woche 3 verzeichnet 7 Überschreitungsstunden, Woche 4 insgesamt 11 Stunden. Wiederum ist dies durch die regelmäßige Fensterlüftung der Nutzenden zu erklären, wie in Abbildung 2-21 veranschaulicht.

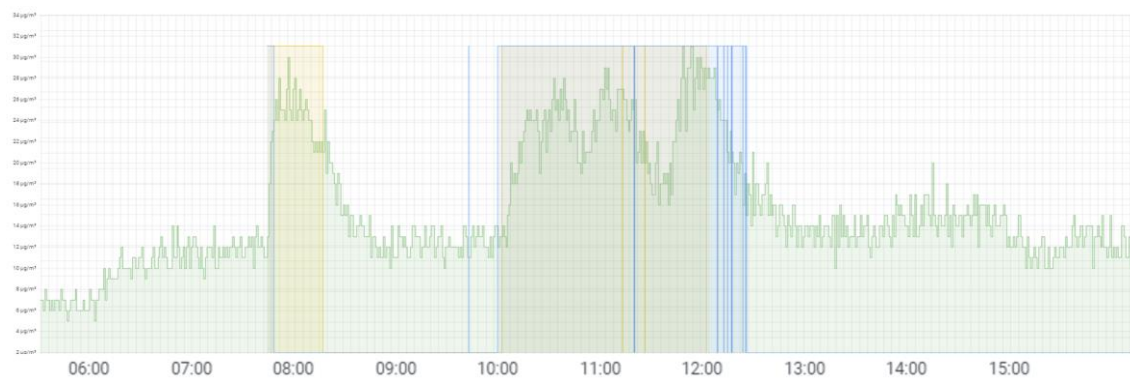


Abbildung 2-21: Verlauf der Feinstaubkonzentration (grün) und Fensterlüftungen (gelb / blau)

Der Energieverbrauch des Lüftungsgerätes korreliert indirekt mit dem Verlauf der Außentemperatur. Abbildung 2-22 zeigt, dass das zugeschaltete Heizregister bei niedrigen Außentemperaturen zu deutlich erhöhter Energieaufnahme führt. Steigt die Außentemperatur, sodass keine zusätzliche Konditionierung der Luft mehr nötig ist, dominiert der Betrieb der Lüftungsmotoren und somit der Luftvolumenstrom den Energieverbrauch. In Woche 3 und 4 benötigt das Lüftungsgerät im Mittel 15,2 kWh Strom pro Woche. Dies entspricht in etwa Energiekosten von 6,08 € (Annahme: 40ct/kWh) und 7,2 kg CO₂-Emissionen (Annahme: 0,471 kg CO₂-Äquiv. / kWh).

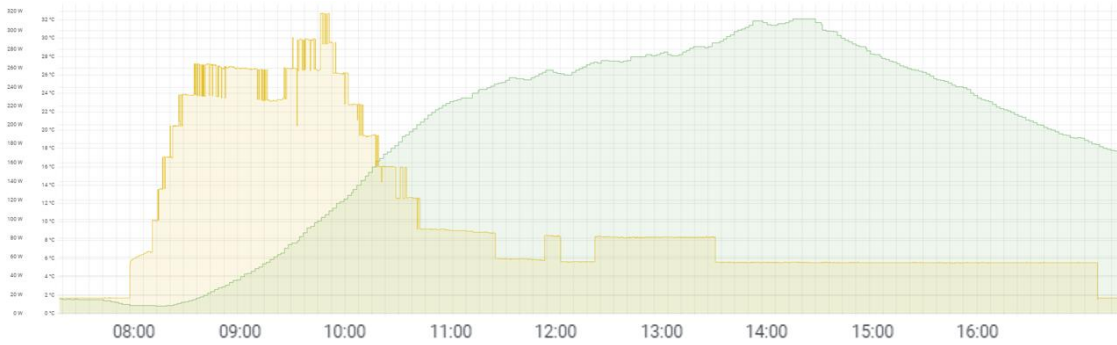


Abbildung 2-22: Außentemperaturverlauf (grün) und Leistungsaufnahme Lüftungsgerät (orange)

Das Lüftungsverhalten in Woche 3 und 4 ist im Vergleich zu Versuchsreihe NL stärker von der Innentemperatur getrieben. Die CO₂-Konzentration korreliert in Woche 3 nur geringfügig mit den Fensteröffnungen.

2.3.5. Versuchsreihe „Minimalkomfort“

Im Rahmen der Versuchsreihe „Minimalkomfort“ (MIN) wurde die Regelung des dezentralen Lüftungsgerätes gezielt adaptiert. Ziel war es, eine Regelstrategie zu implementieren, die einen definierten „Minimalkomfort“ im Klassenraum realisiert, der sich an natürlich belüfteten Räumen orientiert. Die Regelstrategie reduziert die zugeführte Luftmenge von 30 m³ auf 15 m³ pro Stunde und Person und reduziert zudem die Untergrenze der zulässigen Zulufttemperatur auf 16 °C. Weiterhin wurde die standardmäßig festgesetzte Betriebszeit von 8:00 bis 18:00 Uhr aufgehoben und das Gerät nur nach Bedarf, in Abhängigkeit der Anwesenheit von Personen im Raum, aktiviert. Die Versuchsreihe MIN wurde in den Wochen 5 bis 8 durchgeführt. In Woche 6 und 7 wurde der Raum aufgrund von Schulferien nicht genutzt. Bezüglich der am Standort gemessenen Außentemperaturen ergeben sich über die vier Wochen dauernde Versuchsreihe folgende Minimal-, Maximal- und Mittelwerte (Tabelle 2-5):

Tabelle 2-5: Außentemperaturen in Woche 5 bis 8

Woche	Außentemperatur		
	Mittel	Min	Max
5	7,5 °C	-2,2 °C	17,0 °C
6	11,4 °C	1,2 °C	23,7 °C
7	9,6 °C	1,1 °C	16,5 °C
8	10,5 °C	5,0 °C	19,1 °C

Die Temperaturverläufe in Woche 5 sind in etwa vergleichbar mit jenen der Woche 2 aus Versuchsreihe NL und den Wochen 3 und 4 der Versuchsreihe SR. Die Außentemperaturen in Woche 8 liegen im sowohl Mittel als auch im Minimum mit 10,5 °C und 5,0 °C höher als in den vorhergehenden Wochen (Abbildung 2-23).

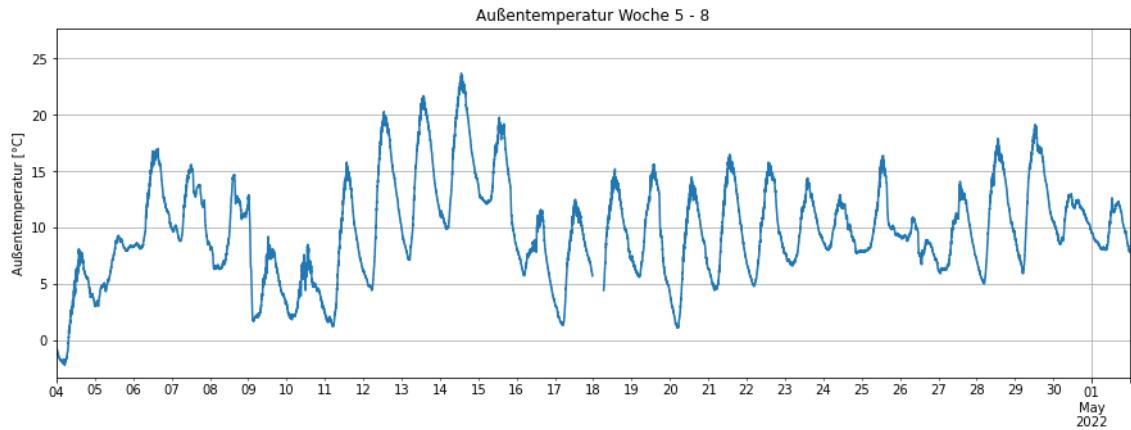


Abbildung 2-23: Außentemperaturverlauf

Woche 5 verzeichnet lediglich 2 Stunden Unterschreitung der thermischen Komfortgrenzen (zwischen 20 °C und 24°C). In Woche 8 befinden sich sämtliche gemessene Temperaturen innerhalb dieses Komfortbandes. Im Vergleich zu Woche 4 der Versuchsreihe SR bedeutet dies eine maßgebliche Verbesserung bei nahezu identischen Außentemperaturen. Die Verbesserung ist vorrangig einer verringerten Fensterlüftung zuzuschreiben.

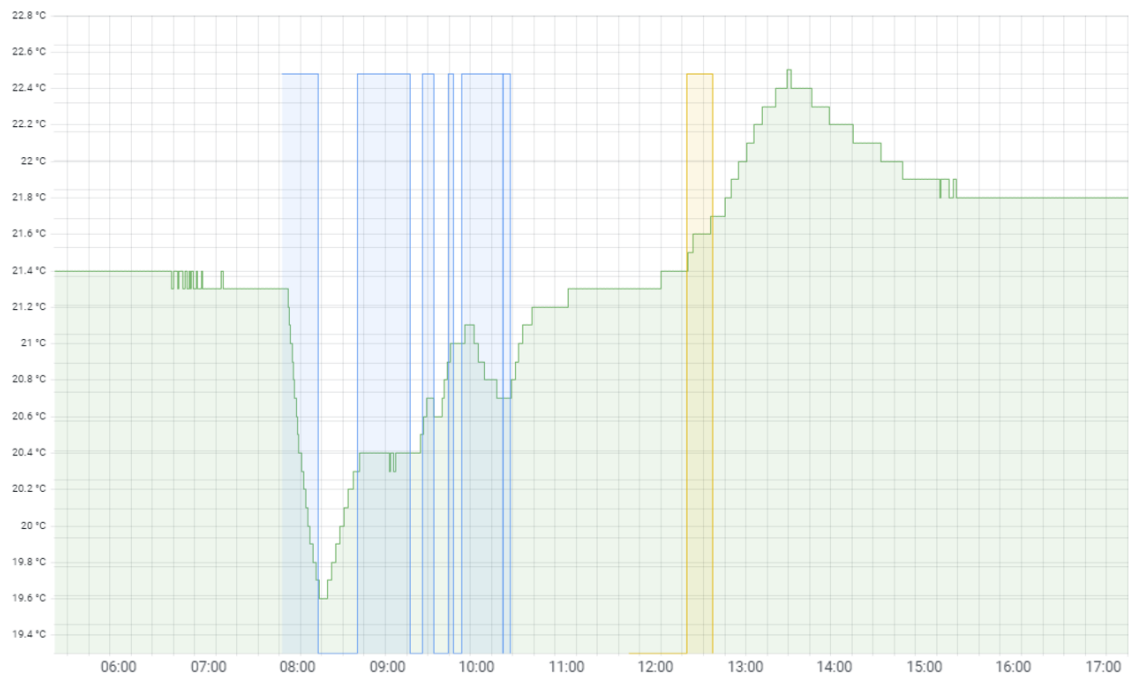


Abbildung 2-24: Innentemperaturverlauf (grün) und Fensteröffnung (orange)

Die Versuchsreihe MIN weist im Vergleich zu NL und SR vermehrt Überschreitungen des CO₂-Komfortwertes von 1.000 ppm auf. In Woche 5 wird dieser für insgesamt 6 Stunden überschritten, in Woche 8 für 16 Stunden. Wie in Abbildung 2-25 zu sehen, reicht der verringerte Zuluftvolumenstrom nicht aus, um die CO₂-Konzentration durchgehend unter einem Wert von 1.000 ppm zu halten und es Bedarf regelmäßiger Fensterlüftung, um die Konzentration zu reduzieren.

