

Living Lab Gebäudeperformance – Sachbericht

Förderkennzeichen EFRE-0400129

Laufzeit 1.11.2017 – 31.10.2020

Projektnehmer

Bergische Universität Wuppertal
Pauluskirchstraße 7
42285 Wuppertal

Projektleitung

Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Fachgebiet Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung
Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss

Projektgruppe

Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen

Fachgebiet Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung
Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss, Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders,
M.Sc. Nils Nengel, M.Eng. Malin Berges, M.Sc. Ahmad Iravani

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders, M.Sc. Ahmad Iravani

Fachgebiet Baubetrieb
Dr.-Ing. habil. Anica Meins-Becker, M.Sc. Michael Zibell

Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, M.Sc. Mahjar Wazifehdust, Dipl.-Ing. Marco Tafuro,
M.Sc. David Cano-Tirado, M.Sc. Maximilian Hendrik Forchheim

Das Projekt wurde gefördert durch die europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) „Investitionen in Wachstum und Beschäftigung“ in Verbindung mit Landesmitteln des Ministeriums für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen (MHKBG NRW)

Wuppertal, den 28. März 2021



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Kurzfassung

Der Energieverbrauch und die Klimagasemissionen aus dem Gebäudebestand sind für die Energiewende und den Klimaschutz sowohl in Europa und bundesweit als auch für NRW von zentraler Bedeutung. Bund und Land streben einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 an. Für den Neubau werden diese Themen in der Planungsphase durch die gesetzlichen Anforderungen weitestgehend abgebildet (u.a. Gebäude-Energiegesetz 2020), beim Bestand geht es zumeist um eine höhere Sanierungsquote und -tiefe.

Ausgangspunkt für das Projekt war die These, dass zusätzliche Potentiale zur Emissionsminderung in einem verbesserten und konsequenteren Betreiben und Nutzen von Gebäuden liegen. Gegenstand der Untersuchung dazu waren Nichtwohngebäude im Bestand. Sie machen direkt und indirekt rund 15% der der Klimagasemissionen in Deutschland aus. Oft werden einer Gebäudeplanung keine in der Betriebsphase überprüfbaren Umweltqualitätsziele hinterlegt. Vielfach gehen wertvolle Informationen aus der Planung durch eine nicht durchgängige Informationshaltung für die Betriebsphase verloren. Eine konsequente Dokumentation der Energie- und Umweltperformance von Gebäuden im Betrieb ist heute eher die Ausnahme als die Regel. Die messtechnische Ausstattung der meisten Gebäude ist für diese Art der Qualitätssicherung nicht geeignet und auch unzureichend, um die Betriebsführung im Hinblick auf einen geringen Energieverbrauch und die Decarbonisierung der Energieversorgung zu optimieren.

Die Energiewende verändert durch den stark gewachsenen Anteil erneuerbarer Energien (2020: 50%¹) die Art der Interaktion von Gebäuden mit dem Stromnetz. Neben der Einspeisung durch lokale Eigenstromerzeugung stellt sich in unterschiedlichen Zeitmaßstäben die Frage der Anpassung des Verbrauchs an die Anforderungen des Netzes. Hierauf nimmt auch die 2018 erfolgte Neufassung der „Energy Performance Directive“ der EU mit der Einführung des „Smart Readiness Indikator“ Bezug².

Vor diesem Hintergrund war es Ziel des über drei Jahre durchgeführten Vorhabens „Living Lab Gebäudeperformance“ auf unterschiedlichen Ebenen relevante Einflüsse auf die Verbesserung der Gebäudeperformance von bestehenden Nichtwohngebäuden zu untersuchen sowie die Infrastruktur für weitere Untersuchungen an der Universität Wuppertal zu verbessern. Dazu wurde das Vorhaben in dem Wettbewerb „Forschungsinfrastrukturen“ 2016 eingereicht und 2017 bewilligt. Aufbauend auf den Kompetenzen der beteiligten Forschungsgruppen erfolgte die Bearbeitung in drei inhaltlichen Teilbereichen. Das Arbeitspaket Building Information Modeling (BIM) widmete sich dem Beitrag einer zukünftig verbesserten Informations- und Datenhaltung für den Gebäudebetrieb. Mit dem Arbeitspaket Simulation und Monitoring (SIMON) wurde untersucht, welcher Aufwand damit verbunden ist, durch gezielten Einsatz von Messungen im realen Gebäudebetrieb die Gebäude- und Umweltperformance zu verbessern. Zusätzlich wurden damit zusammenhängende

¹ <https://energy-charts.info>

² https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

Verbesserungen der experimentellen Einrichtungen am Campus Haspel der Universität Wuppertal durchgeführt. Der Schwerpunkt des Arbeitspaketes GRID lag auf der Planung und Realisierung des Netz-Automatisierungs-Labors am Campus Freudenberg der Universität Wuppertal zur experimentellen Abbildung der Gebäude-Netz-Interaktion mit möglichst realen Lastfällen. Gegenstand eines übergreifenden Arbeitstaktes Transfer (TRANS) waren die Bearbeitung der Themen anhand von mehreren realen Gebäuden, die Übertragung in Impulse für die Aus- und Weiterbildung sowie die projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden im Arbeitspaket BIM die Integration und Vernetzung der relevanten Daten für die BIM-gestützte Betrachtung der Gebäudeperformance untersucht, Konzepte zur Umsetzung entwickelt und für das Gebäude HC am Campus Haspel auf Demonstrationsebene umgesetzt. Im ersten Schritt wurde basierend auf bestehenden 2D-Plänen gemäß einer abgestimmten Modellierungsrichtlinie das Soll-Bauwerksinformationsmodell erstellt. Das Soll-Bauwerksinformationsmodell ist ein objektorientiertes dreidimensionales Bauwerksinformationsmodell unter Anwendung der Methode BIM und beinhaltet im ersten Schritt Basisinformationen, die unabhängig von der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ sind. Im nächsten Schritt wurden mittels Laserscanner und Drohne Punktwolken zum bestehenden Gebäude HC am Campus Haspel aufgenommen und zu einem Ist-Punktwolkenmodell zusammengefügt. Im Anschluss erfolgte der Abgleich mit dem Soll-Bauwerksinformationsmodell in Form der As-Built-Kontrolle. Das Ergebnis liefert die Basis für den digitalen Zwilling des „Living Labs Gebäudeperformance“. Um die in den Arbeitspaketen SIMON und GRID beschriebenen Aufgaben, z.B. Simulation und Monitoring von Raumklima und Simulation von Gebäudenetzinteraktion durchführen zu können, wurde ein Konzept zur Informationsvernetzung und die zugehörigen Informationsanforderungen definiert und im Rahmen der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ dokumentiert. Hierbei wurde die Frage beantwortet „wer welche Informationen zu welchem Zeitpunkt in welchem Format dem Bauwerksinformationsmodell hinzufügen muss, damit die in SIMON und GRID beschriebenen Aufgaben auch erfüllt werden können“. Gleichzeitig wurde ein Konzept zur Gewährleistung des digitalen Informationsaustauschs zwischen den Beteiligten zur Umsetzung der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ entwickelt und auf Demonstrationsebene umgesetzt. Im Ergebnis entstand der digitale Zwilling des Gebäudes.

Im Rahmen von Recherchen und Querschnittsuntersuchungen wurden im Arbeitspaket SIMON geeignete Werkzeuge für Laborversuche, Feldmessungen und Simulationen evaluiert und für die Projektarbeiten ausgewählt. Experimentelle Einrichtungen für die in-situ Messungen des Wärmeschutzes von Bauteilen oder das Raumklima wurden erweitert und für Laborversuche in Vorbereitung zu Feldmessungen an Gebäuden genutzt. Die im Rahmen des Vorhabens realisierte Solarstromanlage am Gebäude HC des Campus Haspel trägt als Bestandteil des „Living Lab HC“ seit Juni 2020 dazu bei, den Strombezug des zentralen Gebäudes bei voller Eigenbedarfsdeckung um etwa 10% zu reduzieren. Für das neue Hauptgebäude am Campus Haspel und vier weitere Pilotprojekte wurden relevante Informationen wie Pläne, Nachweise und vorhanden Datenpunkte der Gebäudeautomation ermittelt. Die vier Gebäude zeichnen sich durch grundlegend unterschiedliche Energie- und Lüftungskonzepte aus, was sich in den umfangreichen Ergebnissen aus der Analyse der durchgeführten Energie- und Raumklimamessungen widerspiegelt. Diese Ergebnisse wurden mit den Erwartungen aus Rechenverfahren oder Regelwerken verglichen und zu detaillierten,

projektbezogenen Erfahrungsberichten und Handlungsempfehlungen zusammengestellt. In Einzelfällen konnten bereits Interventionen durchgeführt und evaluiert werden. Beispielhaft dafür steht die Anwendung von CO₂-Ampeln bei einem allein über Fenster gelüfteten Gebäude. Ein weiteres Projekt im Planungsstadium wurde im Sinne einer verbesserten Zieldefinition begleitet.

Während die energetischen Soll-/Ist-Vergleiche bei drei Projekten einen in der Praxis unverhältnismäßig hohen Aufwand bedeuteten, zeigten sich wesentliche Vorteile im Falle eines Gebäudes mit klar dokumentierter Zieldefinition und einer von Beginn an für das Monitoring ausgelegten Gebäudeautomation (best practice Beispiel). Zur Reduktion des Aufwands erscheint es nach den gemachten Erfahrungen zielführend, einheitliche Schnittstellen und Solldatenpunkte für Gebäudeautomationssysteme in Nichtwohngebäuden einzuführen sowie standardmäßig Betriebsergebnisse als Teil des Facility Managements zu dokumentieren und zu analysieren. Eine gebäudescharfe Energieerfassung ist dazu zwingend notwendig. Sofern überprüfbare Zielsetzungen für Gebäude vorgenommen wurden, kann damit ihre Einhaltung kontinuierlich überprüft und es kann ggf. im Sinne eines Klimaschutzfahrplans nachgesteuert werden.

Es liegen heute vielfältige Erfahrungen mit dem Gebäudemonitoring vor. Das gilt für Hochschulen ebenso wie für Vorreiter in der Immobilienbranche und bei den Kommunen. Für die breite Einführung des Monitorings der Energie- und Umweltperformance von Gebäuden muss es gelingen, die Kosten/Nutzen-Relation zukünftig deutlich zu verbessern. Fehlende Standards haben zu einer unübersichtlichen Vielfalt von Lösungen im Gebäudebestand und damit zu hohem Ressourceneinsatz für eine nachträgliche Datenübertragung geführt. Analyse- und Qualitätssicherungsverfahren müssen noch mehr automatisiert werden. Der Nutzen des Monitorings erhöht sich dann, wenn Klimaschutzfahrpläne als Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele in NRW und ganz Deutschland zur Verpflichtung werden. Ohne eine geeignete Datenbasis sind solche Pläne nicht glaubhaft zu erstellen und zu überprüfen. Die Politik ist aufgefordert, eine Monitoringpflicht gesetzlich einzuführen und darauf basierend Klimaschutzplanungen für den Bestand einzufordern. Hierfür gibt es erste Beispiele³.

Die durchgeführten Messungen zum Raumklima haben deutlich gemacht, wie sehr Lüftungskonzepte, Sonnenschutzart und Nutzerverhalten die Ergebnisse prägen. Mit temporäre Messungen in Gebäuden können Maßnahmen ermittelt werden, die die raumklimatischen Verhältnisse verbessern. Die Erfahrungen mit der dazu eingesetzten Messtechnik waren überwiegend positiv. Mit dem Einsatz von CO₂-Ampeln als Intervention konnte in einem Projekt nachgewiesen werden, dass sich damit speziell die winterliche Luftthygiene signifikant verbessern lässt. Dies wird daher als eine zielführende Maßnahme bei Bestandsgebäuden mit alleiniger Fensterlüftung betrachtet. Beim sommerlichen Raumklima werden zukünftig Anpassungsmaßnahmen bei vielen Bestandsgebäude erforderlich, um die Raumtemperaturen auch unter den Verhältnissen des Klimawandels sinnvoll zu begrenzen.

³ https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/8000/16_8993_D.pdf

Zur Evaluierung eines flexiblen Gebäudebetriebs im elektrischen Verteilnetz, wurde das Netz-Automatisierungs-Labor im Rahmen des Arbeitspaketes GRID aufgebaut. In diesem wurden Niederspannungsleitungen verlegt, die über einen Topologie-Schrank zu beliebigen Netzkonfigurationen zusammen geschaltet werden, um verschiedene übliche Netztypologien nachbilden zu können. Weiterhin wurden steuerbare Komponenten wie 4-Quadranten Umrichter, Lastbänke und ein Längsspannungsregler aufgebaut, um in den Netzzustand dynamisch eingreifen zu können. Diese Komponenten sind dazu geeignet, das Leistungsverhalten eines Gebäudes zu spiegeln. Die bereits vorhandenen Ladesäulen für Elektrofahrzeuge und die bestehende PV-Anlage wurden an das Labor angebunden. Mithilfe der installierten Messtechnik kann der Netzzustand überwacht werden. Alle beschriebenen Komponenten wurden abschließend mithilfe von Kommunikationstechnik an ein selbst entwickeltes SCADA-System angeschlossen und somit ein zentrales Steuerungssystem für das Labor geschaffen.

Zur Evaluierung eines dynamischen Gebäudebetriebes vom Gebäude HC des Campus Haspel wurden Daten der Gebäudeleitechnik über eine Schnittstelle bereitgestellt und ausgewertet. Diese Daten wurden in einer Datenbank gespeichert. Mit den Daten in dieser Datenbank konnte ein vereinfachtes Gebäudesimulationsprogramm validiert werden, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde. Mithilfe dieser Gebäudesimulation konnte der Einfluss eines flexiblen Gebäudebetriebs auf die Personen im Gebäude bewertet werden. Die Ergebnisse dieser Bewertung zeigten, dass ein kurzzeitiger flexibler Betrieb keine Auswirkungen auf die Behaglichkeitskriterien im Gebäude hat. Gleichzeitig ergaben sich Leistungsflexibilitäten, die dem elektrischen Verteilnetz bereitgestellt werden können. Abschließend wurde ein Netzdienstleistungsindikator entwickelt der kennzeichnet, wie netzdienstlich sich ein Gebäude verhält. Dieser konnte im Netz-Automatisierungslabor validiert werden, indem der Einfluss eines flexiblen Gebäudes auf den Netzzustand ausgewertet wurde. Eine Verpflichtung zur Installation von Solarstromanlagen beim Neubau und Bestand kann im Zusammenhang mit einer positiven Gebäude-Netz-Interaktion wesentliche Impulse zur Decarbonisierung bringen. Die Entwicklungen stehen jedoch erst am Anfang.

Im Kontext des Arbeitspaketes Transfer wurden die Projektinhalte mit einem Symposium 2019 sowie einem Webinar 2021 vorgestellt. Die Inhalte der Forschungsarbeit zusammen mit den erweiterten und neuen Forschungsinfrastrukturen an der Universität Wuppertal wurden und werden in Lehrformate der universitären Ausbildung an den beteiligten Fakultäten einbezogen. Das Vorhaben gab darüber hinaus wesentliche Impulse für das inhaltliche Profil eines zukünftigen Weiterbildungsstudiengangs „Nachhaltiges Bauen“.

Um die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ breiter einsetzen zu können, soll sie in der Praxis validiert werden und bestenfalls als abgestimmter Standard der Praxis zur Verfügung gestellt werden. Die methodischen Erfahrungen im Bereich der Raumklimaanalysen fließen in neue Projektarbeiten bereits ein, so dass die Erkenntnistiefe erweitert wird. Die wichtige Wirkung des Nutzerverhaltens in Bezug auf das sommerliche Raumklima wird im Rahmen einer Dissertation und unter Nutzung der erweiterten experimentellen Infrastruktur am Campus Haspel weiterverfolgt. Für den Bereich der Gebäude-Netz-Interaktion konnte das Folgeprojekt „InFlex“ im Rahmen der EFRE-Förderung bereits Ende 2019 begonnen werden. Hierbei wird auf die erfolgreiche Zusammenarbeit der Lehr- und Forschungsgebiete Elektrotechnik sowie Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung aufgebaut.

Inhalt

1	Einleitung	11
2	Building Information Modeling	12
2.1	Aufbau des geplanten LivingLabs (Soll-Bauwerksinformationsmodell)	14
2.1.1	Beschaffung und Prüfung vorhandener Planunterlagen	14
2.1.2	Grundlagen	15
2.1.3	Zusammenfassung und Lessons Learned.....	16
2.2	Aufnahme der Geometrie des realen Living Labs (Ist-Punktwolkenmodell) und Abgleich mit dem Soll-Bauwerksinformationsmodell (As-Built-Kontrolle).....	16
2.2.1	Laserscanning der Räume	17
2.2.2	Laserscanning der Gebäudehülle.....	19
2.2.3	Zusammenführung der Scans zu einer Projektpunktwolke	20
2.2.4	Gegenüberstellung Soll-Bauwerksinformationsmodell und Ist – Punktwolkenmodell (Geometrie).....	23
2.2.5	Zusammenfassung und Lessons Learned.....	24
2.3	Entwicklung des Konzepts zur Informationsvernetzung anhand der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“.....	24
2.3.1	Kontext einer BIM-Anwendung.....	25
2.3.2	Prozesse einer BIM-Anwendung	26
2.3.3	Beschreibung der BIM-Anwendung Gebäudeperformance.....	27
2.3.4	Fachliche Prozesse der BIM-Anwendung Gebäudeperformance	29
2.3.5	Umsetzungsmöglichkeiten der fachlichen Prozesse mit BIM	30
2.3.6	Identifizierte Informationsanforderungen	32
2.3.7	Erweitern des Ist-Bauwerksinformationsmodells um die Merkmale aus der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“.....	33
2.3.8	Zusammenfassung und Lessons Learned.....	33
2.4	Entwicklung eines Konzepts für eine Datenaustauschschnittstelle der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“	34
2.4.1	Aufbau des Demonstrators.....	36
2.4.2	Integration des Ist-Bauwerksinformationsmodells.....	36
2.4.3	Integration der Monitoring-Daten.....	37
2.4.4	Bereitstellung der Daten mit Bauwerksinformationsmodellen	39
2.4.5	Zusammenfassung und Lessons Learned.....	40
3	Simulation und Monitoring	41
3.1	Querschnittsuntersuchungen und Methodik	41

3.2	U-Wert Messung im Bestand.....	44
3.2.1	Langzeitmessungen an der Außenwand des Wärmelabors.....	44
3.2.2	Kurzzeitmessungen an Schulgebäuden in Hagen	46
3.2.3	Parameterstudien in der Klimakammer	47
3.2.4	Klimakammerversuche.....	48
3.3	Experimentelle Raumzelle.....	50
3.4	Pilotprojekte	51
3.4.1	LivingLab Gebäude HC.....	53
3.4.1.1	Raumklima.....	53
3.4.1.2	Übertemperaturstunden	57
3.4.1.3	Morgendliche CO ₂ Konzentration vor Arbeitsbeginn.....	57
3.4.1.4	Energieperformance.....	58
3.4.1.5	Erkenntnisse	64
3.4.2	Kreisverwaltung Mettmann.....	66
3.4.2.1	Raumklimaperformance	66
3.4.2.2	Sommerlicher Wärmeschutz	70
3.4.2.3	Morgendliche CO ₂ Konzentration vor Arbeitsbeginn.....	72
3.4.2.4	CO ₂ -Ampeln.....	73
3.4.2.5	Energieperformance.....	75
3.4.2.6	Erkenntnisse	78
3.4.3	Kreishaus Siegen-Wittgenstein	79
3.4.3.1	Raumklimaperformance	80
3.4.3.2	Übertemperaturstunden	83
3.4.3.3	Raumklimabedingungen vor Arbeitsbeginn	83
3.4.3.4	Morgendliche Raumtemperaturen vor Arbeitsbeginn.....	84
3.4.3.5	Erkenntnisse	85
3.4.4	Bürogebäude Goblet Lavandier & Associés, Luxemburg.....	87
3.4.4.1	Raumklimaperformance	87
3.4.4.2	Energieperformance.....	91
3.4.4.3	Erkenntnisse	94
3.4.5	Hauptverwaltung WSW Wuppertal	95
3.4.6	Ausblick.....	96
4	Gebäude-Netz-Interaktion	98
4.1	Netzautomatisierungslabor.....	98
4.1.1	Aufbau, Komponenten und Messtechnik.....	98

4.1.2	Kommunikation zwischen Labor und Komponenten	101
4.1.3	Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche zur Steuerung des Testnetzes 103	
4.1.4	Anwendungsfälle	106
4.2	Netzdienliche Potenzialanalyse des Gebäudes HC	107
4.2.1	Erzeugung charakteristischer Typtage auf Basis historischer Messdaten.....	108
4.2.2	Modellierung des Gebäudes und dessen relev. techn. Komponenten	110
4.2.3	Definition eines Netzdienlichkeitsindikators	115
4.2.4	Validierung der potentiellen Netzdienlichkeit	116
5	Schnittstellen	118
5.1	Schnittstelle Gebäudeperformance	118
5.2	Schnittstelle Management	118
5.3	Schnittstelle Soll-Daten	119
5.4	Schnittstelle Vergleich	119
6	Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse	120
6.1	Projektbeirat	120
6.2	Veranstaltungen	120
6.3	Lehre und Weiterbildung	121
6.3.1	Ausbildung	121
6.3.2	Weiterbildung	123
6.4	Wissenschaftlich-fachlicher Anschluss und Veröffentlichungen	123
6.5	Schutzrechte	125
7	Literaturverzeichnis	126
8	Anhang	128



1 Einleitung

Der Energieverbrauch und die Klimagasemissionen aus dem Gebäudebestand sind für die Energiewende und den Klimaschutz sowohl Europa und bundesweit als auch für NRW von zentraler Bedeutung. Bund und Land streben einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 an. Für den Neubau werden diese Themen in der Planungsphase durch die gesetzlichen Anforderungen weitestgehend abgebildet (u.a. Gebäude-Energiegesetz 2020), beim Bestand geht es um eine höhere Sanierungsquote und Sanierungstiefe.

Wesentliche und zu wenig beachtete Potentiale liegen in einem verbesserten Betreiben und Nutzen von Gebäuden. Das gilt insbesondere für Nichtwohngebäude. Sie machen rund 40% der Emissionen aus dem Gebäudebestand aus. Einerseits fließen die Belange derer, die für den Gebäudebetrieb verantwortlich sind, zu wenig in die Planung ein. Andererseits gehen wertvolle Informationen aus der Planung durch eine nicht durchgängige Informationshaltung für die Betriebsphase verloren. Eine konsequentes Energie- und Umweltmonitoring mit jährlicher Berichtspflicht im Bestand ist bisher noch nicht verpflichtend eingeführt. Die Anforderungen der Energiewende auf der Netzseite werden bisher noch nicht für den Gebäudebetrieb berücksichtigt. Die messtechnische Ausstattung der meisten Gebäude ist zur Qualitätssicherung nicht geeignet. Sie ist auch unzureichend, um Fehler früh zu erkennen und die Inbetriebnahme/Betriebsführung im Hinblick auf einen geringen Energieverbrauch und die Decarbonisierung der Energieversorgung zu optimieren.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel des über drei Jahre durchgeführten Vorhabens „Living Lab Gebäudeperformance“ und seiner Teilprojekte, durch Informationsvernetzung (BIM), Definition und Überprüfung von Gebäudequalitäten sowie eine kontinuierliche Qualitätssicherung exemplarisch Methoden aufzuzeigen, mit denen die Performance von Nichtwohngebäuden im Betrieb verbessert (SIMON) und die Umweltbelastung durch eine effiziente Decarbonierung der Energieversorgung reduziert wird (GRID), siehe Abb. 1. Dazu gehört als zentraler Baustein der Ausbau der dazugehörigen Forschungsinfrastruktur an der Bergischen Universität Wuppertal. Eine gemeinsame Transferstrategie bildet ein übergeordnetes Teilprojekt (TRANS).

Die beteiligten Akteure der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen widmen sich bereits in zahlreichen Projekten der Informationshaltung im Bauwesen sowie der Simulation und dem Monitoring der Gebäudeperformance. Bei der Energieperformance wird die Schnittstelle zu den Stromnetzforschern der Fakultät Elektrotechnik bedient. In allen Bereichen war eine Basisinfrastruktur mit Testeinrichtungen, Tools und Geräten vorhanden.