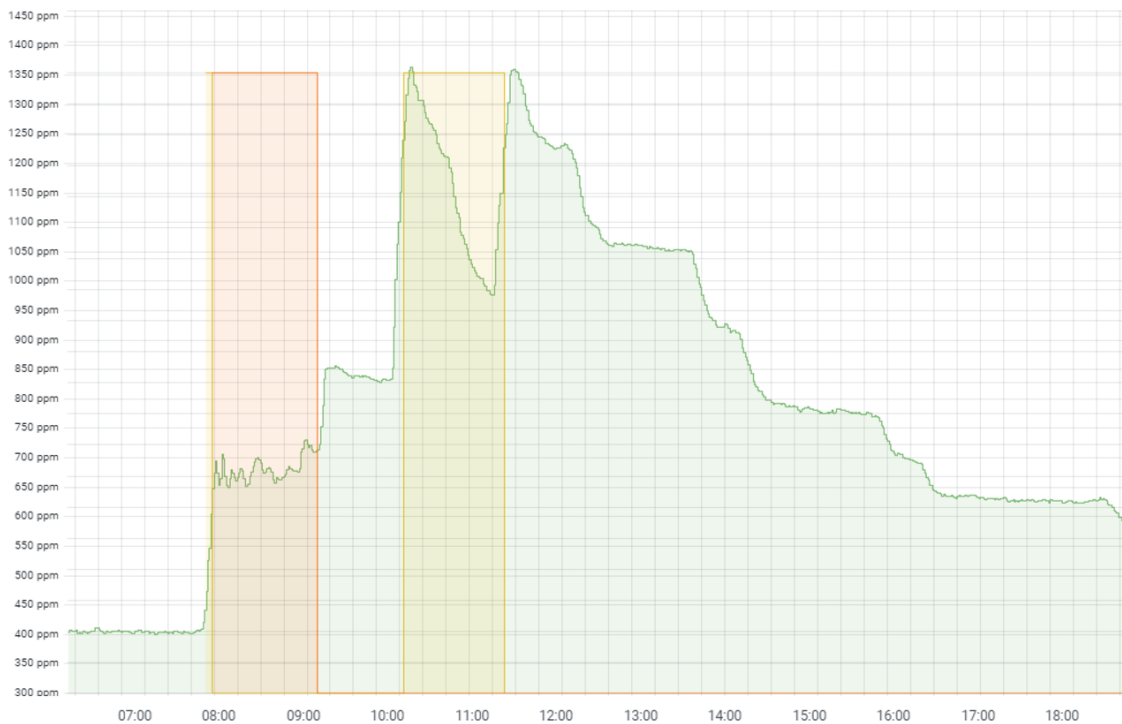


Abbildung 2-25: Verlauf der CO₂-Konzentration (grün) und Fensteröffnung (orange)

Der Grenzwert für Feinstaub von 25 µg/m³ wurde in den Wochen 5 und 8 nicht überschritten. Aus den Messwerten (Abbildung 2-26) wird ersichtlich, dass die Grundlüftung effektiv dazu beiträgt, die Feinstaubbelastung nach der Fensteröffnung wieder zu reduzieren und so Grenzwertüberschreitungen zu vermeiden.

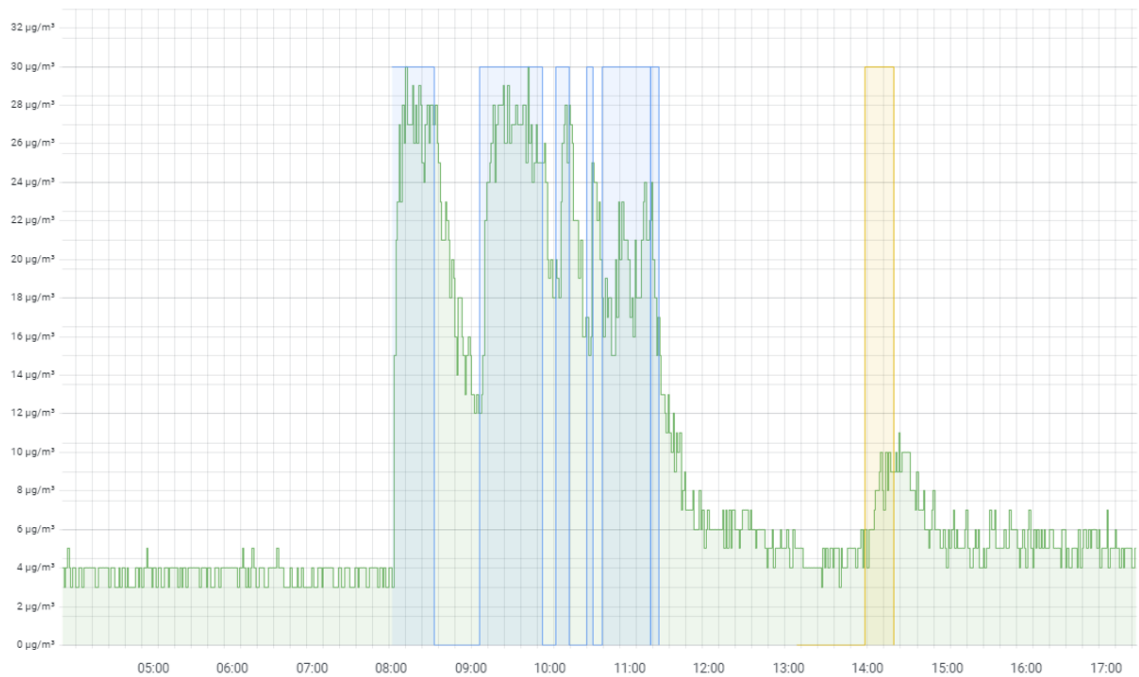


Abbildung 2-26: Verlauf der Feinstaubkonzentration (grün) und Fensteröffnungen (blau gelb)

Der Energieverbrauch des Lüftungsgerätes ist aufgrund der verringerten Zulufttemperatur unabhängig vom Außentemperaturverlauf und lediglich vom vordefinierten Volumenstrom abhängig. Nachfolgende Abbildung 2-27 zeigt, dass das Lüftungsgerät nur bei Anwesenheit aktiviert und bei Abwesenheit deaktiviert wurde. In Woche 5 und 8 benötigte das Lüftungsgerät im Mittel 6,6 kWh Strom pro Woche. Dies entspricht Energiekosten von etwa 2,64 € (Annahme: 40 ct / kWh) und 3,1 kg CO₂-Emissionen (Annahme: 0,471 kg CO₂-Äquiv. / kWh) (Umweltbundesamt 2018).

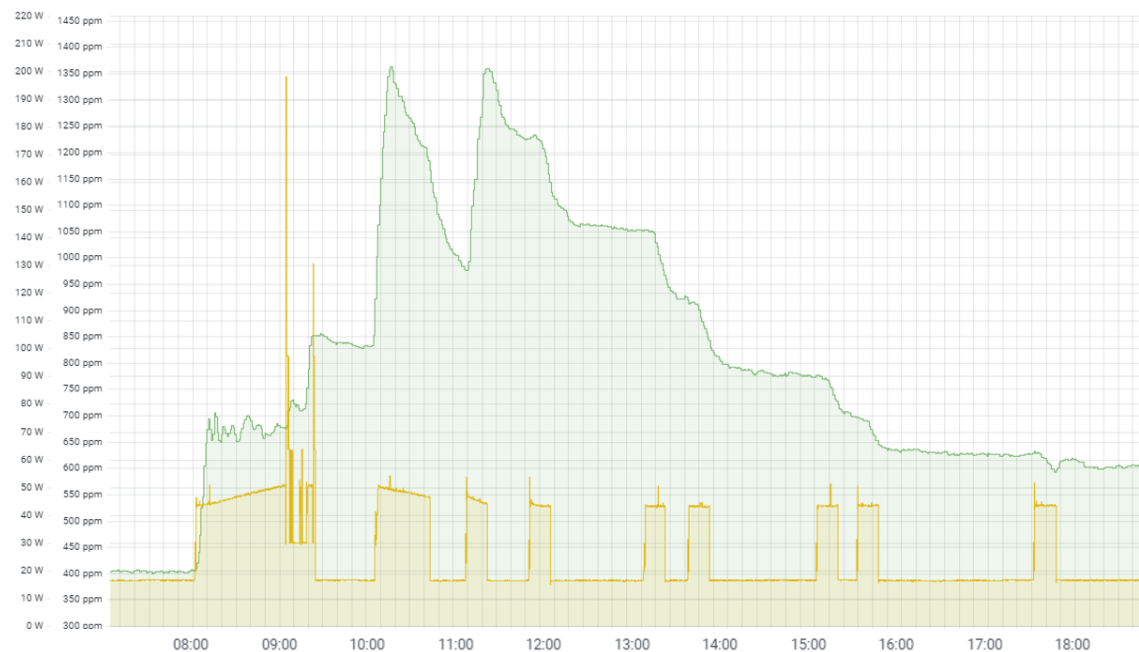


Abbildung 2-27: Verlauf der Leistungsaufnahme des Lüftungsgerätes (gelb) und der CO₂-Konzentration (grün)

Das Lüftungsverhalten der Nutzenden ist in Woche 5 und 8 nahezu unabhängig von der Innentemperatur und maßgeblich durch die CO₂-Konzentration bestimmt.

Zwischenfazit

Im Vergleich zur Versuchsreihe SR, die unter vergleichbaren Wetterbedingungen durchgeführt wurde, ergibt sich eine Energie-, Kosten- und CO₂-Emissionsreduktion von etwa 57 %.

Aufgrund des verringerten Zuluftvolumenstroms über die mechanische Lüftung muss der Nutzende wie in Versuchsreihe NL aktiv werden, um die CO₂-Konzentration niedrig zu halten. Dies steht im Gegensatz zur Versuchsreihe SR, in dem das Lüftungsverhalten vorrangig temperaturbedingt schien.

2.3.6. Versuchsreihe „Minimalkomfort und Interaktion“

Aufbauend auf der Regelstrategie Minimalkomfort der Versuchsreihe MIN wird dem Nutzenden in der Versuchsreihe MIN-INT eine Interaktionsmöglichkeit gegeben, mit der die Luftqualität und der thermische Komfort durch eine kurzzeitig wirksame Intervention an die aktuellen Bedürfnisse angepasst werden kann. Beispiele für einfache Interventionsmodi, die der Nutzende direkt auslösen kann, sind „Lüften“, „Heizen“ oder „Kühlen“. Nach einer definierten Zeit bzw. bei ungenutztem Raum fällt das System zurück in den effizienten Betriebsmodus „Minimalkomfort“. Die Versuchsreihe MIN-INT erstreckte sich von Woche 9 bis 11.

Bezüglich der am Standort gemessenen Außentemperaturen ergeben sich über die drei Wochen dauernde Versuchsreihe folgende Minimal-, Maximal- und Mittelwerte (Tabelle 2-6):

Tabelle 2-6: Außentemperaturen in Woche 9 bis 11

Woche	Außentemperatur		
	Mittel	Min	Max
9	13,1 °C	6,4 °C	20,3 °C
10	18,5 °C	10,5 °C	27,7 °C
11	18,1 °C	13,7 °C	25,1 °C

Die Außentemperaturen liegen in diesem Versuchszeitraum deutlich höher als jene in vorhergehenden Versuchsreihen, wodurch die Vergleichbarkeit mit diesen stark eingeschränkt ist. Durch die höheren Außentemperaturen war kein Heizbedarf vorhanden,

Maximaltemperaturen über 25 °C in Woche 10 und 11 schränkten die Möglichkeit zur Kühlung über die Außenluft während der Nachmittagsstunden stark ein (Abbildung 2-28).

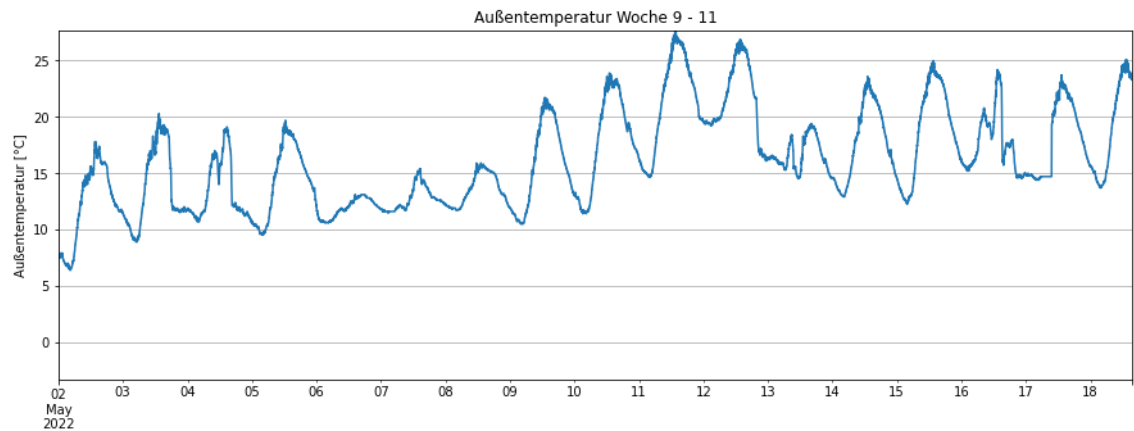


Abbildung 2-28: Außentemperaturverlauf

Aufgrund der erhöhten Außenlufttemperatur verschieben sich auch die Innentemperaturen an die obere Grenze des Komfortbandes und führen in Woche 10 und 11 zu deutlichen Überschreitungen von 29 und 16 Stunden. Trotz der Zunahme der Innentemperaturen nimmt die Häufigkeit der Fensteröffnungen in diesem Zeitraum nicht zu, sondern erfolgt vorrangig über Anforderung eines erhöhten Luftvolumens über die Nutzerinteraktion (Aktivierung der Tasten „zu warm“ und „lüften“) (Abbildung 2-29).

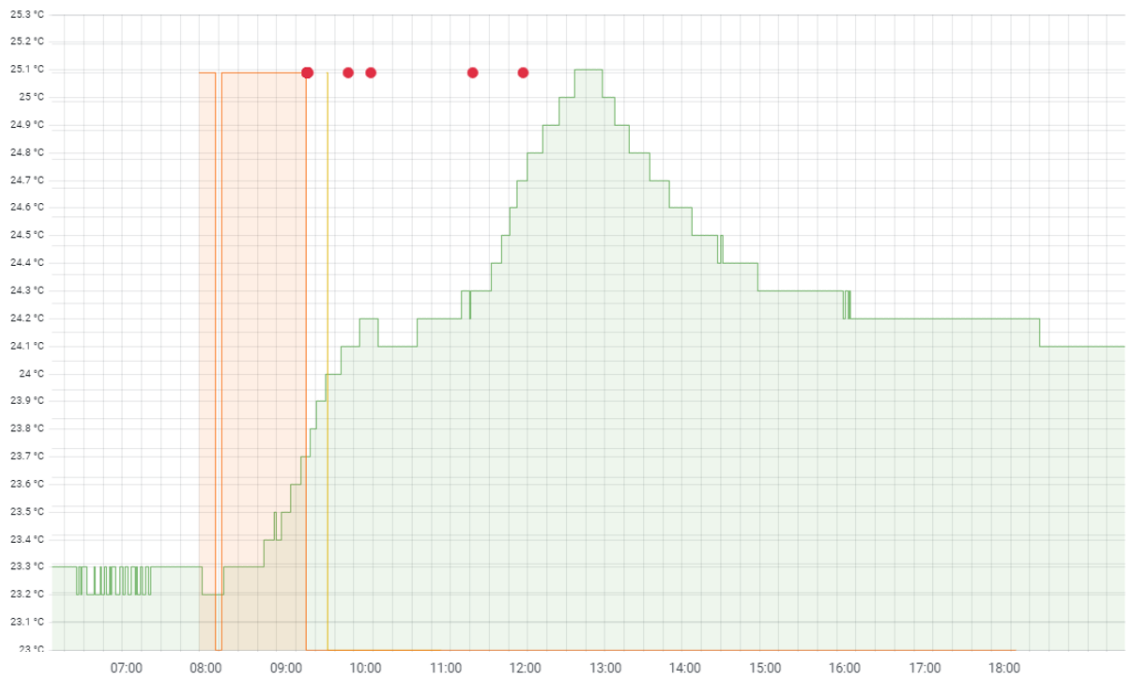


Abbildung 2-29: Innentemperaturverlauf (grün), Fensteröffnung (orange) und Nutzerinteraktion „zu warm“ (rot)

Im Vergleich zur Versuchsreihe MIN verbessert sich durch die zusätzliche Interaktionsmöglichkeit die Innenluftqualität im Innenraum bei gleichzeitiger Abnahme der Fensterlüftungen (Abbildung 2-30). So weisen Woche 9 und 10 je 10 Stunden Überschreitung des 1.000 ppm CO₂-Komfortwertes auf und Woche 11 insgesamt 2 Stunden.

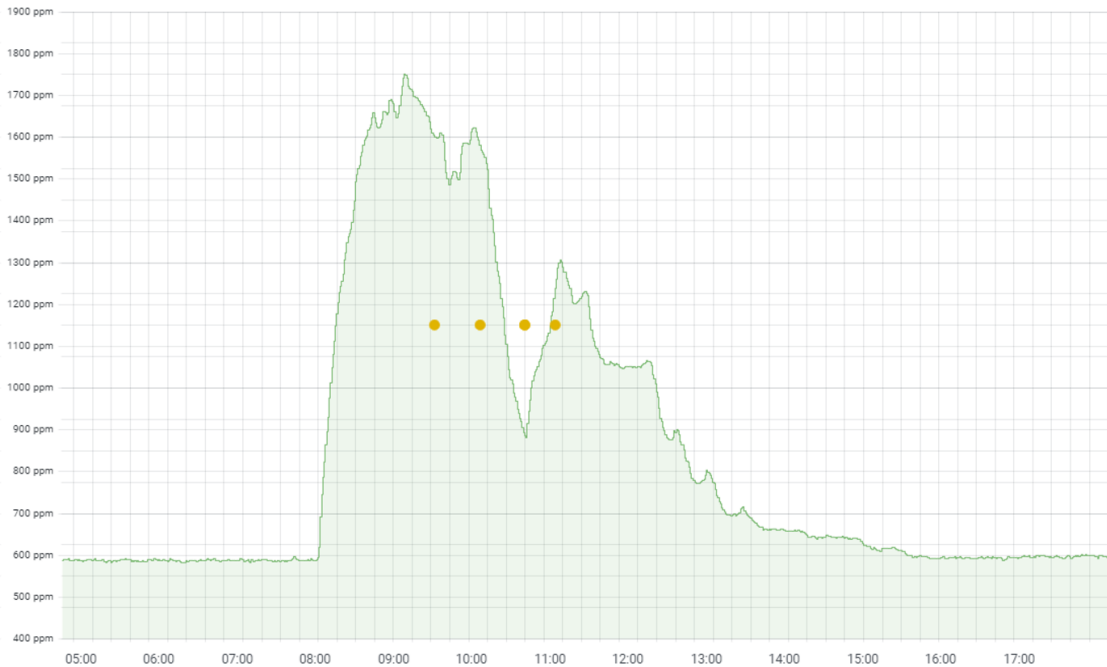


Abbildung 2-30: Verlauf der CO₂-Konzentration (grün) und Nutzerinteraktion „lüften“ (gelb)

Wie zuvor in Versuchsreihe MIN sind auch hier die Grenzwerte für Feinstaub nicht überschritten worden. Die zusätzliche Interaktion des Stoßlüftens über das dezentrale Lüftungsgerät verringerte die Anzahl der Fensteröffnungen und damit den Eintrag von Feinstaub aus dem Außenraum (Abbildung 2-31).

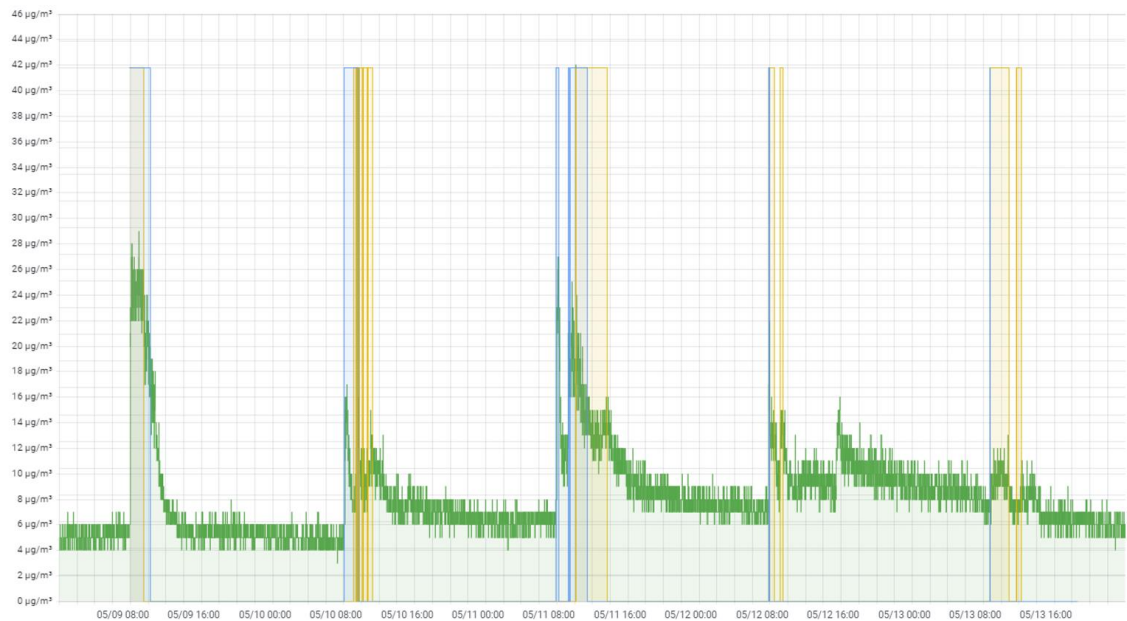


Abbildung 2-31: Verlauf der Feinstaub-Konzentration (grün) und Fensteröffnung (gelb, blau)

Der Energieverbrauch ist aufgrund der höheren Außentemperaturen sowie verringerten Zulufttemperaturen unabhängig von der Außentemperatur, da das Heizregister nie zugeschaltet wurde. Folgende Abbildung zeigt, dass das Lüftungsgerät nur bei Anwesenheit aktiviert wurde und im Grundlastbetrieb wie in Versuchsreihe MIN operierte. Durch die Nutzerinteraktion „lüften“ (blaue Punkte) erhöht sich die Zuluftmenge für einen definierten Zeitraum und resultiert in einem entsprechenden Anstieg des Energieverbrauchs (Abbildung 2-32).

In Woche 9 bis 11 benötigt das Lüftungsgerät im Mittel 8,6 kWh elektrische Energie pro Woche. Dies entspricht Kosten von etwa 3,44 € (Annahme: 40 ct / kWh) und 4,1 kg CO₂-Emissionen (Annahme 0,471 kg CO₂-Äquiv. / kWh) (Umweltbundesamt 2018).

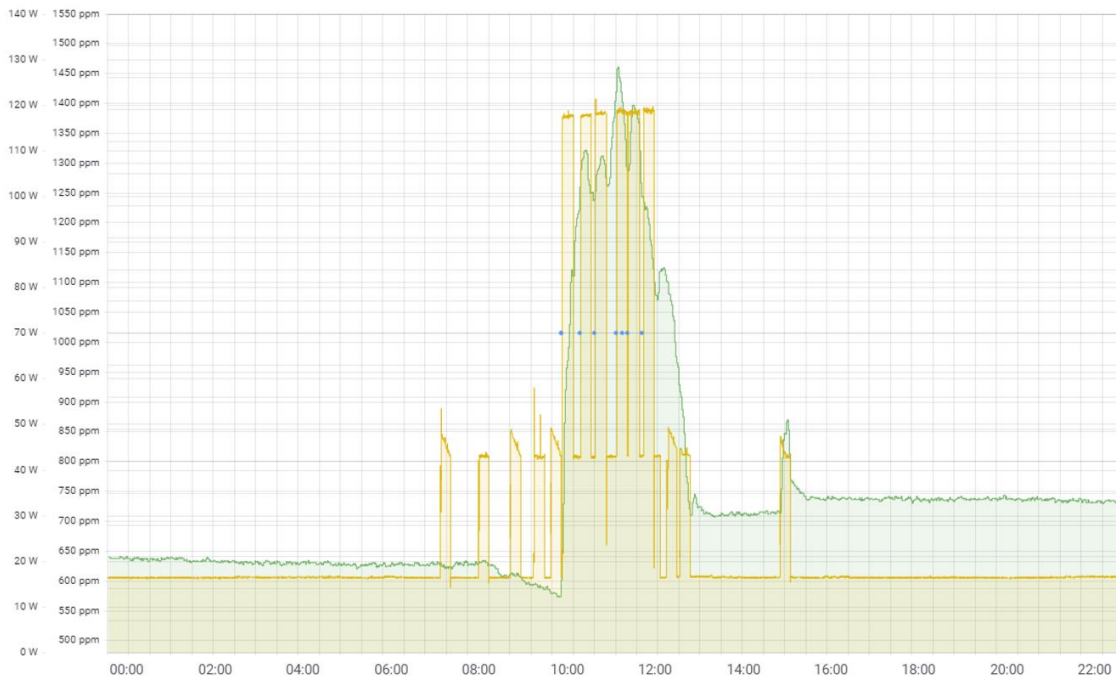


Abbildung 2-32: Verlauf der CO₂-Konzentration (grün), Leistungsaufnahme (gelb) und Nutzerinteraktion „lüften“ (blau)

Das Lüftungsverhalten der Nutzenden ist in den Wochen 9 bis 11 deutlich reduziert gegenüber den vorhergehenden Wochen. Dies ist auf die rege Nutzung der Nutzerinteraktionsmöglichkeit zurückzuführen, welche die Fensterlüftung zu einem Großteil ersetzen konnte. Die verbleibenden Fensteröffnungen wurden vorrangig durch die CO₂-Konzentration bestimmt.

Zwischenfazit

Im Vergleich zur Versuchsreihe SR ergibt sich eine Energie-, Kosten- und Emissionsreduktion um etwa 48 %. Verglichen mit der Versuchsreihe MIN ist somit eine um lediglich 9 Prozentpunkte geringere Einsparung die Folge der zusätzlichen Möglichkeit zur Interaktion.

2.3.7. Ergebnis Versuchsreihen

Die optimierten Regelstrategien ermöglichen eine maßgebliche Reduktion des Energieverbrauches des Lüftungsgerätes im Vergleich zur Standardkonfiguration in Höhe von 57% für Versuchsreihe MIN und einer lediglich 9 Prozentpunkte niedrigeren Einsparung von 48% bei Versuchsreihe MIN-INT mit Nutzerinteraktion. Die Versuchsreihe MIN-INT zeigte eine deutlich höhere Akzeptanz der Nutzenden in Bezug auf die mechanische Lüftung, ausgedrückt durch die deutlich reduzierte Fensterlüftung.