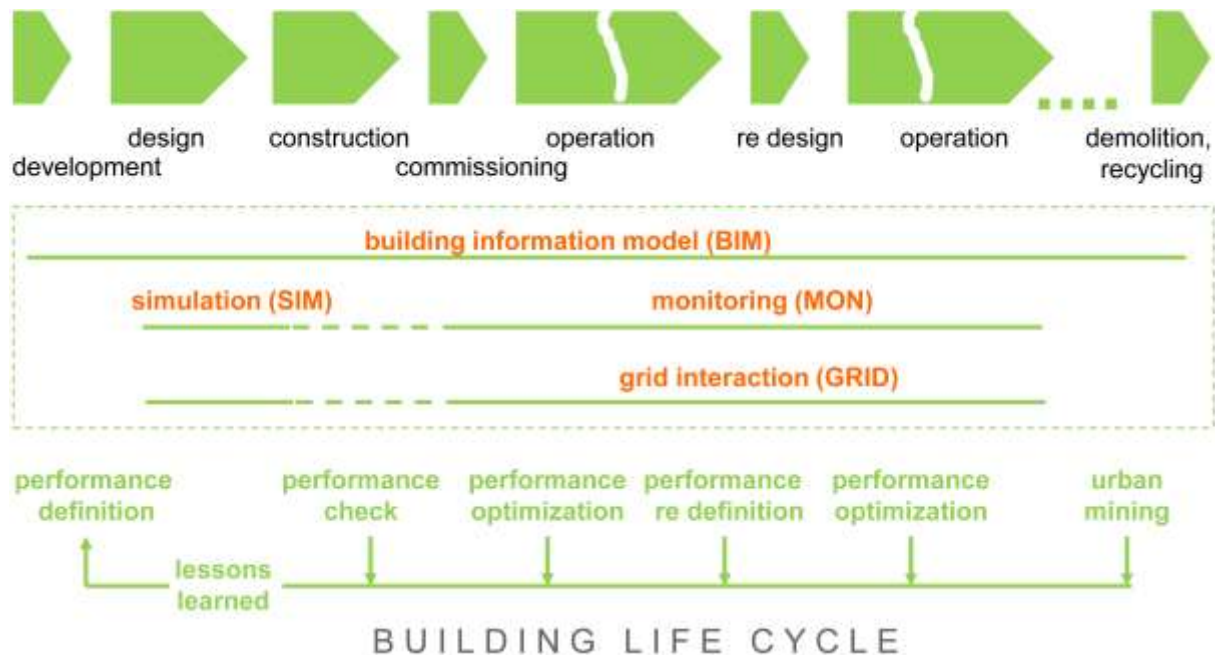


Abb. 1: Lebenszyklusbetrachtung eines Gebäudes mit Darstellung der Teilprojekte und deren Beiträge zur Verbesserung der Gebäudeperformance. Quelle: Bergischen Universität Wuppertal

Die nachfolgende Dokumentation der Ergebnisse orientiert sich jeweils an den Teilprojekten. Das Kapitel 2 thematisiert den Kontext und die durchgeführten Arbeiten auf dem Gebiet des „Building Information Modeling“. Bei der Darstellung der Arbeiten auf dem Gebiet „Simulation und Monitoring“ innerhalb Kapitel 3 wurden neben den methodischen Arbeiten und Arbeiten mit den im Rahmen des Projektes erweiterten Versuchseinrichtungen bereits die Ergebnisse für die fünf Pilotprojekten als Anwendungsfälle einbezogen. Kapitel 4 widmet sich als Schwerpunkt dem Aufbau des Netz-Automatisierungslabors an der Universität Wuppertal, Campus Freudenberg, und zeigt erste Anwendungen zur Erforschung eines netzdienlichen Gebäudebetriebs am Beispiel des Neubaus am Campus Haspel. In einem separaten Kapitel 5 wird die Interaktion der drei Kernarbeitspakete erläutert.

Das finale Kapitel 6 zeigt auf, welche Art der Öffentlichkeitsarbeit durchgeführt wurde, wie der Transfer in die Aus- und Weiterbildung erfolgte bzw. nachfolgend vorgesehen ist und welcher wissenschaftlich-fachliche Anschluss vorgesehen ist.

2 Building Information Modeling

Die Betrachtung der Gebäudeperformance – vor allem im Betrieb von Nichtwohngebäuden – ist in der Praxis mehreren Hemmschwellen zur sinnvollen Umsetzung ausgesetzt. Einerseits fließen die Belange derer, die für den Gebäudebetrieb verantwortlich sind, zu wenig in die Planung ein. Andererseits gehen wertvolle Informationen aus der Planung durch eine nicht durchgängige Informationshaltung für die Betriebsphase verloren. Mit der Methode Building Information Modeling (BIM) bieten sich im Rahmen der Digitalisierung neue Möglichkeiten die beiden genannten Aspekte effizient umzusetzen und zugleich vertraglich zu verankern. Über die digitale Datenhaltung und -Weitergabe können Informationsverluste in Projekten

vermieden und Leistungen besser koordiniert werden. Zugleich bewirkt die dafür notwendige Planung eine intensivere Betrachtung von Zielsetzungen für den Gebäudebetrieb.

Trotz der zentralen Rolle für die Digitalisierung der Bau- und Immobilienwirtschaft ist der Begriff des Building Information Modeling bis zum jetzigen Zeitpunkt in der einschlägigen Literatur nicht allgemeingültig definiert. Aus diesem Grund hat das Forschungsteam im Rahmen des Forschungsprojektes nachfolgenden Fokus festgelegt:

*Building Information Modeling (BIM) bedeutet die Integration und Vernetzung aller **relevanten Daten** eines Bauwerks in bzw. mit einem virtuellen Datenmodell während des **gesamten Lebenszyklus**, also von der Konzeption, Planung und Realisierung bis zur Nutzung und zum Abbruch.*

Die Betonung liegt zum einen auf der Relevanz der Daten, da es nicht darum geht, pauschal alle Bauwerksdaten im Rahmen eines Bauwerksinformationsmodells zu speichern und auszutauschen. Wesentlich ist die Frage, welche Daten wann mit welchem Detaillierungsgrad von wem erzeugt und an wen weitergegeben werden müssen. Die Beantwortung der Frage kann nur über die klare Festlegung von auszuübenden Tätigkeiten und deren Informationsbedarf erfolgen. Zum anderen liegt der Fokus auf dem Begriff des Lebenszyklus, da bereits in frühen Phasen relevante Informationen für spätere Phasen erzeugt werden. In diesem Zusammenhang ist auch die Verknüpfung von Daten aus unterschiedlichen Datenpools relevant, da nicht alle Daten zwangsläufig unmittelbar im Bauwerksinformationsmodell enthalten sein sollen und müssen. Der Lebenszyklus einer Liegenschaft – oder im engeren Sinne einer Immobilie – stellt zugleich die oberste Instanz der Abläufe dar. Er wird im weiteren Dokument in fünf Lebenszyklusphasen gemäß Abb. 2 untergliedert.

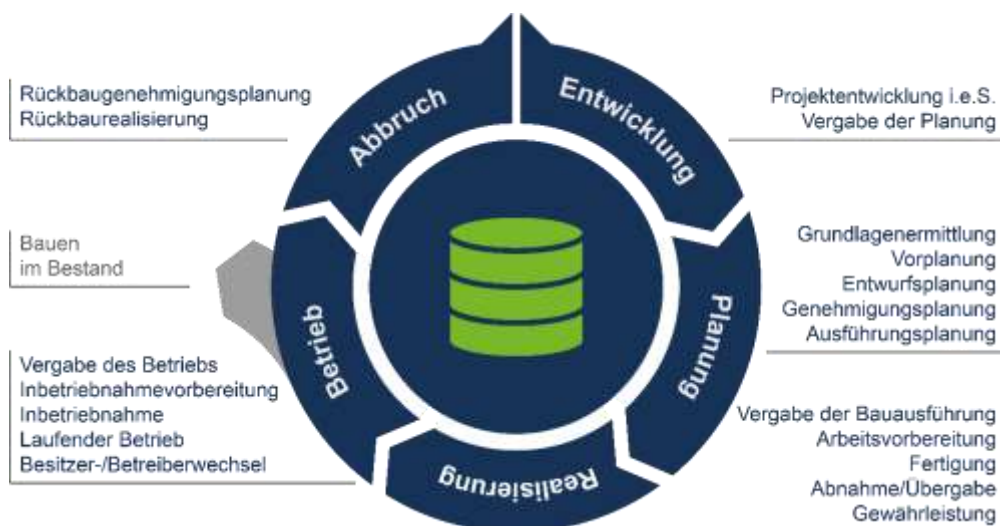


Abb. 2: Lebenszyklus. Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

Im Rahmen des Forschungsprojektes hat das Arbeitspaket BIM die Integration und Vernetzung der relevanten Daten für die BIM-gestützte Betrachtung der Gebäudeperformance untersucht. Dazu gehören

- Aufbau des geplanten LivingLabs (Soll-Bauwerksinformationsmodell), Kap.2.1
- Aufnahme der Geometrie des realen Living Labs (Ist-Punktwolkenmodell) und Abgleich mit dem Soll-Bauwerksinformationsmodell (As-Built-Kontrolle), Kap. 2.2,
- Entwicklung des Konzepts zur Informationsvernetzung anhand der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“, Kap. 2.3
- Entwicklung eines Konzept zur Gewährleistung einer allgemein gültigen Datenaustauschnittstelle zur Umsetzung der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“, Kap. 2.4.

2.1 Aufbau des geplanten LivingLabs (Soll-Bauwerksinformationsmodell)

Das Soll-Bauwerksinformationsmodell ist ein objektorientiertes dreidimensionales Bauwerksinformationsmodell zur Anwendung der Methode BIM und beinhaltet im ersten Schritt Basisinformationen, die unabhängig von der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ sind. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde es exemplarisch für das Gebäude HC am Campus Haspel der Bergischen Universität Wuppertal umgesetzt. Es handelt sich hierbei um ein Bestandsgebäude, welches ohne Anwendung der Methode BIM realisiert wurde. Für eine umfängliche Betrachtung von Gebäudeperformance mit BIM, ist jedoch ein entsprechendes Modell erforderlich. Daher ist das vorliegende Soll-Bauwerksinformationsmodell auf Grundlage der originalen Projektunterlagen nachträglich modelliert worden.

Die Erkenntnisse aus dem gegenständigen Projekt sind zusätzlich in eine „Modellierungsrichtlinie“ des Lehr- und Forschungsgebietes Baubetrieb und Bauwirtschaft eingeflossen. Diese ist auf der Seite des BIM-Instituts der Bergischen Universität Wuppertal im Downloadbereich frei abrufbar⁴.

2.1.1 Beschaffung und Prüfung vorhandener Planunterlagen

Im Vorfeld der Modellierung des Bauwerksinformationsmodells wurden die beschafften Planunterlagen gesichtet und katalogisiert. Folgende Pläne standen u.a. zur Verfügung: Architekturplanung, Melderplanung, Feuerwehrlaufkarten, Informationen zu Netzwerkschränken, Funktionsschemata des EDV-Netzes, Raumluftechnik, Kältetechnik, Heizungstechnik, Heiz- und Kühldecken, Brandschutzklappen, Brandschutzplanung, Einspeisung Netzüberwachung, Lüftungstechnik, Gebäudeautomationsinformationsliste, Beleuchtung, Abluft.

⁴ vgl. https://biminstitut.uni-wuppertal.de/fileadmin/biminstitut/Download-Bereich/Forschungsprojekte-Modellierungsrichtlinie/MRL_20200925_Modellierungsgrundlagen.pdf

2.1.2 Grundlagen

Die Modellierung erfolgte im iterativen Austausch mit dem AP SIMON, um den Belangen der dort vorgesehenen Untersuchung der Simulationen von Gebäudeperformance auf Basis von Bauwerksinformationsmodellen gerecht zu werden. Dieser Schritt ist ebenfalls in der Planungsphase einzuordnen und stellt aus technischer Sicht Anforderungen an die Struktur der Modelle. Konkret meint dies den Import in die verwendete Simulations-Software IDA ICE mittels des standardisierten Austauschformats Industry Foundation Classes (IFC).

Über die zwei Autorensysteme⁵ Autodesk Revit und Graphisoft Archicad entstanden zwei parallele, geometrische Soll-Bauwerksinformationsmodelle (Abb. 3). Die Umsetzung mit zwei Software-Anbietern ermöglicht Produktneutralität. Darüber hinaus schafft dies eine vielfältigere Ausgangslage für weitere, zukünftig darauf aufbauende BIM-Anwendungen und bietet größere Potentiale in Bezug auf die Anwendbarkeit in der Lehre (siehe Kap. 6.3).

Nachfolgend sind die wesentlichen Schritte und Erfahrungen aus der Modellierung zusammengefasst worden. Die Beispiele zeigen die Umsetzung anhand der Modellierungssoftware Autodesk Revit. Die Durchführung mit Graphisoft Archicad folgt den gleichen Prinzipien und nutzt lediglich andere softwarespezifische Funktionen, die hier nicht im Mittelpunkt stehen.



Abb. 3: Gebäudemodell HC (Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal)

Die 3-D-Modellierung des Soll-Bauwerksinformationsmodells hinsichtlich Geometrie und Konstruktion basiert im Wesentlichen auf den vom BLB bereitgestellten CAD-Dateien des

⁵ Software zur Modellierung oder Informationsanreicherung objektorientierter Bauwerksinformationsmodelle

Architekturbüros. Diese liegen im dwg-Format⁶ vor und beinhalten die zweidimensionalen Grundrisse des Gebäudes auf seinen vier Ebenen, vom Kellergeschoss bis zum zweiten Obergeschoss.

2.1.3 Zusammenfassung und Lessons Learned

Zusammenfassung: Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das HC-Gebäude am Campus Haspel der Bergischen Universität Wuppertal als Living-Lab umgesetzt. Da es sich um ein Bestandsgebäude handelt, wurde basierend auf bestehenden Dokumenten das Soll-Bauwerksinformationsmodell für die Objekte der Architektur und in Ansätzen im Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung erstellt. Das Soll-Bauwerksinformationsmodell besteht aus geometrischen Informationen und alphanumerischen Basisinformationen. Es wurde mit Autodesk Revit und mit Graphisoft Archicad erstellt.

Lessons Learned für weitere Living Labs: Als Basis für die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ muss ein grundlegendes Soll-Bauwerksinformationsmodell für die Objekte der Architektur und der Technischen Gebäudeausrüstung gemäß einer abgestimmten Modellierungsrichtlinie erstellt werden.

2.2 Aufnahme der Geometrie des realen Living Labs (Ist-Punktwolkenmodell) und Abgleich mit dem Soll-Bauwerksinformationsmodell (As-Built-Kontrolle)

Die geometrische Aufnahme des bestehenden HC-Gebäudes diene als Grundlage zur Validierung des zuvor beschriebenen Soll-Modells (Kap. 2.1) über die sogenannte As-Built-Kontrolle. Zugleich stellt die aus den Aufnahmen abgeleitete Punktwolke eine alternative Quelle zu den geometrischen Informationen aus den Planunterlagen dar. Dies ist insbesondere für den Aufbau eines dreidimensionalen Bauwerkinformationsmodells und die BIM-basierte Betrachtung von Gebäudeperformance bei bereits bestehenden Nichtwohngebäuden relevant, für die keine oder unzureichende Planunterlagen vorliegen. Insgesamt lassen sich die Arbeiten in vier Schritte unterteilen:

- Laserscanning der Räume
- Laserscanning der Gebäudehülle
- Zusammenführung der Scans zu einer Projektpunktwolke
- Gegenüberstellung Soll-Bauwerksinformationsmodell und Ist –Punktwolkenmodell (Geometrie)

Die Erkenntnisse aus dem gegenständigen Projekt sind zusätzlich in eine „Handlungsempfehlung zur Digitalen Bestandserfassung“ des Lehr- und Forschungsgebietes

⁶ Dateiformat einer Autodesk AutoCAD-Zeichnung

Baubetrieb und Bauwirtschaft eingeflossen. Diese ist auf der Seite des BIM-Instituts der Bergischen Universität Wuppertal im Downloadbereich frei abrufbar⁷.

2.2.1 Laserscanning der Räume

Das Laserscanning ist eine berührungsfreie Abtastung von Bauwerksstrukturen, um diese dreidimensional zu erfassen. Es stellt somit eine digitale Methode zur Erfassung eines Aufmaßes dar. Das Vorgehen eignet sich neben anderen Anwendungen auch zur Aufnahme des Gebäudeinneren im Bestand und findet bereits in der Praxis Anwendung.⁸

Im Vorfeld der Scanarbeiten ist die Positionierung des Laserscanners zu planen. Dazu bedarf es der Planungsunterlagen, insbesondere der Grundrisse des Gebäudes. Neben einer Übersicht über die Raumaufteilung und Gebäudestruktur sind auch Versätze, wie Fensterbänke, Einbuchtungen und Ecken, reflektierende Glasflächen sowie die Licht- und Schattenverhältnisse zu identifizieren. Auf diese Weise können bereits über die Planung der Scanpositionierung potentielle Fehlerquellen vermieden werden. Ergänzend zu den Planunterlagen ist auch eine Begehung vor Ort als sinnvoll zu erachten.

Alle geplanten Scans sollten an die gegebene Raumstruktur angepasst und im Grundriss vorpositioniert werden. Auf Grundlage dessen erfolgt die Festlegung des Laufweges und eine Unterteilung des Gebäudes in Scanabschnitte. Anzustreben ist eine vollständige Aufnahme der zuvor eingeteilten Einheiten innerhalb einer Scaneinheit. Insbesondere bei Gebäuden im laufenden Betrieb wird dies jedoch dadurch erschwert, dass die Verfügbarkeit der Räume für die Aufnahmen wegen einer anderweitigen Belegung nicht immer gewährleistet werden kann. Somit sind die Laufwege während der Durchführung anzupassen. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die Vorpositionierungssymbole in Form von Kreisen eingetragen (Abb. 4) und während der Aufnahmen um eine fortlaufende Nummer des jeweiligen Scans ergänzt.

Sind Bereiche während der geplanten Aufnahmezeit nicht verfügbar erfolgt die Vermessung des Gebäudes in mehreren zeitlich unterbrochenen Einheiten. Daher wird der Fortschritt zusätzlich in einer tabellarischen Raumübersicht gepflegt. Anhand dieser Liste ist es möglich nachzuverfolgen, ob und welcher Raum bereits gescannt wurde und welches die jeweilig dazugehörige Scannummer ist.

⁷ https://biminstitut.uni-wuppertal.de/fileadmin/biminstitut/Download-Bereich/3D-Laserscan_Handlungsempfehlung_Bestanderfassung/200401_HE_Laserscan_Handlungsempfehlung.pdf

⁸ Vgl. Helmus et al. 2020, S.13

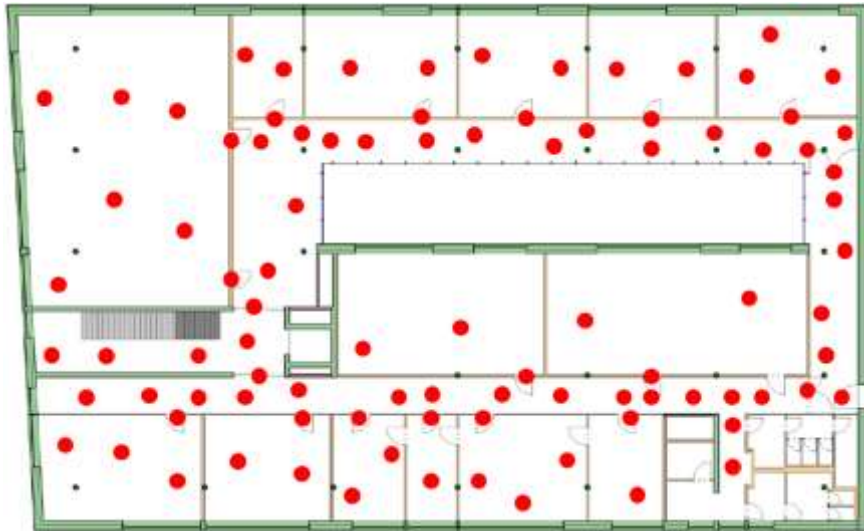


Abb. 4: Vorpositionierung des Laserscanners am Beispiel 1.OG (Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft)

Für die Aufnahmen im gegenständigen Forschungsprojekt wird ein bereits im Vorfeld beschaffter Laserscanner FARO Focus3D verwendet. Für die Aufnahmen mit dem Gerät sind die Auflösung und die Qualität des Scanners wesentlich. Über die Auflösung wird die Anzahl der Messpunkte bestimmt, mit welcher der Laserscanner die Oberfläche abtastet. Die Qualität gibt hingegen die Zeit vor, in welcher die Messpunkte zu erfassen sind. Die Einstellung der Parameter sind im Hinblick auf den notwendigen Detaillierungsgrad und die Dauer der Belegung des Raums abzuwägen. Zusätzlich dazu besteht die Möglichkeit eine Farboption für jeden Scan individuell anzuwählen. Dies kann bei der späteren Nutzung der Punktwolke hilfreich sein, um Objekte voneinander abzugrenzen. Ein Farbscan verlängert die Aufnahmezeit jedoch zusätzlich um drei bis zehn Minuten.

Die Räume im HC-Gebäude sind im Wesentlichen Vorlesungs- oder Büroräume, die eine gleichbleibende Struktur und Möblierung aufweisen. Durch die Analyse von einigen Testscans erweist sich eine Auflösung von 1/16 bei einer Qualität von drei als zielführend für den späteren Abgleich mit dem Soll-Bauwerksinformationsmodell.

Neben der Aufnahme als solche, ist es bereits bei der Aufnahme notwendig die spätere Zusammenführung der Aufnahmen zu einer gesamten Punktwolke zu berücksichtigen. Dazu dienen sogenannte Referenzpunkte. Diese sind in Form von Zielmarken oder Referenzkugeln so zu platzieren, dass der Laserstrahl in einem angemessenen Winkel auf sie trifft und deutlich erfasst. Zu beachten sind hierbei auch Schattenwürfe oder Spiegelungen, die den Laser irritieren könnten. Die Bildmarken der Scans zum späteren Referenzieren der Punktwolken untereinander, müssen derart angebracht sein, dass mindestens drei Zielmarken aus dem vorherigen Scan im darauffolgenden erfasst werden, um eine bestmögliche Lokalisierung des Scanners zu erzielen. Zudem ist darauf zu achten, dass die Zielmarken in den Zeiträumen zwischen zwei benachbarten Scans nicht beschädigt oder entfernt werden. Insbesondere wenn in der Aufbereitung der Aufnahmen an folgenden Arbeitstagen Fehler festgestellt werden, ist es relevant sich bei neuen Scans nach wie vor auf die bestehenden Marken referenzieren zu können. Für die Aufnahme eines öffentlich genutzten Hochschulgebäudes – wie im Fall des HC-Gebäudes – bedeutet dies zum einen die Information über die Montage

der Marken an die Gebäudedienstleister und bekannten Nutzer (z.B. bei Büroräumen) heranzutragen. Zum anderen die Marken mitunter außerhalb der Reichweite unbekannter Nutzer anzubringen.

Die bei diesem Projekt verwendete Referenz stellen zu Beginn Zielmarken dar. Um bei der Verarbeitung der Scanrohdaten eine möglichst genaue Stationierung der Einzelscans vorzunehmen, wurden diese im zu scannenden Abschnitt befestigt. Die Zielmarke ist ein auf DIN-A-4-Blatt gedrucktes Schachbrettmuster (Abb. 5). Aufgrund des hohen Kontrasts können diese vom Scanner bestmöglich anvisiert werden und im Anschluss von der Auswertungssoftware automatisch und halbautomatisch erkannt werden.



Abb. 5: Schachbrettzielmarke, Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

Sofern alle Vorbereitungen und Einstellungen getroffen wurden, kann der Scandurchlauf beginnen. Der Laser wird auf den vorpositionierten Punkten platziert und im Anschluss die jeweilige automatisch erfasste Scan-Nr. auf dem Grundriss vermerkt. Besondere Sorgfalt gilt für die Positionierung von Aufnahmepunkten in den Verbindungen zwischen zwei Räumen (z.B. Türen). Die Scans an diesen Stellen sind elementar, um über die darin enthaltenen Referenzen später die Aufnahmen aus den beiden angrenzenden Räumen korrekt verorten zu können. Daher sind diese Aufnahmen zwingend bei geöffneter Tür durchzuführen.

2.2.2 Laserscanning der Gebäudehülle

Die Aufnahme der Außenhülle mit dem Laserscanner wurde getestet und ist grundsätzlich möglich. Es wurden jedoch zwei maßgebliche Herausforderungen identifiziert.