Im Vergleich zur natürlichen Lüftung konnte in Versuchsreihe MIN und MIN-INT eine signifikante Reduktion der Feinstaubbelastung erreicht werden, sodass der WHO-

Grenzwert nicht mehr überschritten wurde. In keinem der Versuchsreihen konnte die CO₂-Konzentration verlässlich unter den Komfortwert von 1000 ppm gesenkt werden.

Resultierend konnte gezeigt werden, dass die optimierten Regelstrategien eine maßgebliche Reduktion des Energieverbrauches des Lüftungsgerätes im Vergleich zur Standardkonfiguration von bis zu 57% ohne Nutzerinteraktionsmöglichkeit sowie bis zu 48% Reduktion mit Nutzerinteraktionsmöglichkeit erlauben. Die abgeleitete Nutzerakzeptanz konnte durch die Interaktionsmöglichkeit deutlich gesteigert werden und führte zu einem starken Rückgang der Fensteröffnungen. Tabelle 2-7 zeigt exemplarisch, basierend auf den vorläufigen Messergebnissen zweier Wochen, einem angenommenen Strompreis von 40 Ct/kWh und angenommenen CO₂-Emissionen von 0,471 kg CO₂-Äquiv./kWh (Umweltbundesamt 2018) die Einsparpotentiale der optimierten Regelung.

Tabelle 2-7: Einsparpotentiale Strombedarf durch optimierte Regelung im Vergleich zur Standardregelung basierend auf vorläufigen Messergebnissen zweier Wochen

	1 Klassenzimmer			Schule (30 Klassenzimmer)		
	<i>kWh/ Woche</i>	<i>€/ Woche</i>	<i>kg CO₂eq/ Woche</i>	<i>kWh/ Woche</i>	<i>€/ Woche</i>	<i>kg CO₂eq/ Woche</i>
Betrieb Standard	15,2	6,08	7,2	456	182,40	214,8
Betrieb Optimiert	6,6	2,64	3,1	198	79,20	93,3
Einsparungen	8,6	3,44	4,1	258	103,20	121,5

2.4. Modellierung & Simulation

Parallel zur Messung wurde ein Simulationsmodell des Bestands erstellt. Das Simulationsmodell bildet dabei den selben Raum digital ab, der in der 2.3 für die Messungen im Bestandsgebäude der Realschule Aschheim verwendet wurde (Abbildung 2-33).

2.4.1. Modellaufbau

Digital abgebildet sind die Fußbodenheizung, die dezentralen Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, die Fenster in ihren jeweiligen Verglasungsqualitäten, die Raumbeleuchtung, interne elektrische Lasten (z.B. SmartBoard), die Raumbelastung durch Personen, sowie der vor dem Raum an der Außenfassade entlanglaufende Laubengang mit einer semi-transparenten Brüstung.

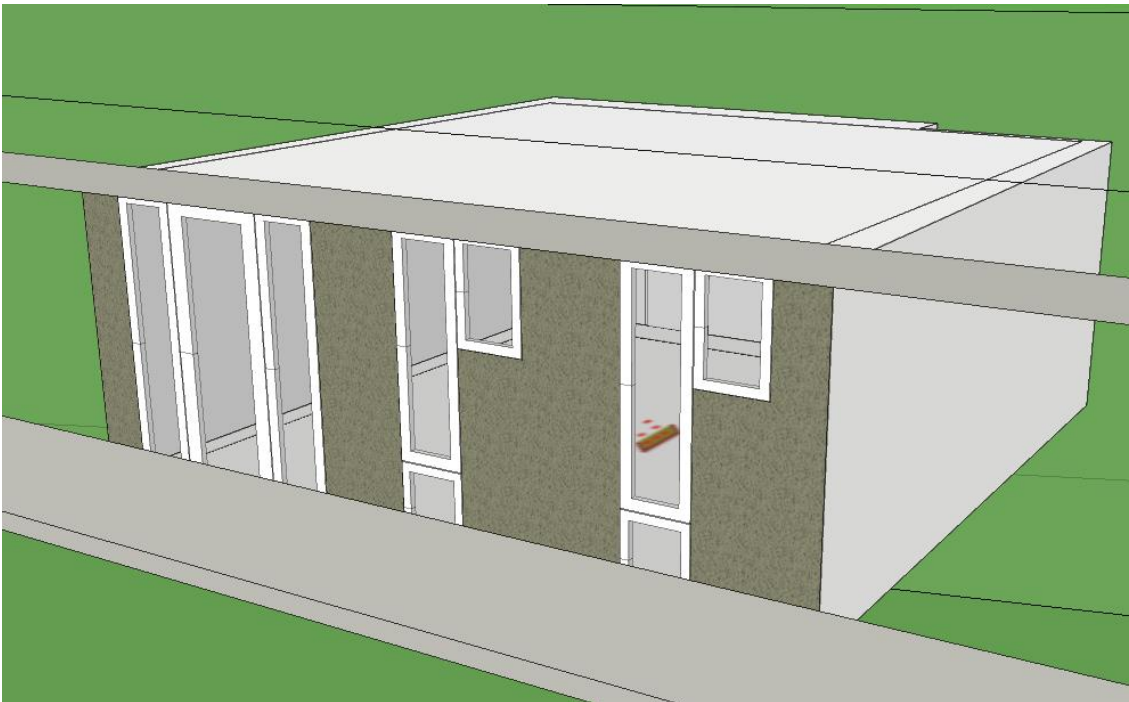


Abbildung 2-33: 1-Zonen-Modell des Klassenraums im Bestandsgebäude

Randbedingung der Simulation waren die vor Ort gemessenen Wetterdaten. Da vor Ort in Aschheim noch keine Wetterstation verfügbar ist (vgl. 2.2.1), wurden die durch einen mobilen Messaufbau erfassten Wetterdaten durch weitere Messdaten wie Einstrahlung, Feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung der Meteorologie der LMU München vom Messstandort Theresienstraße ergänzt (Zinner und Garhammer 2022). Abbildung 2-34 zeigt beispielhaft einen Vergleich der Außentemperaturen in der Woche vom 07.03.2022 bis 13.03.2022, erfasst durch den mobilen Messaufbau und durch die Meteorologie der LMU München vom Messstandort Theresienstraße.

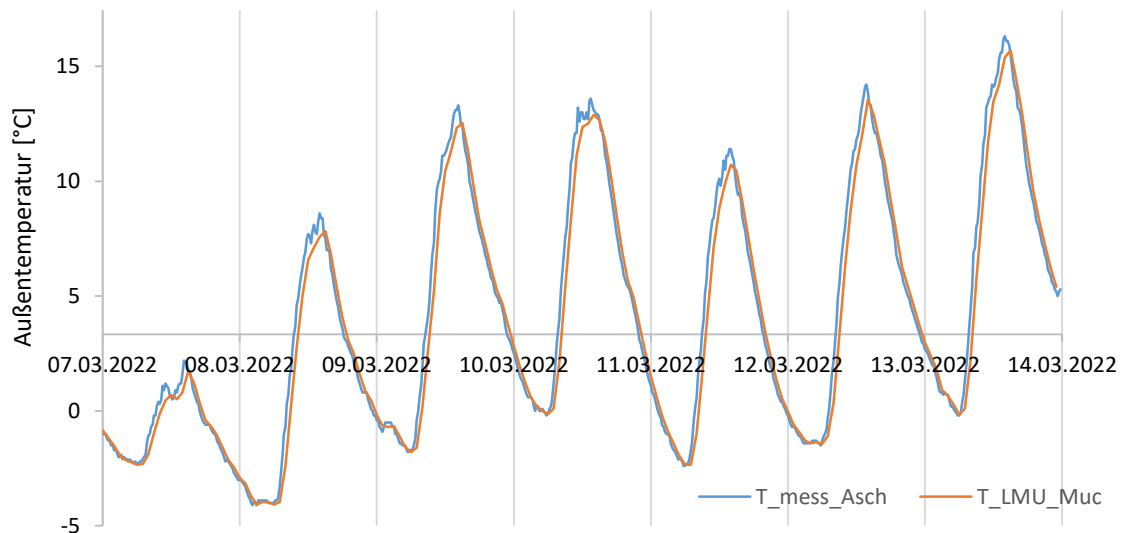


Abbildung 2-34: Außentemperaturen gemessen in Aschheim (T_mess_Asch) und am Messstandort München Theresienstr. (T_LMU_Muc)

Aus Abbildung 2-34 ist ersichtlich, dass ein Unterschied der erfassten Temperaturen zwar vorhanden ist, dieser sich aber in einem für diese Voruntersuchung vertretbaren Rahmen bewegt. Gleiches gilt beispielsweise für die relative Feuchte.

Die simulierten Szenarien entsprechen den Versuchsreihen „Natürliche Lüftung“, „Standard Regelung“ und „Minimalkomfort“ der prototypischen Umsetzung im Bestand (vgl. 2.3.1).

2.4.2. Simulation „Natürliche Lüftung“

In einem ersten Schritt wurde der Klassenraum analog zu 2.3.3 so modelliert, dass dieser nur über die Fensterlüftung mit Frischluft versorgt wird. Dies zeigt damit das thermische Verhalten eines typischen Bestandsraum ohne Lüftungsgerät. Die Annahme hierbei ist, mit dem Wissen um die im Raum befindliche CO₂-Ampel bedingt durch COVID, dass alle 20 bis 30 min die drei offenbaren Fenster für jeweils 3 Minuten geöffnet werden. Abbildung 2-35 zeigt die Außentemperatur und den simulierten Temperaturverlauf im Klassenraum, bei dem ein deutliches Abfallen der operativen Temperatur korrelierend den jeweiligen Fensteröffnungen zu erkennen ist.

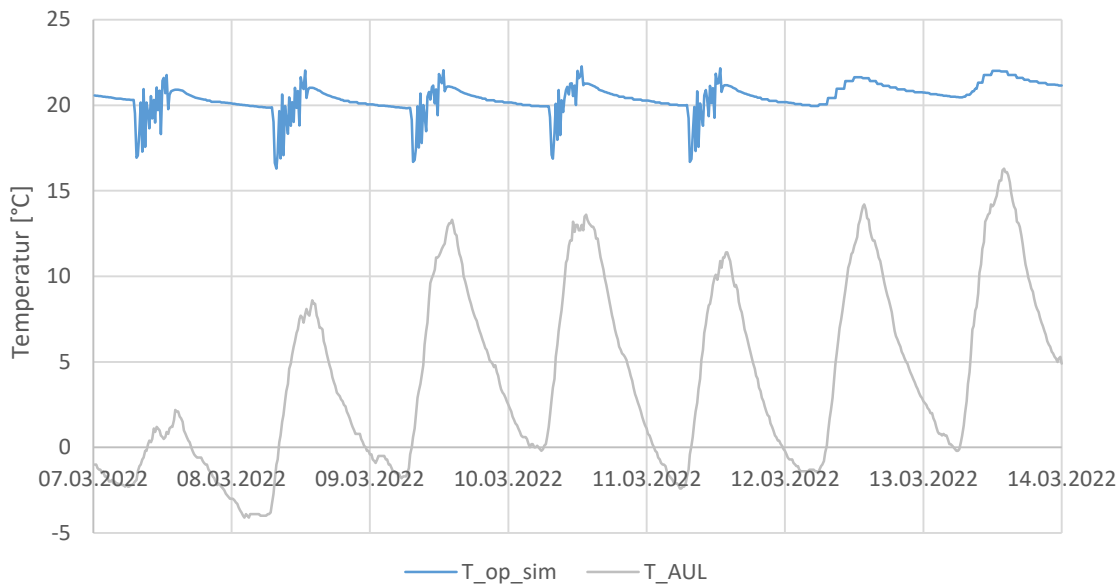


Abbildung 2-35: Außentemperatur und operative Temperatur des Klassenraums in Woche 1

Durch die niedrigen Außentemperaturen ist dieser Effekt verstärkt. Die sich für diesen Fall einstellende CO₂-Konzentration im Klassenraum zeigt Abbildung 2-36.

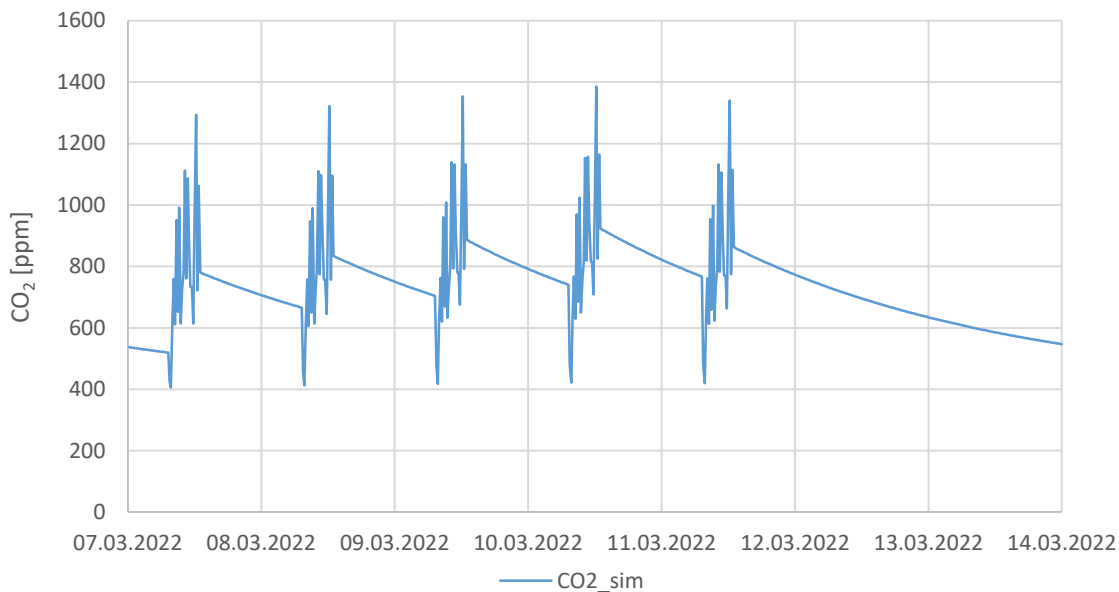


Abbildung 2-36: CO₂-Konzentration im Klassenraum in Woche 1

Auffällig sind hierbei die Spitzen die bei Fensteröffnung nahezu auf 400 ppm absinken und bei geschlossenen Fenstern bis auf 1400 ppm ansteigen. Über Nacht oder am Wochenende sinkt die CO₂-Konzentration im ungenutzten Klassenraum auf Grund der Infiltration und natürlicher Diffusionseffekte.

2.4.3. Simulation „Standardbetrieb“

Analog zur Messung des „Standardbetriebs“ (2.3.4) bildet in einem zweiten Schritt die Simulation den Bestandsklassenraum mit zwei dezentralen Lüftungsgeräten im Standardbetrieb ab. Wie schon in 2.3.4 beschrieben umfasst dies eine Betriebszeit des Lüftungsgeräts von 8 bis 18 Uhr, eine CO₂-geführte Zuluftregelung sowie ein zuschaltbares Heizregister bei Zulufttemperaturen 20°C. Zusätzlich wird angenommen, dass alle 20 bis 30 min eines der drei öffnenbaren Fenster für jeweils 3 Minuten geöffnet wird. Abbildung 2-37 zeigt die sich mit den Außentemperaturen der Woche 3 einstellende, simulierte, operative Innenraumtemperatur.

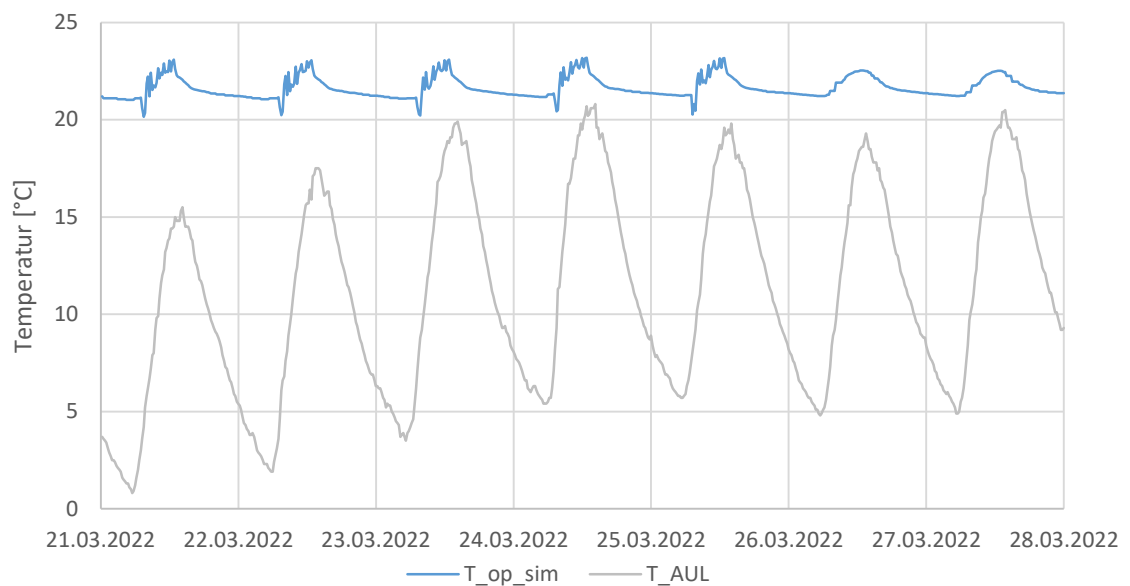


Abbildung 2-37: Gemessene Außentemperatur und simulierte operative Temperatur des Klassenraums in Woche 3

Bedingt durch die aktive CO₂-geführte Zuluftregelung bewegt sich die simulierte CO₂-Konzentration im Klassenraum hauptsächlich unterhalb der 1000 ppm (Abbildung 2-38). Über Nacht oder am Wochenende sinkt diese im ungenutzten Klassenraum durch die voreingestellte Betriebszeit der Lüftungsgeräte bis 18 Uhr auf die natürliche CO₂-Konzentration der Außenluft.

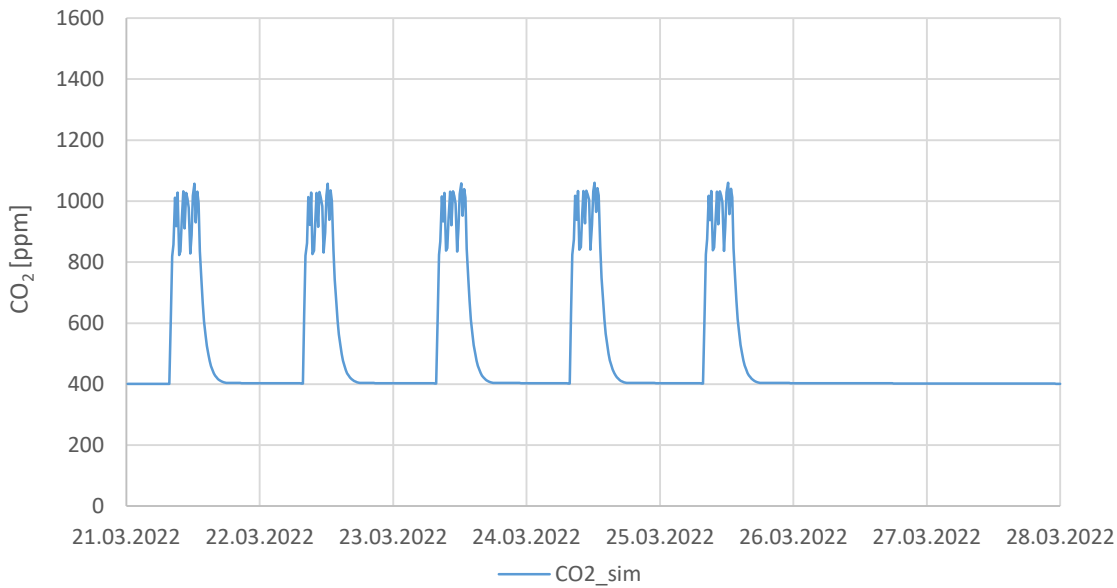


Abbildung 2-38: Simulierte CO₂-Konzentration im Klassenraum in Woche 3

2.4.4. Simulation „Minimalkomfort“

In einem dritten Schritt wird die in 2.3.5 beschriebene Regelung zur Erreichung eines Minimalkomforts im Innenraum modelliert. Diese beinhaltet eine reduzierte Luftmenge von 15 m³ pro Stunde und Person, eine verringerte Untergrenze der zulässigen Zulufttemperatur von 16 °C und eine Aufhebung der festen Betriebszeit zugunsten einer Präsenzregelung. Weiterhin wird zusätzlich angenommen, dass alle 20 bis 30 min eines der drei öffenbaren Fenster für jeweils 3 Minuten geöffnet wird. Abbildung 2-39 zeigt die sich mit den Außentemperaturen der Woche 5 einstellende, simulierte, operative Innenraumtemperatur.

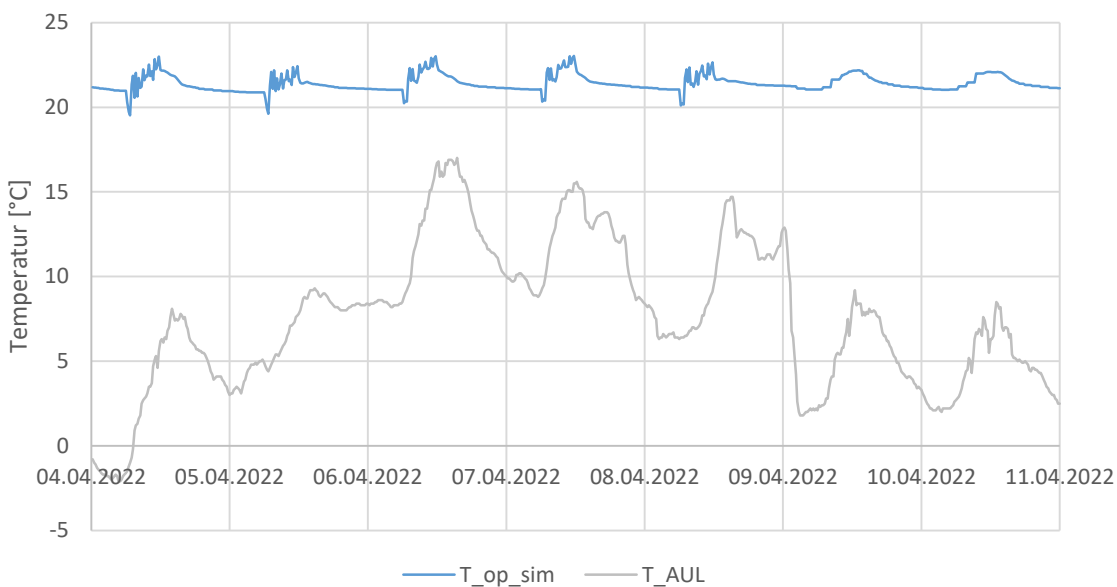


Abbildung 2-39: Gemessene Außentemperatur und simulierte operative Temperatur des Klassenraums in Woche 5

Aufgrund der durch die Regelstrategie reduzierten Luftmenge zeigt sich in Abbildung 2-40 eine größere Varianz der CO₂-Konzentration im Klassenraum als im Fall „Standardbetrieb“. Diese liegt im Mittel bei 1100 ppm mit gelegentlichen Spitzen bis 1200 ppm.

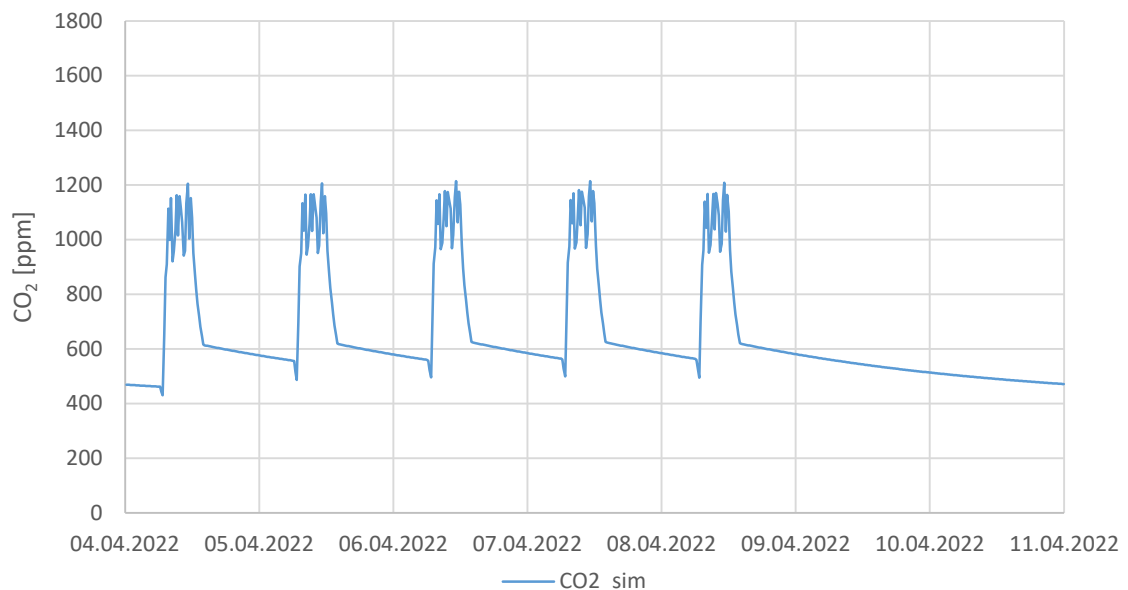


Abbildung 2-40: Simulierte CO₂-Konzentration im Klassenraum in Woche 5

Über Nacht oder am Wochenende sinkt diese im ungenutzten Klassenraum langsam durch natürliche Infiltration und Diffusion. Die Lüftungsgeräte, da präsenzgesteuert, sind in dieser Zeit deaktiviert. Hier wird im Gegensatz zum Standardbetrieb die natürliche CO₂-Konzentration der Außenluft über Nacht nicht vollständig erreicht.