Zum einen ist für eine ausreichende Qualität der Scans ein spitzer Aufnahmewinkel relevant. Bei dem gewählten HC-Gebäude ist dies wegen unmittelbar vor der Fassade stehender Bäume jedoch nicht zu realisieren. Zum anderen müssen die Aufnahmen auf dem Dach über die Stationierung des Scanners auf gegenüberliegenden Gebäude durchgeführt werden. Die hierfür herangezogenen Korrespondenzen liegen sowohl auf dem Vordach, als auch auf der Ebene des Erdgeschosses. Nach etwaigen Versuchen musste diese Vorgehensweise jedoch verworfen werden. Die einzelnen Aufnahmen ließen sich im weiteren Verlauf nicht ausreichend genau referenzieren und somit nicht zu einer gemeinsamen Punktwolke zusammenführen. Die

Aufnahme der Außenhülle des HC-Gebäudes erfolgt daher über das Befliegen mit einer Drohne und Aerophotogrammetrie als Grundlage für das Ableiten der Punktwolke.

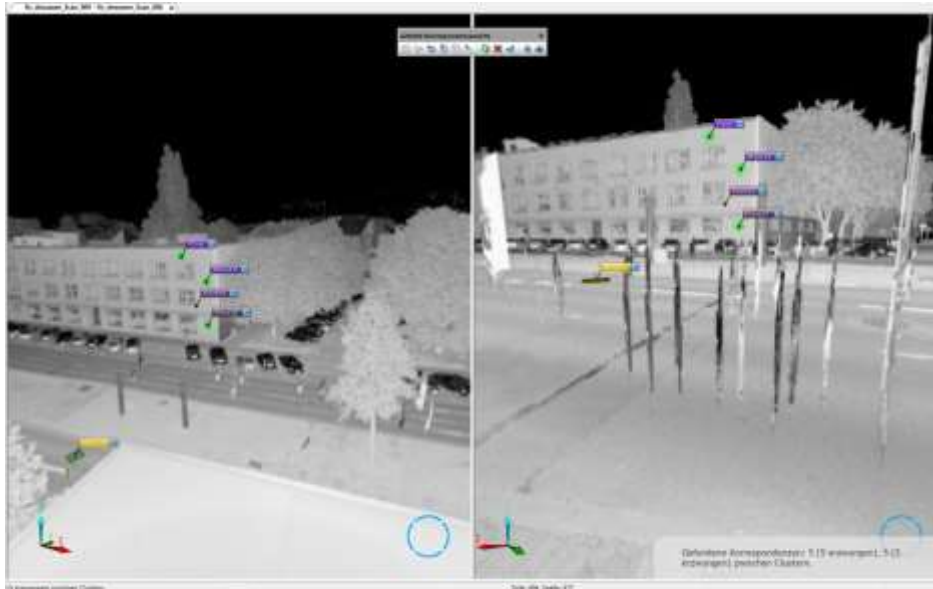


Abb. 6: Erzwungene Korrespondenzen auf dem Nachbargebäude - links: Äußerster Rand des Dachs, rechts: Aufnahme im Parterre, Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

2.2.3 Zusammenführung der Scans zu einer Projektpunktwolke

Die Zusammenführung der einzelnen Aufnahmen in einer gemeinsamen Projektpunktwolke (PPW) erfolgt über Softwaresysteme zur Punktwolkenverarbeitung. Diese ermöglichen es, die Scans untereinander zu verknüpfen und ein Gesamtabbild des aufgenommenen Gebäudes visuell darzustellen. Darüber hinaus ist die Punktwolke in alle gängigen Punktwolkendateiformate exportierbar und damit für die weitere Verarbeitung geeignet. Im Folgenden werden das gewählte Vorgehen zur Zusammenführung und die Erkenntnisse daraus an beispielhaften Auszügen erläutert.

The screenshot shows a software window titled 'Scans/ScanManager' with three tabs: 'Scan-Manager', 'Scanergebnisse', and 'Scanpunkt-Sperrungen'. The 'Scan-Manager' tab is active, displaying a table of scan data under the heading 'Verarbeitete Passungen:'. The table has five columns: 'Objekt anpassen', 'Durchschnittlicher Ziel...', 'Durchschnittlicher Ziel...', 'Durchschnittlicher Sc...', and 'Scan/Cluster'. Below the table are two buttons: 'Korrespondenzansicht' and 'Geteilte Korrespondenzansicht'. At the bottom of the window are buttons for 'Holen', 'Anwenden', 'OK', and 'Abbrechen'.

Objekt anpassen	Durchschnittlicher Ziel...	Durchschnittlicher Ziel...	Durchschnittlicher Sc...	Scan/Cluster
ScanFit	---	---	10.87	HC_01_30.2_Scan_038
ScanFit	---	---	6.94	HC_01_30.2_Scan_060
ScanFit	---	---	6.71	HC_01_30.2_Scan_038
ScanFit	---	---	6.29	HC_01_30.2_Scan_010
ScanFit	---	---	6.24	HC_01_30.2_Scan_027
ScanFit	---	---	6.17	HC_01_30.2_Scan_013
ScanFit	---	---	5.26	HC_01_30.2_Scan_005
ScanFit	---	---	5.02	HC_01_30.2_Scan_029
ScanFit	---	---	4.94	HC_01_30.2_Scan_014
ScanFit	---	---	4.92	HC_01_30.2_Scan_033
ScanFit	---	---	4.81	HC_01_30.2_Scan_046
ScanFit	---	---	4.69	HC_01_30.2_Scan_018

Abb. 7: Übersicht Referenzierungsfehler, Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

Die einzelnen Aufnahmen werden in ein Projekt importiert und über die Mittelpunkte der Zielmarken korrespondiert. In Abhängigkeit der verwendeten Software besteht die Möglichkeit die Zielmarken automatisiert erkennen und deren Zentren aufeinander referenzieren zu lassen. Da die Punkte eines Scans in Abhängigkeit der gewählten Auflösung nicht zwangsläufig exakt in der Mitte einer Referenzmarke liegen, entstehen mitunter Abweichungen. Diese lassen sich über die Software anzeigen und kontrollieren (Abb. 7). Entsprechend dieser Bewertung werden die einzelnen Scanpunkte manuell in der Objektanpassung so lange bearbeitet, bis der durchschnittliche Scanpunktabstandsfehler möglichst gering ausfällt. Da die aufeinander korrespondierten Scans eine Art Netz bilden, hat die Nachbearbeitung einer Referenz jedoch stets Auswirkungen auf andere Referenzen und damit auch deren Fehler. Zum Teil werden einzelne Scans sowohl in der Ebene als auch in der Höhe verschoben. Darüber hinaus kommt es vor, dass sich der Neigungswinkel einzelner Scans verändert. Für eine Korrektur lassen sich die Scandaten zwar in der Ebene verschieben und um die eigene Achse rotieren, jedoch ist es nur sehr schwer bis gar nicht möglich eine Torsion des Scans vorzunehmen. An dieser Stelle wird besonders deutlich, dass die Anwendung noch ausbaufähig in der Handhabbarkeit für den Anwender ist. Um die aufgeführten Herausforderungen zu bewältigen, hat sich hauptsächlich die Zusammenfassung von mehreren Scans in einem Cluster als hilfreiche Lösungsstrategie erwiesen. Als Cluster bezeichnet man eine Bündelung von beieinanderliegenden Scans in einer Gruppe – z.B. der jeweiligen Etage. Liegt der Mittlere Fehlerabstand innerhalb der Cluster bei unter zehn Millimetern, werden diese im Anschluss miteinander verbunden. Wegen der Vielzahl von Korrespondenzen kann es als unwahrscheinlich angesehen werden eine Projektpunktwolke ohne Fehler in der Referenzierung zu erzeugen. Bei den Aufnahmen der HC-Gebäudes ließ sich eine Abweichung von flächendeckend weniger als zehn Millimeter erzielen.

Die sich in einem Cluster befindenden Scans werden in einer dreidimensionalen Ansicht visualisiert (Abb. 8). Die einzelnen Aufnahmen sind zur besseren Unterscheidung z.B. über die Farbgebung voneinander abgegrenzt. Hierdurch wird zusätzlich visuell überprüft, ob die

Überlagerung die gewünschte Genauigkeit erzielt. Im Weiteren wird durch die Korrespondenzansicht ersichtlich, ob die Scans im Grundriss richtig positioniert sind. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt hat sich während der Anwendung bewährt, da über Fehler bei der Referenzierung einzelne Scans an falschen Orten positioniert wurden. Im Zuge dessen sind die genaue Verortung und Nummerierung aber auch Vermerke und Dokumentationen der Scanstandorte auf dem Grundrissplan elementar



Abb. 8: Auswahl einiger Scanpunkte - Korrespondenzansicht – draufsichtbasiert. Bildquelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

Neben den abgebildeten Ansichten ist auch eine rundum Ansicht hilfreich, um nicht nur die zweidimensionale sondern auch die dreidimensionale Stationierung zu prüfen und die Aufnahmepunkte mit den Ebenen des Gebäudes abzugleichen (Abb. 9).

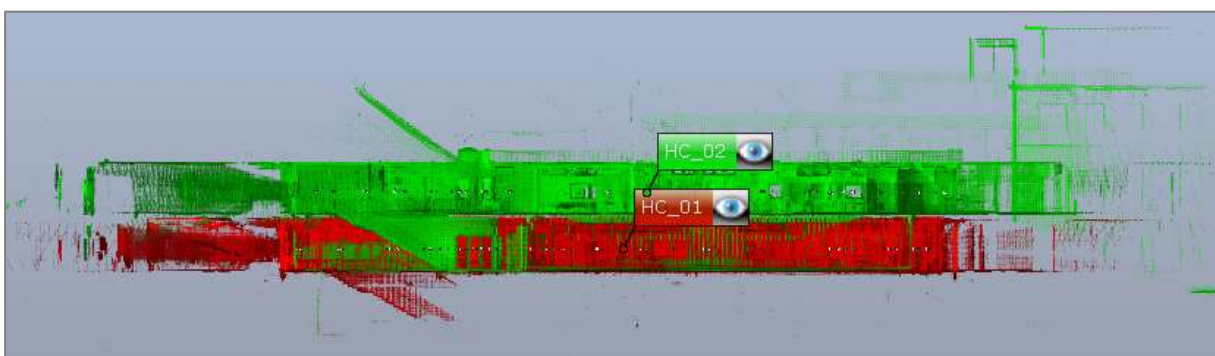


Abb. 9: Gebäude HC – Punktwolken des 1. und 2. Obergeschosses – seitliche Ansicht (Quelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal)

Um einzelne Etagen miteinander zu verbinden werden die Treppenhäuser innerhalb des Gebäudes genutzt. Hierfür bietet die Software eine entsprechende Lösung, indem in der geteilten Korrespondenzansicht die Ausrichtung zwischen Scans per drag and drop Funktion manuell angegeben wird (Abb. 10). Hierfür werden die zu verbindenden Scans nebeneinander geöffnet und identische Flächen durch Markierung bestimmt. Diese selbstständig erstellten

Markierungen werden als Ebenen definiert, um daraufhin der Software den Befehl zu geben, Korrespondenzen zwischen den gekennzeichneten Ebenen zu erzwingen. Analog gilt dies auch für Eckpunkte. Um Korrespondenzen zu erzwingen und in Folge die Scans zusammen zu führen, sind mindestens drei Korrespondenzen nötig. Darüber hinaus können durch/über erzwungene Korrespondenzen beieinanderliegende Scans miteinander fixiert werden. Somit ist es weniger wahrscheinlich, dass vor allem bei fehleranfälligen Scans eine automatische Verschiebung stattfindet. Problematisch erwies sich hierbei, dass sich die erzwungene Korrespondenz negativ auf weitere, zuvor korrekt positionierte Scan auswirkt.

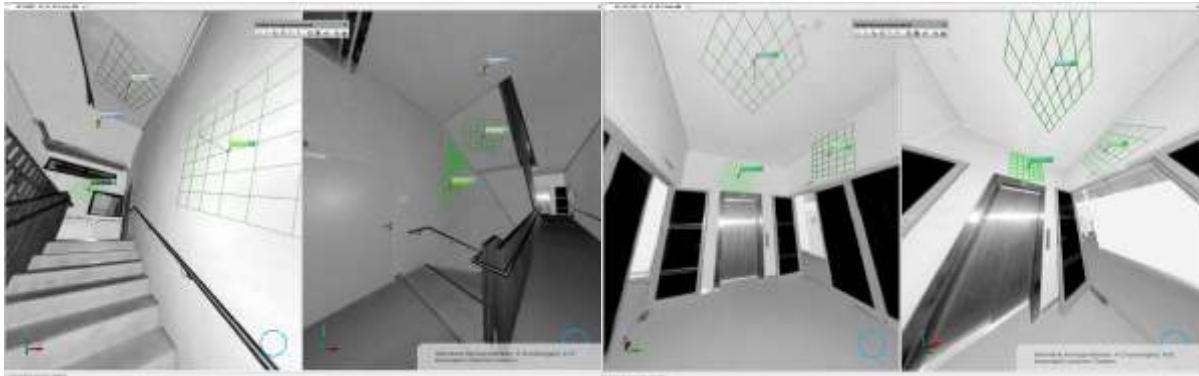


Abb. 10: Verbindung des Erdgeschosses mit dem ersten Obergeschoss durch Erzeugen von Ebenen - Geteilte Korrespondenzansicht (links). Verbindung des ersten Obergeschosses mit dem zweiten Obergeschoss durch Erzeugen von Ebenen - Geteilte Korrespondenzansicht (rechts)

2.2.4 Gegenüberstellung Soll-Bauwerksinformationsmodell und Ist – Punktwolkenmodell (Geometrie)

Das aus den Punktwolken abgeleitete Modell gibt den tatsächlichen geometrischen Stand der Immobilie wieder. In Abhängigkeit des Ziels dieser Verarbeitung sind unterschiedliche Informationen aus der Punktwolke abzuleiten. Beispielsweise besteht zu Anschauungszwecken für den Fördermittelgeber eine farbechte Integration des Raumes HC.01.20 (BIM-Labor) in eine VR-Anwendung zur Verfügung. Für die Identifizierung von Abweichungen zwischen dem Soll- Bauwerksinformationsmodell und dem Ist-Punktwolkenmodell (As-Built-Kontrolle) ist im Wesentlichen die Geometrie von Interesse.

Der Abgleich im gegenständigen Projekt erfolgt exemplarisch über Autodesk Revit. In der Software besteht die Möglichkeit, die zuvor erstellte PPW zu importieren und darzustellen. Die Geometrien werden der PPW entnommen, sodass eine Modellierung direkt in die PPW vorgenommen werden kann. Dazu lassen sich die einzelnen Punkte der PPW als Ankerpunkte für die Modellobjekte auswählen. Damit diese jedoch positioniert werden können, müssen entsprechende Vorlagen der Modellobjekte⁹ im Projekt existieren. Nach Möglichkeit werden sie aus dem Soll-Bauwerksinformationsmodell importiert und ggf. modifiziert. Im Fall, dass keine BIM-basierte Planung erfolgt ist (z.B. nachträgliche Aufnahme des Bestands), sind die

⁹ In Autodesk Revit „Familien“

Objektvorlagen aus digitalen Objektbibliotheken zu importieren oder neu im Programm anzulegen. Die Erstellung von Modellobjektvorlagen ist, abhängig vom Detaillierungsgrad und den Kenntnissen des Anwenders, unterschiedlich aufwändig und zeitintensiv. Zudem ist die im Projekt durchgeführte Modellierung nicht repräsentativ. Daher lassen sich keine pauschalen Aussagen zu Aufwandswerten ableiten, die in dem Kontext des beschriebenen Aufgabenfeldes und des darin zu sehenden Mehrwertes häufig hinterfragt werden.

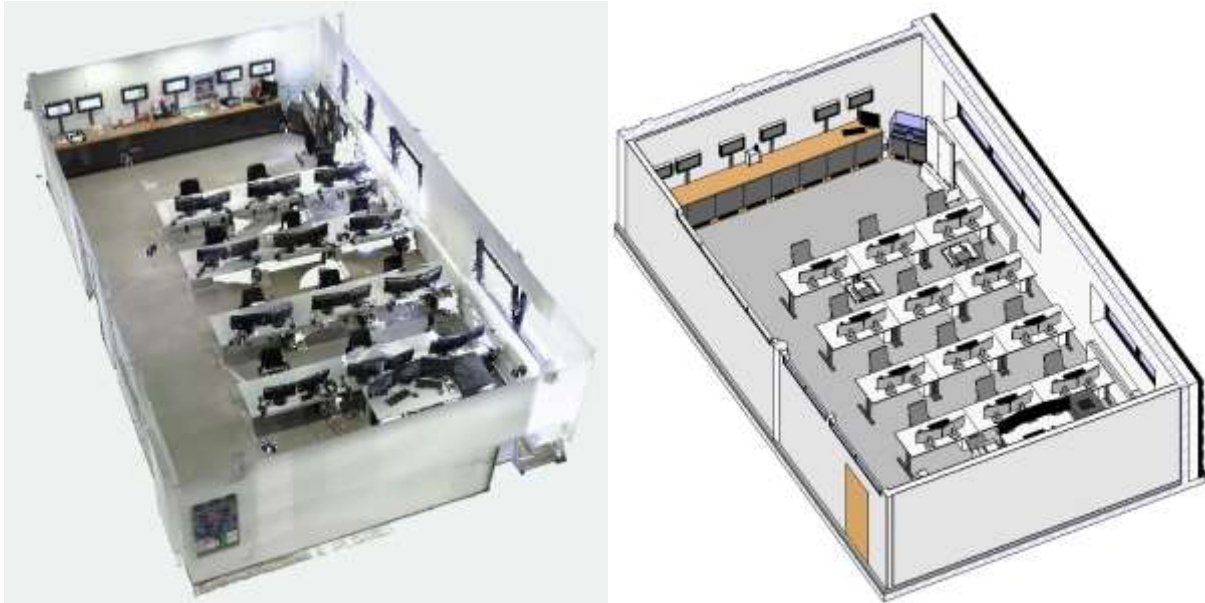


Abb. 11: Vergleich Punktwolke und Revit-Modell, Bildquelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

2.2.5 Zusammenfassung und Lessons Learned

Zusammenfassung: Für das Living Lab am Campus Haspel wurde das Bestandsgebäude mittels Laserscanner aufgenommen und die entstandene Punktwolke wurde mit dem Soll-Bauwerksinformationsmodell abgeglichen. Basierend auf den Abweichungen wurde ein Ist-Bauwerksinformationsmodell erstellt.

Lessons Learned für weitere Living Labs: Als Basis für die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ sollte das Soll-Bauwerksinformationsmodell um ein Ist-Bauwerksinformationsmodell ergänzt werden, um die tatsächliche Geometrie des Bauwerks erfasst zu haben.

2.3 Entwicklung des Konzepts zur Informationsvernetzung anhand der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“

Die in den Teilprojekten Perform SIMON und Perform GRID beschriebenen Aufgaben, z.B. Simulation und Monitoring von Raumklima (CO₂, Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit), Energie (Strom, Verbrauch/Leistung und Wärme), und Simulation der Gebäudenetzinteraktion bilden die Grundlage für die gemeinsam aufgestellte BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“. Aktuell gibt es keine allgemeingültigen Standards zur Beschreibung von BIM-Anwendungen. Die Forschenden beteiligen sich jedoch aktiv an der Ausarbeitung solcher Standards. Auf der

Wissensbasis aus diesen Tätigkeiten wurden die Strukturen bereits veröffentlichter BIM-Anwendungen übereinandergelegt und eine Vorlage zur Beschreibung von BIM-Anwendungen erstellt. Die Vorlage wurde in enger Zusammenarbeit mit den beiden Teilprojekten Perform SIMON und Perform GRID gefüllt.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden die aktuellen Entwicklungen zur Strukturierung und zum Aufbau von BIM-Anwendungen sowie konkret die Entwicklung zur BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ in die Praxis gespiegelt. Beispielsweise wurden die Wuppertaler Stadtwerke (WSW) im Rahmen der Planung für den Neubau der Unternehmenszentrale bei der Definition von Performance-Zielen sowie der möglichen Implementierung der BIM-Anwendung in die Planung, die Bauausführung und den Betrieb unterstützt. Zentrale Erkenntnisse aus der Übertragung in die Pilotprojekte sind u.a.:

- Die fachlichen Ziele müssen im Vorfeld nach dem SMART-Prinzip definiert werden, um die dafür notwendigen Schritte in der Projektabwicklung identifizieren und digital ausgestalten zu können.
- Über das fachliche Verständnis und einer klaren Motivation zur Betrachtung der Gebäudeperformance hinaus bedarf es eines Verständnisses über strukturierte digitale Informationshaltung sowie über die Möglichkeiten der automatisierten Datenverarbeitung.

Die Erkenntnisse aus dem gegenständigen Projekt sind zusätzlich in einen „Leitfaden zur Strukturierung und Aufbau von BIM-Anwendungen“ des Lehr- und Forschungsgebietes Baubetrieb und Bauwirtschaft eingeflossen. Diese ist auf der Seite des BIM-Instituts der Bergischen Universität Wuppertal im Downloadbereich frei abrufbar¹⁰.

In den nachfolgenden Kapiteln wird die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ beschrieben.

2.3.1 Kontext einer BIM-Anwendung

Gemäß Definition der Richtlinie VDI 2552 Blatt 2 besteht eine BIM-Anwendung aus der Durchführung eines oder mehrerer spezifischer Teilprozesse oder Arbeitsschritte unter Anwendung der Methode BIM. Im Forschungsprojekt LivingLab entspricht dies der BIM-basierten Betrachtung von Gebäudeperformance bei Nichtwohngebäuden.

Die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ fasst demnach den Bezugsrahmen relevanter Prozesse für das allgemeingültige Vorgehen beim Aufstellen und Prüfen von quantitativen Performance-Zielen zusammen. Die im Zusammenhang der betrachteten BIM-Anwendung stehenden Prozesse beschreiben die notwendige Abfolge von Arbeitsschritten bis zum Eintreten eines Zielereignisses – hier die Ableitung möglicher Verbesserungsmaßnahmen in

¹⁰https://biminstitut.uni-wuppertal.de/fileadmin/biminstitut/Download-Bereich/BIM-Anwendungen/20200929_Leitfaden_Strukturierung_BIM-Anwendung_17_fe.pdf.

Bezug auf die Gebäudeperformance. Die Auswahl der relevanten Prozessschritte erfolgt nach Aufstellung von Anforderungen in Form von allgemeinen User-Stories für einen Anwendenden.

Infolge der Definition einer BIM-Anwendung durch die Autoren wird die spezifische Perspektive dieser definierenden Instanzen abgebildet. Der so geschaffene, subjektive Entwurf der BIM-Anwendung muss dahingehend durch weitere Personen geprüft und ggf. ergänzt oder angepasst werden. Die Finalisierung einer allgemeingültigen Definition einer jeden BIM-Anwendung entspricht damit einem iterativen Prozess unter Berücksichtigung aller vertretenen Akteure dieser BIM-Anwendung.

Im Rahmen des Projektes wurden die spezifischen Prozesse inklusive der zugehörigen Informationsanforderungen der Gebäudeperformance definiert

2.3.2 Prozesse einer BIM-Anwendung

Als Hilfestellung oder Grundlage für die Definition von BIM-Anwendungen können bestehende Strukturen, Standards und Leistungsbilder (bspw. nach HOAI) herangezogen werden- sofern für die abzubildenden Tätigkeiten vorhanden. Diese weisen jedoch nur bedingt einen Bezug zur Methode BIM auf. Daher ist es notwendig diesen Bezug im Rahmen einer BIM-Anwendung herzustellen.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wird zwischen fachlichen Prozessen und BIM-Basisprozessen einer BIM-Anwendung unterschieden: Die fachlichen Prozesse bilden die sequentielle Abfolge von durchzuführenden spezifischen Teilprozessen einer BIM-Anwendung ab und beschreiben den Informationsfluss der betrachteten BIM-Anwendung unabhängig von der Nutzung technischer und nicht-technischer Hilfsmittel auf rein fachlicher (informativer) Ebene. Sie beschreiben die Vorgänge ähnlich der Definitionen in den angesprochenen Standards und Leistungsbildern. Über den fachlichen Prozess werden neben den durchzuführenden Aktivitätsketten weitere projektrelevante Informationen für jeden spezifischen Teilprozess, wie bspw. die Beschreibung der zuständigen Verantwortlichkeit für die Prozessdurchführung, das zeitliche Referenzieren des betrachteten Prozesses in einem Gesamtprozess etc., beschrieben.