2.5. Schlussfolgerung Vergleich Simulation und Test-Messung

Aus den Test-Messungen und dem Vergleich von Simulation und Test-Messung ergeben sich eine Vielzahl von Erkenntnissen, die sich einerseits bereits auf die weitere Planung des konkreten Projektes und der nächsten Projektphase auswirken, die andererseits jedoch auch im übergeordneten Forschungskontext erste Ergebnisse aufzeigen und weitere Fragen nach sich ziehen. Nachfolgend werden diese vorgestellt.

2.5.1. Vergleich Simulation und Bestandsmessung

Abbildung 2-41 stellt die in Abbildung 2-36 gezeigte, simulierte und die in 2.3.3 beschriebene, gemessene CO₂-Konzentration für den Fall „Natürliche Lüftung“ gegenüber. Niveau und nächtliches Abklingverhalten der CO₂-Konzentration sind dabei sehr ähnlich. Auffällig die stärkeren Ausschläge nach oben und unten der simulierten Konzentration. Dies deutet auf eine etwas höhere Empfindlichkeit des Simulationsmodells gegenüber externen Einflüssen wie z.B. ein offenes Fenster.

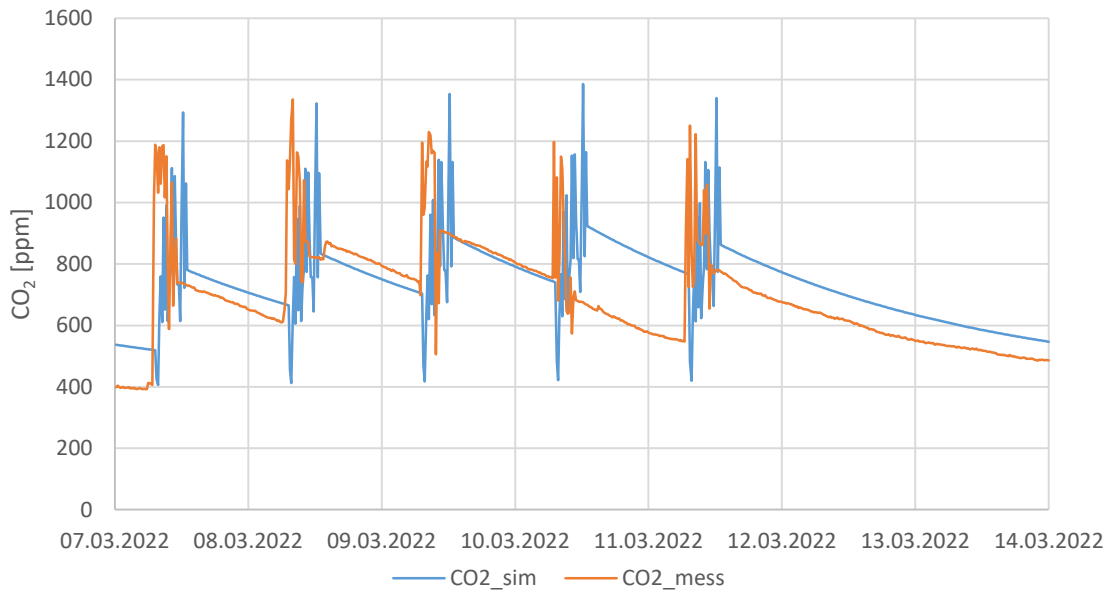


Abbildung 2-41: Gemessene und simulierte CO₂-Konzentration im Fall „Natürliche Lüftung“

Dies wird ebenfalls in Abbildung 2-42 sichtbar, die eine Gegenüberstellung des gemessenen und simulierten Temperaturverlaufs für den Fall „Natürliche Lüftung“ zeigt. Auch hier sind die Ausschläge der simulierten Temperatur deutlich größer als die in Realität gemessenen. Gleichzeitig ist jedoch der übergeordnete Verlauf der beiden Temperaturen sehr ähnlich. Der reale Raum reagiert damit träger als die Simulation dies bisher abbildet. Die simulierten Temperaturen liegen dabei fast durchgehend unterhalb der tatsächlich gemessenen.

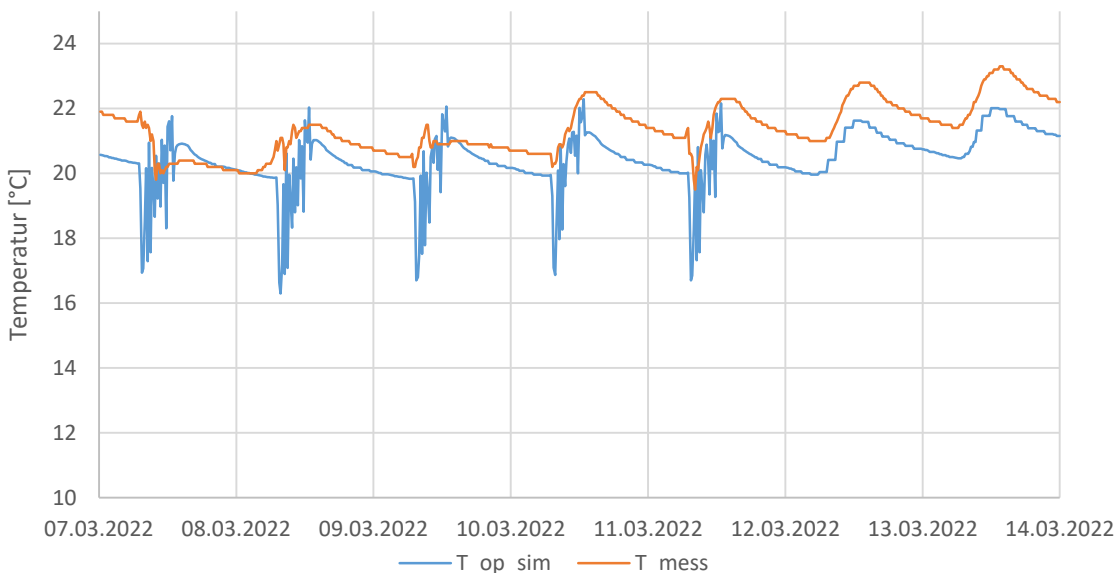


Abbildung 2-42: Gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Natürliche Lüftung“

Auch der Vergleich von Simulation und Messung im Fall „Standardbetrieb“ zeigt ähnliche Charakteristika. Die in Abbildung 2-38 gezeigte simulierte CO₂-Konzentration wird in Abbildung 2-43 gemeinsam mit der gemessenen CO₂-Konzentration dargestellt. Hier zeigt sich, dass die gemessene CO₂-Konzentration, im Gegensatz zur simulierten, über Nacht

nicht bis auf die natürliche CO₂-Konzentration der Außenluft absinkt, bzw. bei Stillstand der Lüftungsgeräte sogar leicht ansteigt. Weiter sind hier die Spitzen der gemessenen CO₂-Konzentration größer als die der simulierten.

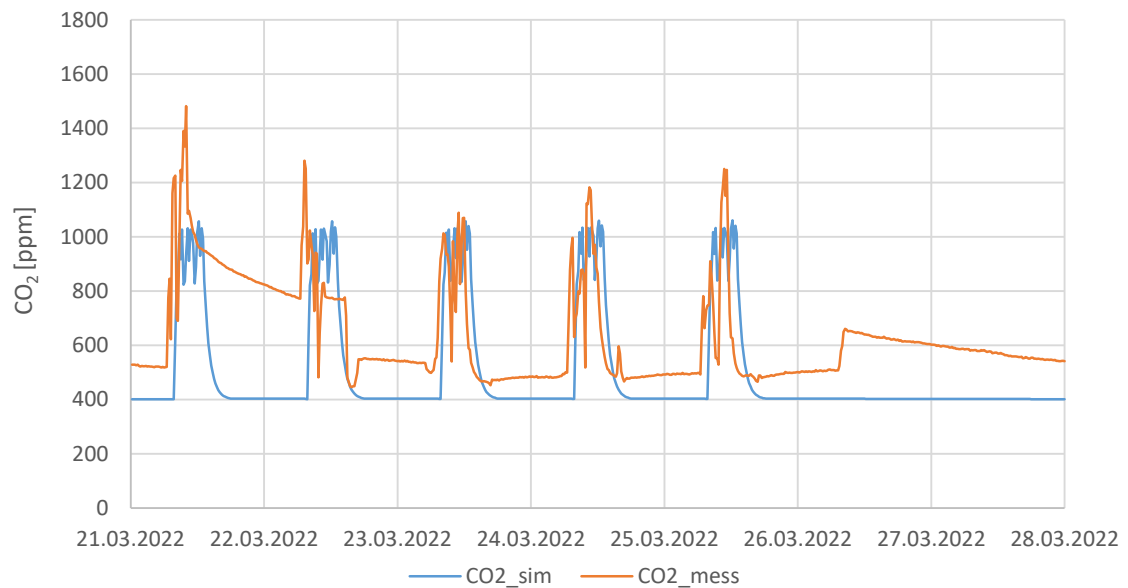


Abbildung 2-43: Gemessene und simulierte CO₂-Konzentration im Fall „Standardbetrieb“

Aus Abbildung 2-43 wird zusätzlich ein verspätetes Einschalten der Lüftungsgeräte sichtbar. So zeigt die nächtliche Abklingkurve der gemessenen CO₂-Konzentration für den 21. und 22.03.2022 die selbe Charakteristik wie Abbildung 2-41, was auf ein ausgeschaltetes Lüftungsgerät hindeutet. Die in Abbildung 2-47 aufgezeichnete Leistungsaufnahme zeigt für dieses Datum ebenfalls nur die Standby-Leistung. Erst ab 23.03.2022 war das Lüftungsgerät im „Standardbetrieb“. Eine Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Temperatur für den Fall „Standardbetrieb“ (Abbildung 2-44) zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf, mit einer „glatteren“ Charakteristik der gemessenen Temperatur. Die simulierten Temperaturen liegen hier teils über, teils unter der gemessenen Temperatur.

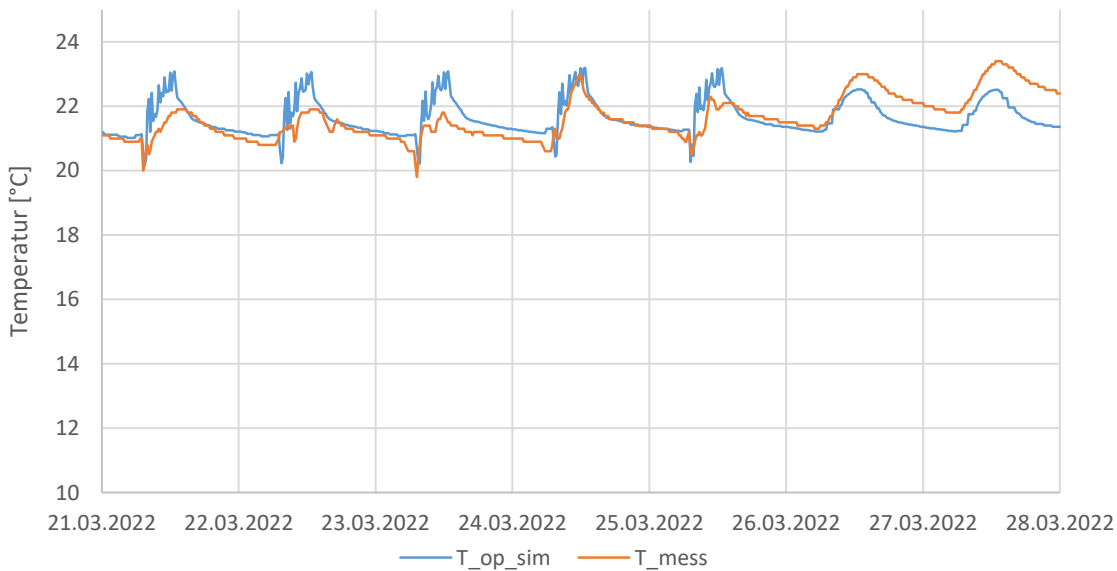


Abbildung 2-44: Gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Standardbetrieb“

Die gemessene und simulierte CO₂-Konzentration im Fall „Minimalkomfort“ in Abbildung 2-45 zeigt, im Gegensatz zum Standardbetrieb in Abbildung 2-43, leicht erhöhte durchschnittliche CO₂-Konzentrationen.