BIM-Basisprozesse hingegen stellen systematisch auftretende/ wiederkehrende Teilprozesse (Arbeitsschritte) innerhalb von BIM-Anwendungen dar. Jedem fachlichen Prozess können somit ein oder mehrere BIM-Basisprozesse zugeordnet werden, die ersteren im Hinblick auf die Anwendung der Methode BIM klassifizieren (Abb. 12). Durch das Referenzieren fachlicher Teilprozesse einer BIM-Anwendung auf BIM-Basisprozesse wird eine Systematik zur Beschreibung gleichartiger Teilprozesse mit einer standardisierten Prozessbeschreibung sowie Prozessanforderungen bereitgestellt. Zur Beschreibung des BIM-Basisprozesses wurden Musterformulierungen erarbeitet. Diese Musterformulierungen bestehen aus einer Kurzbeschreibung und sogenannten BIM-Prozessanforderungen. Die zum jetzigen Zeitpunkt identifizierten BIM-Basisprozesse inklusive der Musterformulierungen können Anlage 1 des zuvor verlinkten Leitfadens entnommen werden.

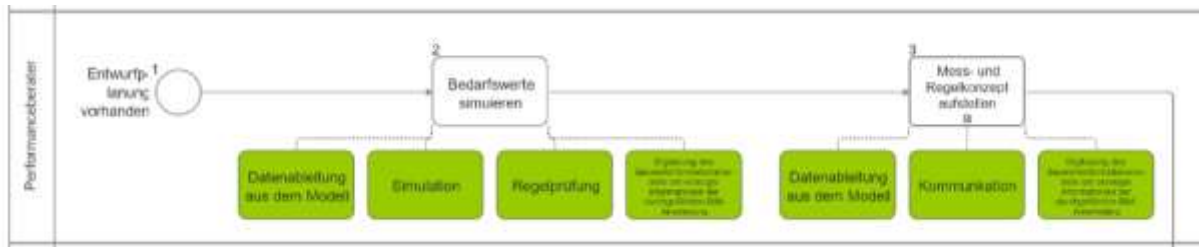


Abb. 12: Zuordnungsbeispiel BIM-Basisprozesse zu fachlichen Prozessen. Bildquelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

BIM-Prozessanforderungen beschreiben die Rahmenbedingungen eines BIM-Basisprozesses und definieren notwendige Informationsanforderungen an einen BIM-Basisprozess. Die einzelnen BIM-Prozessanforderungen schlüsseln sich wie folgt auf:

- Definition des Prozessverantwortlichen (Wer?)¹¹,
- Definition der Input-Informationsaustauschanforderungen (Was? [Input]),
- Definition des Informationslieferzeitpunktes (Wann?),
- Definition der Informationsaustauschmethode (Wie?),
- Definition der Informationsaustauschvorgaben (Wonach?)¹² sowie
- Definition der Output-Informationsaustauschanforderungen (Was? [Output]).

Durch das Beantworten der BIM-Prozessanforderungen wird ein stringentes und transparentes Informationsmanagement ermöglicht. Die jeweiligen BIM-Prozessanforderungen ergeben sich aus dem zugeordneten BIM-Basisprozess; das Füllen der Prozessanforderung erfolgt über die Inhalte des fachlichen Prozesses.

2.3.3 Beschreibung der BIM-Anwendung Gebäudeperformance

Die Betrachtung von Gebäudeperformance lässt sich in vier allgemeingültige Schritte unterteilen. Diese stellen gleichermaßen für jedes Arbeitspaket die Grundlage der fachspezifischen Betrachtung dar.

- Management: Definitionen relevanter Elemente zur Betrachtung von Gebäudeperformance
- Soll-Daten: Erzeugung von Werten, welche als Maßstab für das Erreichen von Zielvorgaben dienen
- Ist-Daten: Aufnahme von Messwerten zur Überprüfung der Einhaltung der Zielvorgaben

¹¹ Entspricht in der Regel der Verantwortlichkeit des fachlichen Prozesses

¹² Umfasst zu berücksichtigenden Gesetze, Regelwerke, Vorschriften, Vorgaben etc., die für die Durchführung des BIM-Basisprozesses zu berücksichtigen sind

- Vergleich: Gegenüberstellung von Soll- und Ist-Daten in Form von Analysen zum Erkenntnisgewinn

Über die Gemeinsamkeit der Abfolge lässt sich, aufgegliedert nach den drei fachlichen Blickwinkeln SIMON, GRID und BIM, eine Übersichtsmatrix für die Arbeitspakete ableiten (Abb. 13). Die horizontale Achse stellt die vier übergreifenden Schritte Management, Soll-Daten, Ist-Daten und Vergleich dar. Die vertikale Achse hingegen beinhaltet die Blickwinkel für die Performance von Nichtwohngebäuden. In den Feldern der Matrix sind die Forschungsschwerpunkte der jeweiligen Blickwinkel den übergreifenden Schritten zugeordnet. Zusätzlich beschreiben die eingetragenen Pfeile den, im Rahmen der Gebäudeperformance fachlich sinnvollen, Informationsaustausch zwischen den drei Blickwinkeln und somit den dahinterstehenden Arbeitspaketen.

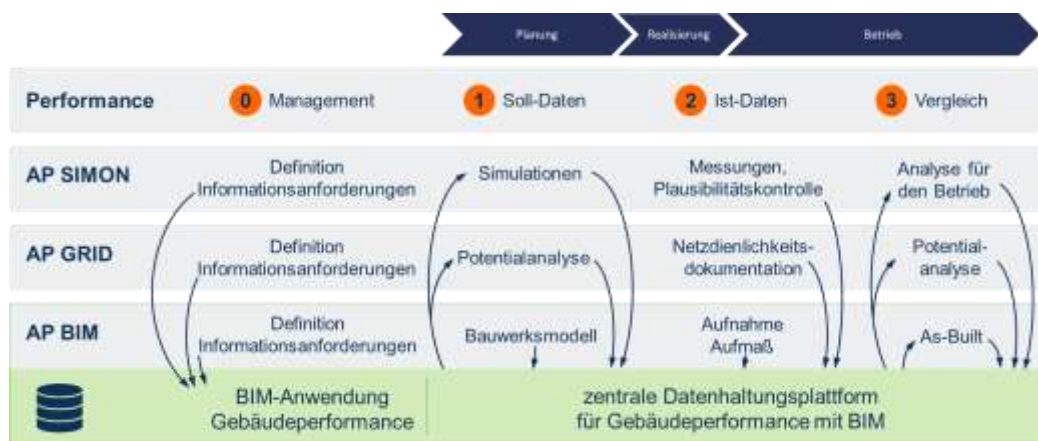


Abb. 13: Übersichtsmatrix Forschungsschwerpunkte der Arbeitspakete

Auf Grundlage der dargestellten Zusammenhänge sind in Zusammenarbeit der Arbeitspakete folgende Zielsetzung und Kurzbeschreibung der BIM-Anwendung Gebäudeperformance entstanden.

Die Zielsetzung definiert sich wie folgt:

Das Ziel ist der Vergleich zwischen festgelegten und simulierten Raum- sowie Energie-Performance-Kennwerten aus der Planungsphase mit den vorliegenden und gemessenen Parametern im Gebäudebetrieb.

Das Vorgehen der BIM-Anwendung lässt sich entlang des Lebenszyklus wie folgt beschreiben:

Projektentwicklung

Bereits in der Planungsphase eines Bauprojektes müssen die Performance Ziele festgelegt werden, damit diese von Beginn an in den Entwurfsprozess mit einfließen können (Performance-Based Design). Die Performance-Ziele können aus unterschiedlichen Perspektiven definiert werden – z.B. Raumklima, Energie etc.

Planungsphase

In der Planungsphase werden die festgelegten Performance Ziele über verschiedene Gebäudesimulationen konkretisiert und auf Umsetzbarkeit validiert. Wenn diese in der Simulation nicht erfüllt werden können, muss der Entwurf hinreichend optimiert werden. Dies betrifft z.B. den sommerlichen Wärmeschutz, die zu erreichende Luftqualität oder den einzuhaltenden Energiebedarf. Darüber hinaus muss zu diesem Zeitpunkt bereits festgelegt werden, wie die verschiedenen Performance Ziele mit Hilfe jeweils geeigneter Monitoring Maßnahmen überwacht werden können.

Realisierungsphase

Parallel zu den Baumaßnahmen sind abweichende oder ergänzende Informationen zu denen aus der Planung festzuhalten. Andernfalls können die falschen oder fehlenden Informationen (z.B. ID des tatsächlich eingebauten Sensors) im weiteren Verlauf dazu führen, dass Mehraufwände für eine nachträgliche Aufnahme oder Abstriche bei der Auswertung der Gebäudeperformance notwendig sind.

Während der Inbetriebnahme des Gebäudes muss mit dem Monitoring bereits begonnen werden, um alle baulichen und anlagentechnischen Komponenten detailliert auf ihre Funktion untersuchen zu können. Treten hier Differenzen zwischen Soll-Werten aus der Planung und Ist-Zuständen auf, sollte geprüft werden, ob Gewährleistungsansprüche geltend gemacht werden können.

Betrieb

Ein fortlaufendes Monitoring während des Gebäudebetriebs gewährleistet eine stetige Überwachung der Gebäudeperformance von Raumklima und Energie. Dies kann über verschiedene Sensoren in den Räumen des Gebäudes und in der Anlagentechnik erfolgen. Die erhobenen Daten sind in das Datenmodell zu integrieren.

Zur Überprüfung der Performance Ziele werden die Daten aus dem Monitoring mit den Daten aus der Planungsphase verglichen. Hierfür sollten geeignete grafische Darstellungsformen herangezogen werden, um Differenzen schnell erkennen zu können.

Wenn es zu großen Abweichungen zwischen Planungszielen und Ist-Werten kommt (Performance Gap), muss nach den Ursachen gesucht werden. Fehlerquellen können auf anlagentechnischer Seite liegen (Defekte oder falsche Einstellungen), aber auch bautechnisch Ursachen wie Gebäudeundichtigkeiten haben. Wenn die Fehlerquellen gefunden und beseitigt wurden, ist dies im Rahmen des Monitorings erkennbar und sollte weiterhin kontinuierlich kontrolliert werden.

2.3.4 Fachliche Prozesse der BIM-Anwendung Gebäudeperformance

Entsprechend der Ausführungen zu den Prozessen einer BIM-Anwendung (Kap. 2.3.2) sind die zu den Beschreibungen der BIM-Anwendung Gebäudeperformance (Kap. 2.3.3) zugehörigen Prozesse zu identifizieren. Dies erfolgt in einer datenbankbasierten Plattform für das Business-Process-Management (BPM-Plattform), welche das Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft bereits seit mehreren Jahren aufbaut. Die

BPM-Plattform und die dahinterstehenden Überlegungen werden kontinuierlich weiterentwickelt. Im Folgenden wird das gewählte Vorgehen zum Zeitpunkt der Berichterstellung beschrieben. Daher kann zu einem späteren Zeitpunkt zu Abweichungen zwischen den hier beschriebenen Sachverhalten und dem Stand in der Datenbank kommen.

Die BPM-Plattform beinhaltet eine Vielzahl an fachlichen Prozessen über den gesamten Lebenszyklus einer Immobilie. Die daraus relevanten Prozesse sind über iterative Sitzungen der Forschenden in den Arbeitspaketen über die festgelegten Kurzbeschreibungen identifiziert und der BIM-Anwendung zugeordnet worden. Im Ergebnis liegen der BIM-Anwendung die folgenden fachlichen Prozesse zugrunde:

Projektentwicklung

- Nutzerbedarfsprogramm erstellen

Planungsphase

- Bedarfswerte simulieren
- Mess- und Regelkonzept aufstellen

Realisierungsphase

- Leistungen ausführen
- Revisionsunterlagen erstellen

Betrieb

- Messwerte bereitstellen
- Messwerte plausibilisieren
- Gebäudeperformance analysieren
- Verbesserungsmaßnahmen ableiten

Über die fachlichen Prozesse ergibt sich ein Regelkreis, der die allgemeinen Schritte für die Betrachtung von Gebäudeperformance widerspiegelt. Er lässt sich auf unterschiedliche Perspektiven der Thematik anwenden, wie sie die Arbeitspakete des Forschungsprojektes beinhalten. Die Darstellung erfolgt über ein Prozessdiagramm in Anlehnung an die BPMN-Konvention¹³. Diese beschreibt einen zentralen, weltweit verbreiteten Standard zum Aufbau von Prozessvisualisierungen.

2.3.5 Umsetzungsmöglichkeiten der fachlichen Prozesse mit BIM

Die Durchführung der identifizierten fachlichen Prozesse mit der Methode BIM ist ein wesentlicher Aspekt bei der Beschreibung einer BIM-Anwendung. Nahfolgend sind die Umsetzungsmöglichkeiten der fachlichen Prozesse aus der BIM-Anwendung Gebäudeperformance beschrieben.

¹³ Business Process Model and Notation

Nutzerbedarfsprogramm erstellen

In dieser frühen Phase von Projekten existiert i.d.R. kein Bauwerksinformationsmodell. Die hier aufzustellenden Zielvorgaben für die Gebäudeperformance werden schriftlich festgehalten und bereitgestellt.

Bedarfswerte simulieren

Die Bedarfswerte der Gebäudeperformance werden in der Planungsphase über Simulationen ermittelt, die auf Basis von Bauwerksinformationsmodellen durchgeführt werden können. Diese werden zum Beispiel über das offene Datenaustauschformat IFC importiert. Tests der Arbeitspakete haben gezeigt, dass diverse Simulationssoftware-Pakete zwar für den IFC-Standard zertifiziert sind, darüber jedoch aktuell z.T. nur die Geometrien und keine weiteren Informationen importieren können, obwohl diese technisch mittels des IFC-Standards übertragen werden können. Der Austausch mit den Herausgebern der Software-Systeme hat ergeben, dass dies aber in Zukunft möglich sein wird.

Mess- und Regelkonzept aufstellen

Das Mess- und Regelkonzept beinhaltet eine Reihe von Vorgaben, welche sich entsprechend der Bezeichnung auf die vorzusehenden Messpunkte und Regelung der Anlagen beziehen. Die Vorgaben können in Bauwerksmodellen an den entsprechenden Modellobjekten über bestehende Autorensysteme eingepflegt oder verknüpft werden.

Leistungen ausführen

Während der Bauausführung müssen Informationen zu den realen Bauteilen im Bauwerksinformationsmodell fortgeschrieben werden. Dies betrifft z.B. den Einbau von Sensorik. Eine Ergänzung der konkreten Geräteidentifikation im Bauwerksinformationsmodell ermöglicht später eine exakte Verortung von empfangenen Daten. Diese Ergänzungen können ebenfalls über bestehende Autorensysteme eingepflegt oder verknüpft werden.

Revisionsunterlagen erstellen

Die modellbasierten Revisionsunterlagen spiegeln die Anpassungen des Bauwerksinformationsmodells an den realen Zustand des Gebäudes wider. Die dafür notwendigen Informationen werden auf Grundlage einer As-Built-Kontrolle ermittelt. Die Anpassungen werden in den bestehenden Autorensystemen vorgenommen.

Messwerte bereitstellen

Die Ist-Daten für die Analyse der Gebäudeperformance werden in Form von Messwerten über Sensorik aufgenommen. Von dort müssen diese für die weitere Verarbeitung bereitgestellt werden. Bei einer Vielzahl von Sensoren besteht die Herausforderung darin, die Datenmenge über geschickte Filterung handhabbar zu machen. Als Filterkriterien eignen sich Kriterien wie Zeiträume. Mit BIM könnten die Filterkriterien zusätzlich um Informationen wie räumliche Abgrenzungen durch Gebäudeabschnitte oder Räume ergänzt werden. Für eine derartige Verknüpfung existiert nach Recherchen der Forschenden jedoch keine bestehende Software, welche gleichzeitig dafür ausgelegt ist die Vielzahl an Messwerten zu verarbeiten.

Messwerte plausibilisieren

Die automatisch erfassten Messwerte können fehlerhaft sein – z.B. durch einen defekten Sensor. Regeln für die Prüfung der Messdaten können grundsätzlich auch für die Anwendung auf Bauwerksinformationsmodelle entwickelt und mit Software für die regelbasierte Modellprüfung angewendet werden.

Gebäudeperformance analysieren

Die Analyse der Gebäudeperformance ist vielschichtig. Auch wenn die Zielvorgaben in der Projektentwicklung SMART definiert sind, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten die Einhaltung zu prüfen. Die dafür benötigten Werte und Zusammenhänge können für das Soll aus dem mit Modelviewern¹⁴ oder umfangreicheren Software-Paketen aus dem Bauwerksinformationsmodell entnommen werden.

Verbesserungsmaßnahmen ableiten

Die Verbesserungsmaßnahmen beschreiben im Wesentlichen eine Anpassung einzelner Punkte im Mess- und Regelkonzept auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Analyse. Dementsprechend können auch die in diesem Schritt durchzuführenden Anpassungen in den bestehenden Autorensystemen vorgenommen werden.

2.3.6 Identifizierte Informationsanforderungen

Aus den Prozessen der BIM-Anwendung und den darin verarbeiteten Dokumenten und Dateien können spezifische Informationsanforderungen abgeleitet werden. Diese entsprechen im Kontext der Methode BIM sogenannten Merkmalen, die in Form von Datenfeldern an die entsprechenden Modellobjekte im Bauwerksinformationsmodell angefügt werden. Für das Ableiten der Informationsanforderungen werden in Zusammenarbeit mit den Arbeitspaketen SIMON und GRID für die identifizierten Prozesse die folgenden Quellen herangezogen:

Richtlinien, Leistungsbilder und Leitfäden

Die Beschreibungen in Richtlinien, Leistungsbildern und Leitfäden beschreiben nicht nur die durchzuführenden Aufgaben. Vielmehr beinhalten sie mitunter konkrete Informationsanforderungen dafür bis hin zu einzelnen benötigten Merkmalen. In Bezug auf die Gebäudeperformance ist vor allem der ENOB-Leitfäden zu erwähnen, welcher umfangreiche Auflistungen einzelner Merkmale für das Monitoring beinhaltet.

Eingabemasken und Importfunktionen von Softwaresystemen

Die Funktionen von der im Projekt eingesetzten Software zur Simulation und zum Monitoring beinhalten über die Eingabefelder und Optionen eine umfangreiche Quelle für die Aufnahme von benötigten Merkmalen. Dabei ist allerdings zu prüfen, ob diese von allgemeingültiger Relevanz sind oder eine Besonderheit des jeweiligen Produktes darstellen.

¹⁴ Software zur Betrachtung von Bauwerksinformationsmodellen

Die Informationsanforderungen sind in eine umfangreiche Tabelle eingepflegt. Diese bietet eine Gesamtübersicht zu allen in der BIM-Anwendung benötigten Informationen. Jedes identifizierte Merkmal ist darin sowohl den Tätigkeiten zugeordnet, durch welche der Bedarf entsteht, als auch einer Tätigkeit zugeordnet, welche für die Bereitstellung der Information verantwortlich ist. Darüber hinaus sind die Inhalte zur besseren Filterung nach Themenfeldern kategorisiert sowie im Hinblick auf die spätere Nutzung im Kontext der Methode BIM möglichen Einheiten, Datentypen und relevanten Modellobjekten zugeordnet. Letztere sind nach DIN 276 und DIM277 strukturiert. Insgesamt enthält die Tabelle 197 unterschiedliche Merkmale.

Die vom Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft betriebene BPM-Plattform sieht eine direkte Integration der Informationsanforderungen in die BIM-Anwendungen vor. Damit beinhaltet die BIM-Anwendung die zum gegenwärtigen Zeitpunkt definierten Inhalte für die Ausgabe eines PDF-Dokuments, welches die BIM-Anwendung umfänglich beschreibt.

Für die Integration müssen die Merkmale in der BPM-Plattform eingepflegt und mit den Prozessen der BIM-Anwendung verknüpft sein. Dies kann automatisiert erfolgen, da die Tabelle in elektronischer Form vorliegt und alle relevanten Informationen über die beschriebenen Spalten enthält. Am Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft ist für den Schritt eine Importfunktion der bestehenden Tabelle mit den Merkmalen in der BPM-Plattform eingerichtet worden. Diese ermöglicht das Einladen von tabellarischen Informationen zu BIM-Anwendungen über das CSV-Format. Somit stehen die identifizierten Merkmale ebenfalls für die Definition von weiteren BIM-Anwendungen mit thematischen Überlagerungen zur Gebäudeperformance auf der Plattform zur Verfügung.

2.3.7 Erweitern des Ist-Bauwerksinformationsmodells um die Merkmale aus der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“

Das Ist-Bauwerksinformationsmodell, vgl. Kap. 2.2 wird entsprechend der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ um die benötigten Informationen angereichert.

2.3.8 Zusammenfassung und Lessons Learned

Zusammenfassung: Für das Living Lab am Campus Haspel wurde die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ entwickelt und das Ist-Bauwerksinformationsmodell wurde entsprechend um die benötigten Merkmale angereichert.

Lessons Learned für weitere Living Labs: Die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ kann auf weitere Living Labs übertragen werden. Die BIM-Anwendung beinhaltet somit ein Konzept, das in beschreibender Form einen Vorschlag für eine ganzheitliche Datenhaltung darstellt. Durch die Beschreibung der BIM-Basisprozesse werden technische Lösungen vorgeschlagen. Für fast alle Lösungen bestehen bereits Möglichkeiten vorhandene Systeme weitestgehend zu nutzen bzw. zu integrieren. Für den Kernprozess „Messwerte prüfen“ wird in Ziff. 2.4.1 eine technische Lösung auf Demonstrationsebene vorgestellt.

Mit Hilfe der erstellten BIM-Anwendung wird es möglich durch Informationsvernetzung, Definition und Überprüfung von Gebäudequalitäten sowie eine kontinuierliche Qualitätssicherung darzustellen, mit der die Performance von Nichtwohngebäuden im Betrieb

verbessert (Perform SIMON) und die Umweltbelastung durch eine effiziente Decarbonierung der Energieversorgung reduziert wird (Perform GRID).

2.4 Entwicklung eines Konzepts für eine Datenaustauschnittstelle der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“

Die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ beschreibt wer wann welche Tätigkeiten durchzuführen hat und wer wann welche Informationen an wen zu liefern hat und wie diese Informationen mit den geometrischen Informationen verknüpft werden sollten. Die Umsetzung einer Vielzahl der durchzuführenden Tätigkeiten wurden bereits beschrieben und es wurde gezeigt, dass für diese Aufgaben im Rahmen der BIM-basierten Betrachtung von Gebäudeperformance bereits Lösungen existieren. Im Folgenden werden die Erkenntnisse zusammenfassend aufgeführt:

Nutzerbedarfsprogramm erstellen

Die bereits vor der Planungsphase festgelegten Ziele müssen SMART definiert sein, bevor sie in das Nutzerbedarfsprogramm einfließen (Performance-Based Design). Zwar existiert in dieser frühen Phase von Projekten i.d.R. kein Bauwerksinformationsmodell, die aufzustellenden Zielvorgaben sind jedoch Ausgangspunkt für die weitere Betrachtung der Gebäudeperformance mit BIM. Über die Laufzeit des Projektes haben die Forschenden für mehrere der Pilotprojekte solche Ziele definiert (s. Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Bedarfswerte simulieren

Die Bedarfswerte der Gebäudeperformance werden in der Planungsphase über Simulationen ermittelt, die auf Basis von Bauwerksinformationsmodellen durchgeführt werden können. Tests der Arbeitspakete haben gezeigt, dass diverse Simulationssoftware-Pakete zwar für den IFC-Standard zertifiziert sind, darüber jedoch aktuell z.T. nur die Geometrien und keine weiteren Informationen importieren können, obwohl diese technisch mittels des IFC-Standards übertragen werden können. Der Austausch mit den Herausgebern der Software-Systeme hat ergeben, dass dies aber in Zukunft möglich sein wird. Für das Pilotprojekt Gebäude HC wurden von den Forschenden unterschiedliche Simulationen erstellt (s. Kap. 3.4.1).

Mess- und Regelkonzept aufstellen

Das Mess- und Regelkonzept beinhaltet eine Reihe von Vorgaben, welche sich entsprechend der Bezeichnung auf die vorzusehenden Messpunkte und Regelung der Anlagen beziehen. Die Vorgaben können in Bauwerksmodellen an den entsprechenden Modellobjekten über bestehende Autorensysteme eingepflegt oder verknüpft werden. Die dafür notwendigen Merkmale wurden von den Forschenden im Rahmen der Informationsanforderungen der BIM-Anwendung identifiziert und exemplarisch in die vorliegenden Modelle implementiert.

Leistungen ausführen

Parallel zu den Baumaßnahmen sind abweichende oder ergänzende Informationen zu denen aus der Planung festzuhalten. Andernfalls können die falschen oder fehlenden Informationen (z.B. ID des tatsächlich eingebauten Sensors) im weiteren Verlauf dazu führen, dass Mehraufwände für eine nachträgliche Aufnahme oder Abstriche bei der Auswertung der Gebäudeperformance notwendig sind. Da das zentrale Pilotprojekt Gebäude HC bereits zu Beginn des Forschungsprojektes fertiggestellt war, wurden die entsprechenden Unterlagen vom BLB angefragt und untersucht.

Revisionsunterlagen erstellen

Die modellbasierten Revisionsunterlagen spiegeln die Anpassungen des Bauwerksinformationsmodells an den realen Zustand des Gebäudes wider. Die dafür notwendigen Informationen werden auf Grundlage einer As-Built-Kontrolle ermittelt. Die Anpassungen werden in den bestehenden Autorensystemen vorgenommen. Aus geometrischer Sicht ist über die Aufnahme von Punktwolken der Ist-Zustand erfasst (s. Kap. 2.2.4). Die notwendigen Informationen zu den Sensoren und Aktoren liegen über die Dokumentationen mehrfacher Begehungen des originalen HC-Gebäudes vor.

Messwerte bereitstellen

Die Ist-Daten für die Analyse der Gebäudeperformance werden in Form von Messwerten über Sensorik aufgenommen. Von dort müssen diese für die weitere Verarbeitung bereitgestellt werden. Bei einer Vielzahl von Sensoren besteht die Herausforderung darin, die Datenmenge über geschickte Filterung handhabbar zu machen. Als Filterkriterien eignet sich z.B. die Angabe von Zeiträumen. Mit BIM könnten die Filterkriterien zusätzlich um Informationen wie räumliche Abgrenzungen durch Gebäudeabschnitte oder Räume ergänzt werden. Für eine derartige Verknüpfung existiert nach Recherchen der Forschenden jedoch keine bestehende Software, welche gleichzeitig dafür ausgelegt ist die Vielzahl an Messwerten zu verarbeiten. Daher haben die Forschenden diesen Schritt im Hinblick auf die technische Umsetzung im Rahmen eines Demonstrators näher untersucht und umgesetzt (s. Kap. 3.1 u. 3.4.1).

Messwerte plausibilisieren

Die automatisiert erfassten Messwerte können fehlerhaft sein – z.B. durch einen defekten Sensor. Regeln für die Prüfung der Messdaten können grundsätzlich auch für die Anwendung auf Bauwerksinformationsmodelle entwickelt und mit Software für die regelbasierte Modellprüfung angewendet werden.

Gebäudeperformance analysieren

Zur Überprüfung der Performance Ziele werden die Daten aus dem Monitoring mit den Daten aus der Planungsphase verglichen. Die Analyse der Gebäudeperformance ist vielschichtig. Auch wenn die Zielvorgaben in der Projektentwicklung SMART definiert sind, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten die Einhaltung zu prüfen. Die Forschenden haben verschiedene Analysen im Rahmen des Forschungsprojektes für das Pilotprojekt Gebäude HC aber auch andere Pilotprojekte durchgeführt und die Erkenntnisse daraus dokumentiert (s. Kap. **Fehler! V erweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Verbesserungsmaßnahmen ableiten

Die Verbesserungsmaßnahmen beschreiben im Wesentlichen eine Anpassung einzelner Punkte im Mess- und Regelkonzept auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Analyse. Dementsprechend können auch die in diesem Schritt durchzuführenden Anpassungen in den bestehenden Autorensystemen vorgenommen werden. Die Forschenden haben die identifizierten Verbesserungsmaßnahmen bei den Pilotprojekten dokumentiert und an die verantwortlichen Personen weitergeleitet. Die wesentlichen Aspekte sind in die gegenständliche Anlage zum Sachbericht eingeflossen (s. Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

2.4.1 Aufbau des Demonstrators

Die Auswahl der Softwareentwicklungsumgebung ist von zentraler Bedeutung für den Aufbau eines Demonstrators. Diese bestimmt über ihren Aufbau mögliche Spezifikationen, Funktionen und Einsatzbereiche während der Entwicklung und dem späteren Einsatz. In Anlehnung an vorangegangene Forschungsprojekte des Lehr- und Forschungsgebietes Baubetrieb und Bauwirtschaft entscheiden sich die Forschenden für Meteor. Meteor ist eine integrierte Open-Source-Entwicklungsumgebung für Web- und mobile Apps sowie Desktop-Anwendungen. Sowohl im Front- als auch im Backend kommt die Programmiersprache Java-Script zum Einsatz. Zudem verfügt das Paket mit MongoDB bereits über eine voll integrierte NO-SQL-Datenbank, deren Funktionalitäten nach Auffassung der Forschenden gute Randbedingungen für die Umsetzung der Aufgaben beinhalten.

Die App zeigt beispielhaft die bereits unter den Umsetzungsmöglichkeiten der fachlichen Prozesse mit BIM beschriebenen Funktionalitäten für die Bereitstellung von Messdaten auf. Dazu gehört auf der einen Seite die Integration des Soll-Modells des HC-Gebäudes, um über die darin enthaltenen Informationen Soll-Werte der Gebäudeperformance und Filterkriterien für die Messdaten zur Verfügung zu stellen. Auf der anderen Seite müssen die Messwerte des Monitorings in der Datenbank vorgehalten und bereitgestellt werden.

2.4.2 Integration des Ist-Bauwerksinformationsmodells

Bei der Integration des Ist-Bauwerksinformationsmodells in den Demonstrator sind zwei Aspekte zu betrachten. Zum einen die Visualisierung der geometrischen Repräsentation, um das Modell für den Nutzer darstellen und greifbar machen zu können. Zum anderen die hinter den Modellobjekten stehenden Daten.

Das Bauwerksinformationsmodell des HC-Gebäudes wurde in Autodesk Revit und Grafisoft Archicad erstellt und als IFC-Datei exportiert. Da IFC ein offener Standard ist, können mit der frei verfügbaren Bibliothek IfcOpenShell die geometrischen Informationen und die Objektinformationen aus dem Modell in unterschiedliche Datenpakete separiert werden. Dies hat den Vorteil, dass in Abhängigkeit der Funktionen der Anwendung nur Teile des Gesamtmodells geladen werden müssen und auf diese Weise die Performance-Ansprüche an die Hardware reduziert werden können. Darüber hinaus bietet die Aufteilung eine zusätzliche Möglichkeit zu Autorensystemen das Modell für den Demonstrator aufzubereiten und zu erweitern. (Abb. 14).

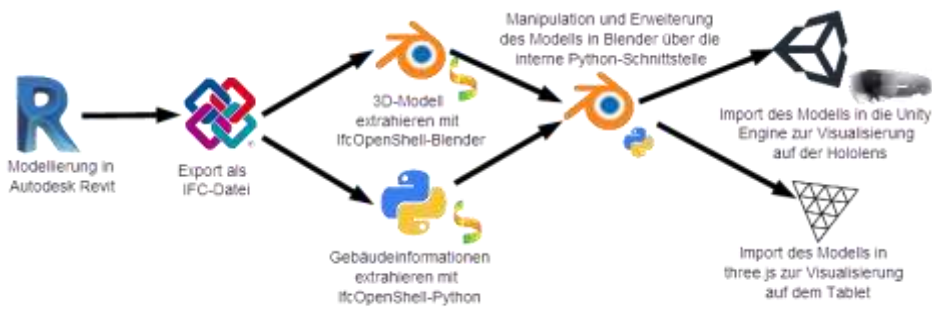


Abb. 14: Export und Aufbereitung der Daten von Revit zum Import in mobile Endgeräte

Die ausgelesenen Daten beinhalten unter anderem die Information über die Position der Räume, deren Bezeichnung und Nutzungsart, welche für die Zuordnung und Filterung der Monitoringdaten später relevant ist. Des Weiteren ermöglichen es diese Daten, gezielt Objekte auszublenden. Durch das automatisierte Ausblenden von Bauteilgruppen wie Decken oder Wandplatten kann man einen Blick in beliebige Gebäudemodelle realisieren und die einzelnen Ebenen getrennt darstellen.



Abb. 15: Gebäudemodell als interaktive 3D-Visualisierung

Die in IFC vorliegenden Gebäudemodelle sind zum Teil sehr detailliert mit vielen Objekten in hoher Auflösung, was hohe Rechenkapazitäten von den Endgeräten erfordert. Da mit den IFC-Daten auch die Typen der Objekte vorliegen, können darüber Gegenstände wie Deckenlampen oder Stühle durch andere Darstellungen in niedrigerer Auflösung ausgetauscht werden.

2.4.3 Integration der Monitoring-Daten

Die Monitoring-Daten werden über die im Pilotprojekt Campus Haspel vorhandene Gebäudeleittechnik (GLT) erfasst. Standortklimadaten liefert die im Rahmen des Vorhabens erweiterte Klimamessstation. Diese Daten werden für die Plattform aufbereitet und bilden Rahmenbedingungen zur Ermittlung der Ist-Werte.

In einem ersten Schritt muss eine entsprechende Datenanbindung aufgebaut werden. Das Konzept zur Extraktion der Daten aus dem GLT-System stellt somit eine zentrale Säule für alle Arbeitspakete dar. Dieses Konzept beinhaltet folgende Punkte:

- Die geltenden Anforderungen an den Datenschutz, auch in Bezug auf Daten aus dem weiteren Netzwerk der Gebäudeleittechnik, welches vom Dezernat 5 der Bergischen Universität verwaltet wird.
- Die Erfassung aller Daten und Datenpunkte im Netzwerk über die bestehenden Controller und unter Berücksichtigung der bestehenden Dokumentation.
- Die Ausfallsicherheit des Konzeptes auf ein Maximum zu erhöhen, um lückenhafte Daten weitestgehend zu vermeiden.
- Die redundante Sicherung der Daten auf Geräten außerhalb des GLT-Netzes, um über die darauf aufbauenden Tests keine Gefährdung der Datengrundlage hervorzurufen.

Zur Gewährleistung eines funktionierenden Datenaustausches und einer kontinuierlichen Bereitstellung für die AP SIMON und GRID ist eine Gesamtstruktur für die Vernetzung der notwendigen Hardware-Komponenten zu definieren. Dieses wurde in enger Abstimmung mit Dezernat 5 (Gebäude-, Sicherheits- und Umweltmanagement) und dem ZIM (Zentrum für Informations- und Medienverarbeitung) der Bergischen Universität Wuppertal aufgestellt. In sehr zeitintensiver Zusammenarbeit ist es gelungen ein Konzept zu erstellen und erfolgreich zu implementieren, welches den Anforderungen aller Beteiligten genügt und mit den wesentlichen Komponenten veröffentlicht werden kann (Abb. 16).

In der Ausgangslage besteht für die Gebäudeleittechnik ein separates Netzwerk, welches keine Verbindung zu den Rechnernetzen des ZIM aufweist. Für die vorgesehene Anbindung ist eine ausreichend sichere Verbindung zwischen den beiden Netzwerken zu schaffen, über die lediglich Daten aus dem GLT-Netz herausgeführt werden können. Im Rahmen der Entwicklung wurden vor allem folgende Risiken identifiziert:

- Die in beiden Netzwerken geltenden Bestimmungen für den Datenschutz können nicht eingehalten werden
- Die Datenverbindung ermöglicht ein unbefugtes Zugreifen auf die Gebäudeleittechnik
- Die Veröffentlichung der Beschreibungen erleichtert die Identifizierung von Schwachstellen

Der Lösungsweg sieht einen separaten Rechner im Netzwerk der GLT vor, welcher ausschließlich dafür verantwortlich ist, über eine entsprechende Software die Messwerte der Datenpunkte zu extrahieren und bereitzustellen. Dies geschieht in Zeitintervallen mittels einzelner Dateien über eine streng regulierte Verbindung auf ein speziell dafür beim Rechenzentrum eingerichtetes Laufwerk. Das Laufwerk ist zusätzlich mit besonderen Rechten belegt und stellt die Dateien unter weiteren Zugriffsbeschränkungen im Rechnernetzwerk der Bergischen Universität bereit.

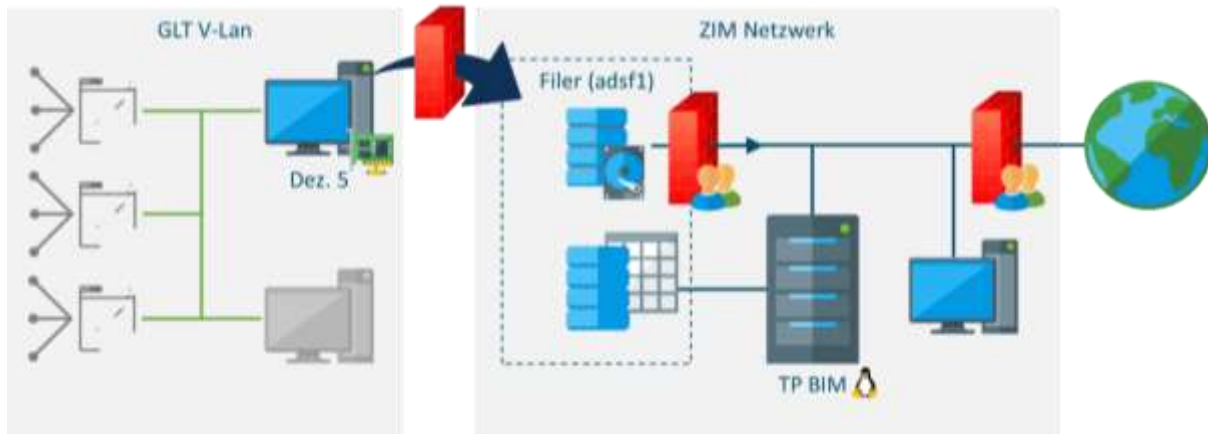


Abb. 16: Gesamtstruktur für die Vernetzung der notwendigen Hardware-Komponenten, Bildquelle: Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Bergischen Universität Wuppertal

Der hinter der Ausarbeitung stehende Arbeitsaufwand hat gezeigt, wie wichtig die frühzeitige Aufstellung von Gebäudeperformance-Zielen und Berücksichtigung bereits während der Planung von Bauwerken ist. Ohne deutlich effizientere Wege stehen die Ergebnisse in keinem sinnvollen Verhältnis zum Aufwand.

Nach dem Einrichten einer Datenanbindung müssen diese für die Bereitstellung in der Plattform vom Laufwerk des Rechenzentrums abgeholt und aufbereitet werden. Dafür wurde ein serverseitiger Dienst entwickelt, welcher den Pfad des Laufwerks in Bezug auf neue Messwert-Daten aus der GLT überwacht. Sind neue Dateien vorhanden, werden diese abgeholt, aufbereitet und in die Datenbank integriert.

Für die Aufbereitung der Rohdaten aus der Gebäudeleittechnik fehlte zunächst eine eindeutige und dauerhafte Zuordnungsmöglichkeit der Daten zu Datenpunkten. Über das Arbeitspaket SIMON wurden Listen der Datenpunkte eingeholt. Darüber hinaus ermangelte es einer brauchbaren Struktur der Informationen für die Nutzung in den Analysen. Über Skripte im Rahmen des Dienstes ist es gelungen die Daten nach den Anforderungen der beiden anderen Arbeitspakete umstrukturieren. Grundsätzlich erscheint die Datenverarbeitung in eine für den Soll-/Ist-Vergleich geeignete Struktur ein sehr wichtiger Baustein für die Performanceanalyse. Erst wenn die Daten in einer geeigneten Struktur vorliegen, können sie mit vertretbarem Aufwand evaluiert werden.

2.4.4 Bereitstellung der Daten mit Bauwerksinformationsmodellen

Für die Bereitstellung der Daten und die dafür notwendige Filterung ist insbesondere die weitere Verarbeitung relevant. In einem engen iterativen Austausch der Arbeitspakete wurden die fachlichen Arbeitsabläufe entsprechend der Beschreibungen in der BIM-Anwendung vorgestellt. Im Ergebnis erscheint eine tabellarische Ausgabe als CSV-Datei mit folgenden Filterungsmöglichkeiten sinnvoll:

- Angabe des Zeitraums der Messdaten
- Geometrische Eingrenzung der Messdaten über Bauwerksstrukturelemente (z.B. Gebäudeabschnitte, Etagen und Räume)

- Auswahl spezifischer Messpunkte
- Beschränkung auf Arten von Messwerten über Einheiten

Die Monitoringdaten beinhalten bereits die meisten Informationen. Lediglich die geometrische Eingrenzung lässt sich damit nicht umsetzen. Um dies zu ermöglichen müssen den Messwerten bzw. den zugehörigen Datenpunkten nachträglich in der Datenbank die Strukturelemente zugeordnet werden können. Hierfür ist eine Verknüpfung mit Räumen als feingliedrigstes Strukturelement für ausreichend zu erachten, da diese über die modelleigene Struktur bereits über weiterführende Verknüpfungen mit übergeordneten Strukturelementen verfügen. Die für die Verknüpfung mit den Datenpunkten notwendigen Informationen zu den Räumen liegen im integrierten Soll-Modell vor. Jeder Raum verfügt über einen Global-Unique-Identifier (GUID) sowie eine im Rahmen des Pilotprojektes eindeutige Raumbezeichnung. Über einen Verweis unter den Datenpunkten auf die eindeutigen Bezeichner der Räume kann die Verknüpfung erzeugt werden. Dies erfolgt über ein zusätzliches Merkmal an den Datenpunkten.

Damit stehen die identifizierten Filterkriterien für die Bereitstellung der Daten als CSV-Datei zur Verfügung. Entgegen der herkömmlichen Vorgehensweise sind die Datenpunkte mit BIM-basierten Informationen verknüpft. Grundsätzlich besteht damit auch die Möglichkeit diese über den invertierten Weg zur Integration des Soll-Modells entsprechend als IFC-Modell zu exportieren. Dies macht nach Ansicht der Forschenden jedoch in der Praxis wenig Sinn, da für jede Analyse ein umfangreiches IFC-Modell erzeugt würde, welches in dieser Form in den weiteren Schritten nicht benötigt wird.

2.4.5 Zusammenfassung und Lessons Learned

Zusammenfassung: Für die Umsetzung der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ und hier konkret den Prozess „Messwerte bereitstellen“ fehlte die technische Umsetzungsmöglichkeit. Aus diesem Grund wurde eine Lösung auf Demonstrationsebene entwickelt, die gewährleistet, dass sowohl geometrische Objekte als auch zugehörige Soll-Informationen, die Ergebnisse aus Simulationen aus der Planung darstellen, aus den Bauwerksinformationsmodellen gefiltert werden konnten und die Messwerte aus Perform SIMON für einen Soll-Ist-Vergleich zur Verfügung standen.

Lessons Learned für weitere Living Labs: Das Konzept der technischen Lösung kann für weitere Living Labs übernommen werden.

3 Simulation und Monitoring

3.1 Querschnittsuntersuchungen und Methodik

Um die Energieperformance der Pilotgebäude erfolgreich untersuchen zu können, wurde nach verschiedenen Methoden vorgegangen.

Zur Erstellung der Gebäudemodelle sind von Seiten des*der Eigentümers*in grundlegende Daten zu Verfügung zu stellen. Dazu gehören die Geometriedaten, wie Hüllflächen, Grundflächen und Energiebezugsflächen, mindestens in Form von Plänen, besser noch in einem geeigneten digitalen Format. Hinzu kommen die jeweiligen Bauteileigenschaften, wenn sie nicht schon in einem geeigneten BIM Modell zur Verfügung stehen.

Für die Erhebung der Daten muss das vorhandene Zählerkonzept im Gebäude analysiert und nach Bedarf erweitert werden. Erfahrungen aus dem Projekt haben gezeigt, dass eine nachträgliche Installation von Zählern, gerade in der fünfjährigen Gewährleistungsphase, extrem schwierig umzusetzen ist. Durch die Gewährleistung sind Bauherren an die ausführenden Firmen gebunden. Solch spezialisierte Firmen haben gut gefüllte Auftragsbücher, so dass dadurch kleinere Aufträge nicht lukrativ sind, oder die Vorlaufzeit so lang ist, dass Fördergelder auslaufen. Selbst wenn Zähler vorhanden sind, ist der logistische Aufwand sie auf die Gebäudeleittechnik aufzuschalten eine große Hürde. In einem solchen Fall sollten vorhandene Zähler bis zur Aufschaltung mindestens monatlich abgelesen werden.

Die Energieverbrauchsdaten müssen je nach Analysetiefe in unterschiedlicher zeitlicher Detailtiefe erfasst werden. Verbrauchsdaten sollten neben den Jahresverbräuchen in monatlicher Auflösung betrachtet werden, um so jahreszeitliche Unterschiede herauszulesen und erwartungsgemäß vom klimatischen Verlauf unabhängige Verbraucher zu erkennen. Zu Erstellung von Kennfeldern zu einzelnen technischen Anlagen, sollten mindestens Tageswerte vorhanden sein. Zur Erstellung von Lastprofilen der elektrischen Verbraucher müssen Stundenwerte vorhanden sein.

Klima und Wetterdaten sollten im besten Fall über eine eigene Klimamessstation direkt am Gebäude erfasst werden. Ist dies nicht umsetzbar, kann auf die freie Klimadatenbank¹⁵ des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) zurückgegriffen werden.

Der automatisierte Datentransfer und Export der Mess- und Zählerdaten aus der Gebäudeleittechnik ermöglicht es theoretisch, mit geringem Aufwand die aktuellen Verbrauchsdaten greifbar zu haben und auch zu sichern. Oft stellen die Exportmodule der Gebäudeleittechniken aber kein geeignetes und standardisiertes Datenformat zur Verfügung oder nur gegen Zusatzkosten. Verwaltet man mehrere Gebäude und möchte sie in einer Datenbanksoftware sichern und gegenüberstellen, so muss für jedes Gebäude und jede GLT ein eigenes Skript geschrieben werden, um die Daten in ein einheitliches CSV-Format zu überführen. Dieses wurde für das LivingLab HC im Projekt in Zusammenarbeit mit dem AP-BIM entwickelt. Vor der Ablage in der Datenbank müssen die Daten auf Qualität (korrekte

¹⁵ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/

Installation,...) und Plausibilität (Datenpunktzuordnung, korrekte Umrechnungsfaktoren,...) geprüft werden. Die Qualitätssicherung für die Datenpunkte ist vielfach unzureichend. Das betrifft in der Praxis Zuordnungsfehler, fehlerhafte Umrechnungsfaktoren für Messwandler, fehlerhaft montierte Temperatursensoren, etc.). Ohne eine systematische Datenanalyse bleiben solche Fehler über Jahre unbemerkt. Fachspezifische Analysedatenbanken für den Gebäudebetrieb ermöglichen neben der Datensicherung, integrierte Auswertungs- und Vergleichsmöglichkeiten. Hierfür bietet die im Projekt verwendete Datenbanksoftware Monisoft¹⁶ viele Möglichkeiten.

Neben dem Vergleich und der Bilanzierung der Verbrauchsdaten zu vorausgegangenen Jahren ist es wichtig, ein Energiebedarfsmodell auf Endenergieebene zum Vergleich heranziehen zu können. Zu Energiebedarfsberechnung können Tools mit unterschiedlicher Detailtiefe verwendet werden. Im Projekt wurden für die Bilanzierung auf Monatsebene das Excel-Tool EnerCalc¹⁷ verwendet. Dieses berechnet die Energiebedarfswerte auf Nutz-, End- und Primärenergieebene in Anlehnung an die DIN V 18599. Das normative Rechenverfahren macht es möglich die Gebäude untereinander zu vergleichen, bildet aber durch die vorgegebenen Randbedingungen die Gegebenheiten des einzelnen Gebäudes nicht ab. Neben den normativen Berechnungen wurden daher die Nutzungsprofile, sowie die Wetterdaten für den Standort und das Untersuchungsjahr angepasst. Erst durch die Anpassungen ist ein Verbrauchs-/Bedarfsabgleich nach DIN 18599 Beiblatt 2 durchführbar.