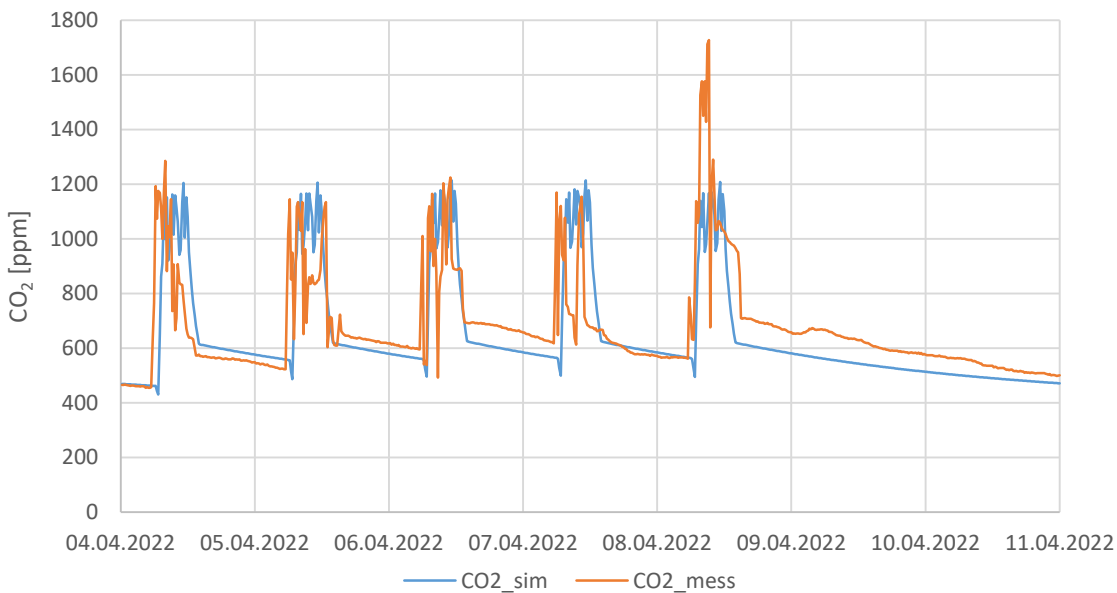


Abbildung 2-45: Gemessene und simulierte CO₂-Konzentration im Fall „Minimalkomfort“

In der Simulation kommt es hierbei jedoch zu weniger stark ausgeprägten Oszillationen. Die gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Minimalkomfort“ unterscheidet sich etwas mehr, als im Fall „Standardbetrieb“. Die simulierten Temperaturen liegen fast durchgehend oberhalb der gemessenen Temperatur.

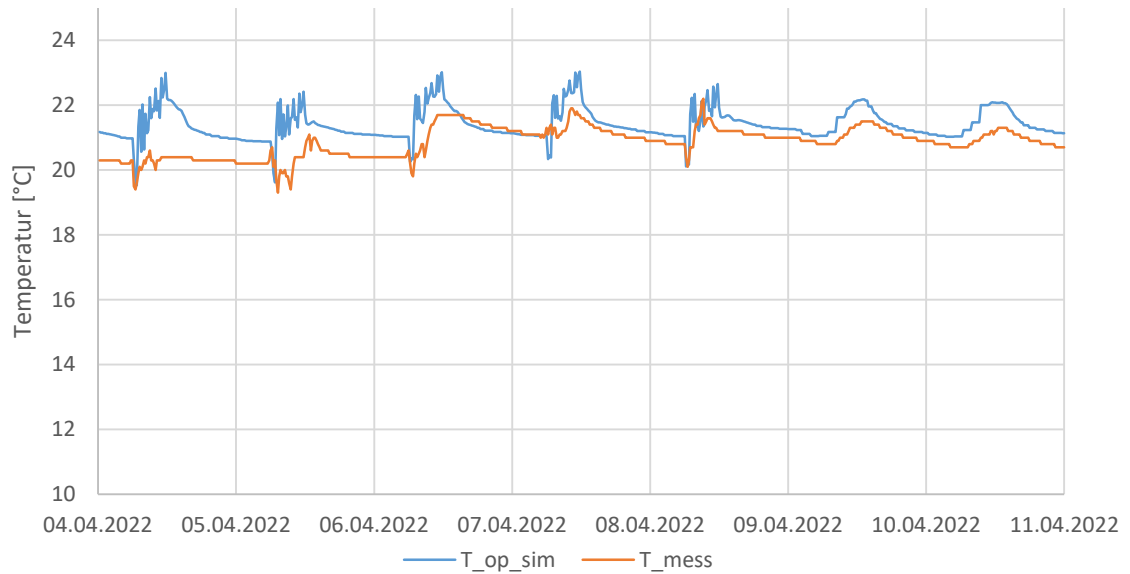


Abbildung 2-46: Gemessene und simulierte Temperatur im Fall „Minimalkomfort“

Übergeordnet zeigen die Vergleiche der verschiedenen untersuchten Größen die Realität als trägeres System als das in der Simulation modellierte, bei gleichzeitig qualitativ gut übereinstimmenden Ergebnissen von Messung und Simulation. Dieser Umstand muss in der nächsten Projektphase detaillierter und breiter betrachtet werden, da er für die planerische Auslegung anhand von Simulationsergebnissen bedeutende Konsequenzen haben könnte. Konkret könnte dies eine der Ursachen des Performance Gap, durch eine Anlagenüberdimensionierung im Planungsprozess sein.

2.5.2. Energieeinsparung Reduzierte Leistung

Wie schon im vorherigen Abschnitt 2.5.1 erwähnt, liefen die Lüftungsgeräte in Woche 3 erst ab dem 23.03.2022 im „Standardbetrieb“. Abbildung 2-47 zeigt die gemessene sowie die simulierte elektrische Leistung der Lüftungsgeräte. Zusätzlich zeigt der Graph im Hintergrund die Außenlufttemperatur.

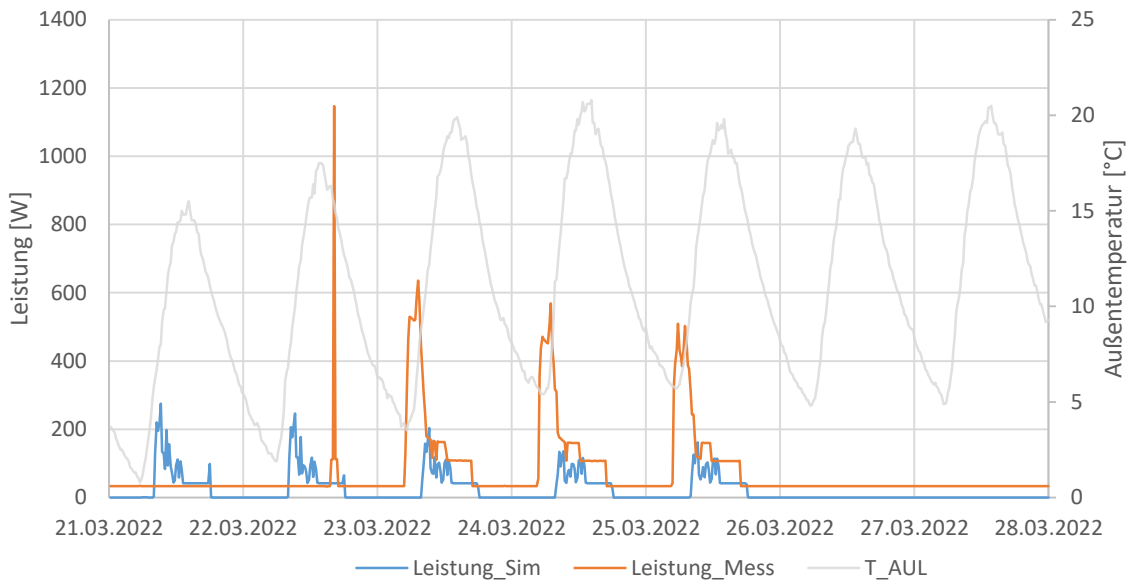


Abbildung 2-47: Gemessene und simulierte elektrische Leistungsaufnahme im Fall „Standardbetrieb“ in Woche 3

Auffällig ist dabei der Peak der gemessenen Leistung in den frühen Morgenstunden von bis zu 600 W. Dieser ist deutlich höher als die Peaks der Simulation von etwas über 200 W. Weiter fällt auf, dass dieser Leistungspeak zu den Zeiten auftritt, an denen die Außenlufttemperatur am niedrigsten ist. Dies lässt einen Zusammenhang mit dem erhöhten elektrischen Energiebedarf für das Nachheizregister vermuten. Bestätigt wird diese Vermutung durch die Messung in Woche 5 (Abbildung 2-48) im Fall „Minimalcomfort“, bei der am 04.04.2022 in der Frühe die Außenlufttemperatur unter 0°C sinkt. Auch hier ist ein erneuter Leistungspeak von 770 W zu sehen, der auf das Heizregister schließen lässt.

Da bei dieser ersten Messung im Bestand noch keine getrennte Leistungserfassung von Heizregister und Ventilatoren erfolgen konnte, sollte diese Hypothese weiterverfolgt und überprüft werden.

Eine mögliche Regelungsanpassung wäre hier eine präsenzbasierte Lüftung, die nur zu Tageszeiten läuft und durch die thermischen Gewinne der Personen im Raum in Kombination mit der Wärmerückgewinnung der dezentralen Lüftungsgeräte weniger bis keinen Nachheizbedarf hat.

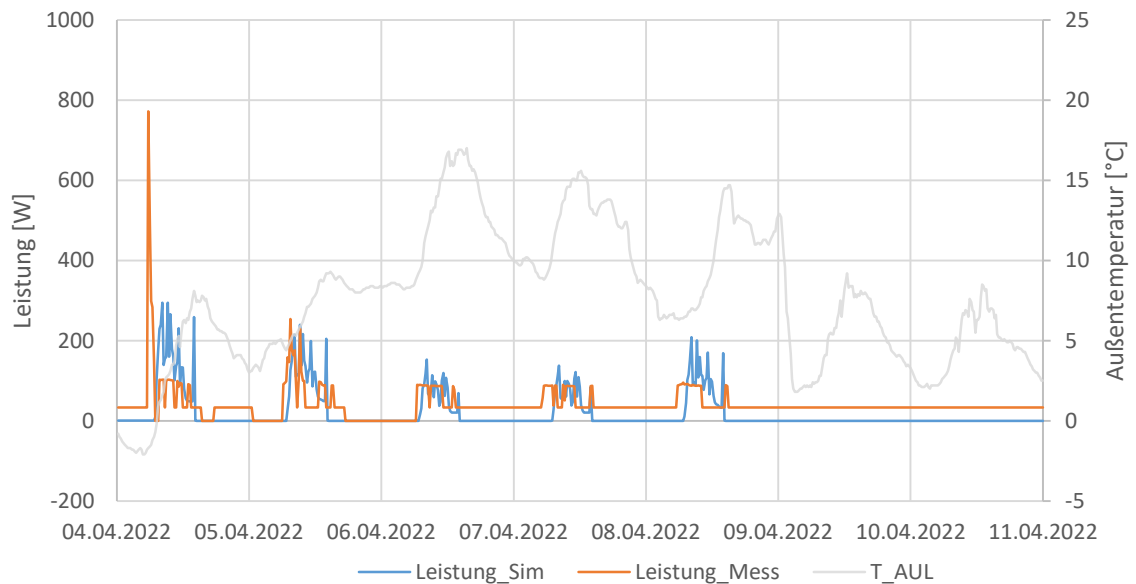


Abbildung 2-48: Gemessene und simulierte elektrische Leistungsaufnahme im Fall „Minimalbetrieb“

Zudem ist die durchgehende Standby-Leistung der Lüftungsgeräte auffällig. Die auftretenden Nullstellen in der Messung der elektrischen Leistung entsprechen nicht einem gemessenen Wert von 0 W, sondern sind Messfehler. In diesen Zeiträumen konnten keine Messwerte erfasst werden.

2.5.3. Energieeinsparung Stand-By Abschaltung

Darüber hinaus zeigt Abbildung 2-47, dass die gemessene Leistungsaufnahme der zwei dezentralen Lüftungsgeräte im Bestand nicht den Wert 0 annimmt. Besonders am Wochenende 26/27.03.2022 ist dies deutlich zu sehen. Das Niveau der bezogenen Standby-Leistung liegt hier bei 33 W. Pro Gerät folgt hieraus eine Standby-Leistung von 16,5 W. Pro Tag und Gerät wäre dies ein Energiebedarf von 0,396 kWh. Im Schulneubau sind aktuell 230 Geräte geplant. Dies würde einem Energiebedarf von 91,08 kWh pro Tag im Standby-Betrieb entsprechen. Bei einer Annahme von 190 Schultagen pro Jahr ergeben sich 175 Tage ohne Schulbetrieb, welche einem Standby-Energiebedarf von 15.939 kWh entsprechen. Zusätzlich entsteht ein Standby-Energiebedarf der Lüftungsgeräte außerhalb der üblichen Schulbetriebszeiten (z.B. nachts). Wird dieser ebenfalls eingerechnet und eine Standard-Schulbetriebszeit pro Schultag von 6 Uhr bis 18 Uhr angenommen, erhöht sich der Standby-Energiebedarf der Lüftungsgeräte um weitere 8.652 kWh auf 24.591 kWh pro Jahr.

Auf Basis dieser Erkenntnis wurde die Planung des Schulneubaus angepasst, um den Standby-Energiebedarf der Lüftungsgeräte zu minimieren. Aktuell geplanter Ansatz ist, die dezentralen Lüftungsgeräte außerhalb der Schulbetriebszeit vom Netz zu trennen. Eine Kopplung an die in den Klassenräumen verbauten Präsenzmelder wird untersucht.