Für detailliertere Untersuchungen, beispielsweise des Hörsaals in Gebäude HC, wurde ein Simulationsmodell in IDA-ICE¹⁸ erstellt. Hier konnte durch eine IFC-Schnittstelle eine Anbindung an das im AP-BIM erstellte Gebäudedatenmodell zurückgegriffen werden. IDA-ICE bietet die Möglichkeit tiefgreifende Simulationen durchzuführen, von der Anlagentechnik über sommerliches Raumklima bis hin zu Tageslichtsimulationen.

Neben der Energieperformance ist auch die Raumklimaperformance ein wichtiger Baustein für den effizienten Gebäudebetrieb. Durch eine Überprüfung des Raumklimas können die Energieverbräuche weiter analysiert und validiert werden. Im Projekt wurden dazu unterschiedliche Raumklimatestgeräte getestet und in Feldversuchen eingesetzt. Die untersuchten Geräte können Tabelle 1 entnommen werden. Von den sieben getesteten Messgeräten können nur vier die Messdaten aufzeichnen. Für Langzeiterhebungen kamen so nur zwei internetfähige Geräte mit Cloudanbindung in Frage. Bei den WLAN fähigen Messgeräten hat sich gezeigt, dass ein WLAN-Netz wie ein klassisches Heimnetzwerk mit WLAN-Schlüssel benötigt wird. In den Uniräumen steht dagegen nur WLAN-Netz mit zentraler User- und Passwortanmeldung zur Verfügung. Daher wurde dort ein zusätzlicher handelsüblicher WLAN Router beschafft und über diesen die Messgeräte eingebunden. Das Betreiben zweier paralleler WLAN-Netze hat jedoch zeitweise zu Funkproblemen geführt,

¹⁶ *MoniSoft*, Software für Monitoring und energetische Betriebsoptimierung, Version 17-10-2017

¹⁷ *EnerCalc*, Excel-Werkzeug für Vereinfachte Energiebilanzen in Anlehnung an DIN V 18599:2011-12, Version 5.27.149, 2021 © Markus Lichtmeß, siehe <https://www.enec.de/page/EnerCalc/index.html>

¹⁸ *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)*, Software zur Gebäudesimulation, <https://www.equa.se/en/ida-ice>

wodurch keine Messdaten übertragen wurden. Neben dem parallelen Betrieb zweier WLAN-Netze kann es aber auch durch die baulichen Strukturen des Gebäudes zu Verbindungsproblemen kommen. Eine Abhilfe zu den WLAN gestützten Messgräten können die Raumklimamessgeräte mit einer Cloud-Einbindung via GSM sein, wobei hier analog zu Mobiltelefonen je nach Bauweise Empfangsprobleme auftreten können.

Bei den Raumklimamessungen ist zu beachten, dass der Datenschutz der Personen in den Räumen gewahrt wird. Über die CO₂-Konzentration und die Raumlufttemperatur können beispielsweise Rückschlüsse auf die Anwesenheitszeiten gezogen werden und könnte so zu einer Überwachung der Personen beitragen. Es muss gewährleistet werden, dass die Daten nur zur Validierung des Gebäudebetriebs genutzt werden und verantwortlichen vorgesetzten Personen zu keinem Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Die Daten sollten am besten anonymisiert erfasst werden. Es sollte mit dem*der Nutzer*in eine Betriebsvereinbarung geschlossen werden, in der alle Punkte vertraglich transparent festgehalten werden.

Die systematische Analyse der Stichproben anhand der Messdaten aus dem Gebäude in Mettmann (Anhang 4) hat gezeigt, dass das Raumklima mit mindestens 10 Messgeräten untersucht werden sollte, um das Gesamtbild des Gebäudes zu charakterisieren.

Tabelle 1: Übersichtstabelle für mobile Raumklimasensorik

	TFA Dorstmann	EMAQ- 11	HOBO MX1102	Netatmo smarte Wetterstation	Netatmo smarter Raumluftsensor	IC-Meter	Komerici HT-501
Foto							
Messung CO ₂	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Messung Temp	ja	-	ja	ja	ja	ja	ja
Messung Hum	-	-	ja	ja	ja	ja	ja
Messung Noise	-	-	-	ja	-	ja	-
Speicherung	-	-	intern	Cloud	-	Cloud	intern
Daten Übertragung	-	-	USB / Bluetooth	W-LAN	W-LAN	GSM	USB
Netz / Batterie	Netz	Netz	Batterie	Strom	Strom	Strom	Netz / Akku
Preis	70 €	168 €	750 €	150 €	100 €	450 €	100 €

Der Einsatz einer CO₂-Ampel soll den Personen in den Büroräumen den CO₂-Gehalt der Innenraumluft visuell anzeigen und so bei schlechten Raumklimakonditionen motivieren, die Fenster zum Lüften zu öffnen. Im Projekt wurden smarte LED-Leuchten über eine Smart-Home

Programmierungsplattform via IFTT¹⁹ mit den Messgeräten verknüpft. So wurde bei einem CO₂ Gehalt zwischen 1000 ppm und 1200 ppm die Leuchtfarbe gelb eingestellt, steigt die CO₂ Konzentration über 1200 ppm, so wechselt die Farbe zu rot. Liegt der Wert unter 1000 ppm leuchtet sie nicht.

Die raumklimatischen Bedingungen werden nach der DIN EN 15251:2012 in unterschiedliche Kategorien aufgeteilt und zeigen an, ob nach deren Sinn eine gute Raumluftqualität (Kategorie I) bis schlechte Raumluftqualität (Kategorie IV) vorliegt. Teilt man diese Kategorien auf die Nutzungszeiten auf, kann man den jeweiligen Anteil der Vorliegenden Kategorie sehr anschaulich darstellen. Durch die Einteilung in die Kategorien werden die Bedingungen der besten und der schlechtesten Kategorie nicht qualitativ bewertet. Daher sollte gerade im Sommerfall der Vergleich zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2:2013 gezogen werden.

3.2 U-Wert Messung im Bestand

Im Rahmen der U-Wert Messungen im Bestand wurden verschiedene Messverfahren unter unterschiedlichen Bedingungen geprüft und bewertet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick. Als Referenzverfahren wurde die in ISO 9869-1 genormte Wärmefluss-Methode mit einer großen Wärmeflussplatte verwendet. Die weiteren Messungen, insbesondere in der „Experimentellen Raumzelle“, wurden der großen Wärmeflussplatte gegenübergestellt.

Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten U-Wertmessungen

	Wärmeflussmessung nach ISO 9869-1		Finnisches Messgerät „Arcada“ (10cm x10cm)*
	Große Wärmeflussplatte (18cm x 18cm)*	Kleine Wärmeflussplatte (9cm x 9cm)*	
Langzeitmessung Außenwand Wärmelabor (BUW)	X	---	X
Kurzzeitmessungen in Schulgebäuden in Hagen	---	---	X
Parameterstudien „Klimakammer“	X	X	X

* Größe der Messfläche

3.2.1 Langzeitmessungen an der Außenwand des Wärmelabors

Die Langzeitmessungen an der Außenwand des Wärmelabors der BUW waren chronologisch die ersten Messungen. Einige der in der experimentellen Raumzelle untersuchten Parameter wurden auf der Grundlage dieser Messungen entworfen. Die folgenden Abbildungen zeigen die Applikation sowohl der Wärmeflussplatte zur Langzeitmessung als auch der Geräte des

¹⁹ Conrad Connect, Online Plattform zur Verknüpfung smarterer Geräte, <https://conradconnect.com/de>

finnischen Herstellers „Arcada“ die als Kurzzeitmessgeräte mit Messdauern zwischen 60 min. und 120 min. vorgesehen sind.

Im Rahmen eines studentischen Projektes waren im Vorfeld der Messungen verschiedene, z.T. IR-selektiv beschichtete Planen und Vorhänge an der Messwand installiert worden, deren Ziel die Veränderung des Wärmeübergangswiderstandes auf der Wandaußenseite ist. Mit dem Wärmeflussverfahren sollte überprüft werden, ob und wie die äußeren Maßnahmen sich messbar auf die U-Werte auswirken.

Im Rahmen dieser Messungen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Das Kurzzeitmessverfahren „Arcada“ ergibt durchgehend höhere U-Werte des Wandaufbaus im Vergleich zum Wärmeflussverfahren. Die Erhöhung hängt von der Homogenität des Wärmeflusses in der Wand sowie von der Größe des Wärmeflusses ab. Im Mittel werden mit dem Kurzzeitmessverfahren zwischen 10% und 20% höhere U-Werte gemessen.
- Die Positionierung der Kurzzeitmessgeräte auf der Wand hat einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen U-Werte. Entsprechend der folgenden Abbildung kann diese auf die inhomogene Verteilung der Oberflächentemperatur und die damit über die Wand variierende Temperaturdifferenz zurückgeführt werden.
- Für das Kurzzeitmessverfahren konnte durch systematischen Austausch der einzelnen Messgeräte an verschiedenen Positionen gezeigt werden, dass verschiedene Messgeräte jeweils sehr vergleichbare Werte an denselben Positionen ergeben, während sich über den Wänden Streuungen ergeben.
- Darüber hinaus zeigt sich bei dem schweren Wandaufbau eine Abhängigkeit der gemessenen U-Werte von der Lufttemperaturdifferenz. Die Differenz sollte bei dem hier betrachteten, ungedämmten, schweren Mauerwerk nach Möglichkeit mindestens 10 K betragen. Infolge des geringeren Wärmeflusses bei gedämmten Wänden sollte die Lufttemperaturdifferenz noch größer sein. Auf Grundlage der unten beschriebenen Messungen in der Klimakammer wäre bei dem dort verwendeten gedämmten Kalksandsteinaufbau für einen vergleichbaren Wärmefluss eine Lufttemperaturdifferenz von knapp 20 K erforderlich.

Nach mehreren Monate Langzeitmessungen an der Wand mittels Wärmeflussplatten wurden im Rahmen des Projektes folgende Ergebnisse erzielt:

- Das Wärmeflussverfahren basiert zur Bestimmung des U-Wertes auf einer Integration der Messwerte über mindestens 3 Tage. Es konnte gezeigt werden, dass der gemessene U-Wert um ca. $\pm 5\%$ variiert, wenn der Beginn der Integration innerhalb derselben Messkampagne verschoben wird. Im Rahmen der später durchgeführten Untersuchungen in der Klimakammer wurde zudem ein Einfluss der Lufttemperaturdifferenz (und damit des zu Grunde liegenden Wärmeflusses) auf den gemessenen U-Wert ermittelt, der bei einer Änderung der Lufttemperaturdifferenz von 10 K auf 20 K bis zu 10% betragen hat.
- Für das hier betrachtete Beispiel einer „schweren Wand“ wurden zusätzliche Parameterstudien zum Pre-Processing der Messwerte durchgeführt. Bspw. wurden nur Werte zwischen 3.00 Uhr und 6.00 Uhr vormittags mit angepasster gleitender Mittelung verwendet. Hierbei konnte mit Ausnahme sehr ungünstiger klimatischer Bedingungen

gezeigt werden, dass eine Messung in einer Nacht ähnliche Ergebnisse zeigt wie eine 3-tägige Langzeitmessung, bei der die klimatischen Bedingungen nicht berücksichtigt wurden.

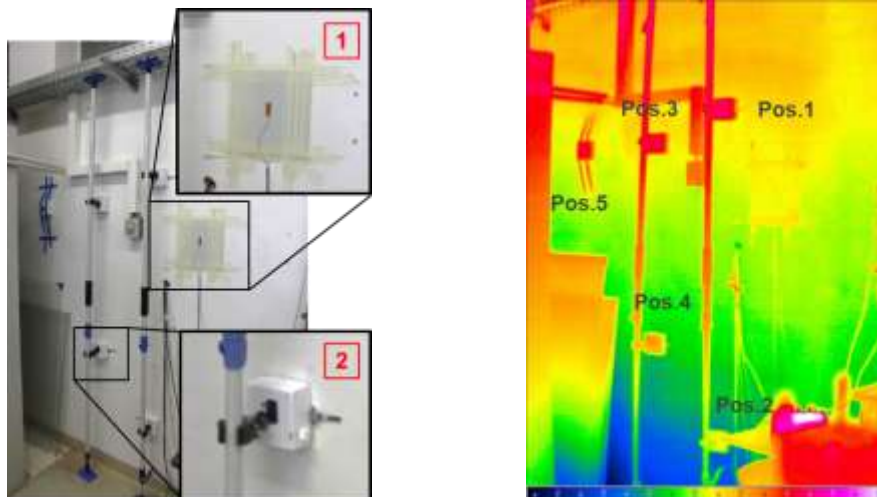


Abb. 17: Messaufbau der Langzeitmessungen an der Außenwand mit Wärmeflussplatte (1) und ergänzendem Kurzzeitmessverfahren (2) (links) sowie zugehöriges Wärmebild (rechts)

3.2.2 Kurzzeitmessungen an Schulgebäuden in Hagen

In zwei Schulgebäuden in Hagen wurden ausschließlich mit dem Kurzzeitverfahren von „Arcada“ Messungen an zwei Tagen mit unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Diese experimentellen Ergebnisse wurden einer Ausarbeitung Studierender gegenübergestellt, die die U-Werte der Konstruktionen der beprobten Schulgebäude aus Planunterlagen überschlägig berechnet hatten. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung zeigt die folgende Tabelle. Den angegebenen Werten liegen an beiden Messtagen jeweils vier bis fünf Messungen zu Grunde. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte die Sensibilität des Prüfverfahrens gegenüber der Lufttemperaturdifferenz und damit des Wärmestroms bestätigt werden.

In der folgenden Tabelle sind in der Emil Schumacher Schule in der Turnhalle etwas größere und in der Volmetal Schule deutliche Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen U-Werten zu erkennen. Diese Messungen zeigen plakativ die Auswirkungen in der Fläche inhomogener Wände sowie geringer Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft. Die Messungen im Geräteraum der Emil Schumacher Schule fanden bei Temperaturdifferenzen von im Mittel ca. 10 K statt. Dies ist eine tendenziell geringere Differenz. Zudem handelt es sich den Thermografie-Aufnahmen zufolge um eine verputzte Stahlbetonkonstruktion mit Mauerwerksausfachung. Die Thermografie-Aufnahmen zeigten einen sichtbaren Einfluss der Stahlbetonstruktur auf die Homogenität der Oberflächentemperaturen in der Wandfläche. Diese zeigt sich dann auch in den Messergebnissen.

Die Differenzen im Flur der Volmetal Schule lassen sich aus einer geringen Temperaturdifferenz zwischen dem unbeheizten Flur im 2. Stock und der Außenluft erklären. Im Computerraum konnte nur an einem vergleichsweise kleinen Wandabschnitt gemessen

werden. Generell zeigte sich, dass durch die starke Gliederung der Stahlbetonskelettstruktur, den großen Anteil an Fensterflächen sowie zahlreiche Heizkörper unter den Fenstern nur sehr wenige Flächen zur Verfügung stehen, auf denen Messungen überhaupt sinnvoll möglich sind.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der gemessenen und aus Planunterlagen berechneten U-Werte der in-situ Messungen an Schulen

School	Wall / Member	Building ¹⁾	U-Value ¹⁾ (Estimated/ Calculated)	U-Value (measured)
			[W/m ² K]	[W/m ² K]
Emil Schumacher	Leitungsbüro	Altbau	1,16	1,35
	Förderaum	Altbau	1,16	1,00
	Gerätraum	Turnhalle	1,76	1,30
Volmetal	Computerraum	Neubau	0,15	0,36
	Flur 2. Stock	Altbau	0,73	1,83

¹⁾ Quelle: Gebäude Performance - Schulen mit Zukunft, Bauphysik und TGA, Bergische Universität Wuppertal

3.2.3 Parameterstudien in der Klimakammer

Die Parameterstudien in der mit Projektmitteln wieder in Betrieb gesetzten und erweiterten Klimakammer haben einen langen Zeitraum in Anspruch genommen (siehe Kap. 3.2.4). Es sind die nach folgend dargestellten Parameter, Einflussgrößen und Messverfahren untersucht worden. Die Messdauer je Mauerwerkskonfiguration betrug in der Regel vier Wochen.

Messverfahren:

2 Wärmeflussplatten mit unterschiedlich großen Messbereichen sowie Kurzzeitmessgerät (Arcada)

Konfigurationen des Mauerwerks:

Kalksandsteinwand ohne Dämmung: typisches schweres Mauerwerk im Bestand

Kalksandsteinwand ohne Dämmung: typisches schweres Mauerwerk mit nachträglicher Dämmung

Porenbetonwand: typisches leichtes Mauerwerk im Neubau

Klimatische Randbedingungen:

Temperaturdifferenzen von 10 K und 20 K

Exemplarisch für die weiteren durchgeführten Messungen zeigt sich in der folgenden Abbildung an der schweren Kalksandsteinwand mit einer Außenwärmedämmung, dass auch das Wärmeflussverfahren nach ISO 9869-1 eine leichte Abhängigkeit des gemessenen U-Wertes von der Lufttemperaturdifferenz bzw. dem Wärmefluss zeigt. Mit dem Kurzzeitmessverfahren von „Arcada“ werden wie schon bei der Messung an der Außenwand des Wärmelabors etwas höhere U-Werte im Vergleich zum Wärmeflussverfahren gemessen.

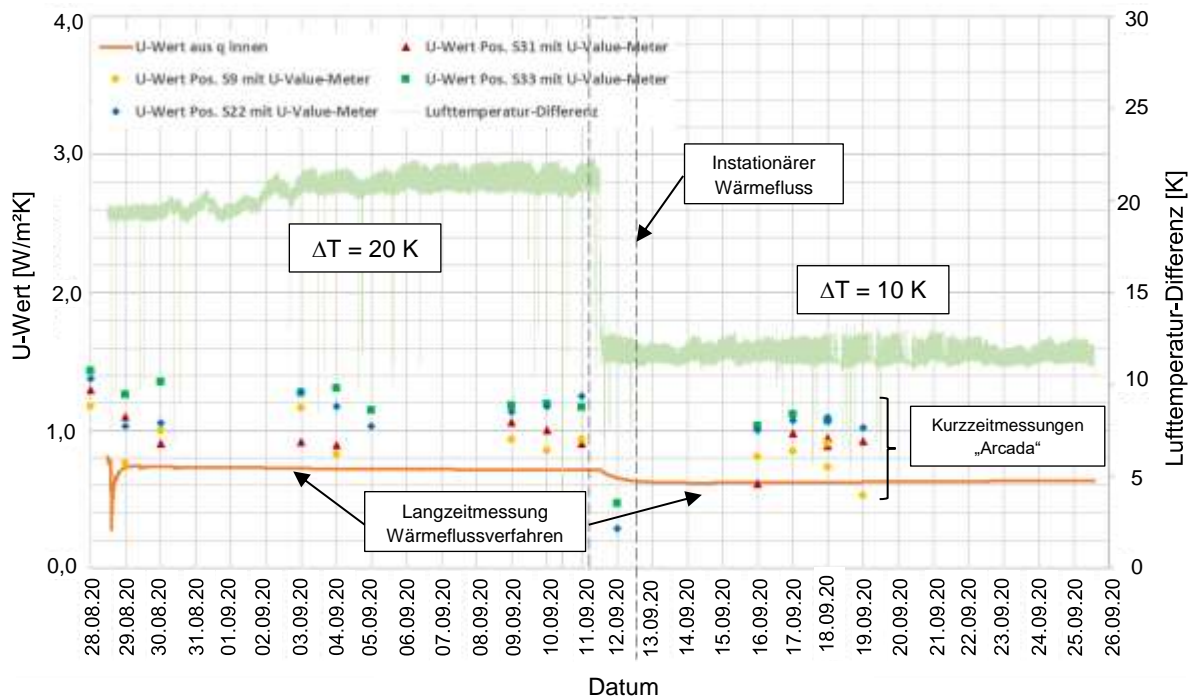


Abb. 18: Vergleich des Kurzzeit- und Langzeitmessverfahrens an einer Mauerwerkswand aus 24 cm Kalksandstein mit 5 cm Außenwärmedämmung, WLG 035.

In den Vergleichen zwischen den verschiedenen Mauerwerkskonstruktionen kann gezeigt werden, dass Maßnahmen, die zu einer Vergleichmäßigung des Wärmeflusses führen, wie eine Außenwärmedämmung auf schwerem Mauerwerk oder leichte Mauersteine mit dünnen Fugen ebenfalls zu gleichmäßigeren U-Werten führen. Dies gilt gleichermaßen für das Kurzzeit- und das Langzeitmessverfahren. Generell lagen die gemessenen U-Werte mit dem Kurzzeitmessverfahren 10 % bis 20 % über den U-Werten des Langzeitmessverfahrens.

Die Einschwingzeit des Wärmeflussverfahrens hängt deutlich davon ab, wie die Temperaturverteilung vor dem Beginn der Messung war. In der obigen Abbildung wurde ein konstanter U-Wert bereits nach ca. 36 Stunden erreicht, während bei der Kalksandsteinwand ohne Dämmung mehr als 72 Stunden vergangen sind.

Im Zusammenhang der umgerüsteten Klimakammer mit den Ergebnissen der Parameterstudie sowie den Ansätzen zum Pre-Processing der Messdaten aus den Langzeitmessungen an der Bestandswand des Wärmelabors sind aufbauende Forschungsanträge geplant, in denen gezielt instationäre Zustände in der Wand und ihre Auswirkungen auf die U-Wert Messung nach dem Wärmeflussverfahren nachgestellt werden. Das Ziel ist, durch eine geeignete Wahl der Wetterbedingungen in den Tagen vor einer Messung die Messdauer verkürzen zu können.

3.2.4 Klimakammerversuche

Im Zuge des Projektes wurde ein vorhandener, einfacher Trockenschrank mit Maßen von ca. 2 m x 2 m x 2 m zur gezielten und kontrollierten in-situ Prüfung von Mauerwerksabschnitten mit einer Fläche von 1 m x 1 m umgerüstet. Wie in der folgenden Abbildung zu erkennen,

wurde eine gedämmte Holztrennwand in die Raumzelle eingebaut, die eine gleichmäßige und konstante Durchströmung des Mauerwerksabschnittes ermöglicht. Zu erkennen ist weiterhin, dass eine sehr konstante Verteilung der Oberflächentemperatur mit nur geringen Randeffekten erreicht wurde.

Neben dem Einbau der Trennwand wurde die Temperatur maßgeblich verbessert, um für die Warmseite der Raumzelle das Halten einer konstanten Temperatur zu ermöglichen. Hierzu mussten die vorhandenen Heizungen mit einer regelbaren Leistungsaufnahme ergänzt werden, sodass im Betrieb eine Regelgenauigkeit von $\pm 0,5\text{ °C}$ erreicht wird. Aus Kostengründen wurde für die Kaltseite auf die vorhandene Klimatisierung des Labors zurückgegriffen, da der Einbau einer zusätzlichen Klimaanlage für die Kühlung den vorgesehenen Förderrahmen überschritten hätte. Im Betrieb wurde auf der Kaltseite ebenfalls eine sehr gute Gleichmäßigkeit der Temperatur erreicht.

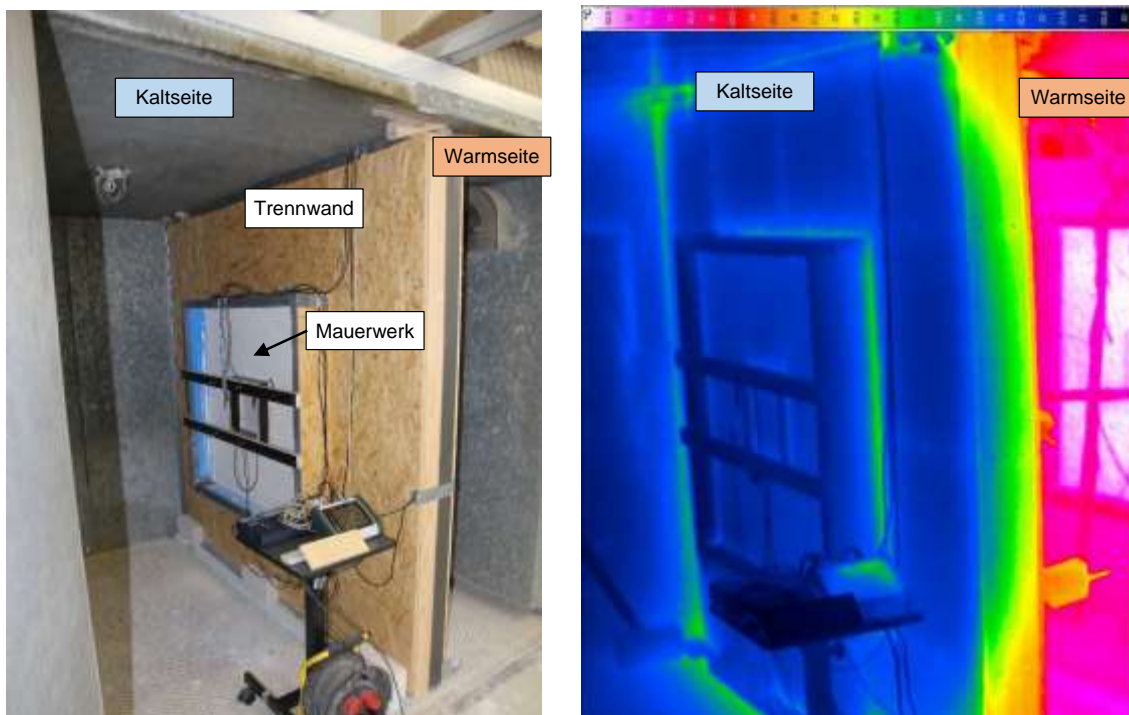


Abb. 19: Ertüchtigte Raumzelle mit Trennwand und Kalksandstein Versuchswand (links) und thermografischer Messung während eines Versuchs (rechts).

Eine Nachnutzung der Raumzelle ist in vielfältiger Weise möglich und geplant. Durch die maßgebliche Verbesserung der Steuerung ist es nunmehr möglich, die Kammer auch für Erwärmungsvorgänge mit mehreren Stufen und Haltezeiten zu verwenden, beispielsweise zur Validierung von Temperaturfeldberechnungen an Bauteilen.

Weiterhin ist geplant, ergänzende Forschungsvorhaben zur Frage der Validierung und Verfahrensverbesserung von in-situ U-Wert Messungen anzustoßen.

3.3 Experimentelle Raumzelle

Im Sinne der Ertüchtigung bzw. Erweiterung der Forschungsinfrastruktur am Campus Haspel der Bergische Universität Wuppertal wurden im Rahmen des Vorhabens an der experimentellen Raumzelle „btga box“ folgende Maßnahmen durchgeführt

- Technische Anpassung und Wartung der reversibel arbeitenden Wärmepumpe zum aktiven Heiz- und Kühlbetrieb über zwei Deckensegel
- Elektroinstallationsarbeiten zur Einbindung von Messdaten mehrerer, vergleichend untersuchter Wetterstationen, neuer Sensorik, Nutzungsinterfaces und der Sonnenschutzanlage.
- Softwareseitige Aktualisierung und Anpassung der Datenerfassung.

Abb. 20 zeigt die Raumzelle auf dem Campus nach der Inbetriebnahme von außen und innen.



Abb. 20: Ansicht der Raumzelle „btga box“ (links) sowie Innenaufnahme (rechts) im Kontext von Versuchen zum Nutzungsverhalten bei erhöhten Raumtemperaturen. Im Hintergrund ist die Sensorik zum thermischen Komfort, auf dem Tisch ein Beleuchtungsstärkesensor erkennbar. (Quelle: Bergische Universität Wuppertal)

Die Raumzelle eignet sich mit der erweiterten Funktionalität insbesondere für den Folgeeinsatz in der Lehre. Sie ermöglicht die Betrachtung von zeitlich hoch aufgelösten Messdaten im Vergleich zu Simulationsergebnissen und damit zur Kalibrierung von Simulationsmodellen für die gezielte Vorhersage der Raumperformance. Schwerpunkte bilden dabei das thermische Raumklima bei höheren Raumtemperaturen und die Modellierung des Nutzungsverhaltens im Umgang mit Fensteröffnung, Sonnenschutzanlagen und Einrichtungen zur aktiven Kühlung.

In 2019 wurde bereits mit der Nutzung im Rahmen der Arbeit einer Stipendiatin zur Erstellung einer ingenieurwissenschaftlichen Dissertation zum Thema der Einbindung von Nutzerverhaltensmodellen in BIM-basierte Planungswerkzeuge begonnen. Diese Arbeiten wurden international zum Annex 79 „Occupant-Centric Building Design and Operation“ im

Rahmen des Energy in Buildings and Communities Programme der Internationalen Energieagentur IEA angebunden.

3.4 Pilotprojekte

Im Projekt wurden insgesamt vier Nichtwohngebäude mit vornehmlicher Büronutzung experimentell untersucht. Dabei liegen drei der vier Gebäude in Nordrhein-Westfalen und ein Gebäude als Best-Practice-Beispiel in Luxemburg. Die Unterschiede und Kenndaten der Gebäude zeigt Tabelle 4. Untersucht wurden die Raumklima- und die Energieperformance. Die Hauptmerkmale je Gebäude wurden in der Tabelle grau hinterlegt.

Die Gebäude unterscheiden sich grundlegend in vielen Teilen der Gebäudetechnik. Neben der unterschiedlichen Wärmebereitstellung bzw. Energieträger liegen in den Gebäuden grundlegend unterschiedliche Belüftungskonzepte vor, wodurch eine große Bandbreite an Möglichkeiten untersucht und aufgezeigt wird. Bis auf das 2010 sanierte Kreishaus in Siegen handelt es sich um Neubauten ab 2016.

Tabelle 4: Übersichtstabelle der Pilotgebäude

Gebäude	HC BUW Wuppertal	VG 2 Mettmann	Kreishaus Siegen	Bürogebäude Golav in Niederanven, Luxembourg
Eigentümer*in / Nutzer*in	BLB NRW / Bergische Universität Wuppertal	Kreis Mettmann	Kreis Siegen Wittgenstein	Goblet Lavandier & Associés
Geschosse	3 + UG	2 + UG	14 + 2 UG	5 + 2 UG
EBF	3.485 m ²	4.686 m ²	13.933 m ²	2.594 m ²
Energieträger Wärme	Fernwärme	Holzpellets	Gas	Strom ü. Wärmepumpe mit Erdsonden
TWW Zentral	Im EG	-	-	dezentral, nur im EG
Lüftung	<u>RLT</u> in öffentlichen Bereichen mit WRG, <u>Fensterlüftung</u> in Büroräumen	<u>RLT</u> in WC-Räumen, <u>Fensterlüftung</u> in Büroräumen	<u>RLT</u> in den WC Räumen, <u>Fassadenventile</u> in den Büroräumen	<u>RLT</u> m. WRG
Kühlung	Über RLT u. Kühldecke Hörsaal ü. Kältemaschine elek.	-	Kühldecken in den Büroräumen	Bauteiltemperierung frei und Kältemaschine
Sonnenschutz	<u>Sonnenschutzverglasung</u> im EG, außenliegende <u>Lamellenjalousien</u> im OG	Außenliegende <u>Lamellenjalousie</u> an Köpfen und Erschließungsriegel <u>Markisen</u> in den Büroräumen + <u>Blendschutz</u>	Außenliegende <u>Lamellenjalousie</u> hinter Prallscheibe	Außenliegende <u>Lamellenjalousie</u> und innen angebrachter Blendschutz
Erneuerbare Energien	Photovoltaikanlage seit 05/2020	-	-	Photovoltaikanlage u. Erdreichwärmepumpe
Zählerinfrastruktur	<u>Wärmemengenzähler</u> : Wärme ges., RLT, TWW, und versch. Heizkreise, <u>Stromzähler</u> : RLT, Kälte, Heizung und Küche Erfassung aller Zählerdaten via GLT minütlich	<u>Wärmemengenzähler</u> je Gebäuderiegel und Geschoss (täglich händische Ablesung) <u>Stromzähler</u> Gebäuderiegel und Geschoss für Strom ges. und Beleuchtung (monatlich)	-	<u>Wärmemengenzähler</u> für Nutzwärme hinter WP, <u>Stromzähler</u> jeweils für alle Bereiche der TGA und geschossweise Erfassung zur Performanceüberwachung
Raumklimamessungen	12 dezentral (div. Raumnutzung) + 5 Zentral	36 Büroräume, ab 02/2020 16 CO ₂ -Ampeln	5 Messgeräte in 10 Büroräumen (Wechsel)	2 Büroräume (OG) + 7 zentral (EG)
Endenergiebedarf EnEV-Nachweis	Wärme 87,7 kWh/m ² Strom 34,5 kWh/m ²	Wärme 96,7 kWh/m ² Strom 14,9 kWh/m ²	Wärme 102,9 kWh/m ² Strom 23,5 kWh/m ²	Strom 21,2 kWh/m ² a

3.4.1 LivingLab Gebäude HC

Das Gebäude HC am Campus Haspel der Bergischen Universität Wuppertal ist ein dreigeschossiges Gebäude mit einem Hörsaal, einer Cafeteria und mehreren Seminar- und Büroräumen. Darüber hinaus befinden sich im 2. Obergeschoss des Gebäudes Open-Space Arbeitsplätze für Studierende.



Abb. 21: Aufnahme des Gebäudes HC am Campus Haspel der Bergischen Universität Wuppertal (Quelle: Katharina Simon, Bergische Universität Wuppertal)

Die Wärme wird mittels Fernwärme bereitgestellt. Auf dem Dach befinden sich insgesamt sechs Lüftungsanlagen und teilen sich die Dachfläche mit der aus den Projektmitteln geförderten Photovoltaikanlage. Das Erdgeschoss verfügt über eine Pfosten-Riegel-Fassade mit Sonnenschutz-verglasung. Die Obergeschosse haben eine klassische Lochfassade mit jeweils zwei übereinanderliegenden Fensterbändern, wobei das obere Fensterband Tageslicht in das Innere des Gebäudes leiten soll. Die untere und höhere Fensterreihe ist mit einer Lamellenjalousie ausgestattet.

In den öffentlichen Bereichen wie dem Hörsaal, den Seminarräumen und der Cafeteria besitzt das Gebäude eine Zu- und Abluftanlage mit Kühlung und Wärmerückgewinnung. Die restlichen Räume, hauptsächlich Büroräume für die Angestellten der Universität, werden über die Fenster gelüftet und besitzen keine Kühlung.

Für Raumklimauntersuchungen wurden die Messgeräte in verschiedenen Räumen des Gebäudes aufgestellt. Neben den Messgeräten wird über die Gebäudeleittechnik in einigen Räumen der CO₂-Gehalt und die Raumtemperatur erfasst. Auch die Zählerdaten der Stromversorgung und der Fernwärme werden über die GLT zentral erfasst und gespeichert.

3.4.1.1 Raumklima

Die Raumklimaanalysen und der Einfluss des CO₂-Sollwerts der RLT speziell des Hörsaals liegen in einem gesonderten Teilbericht vor. Darauf wird mit Abb. 35 Bezug genommen. Im Folgenden liegt der Fokus auf den Büroräumen im ersten Obergeschoss des Gebäudes.

Tabelle 5: Übersichtstabelle über die eingesetzten Messgeräte vom Typ Netatmo und deren Randbedingungen in den Büroräumen des Gebäudes HC in Wuppertal

Ausrichtung	Messgerät	Raum	Belegung	Messzeitraum
nord-ost	3.0	nord-ost 1	4	seit 24.06.19
nord-ost	3.1	nord-ost 2	3-4	seit 24.06.19
süd-west	HC 2	süd-west 1	2	seit 23.10.19
süd-west	HC 3	süd-west 2	2	seit 23.10.19

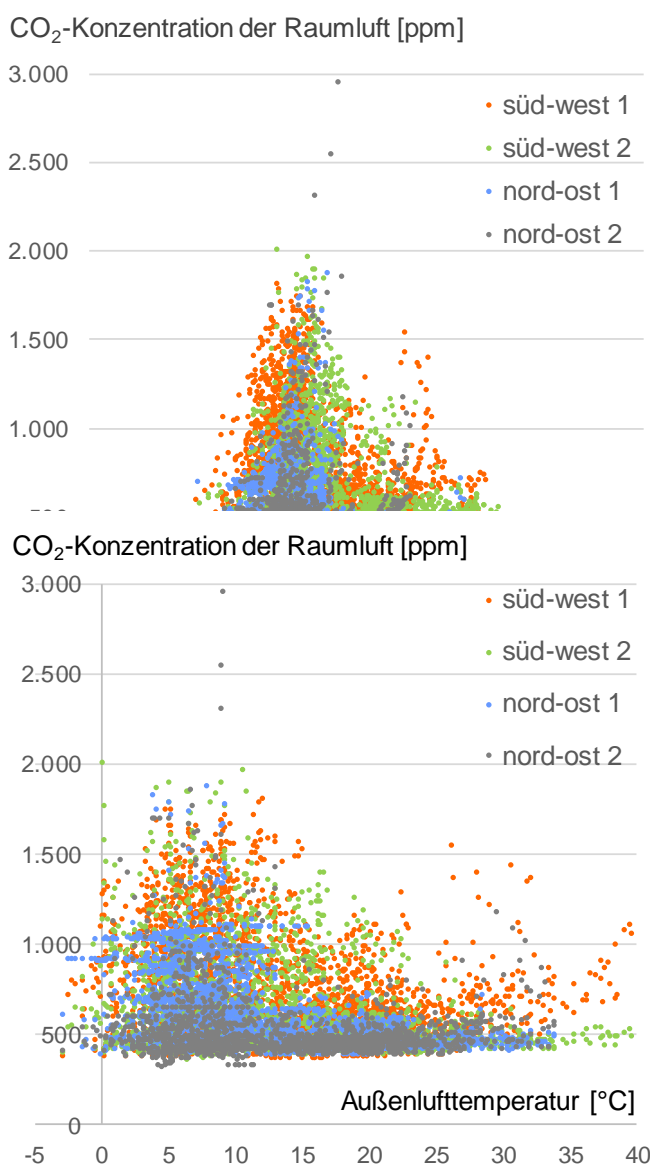


Abb. 23: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur Außenlufttemperatur für das Jahr 2019 für die untersuchten Büroräume im Gebäude HC in Wuppertal auf Basis von stündlichen Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum

Zwei Räume orientieren sich nach nord-ost und zwei Räume in Richtung süd-west. Betrachtet werden dabei jeweils Stundenmittelwerte von montags bis freitags für ein gesamtes Messjahr im wochentäglichen Nutzungszeitraum von 8:00 – 18:00 Uhr. Dabei wurden die nord-östlichen Büroräume von Juli 2019 bis Juni 2020 betrachtet, die süd-westlichen Büroräume jeweils von November 2019 bis Oktober 2020.

Die zeitliche Verteilung der Raumklimakategorien nach DIN EN 15251:2012 (Abb. 24) zeigt, dass in allen Räumen in mehr als 60% der Zeit Kategorie I vorliegt. Trotz reiner Fensterlüftung in den Büros liegt der zeitliche Anteil von CO₂-Werten über 1200 ppm in den süd-westlichen Räumen nur bei maximal 10%. Im Gegensatz zu den CO₂-Werten ist der Anteil an Raumlufttemperaturen über 25°C in Kategorie IV bei bis zu über einem Viertel der Nutzungszeit. Eine genauere Betrachtung der Sommersituation zeigt, dass in den süd-westlichen Büroräumen in bis zu 90% der Zeit Raumklimakategorie IV in Bezug auf die Raumtemperaturen vorliegt. Vergleicht man den Sommer 2019 mit dem Sommer 2020 unter Coronabedingungen, so zeigt sich ein fast identisches Bild. Daher ist nicht davon auszugehen, dass die Büroräume ungenutzt sind. Im

Vergleich dazu ist die CO₂ Konzentration zeitlich fast durchgehend auf einem sehr niedrigen Niveau und liegt unter dem Schwellwert von 750 ppm. Die Messwerte legen nahe, dass die Fenster im Sommer dauerhaft geöffnet sind und so die warme Außenluft ungehindert in die Räume eindringen kann und gleichzeitig die CO₂-Konzentrationen niedrig sind. Diese Annahme wird durch Abb. 22 ebenfalls untermauert. Hier sind die CO₂-Konzentrationen in Büro süd-west 2 bei sehr hohen Raumlufttemperaturen in einem Bereich um 500 ppm.

Büro nord-ost 2 weist nur wenig CO₂-Konzentrationen über 600 ppm auf. Diese beschränken sich auf eine Innenraumtemperatur (Abb. 22) zwischen 21°C und 24°C. Vergleicht man die CO₂-Werte mit der Außentemperatur (Abb. 23) so zeigen sich im Temperaturbereich bis 10°C einige höhere Werte. Die Verteilung der Raumklimakategorien nach DIN EN 15251 zeigt in 100% der Zeit Kategorie I für den CO₂-Gehalt im Sommer und nur im Winter auch Kategorie II, III und IV. Dieses Büro ist ein gutes Beispiel für die Homeoffice Zeit während der Corona Pandemie, startend im Frühjahr, da bei niedrigeren Außentemperaturen eine Anwesenheit zu erkennen ist.

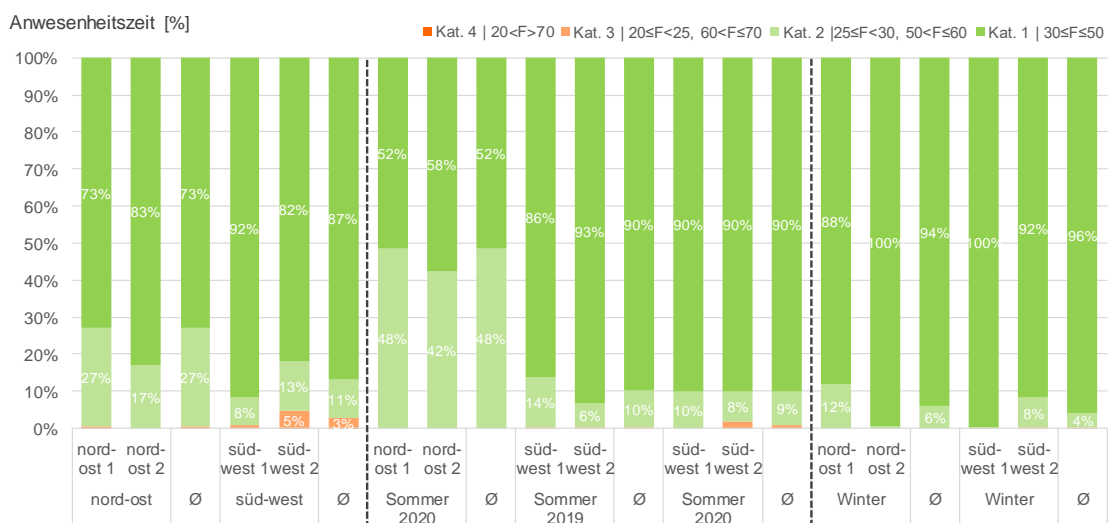
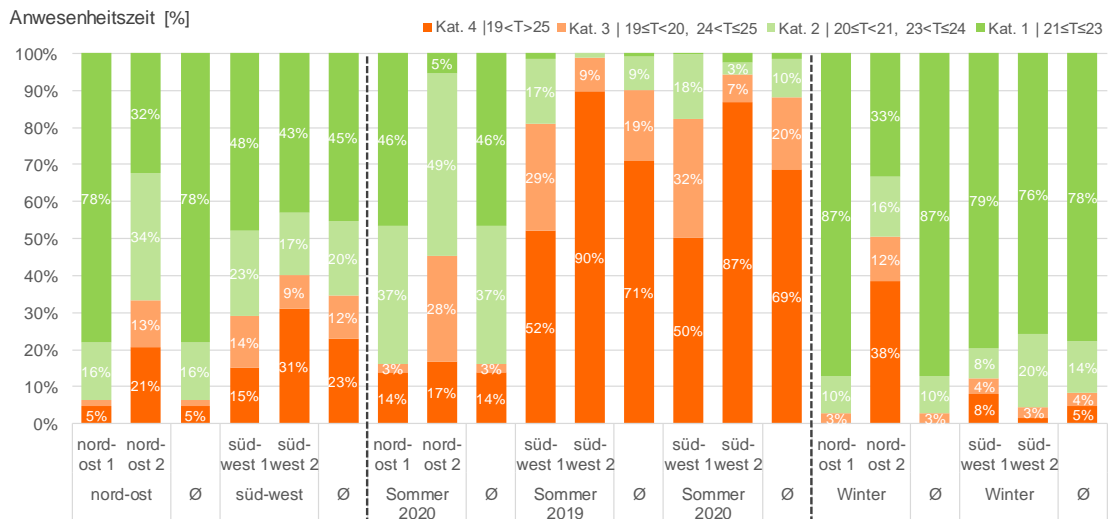
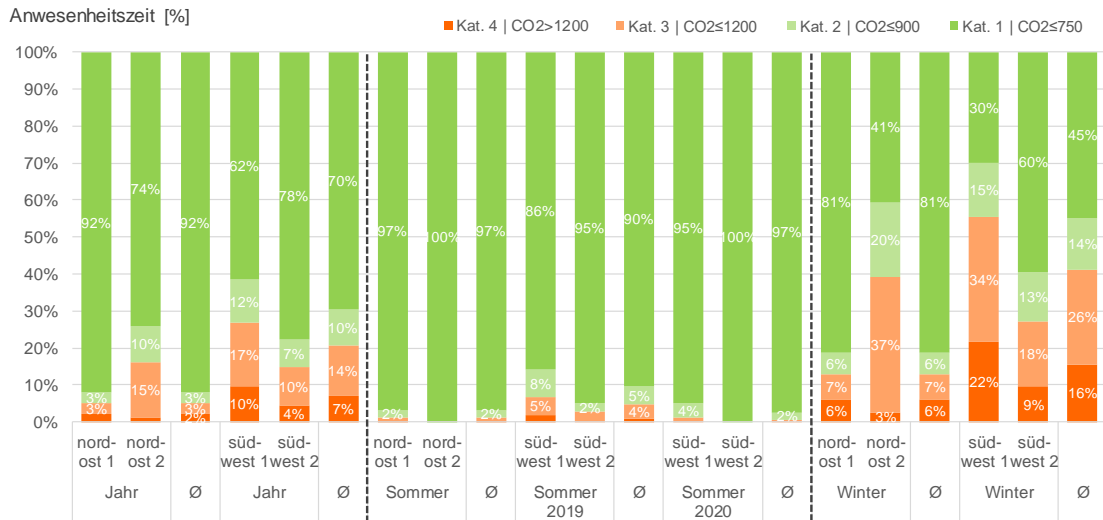
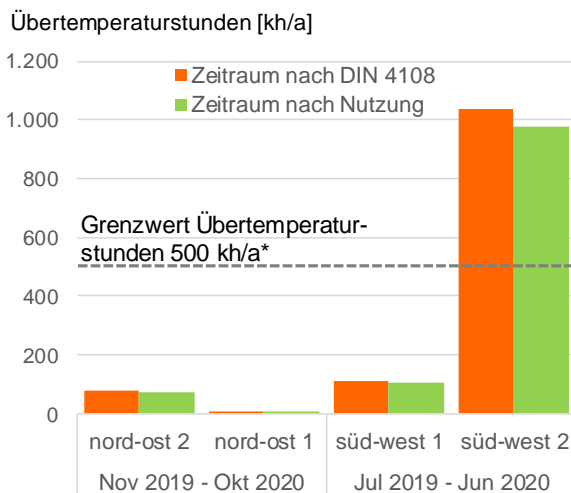


Abb. 24: Zeitliche Verteilung nach den Raumlufthumiditätskategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumlufthumidität, die Raumlufthumidität und relative Raumlufthumidität in den untersuchten Büroräumen des Gebäude HC in Wuppertal jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume in den Büroräumen.



* DIN 4108-2, Tabelle 9 - Zugrunde gelegte Bezugswerte der operativen Innentemperatur für die Sommerklimaregionen und Übertemperaturgradstundenanforderungswerte.

Abb. 25: Übertemperaturstunden im Gebäude HC in Wuppertal nach DIN 4108 und den realen Nutzungszeiten der Büroräume für ein Jahr.

Raumlufttemperatur gezählt. Daher zeigt sich in Abb. 25, dass es nur im Büro süd-west 2 zu einer Überschreitung der Übertemperaturstunden kommt. Das Büro süd-west 1 liegt nach Abb. 24 in über 50% der Zeit im Sommer in Kategorie IV. Vergleicht man Abb. 22 und Abb. 23 so erkennt man dass die meisten Werte unter 26°C liegen und somit nicht in die Betrachtung der Übertemperaturstunden mit einem Grenzwert von 26°C fallen. Der Unterschied zwischen Büro süd-west 1 und süd-west 2 ist auf ein unterschiedliches Lüftungsverhalten oder dem Gebrauch des Sonnenschutzes zurückzuführen und damit sehr deutlich durch den*die Nutzer*in beeinflusst.