2.5.4. Occupancy

Bei der Erstellung und dem Vergleich von Simulation und Messung hat sich gezeigt, dass die CO₂-Konzentration in Klassenräumen auch unabhängig vom konkreten Lüftungsverhalten stark variiert. Dies konnte auf eine variierende Anzahl an Personen in den Klassenräumen zurückgeführt werden. Diese sind nicht nur durch Klassenwechsel bedingt. Auch unterschiedliche Unterrichtsstunden z.B. Religionsunterricht können zu Klassenteilungen führen, die Klassengrößen abseits der definierten Regelgrößen nach sich ziehen. Darüber hinaus tragen natürlich auch nicht dem Regelbetrieb entsprechende Ereignisse wie Krankheiten, Exkursionen o.Ä. zu variierenden Personenzahlen in den Klassenräumen bei. Für Übertragbarkeit der Ergebnisse ist die tatsächliche Anzahl der im Raum befindlichen Personen jedoch wichtig. Weitere, parallel am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie laufende Forschungsarbeiten zeigen ähnliche Ergebnisse. Auf dieser Erkenntnis aufbauend wurde für die zweite Forschungsphase dieses Ergebnis mit aufgenommen und die Planung der Typräume um Sensoren zur Personenzählung ergänzt. Alternativ wird in Langzeitanalysen untersucht, ob beispielsweise durch Korrelationen zur CO₂-Konzentration die Regelungsstrategien angepasst werden können.

2.5.5. Zeitschritte Messdatenerfassung

Eine weitere Erkenntnis aus dem Vergleich von Simulations- und Messergebnissen ist, dass die Zeitschritte zur Messdatenerfassung, insbesondere von Sensoren die Einzerevents und keine kontinuierlichen Messgrößen erfassen, wie z.B. von Türen oder Fenstern, 15-minütige Zeitschritte zu groß sind. Hier sind mindestens minütliche oder Eventbasierte Zeitschritte vorzusehen, um daraus genaue Fenster- oder Türöffnungszeiten ableiten zu können.

2.5.6. Detaillierte Leistungserfassung

Um die Auswirkungen der Energieströme in den Innenraum benennen und einordnen zu können, ist eine aufgeschlüsselte Erfassung der Leistungen die in den jeweiligen Typräumen umgesetzt werden nach Verbrauchern essenziell. Hierzu zählen die eingebrachten elektrischen Leistungen ebenso wie die Wärmeströme, die über die Fußbodenheizung oder die elektrischen Nachheizregister der dezentralen Lüftungsgeräte dem jeweiligen Typraum zugeführt werden. Wichtig ist dabei die getrennte Erfassung der einzelnen Energie- und Wärmeströme.

3. Fazit

Aus den Beobachtungen und Analysen lassen sich folgende, grundlegende Erkenntnisse ableiten, die einen ersten Hinweis auf mögliche Planungsempfehlungen geben. Da die zu Grunde liegenden Versuchsreihen

- einen vergleichsweise kurzen Zeitraum umfassen,
- ausschließlich die Übergangsjahreszeit abbilden,
- nur einen Klassenraum bzw. eine Schulklasse betrachten,
- von Maßnahmen zum Infektionsschutz („Corona-Ampel“) beeinflusst sind,

erscheint eine verlässliche Verallgemeinerung der Aussagen zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich. Dennoch lassen sich starke Tendenzen erkennen, aus denen sich mögliche Planungsempfehlungen herleiten lassen, die weiter zu validieren sind:

- Die implementierte Standard-Regelstrategie des dezentralen Lüftungsgerätes sollte durch intelligente, dezentrale Regelungsmechanismen ersetzt werden um Energie, Kosten und CO₂-Emissionen zu reduzieren und die Nutzerakzeptanz zu erhöhen.
- Die Simulationsergebnisse zeichnen durch das empfindliche Verhalten der Simulation gegenüber Störungen ein Bild, das die Realität weniger träge darstellt als sie es tatsächlich ist. Anlagen und baulichen Qualitäten in typischen Bauprozessen die auf Simulationen basieren, sind dadurch gegebenenfalls größer oder stärker dimensioniert als tatsächlich benötigt, und tragen so zum Performance Gap bei.
- Eine anwesenheitsgeführte Aktivierung des Lüftungsgerätes reduziert Verschleiß und Energieverbrauch, ohne die Innenraumluftqualität und den thermischen Komfort maßgeblich zu beeinträchtigen.
- Die Stand-By Bedarfe der Lüftungsgeräte sind hoch, eine Trennung vom Netz außerhalb der Nutzungszeiten bzw. der Präsenzerkennung reduziert den Energieverbrauch.

- Eine vereinfachte Nutzerinteraktion führt zu erhöhter Akzeptanz der mechanischen Lüftung, wodurch Fensteröffnungen und dadurch ungewollte Lüftungswärmeverluste reduziert werden können.
- Die mechanische Lüftung reduziert die Feinstaubkonzentration im Raum signifikant gegenüber natürlicher Belüftung.
- Eine optimierte, intelligente Regelung benötigt keine aufwändige Konnektivität (Bus-Systeme), sondern kann dezentral umgesetzt werden.
- Die Nutzermündigkeit sollte im Zentrum stehen, um eine hohe Nutzerakzeptanz zu schaffen und die Performance Gap von Gebäuden zu reduzieren
- Die tatsächliche Anzahl von Personen im Raum muss erfasst werden, um aus den Messergebnissen übertragbare und verallgemeinerbare Aussagen treffen zu können.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe MIN-INT stellen sich vielversprechend dar, eine reduzierte Grundversorgung ergänzt um kurzzeitig wirkende Nutzerinterventionen ermöglichen eine optimierte Betriebsweise, die Energieverbrauch, Kosten, Emissionen und Innenluftqualität, thermischen Komfort und Nutzerakzeptanz einbezieht.

In einem nächsten Schritt sollten die erarbeiteten Erkenntnisse auf einer breiteren Datenbasis aufgestellt und damit die oben genannten Hypothesen überprüft werden. Ergänzt durch eine mehrjährige Evaluation und Weiterentwicklung der eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten sowie der Nutzerinterfaces sollten übertragbare Handlungs- bzw. Planungsempfehlungen ermittelt werden, die dabei helfen, die erarbeiteten Erkenntnisse in die Breite zu tragen.

Literaturverzeichnis

Auer, Thomas; Franke, Laura (2019): Lowtech im Gebäudebereich. Robuste Architektur. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Fachsymposium TU Berlin (Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, Band 21). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2020/band-21-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Auer, Thomas; Vohlidka, Philipp; Zettelmeier, Christine (2020): The Right Amount of Technology in School Buildings. In: *Sustainability* 12 (3), S. 1134. DOI: 10.3390/su12031134.

BINE (Hg.) (2015): Nutzerverhalten bei Sanierungen berücksichtigen. Projektinfo 02/2015. Energieforschung konkret. E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen University. BINE Informationsdienst.

CarbonBuzz (Hg.) (2020): The Performance Gap. CIBSE Benchmark. RIBA, CIBSE. Online verfügbar unter <https://www.carbonbuzz.org/index.jsp#performancegap>.

Delzende, Elham; Wu, Song; Lee, Angela; Zhou, Ying (2017): The impact of occupants' behaviours on building energy analysis. A research review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, S. 1061–1071. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.264.

Djahanschah, Sabine; Nagler, Florian; Auer, Thomas (2017): DBU Bauband 2: Zukunftsfähiger Schulbau. 12 Schulen im Vergleich.

DIN EN 16798-1, März 2022: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6, zuletzt geprüft am 09.11.2022.

Hellwig, Runa Tabea (2005): Thermische Behaglichkeit: Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht. Dissertation. Technische Universität München, München.

Jazizadeh, Farrokh; Ghahramani, Ali; Becerik-Gerber, Burcin; Kichkaylo, Tatiana; Orosz, Michael (2013): Personalized Thermal Comfort-Driven Control in HVAC-Operated Office Buildings. Computing in Civil Engineering – Proceedings of the 2013 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering (218-225).

Kalz, Doreen E.; Pfafferott, Jens (2014): Thermal Comfort and Energy-Efficient Cooling of Nonresidential Buildings. Cham, s.l.: Springer International Publishing (Springer-Briefs in Applied Sciences and Technology). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-04582-5>.

köhler architekten + beratende ingenieure Gmbh (2021): Schulcampus Aschheim. Gesamtpläne. München.

Mahler, B.; Himmler, R. (2008): Evaluierung dezentraler außenwandintegrierter Lüftungssysteme. STZ-Projekt-Nr. 24306, DeAL-Projekt-Nr. 24306. Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A59010067X>.

OBB (2017): e% – Energieeffizienter Wohnungsbau. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellbauvorhabens. Unter Mitarbeit von Technische Universität München, Hochschule Augsburg, Hochschule Coburg. Hg. v. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr.

Rhein, Beate (2014): Robuste Optimierung mit Quantilmaßen auf globalen Metamodellen. Zugl.: Köln, Univ., Diss., 2014. Berlin: Logos-Verl.

Umweltbundesamt (Hg.) (2018): Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1990-2020 und erste Schätzungen 2021. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-stromsteigen>.

Zinner, Tobias; Garhammer, Markus (2022): Wetterdaten München. Hg. v. Meteorologisches Institut der LMU. Ludwig Maximilians Universität München. München. Online verfügbar unter www.meteorologie.lmu.de.

A. Anhang Tabellen

Tabelle A-1: Messorte und Messparameter Schulgebäude

Messort	Untereinheit	Messparameter
Wetterstation	Dach, unverschattet	T_AUL
		rel Feuchte
		Strahlung glob
		Strahlung diff
		Luftdruck
		Windrichtung
		Windgeschwindigkeit
		Niederschlagsmenge
Übergabestation FW	Primärseitig	T_VL
		T_RL
		Massenstrom
		Wärmemengenzähler
	Sekundärseitig	T_VL
		T_RL
		Massenstrom
		Wärmemengenzähler
		Stellsig. Pumpe
		P_Pumpe
Wärmepumpe	Primärseitig	P_Wärmepumpe
		COP_WP
		T_VL
		T_RL
		Massenstrom
		Wärmemengenzähler
		Stellsig. Pumpe
	Sekundärseitig	P_Pumpe
		T_VL
		T_RL
		Massenstrom
		Wärmemengenzähler
		Stellsig. Pumpe
		P_Pumpe
Grundwasserkühlung	Primärseitig	T_VL
		T_RL
		Massenstrom
		Wärmemengenzähler
		Stellsig. Pumpe
		P_Pumpe
	Sekundärseitig	T_VL
		T_RL
		Massenstrom
		Wärmemengenzähler
		Stellsig. Pumpe
		P_Pumpe
PV-Anlage		P_Erzeugung
		P_Eigennutzung
		P_Einspeisung

Tabelle A-2: Messorte und Messparameter Typräume

Messort	Untereinheit	Messparameter
Typraum	Decke (Ebene Pult, Mittig)	T_Luft
	Decke (Ebene Pult, Mittig)	CO2
	Decke (Ebene Pult, Mittig)	rel Feuchte
	Decke (Ebene Pult, Mittig)	dB
	1.7 m Höhe (Ebene Pult, Wand zum Gebäudekern)	T_Luft
	1.7 m Höhe (Ebene Pult, Wand zum Gebäudekern)	CO2
	1.7 m Höhe (Ebene Pult, Wand zum Gebäudekern)	rel Feuchte
	Fussboden (Ebene Pult, Mittig)	T_Boden_Oberfläche
	Fenster 1	Fensteröffnung
	Fenster 2	Fensteröffnung
	Fenster 3	Fensteröffnung
		Präsenz
		Leistungsaufnahme_Beleuchtung
	Leistungsaufnahme_Steckdosen (Verbrauch Schüler)	
	Leistungsaufnahme_Lehrerpult/Smartboard (Verbrauch Lehrkraft)	
	Leistungsaufnahme_Putzsteckdose	
	Leistungsaufnahme_Raumautomation	
Lüftungsgerät		Stellsig. Ventilator ZUL
		Stellsig. Ventilator ABL
		Volumenstrom_ZUL
		Volumenstrom_ABL
		Druckdiff ZUL
		Druckdiff ABL
		Stellsig. Bypass
		T_ZUL
		T_nach_WRG (abh. v. Aufbau Gerät)
		T_nach_Heizregister (abh. v. Aufbau Gerät)
		Leistungsaufnahme_Heizregister
	Leistungsaufnahme_Lüftungsgerät ges	
Fussbodenheizung/Kühlung (raumweise je Typraum)		T_VL
		T_RL
		Massenstrom_VL
		Ventilstellung 2-Wege-Vent
		Wärmemengenzähler (incl. Kälte..)
		Taupunktfühler
Fussbodenheizung/Kühlung (Verteilkreis)		Stellsign. Pumpe
		Massenstrom Pumpe
		Ventilstellung 3-Wege-Vent
		Druckdiff Pumpe
		Leistungsaufnahme_Pumpe