3.4.1.3 Morgendliche CO₂ Konzentration vor Arbeitsbeginn

Die mittlere morgendliche CO₂-Konzentration (Abb. 26) über ein Jahr liegt bei knapp 550 ppm. Damit liegt sie im Schnitt ca. 100 ppm über der Außenluft. Betrachtet man den Winterfall, so lässt sich eine ähnliche Verteilung der CO₂-Konzentration unter den Räumen erkennen. Im Durchschnitt ist die CO₂-Konzentration um 6 Uhr morgens gut 150 ppm oder 20% höher als

3.4.1.2 Übertemperaturstunden

Das Gebäude liegt nach DIN 4108 in der Klimaregion B. Damit liegt der Grenzwert für Übertemperaturstunden bei 26°C. Es werden die Übertemperaturstunden nach DIN 4108 werktags für den Nutzungszeitraum von 7:00-18:00 Uhr und nach der realen Nutzung von 8:00-18:00 Uhr gegenübergestellt. Die Zahl der Übertemperaturstunden wird für ein Jahr von Sommer 2019 - 2020 betrachtet.

Die Untersuchungen der Sommersituation unter Abb. 24 hat gezeigt, dass sehr häufig Raumtemperaturen über 25°C vorliegen. Nach DIN EN 15251:2012 liegt die schlechteste Raumklimakategorie für Innenraumtemperaturen schon ab 25°C vor, nach DIN 4108 wird eine Übertemperaturstunde erst ab 26°C

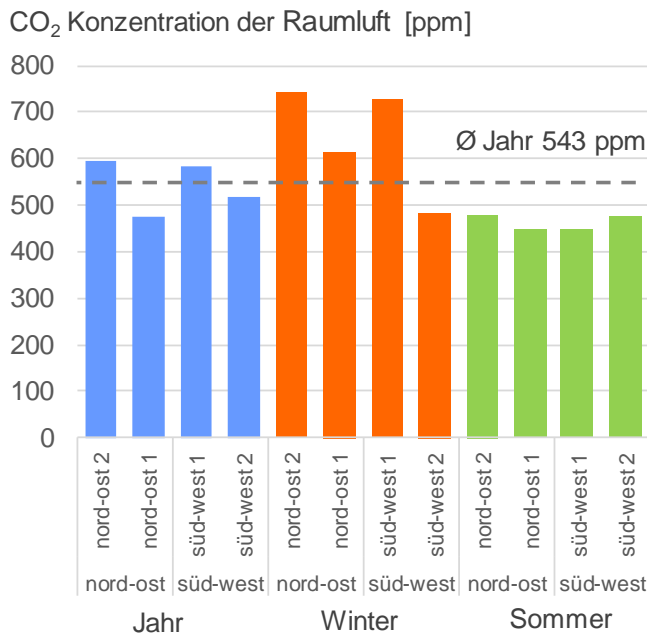


Abb. 26: Mittlere CO₂ Konzentration der Raumluft kurz vor Beginn der Nutzungszeit um 6 Uhr morgens im Zeitraum von Dienstag bis Samstag für das Jahr 2019/2020

nord-ost Büros.

im Jahresdurchschnitt. Die Unterschiede zwischen den Räumen deuten auf eine unterschiedliche Belegungsdichte hin. Im Sommer ist die mittlere CO₂-Konzentration am Morgen nahezu auf Außenluftniveau. Begünstigt wird dies durch eine nächtliche Kipplüftung der Fenster.

Die Kurve der mittleren stündlichen CO₂-Konzentration (Abb. 27) zeigt, dass das Tagesmaximum der Büroräume um ca. 100 ppm voneinander abweicht. Ab ca. 6:00 Uhr morgens bis zum Beginn des Nutzungszeitraums ab ca. 8:00 Uhr liegen die Konzentrationen auf einem niedrigen Niveau. Hier unterscheiden sich die Büroräume nicht voneinander. Das heißt, dass in den süd-west Büros die Konzentration über Nacht stärker abnimmt als in den

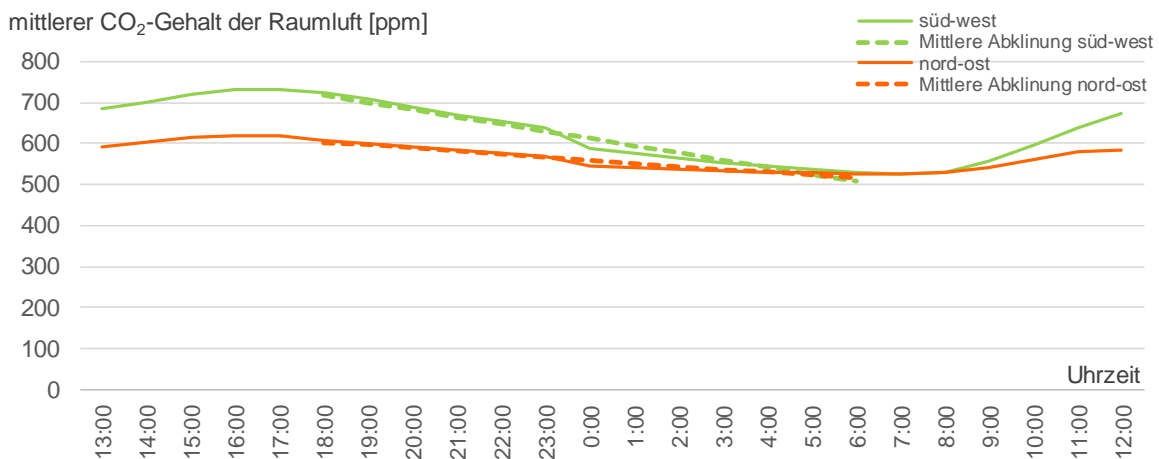


Abb. 27: Mittlere CO₂ Konzentration werktags in Wuppertal über ein Jahr in Relation zur mittleren Abklingkurve außerhalb der Nutzungszeit von 18:00 Uhr bis 6:00 Uhr.

3.4.1.4 Energieperformance

Zunächst wird der aufgezeichnete Energieverbrauch des Gebäudes betrachtet. Abb. 28 zeigt diesen für das Jahr 2019, aufgeteilt auf die einzelnen Monate. Dabei zeigt sich die typische Verteilung der Heizwärme zwischen Sommer und Winter. Die Wärmebereitstellung für Trinkwarmwasser ist über das gesamte Jahr monatlich konstant. Auffällig ist, dass es im Sommer zu einem geringen Heizwärmeverbrauch zusätzlich zu dem für die Trinkwarmwasserversorgung kommt.

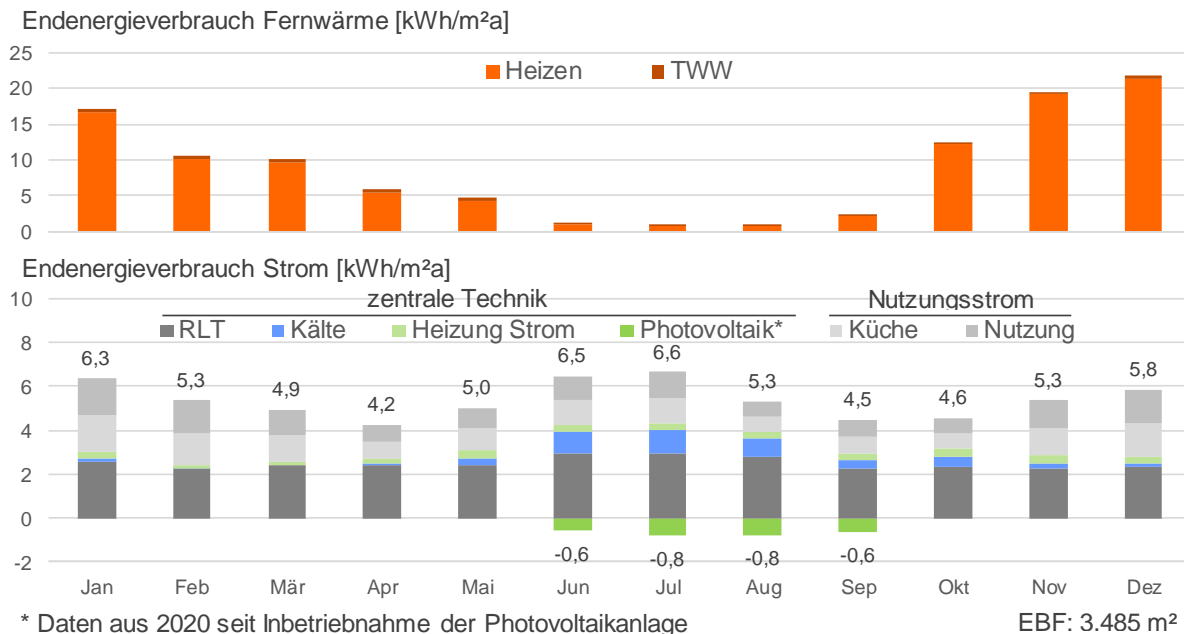


Abb. 28: Endenergieverbrauch von Gebäude HC, aufgeteilt nach Wärme, zentraler Gebäudetechnik und Nutzungsstrom.

Betrachtet man den Stromverbrauch so ist erkennbar, dass der Verbrauch der zentralen Gebäudetechnik über das Jahr quasi konstant ist. Gegenteilig zum Wärmeverbrauch liegt in den Sommermonaten ein Stromverbrauch für die Kältemaschine vor. Der Lüftungsstromverbrauch hat großen Anteil. Dieser liegt sehr konstant bei knapp über 2 kWh/m². Nur im Sommer steigt er leicht an. Dagegen variieren der Nutzungsstromverbrauch

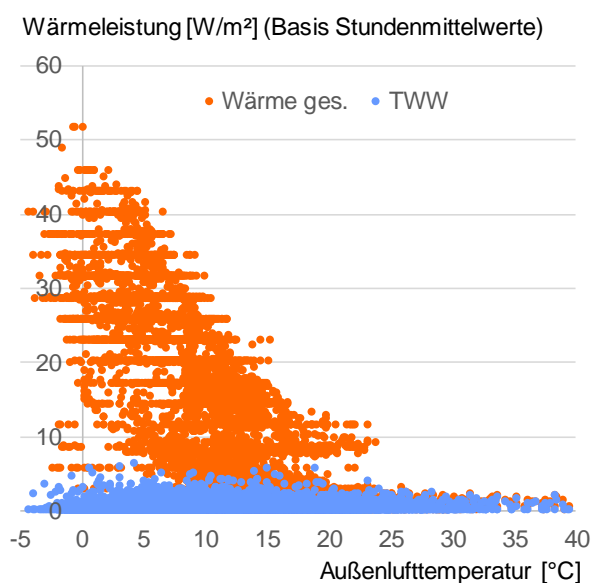


Abb. 29: Kennfeld der mittleren stündlichen Wärmeleistung für Heizung und Trinkwarmwasser im Gebäude HC.

und der Stromverbrauch für die Küche erkennbar zwischen Vorlesungszeit und vorlesungsfreier Zeit (März/April und September/Oktober). Die vorliegenden Erzeugungsdaten der Photovoltaikanlage seit Inbetriebnahme im Juni 2020 wurden beispielhaft dem Gesamtverbrauch gegenübergestellt. Durch die Photovoltaikanlage kann im Sommer etwa 12% des Gesamtstroms gedeckt werden. In der vorlesungsfreien Zeit liegt der Anteil bei ca. 15%.

Das Kennfeld für die Wärmeleistung im Gebäude unterstreicht die Ergebnisse aus Abb. 28. Man kann deutlich erkennen, dass die Wärmeleistung von der Außenlufttemperatur abhängig ist. Je niedriger die Außenlufttemperatur desto höher ist die Wärmeleistung. Dabei ist die Wärmeleistung für Trinkwarmwasser

unabhängig von der Außenlufttemperatur konstant vorhanden. Man kann jedoch auch erkennen, dass bei Außenlufttemperaturen über 20°C Wärme im Gebäude benötigt wird.

Den mittlere tägliche Stromlastgang veranschaulicht Abb. 30. Daran erkennt man, dass sich die Leistung zwischen Nacht zum Tag mehr als verdoppelt. Dabei spielt im Fall des Universitätsgebäudes die Küche mit angeschlossenem Bistro die größte Rolle. Die vergleichsweise hohen Lüftungsstromverbräuche (Abb. 28) sind auch im täglichen Lastgang sehr deutlich zu erkennen. Die Lüftungsanlagen laufen Tag und Nacht durchgehend auf fast 10 kW. Im Tagesverlauf ab etwa 6 Uhr erkennt man, dass die Leistung der variabel geführten Lüftungsanlage durch die Nutzung im Gebäude ansteigt. Die Photovoltaikanlage wurde im Juni 2020 in Betrieb genommen. Daher spiegelt der dargestellte Erzeugungslastgang nur die Sommermonate wieder. Trotz dessen ist erkennbar, dass die gesamte erzeugte elektrische Leistung im Gebäude abgenommen wird, da die Grundlast auch am Wochenende im Mittel bei über 15 kW liegt.

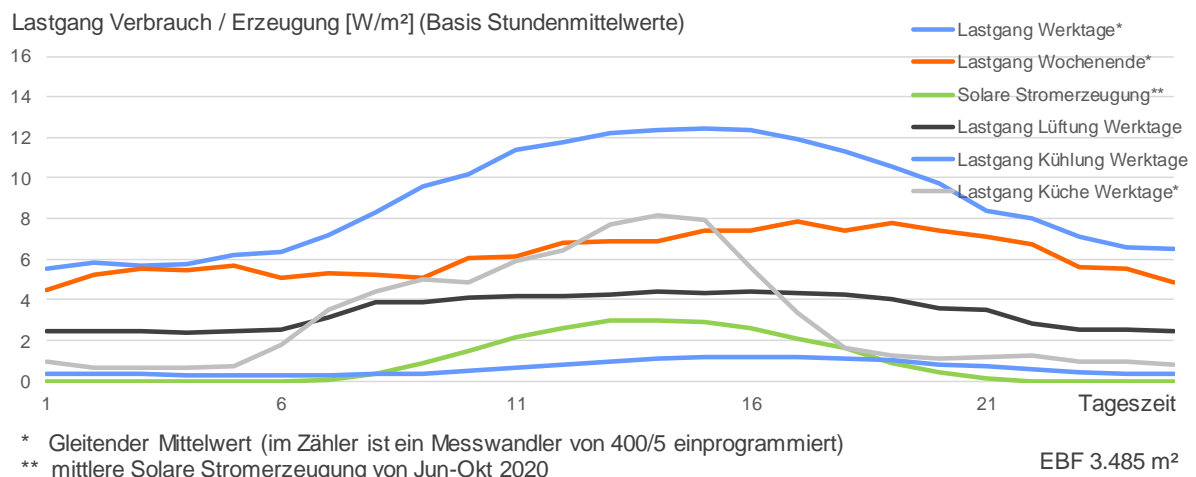


Abb. 30: Mittlerer täglicher Lastgang Strom

Die Kältemaschine hat im Gebäude HC nur einen kleinen Anteil am Energieverbrauch und im Vergleich des täglichen Lastgangs ebenfalls einen nur einen kleinen Einfluss. Betrachtet man ihr Kennfeld (Abb. 31) so lässt sich die Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur erkennen. Ab ca. 15°C Außenlufttemperatur beginnt die Kältemaschine zu arbeiten. Da aber auch bei Temperaturen unter 15°C die Kälte im Gebäude verbraucht wird kann man davon ausgehen, dass diese durch die freie Kühlung mittels Tischwärmetauscher auf dem Dach des Gebäudes bereitgestellt wird. Schaut man dann auf die Energy Efficiency Ratio (EER) der Kälteanlage, wird diese Annahme noch einmal bekräftigt. Ab einer Außenlufttemperatur von ca. 23°C liegt die EER bei etwa 10. Der Grenzwert für die freie Kühlung scheint somit bei über 20°C zu liegen. Alle Temperaturen darunter lassen die EER durch die freie Kühlung dementsprechend steigen.

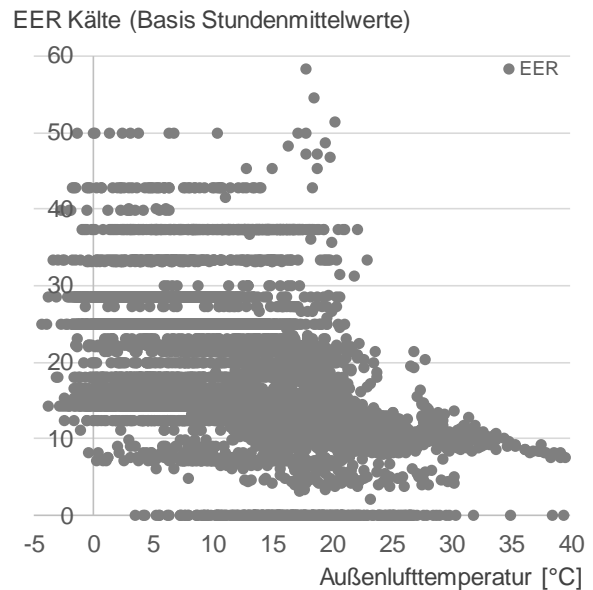
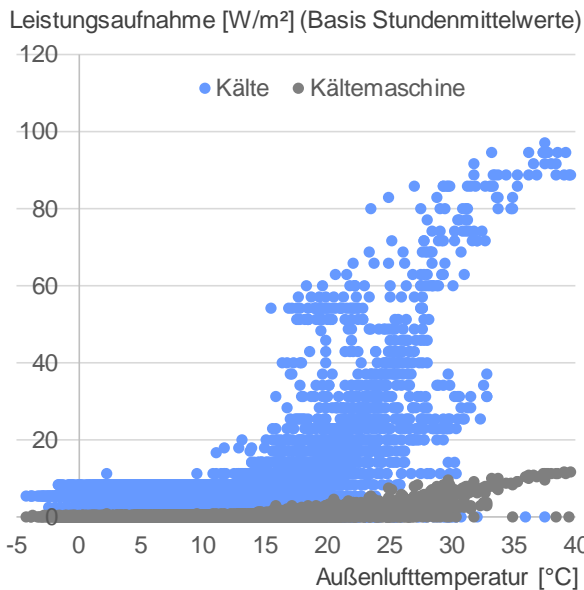


Abb. 31: Kennfeld der mittleren stündlichen Kälteleistung und elektrischen Leistung der Kältemaschine im Gebäude HC und des EER (Energy Efficiency Ratio) der Kälteanlage.

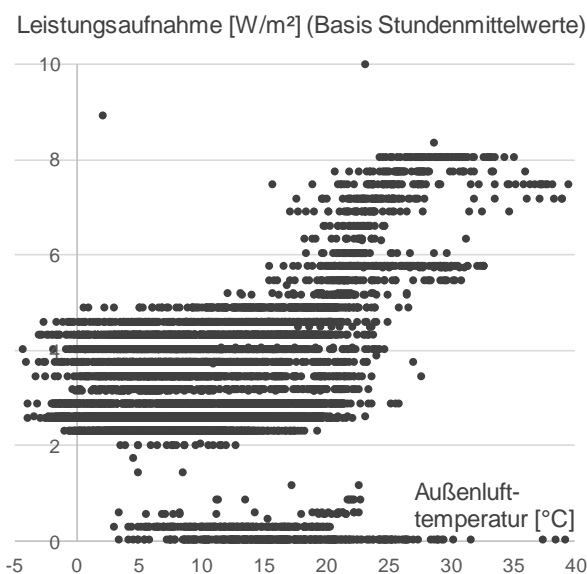


Abb. 32: : Kennfeld der mittleren stündlichen Leistungsaufnahme der Lüftungsgeräte im Gebäude HC.

Abb. 32 zeigt das Kennfeld der Lüftungsanlagen. Man kann deutlich erkennen, dass die Anlagen im Temperaturbereich zwischen 5°C und 25°C sehr konstant laufen und ab ca. 15°C die Leistungsaufnahme steigt. Das liegt daran, dass das Gebäude fast ausschließlich über die Lüftungsanlage gekühlt wird und somit bei steigender Außenlufttemperatur der Luftvolumenstrom zum Kühlen des Gebäudes gesteigert wird. Daher liegt der Lüftungsstromverbrauch in den Sommermonaten der Jahresbilanzierung (Abb. 28) auch über dem mittleren Stromverbrauch in den restlichen Monaten. Daher ist das Kennfeld der Lüftungsanlage im Gebäude in Wuppertal als typisch für ein Gebäude mit einer Kühlung über die Lüftungsanlage zu sehen.

Bei Vergleich von Verbrauchs- und Bedarfswerte fallen große Unterschiede auf. Der normative Endenergiebedarf für Wärme (Abb. 33) ist im Gebäude HC ein Drittel niedriger als der reale Wärmeverbrauch. Der Stromverbrauch der Lüftung ist dagegen mehr als 300% größer als deren rechnerischer Bedarf. Einhergehend mit den deutlich über der Norm liegenden Luftwechseln, hat dies einen starken Einfluss auf die Lüftungswärmeverluste und beeinflusst

damit den Wärmeverbrauch erheblich. Auch die Klimabereinigung des Wärmeverbrauchs²⁰ trägt nicht zur Annäherung des Wärmeverbrauchs an den normativen Endenergiebedarf bei. Auch hier zeigt sich der große Einfluss der Lüftungsanlage. Die Energie für Trinkwarmwasser und die Kühlung des Gebäudes sind annähernd zwischen Verbrauch und Bedarf vergleichbar. Der Beleuchtungsstrom wird im Gebäude nicht getrennt erfasst und kann somit auf Verbrauchsseite nicht gesondert ausgewiesen werden. Erzeugungsdaten der Photovoltaikanlage sind für 2018 und 2019 noch nicht verfügbar. Für die Endenergiebedarfsberechnung der Jahre 2018 und 2019 wurden die Wetterdaten der nächsten gelegenen Wetterstation des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) aus dem jeweiligen Zeitraum verwendet.

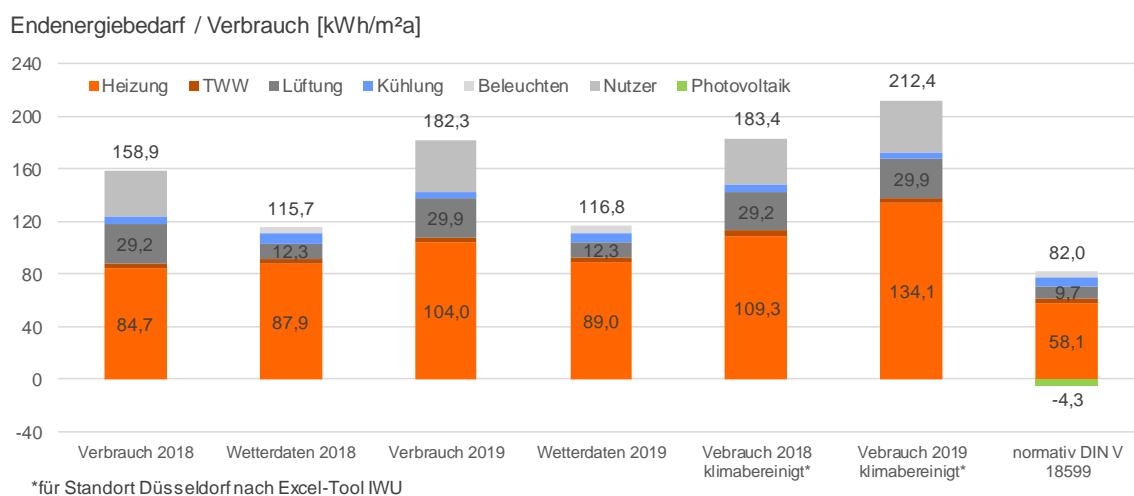


Abb. 33: Energieperformance von Gebäude HC, Bedarfswerte wurden mit dem Bilanzierungstool EnerCalc erstellt.

Da die Photovoltaikanlage auf dem Dach des Gebäudes erst im Juni 2020 in Betrieb genommen wurde, liegt hier noch kein Jahresergebnis vor. Die Photovoltaikanlage mit 15° Neigung hat zwei verschiedene Ausrichtungen. Die eine Hälfte ist in Richtung Süd-Ost und die zweite Hälfte in Richtung Süd-West orientiert. In

Abb. 34 erkennt man diesen Unterschied im mittleren täglichen Verlauf der Solarstrahlung. Das Maximum der Solarstrahlung liegt durch den Tagesverlauf der Sonne bei der südwestlichen Anlage etwa eine Stunde hinter der südöstlichen Anlage.

²⁰ *Gradtagzahlen in Deutschland*, Excel-Berechnungstool zur Bestimmung der tatsächlichen Heizgradtage (HGT) bzw. der Gradtagzahl (GTZ) für 42 deutsche Wetterstationen, Version Aug 2020

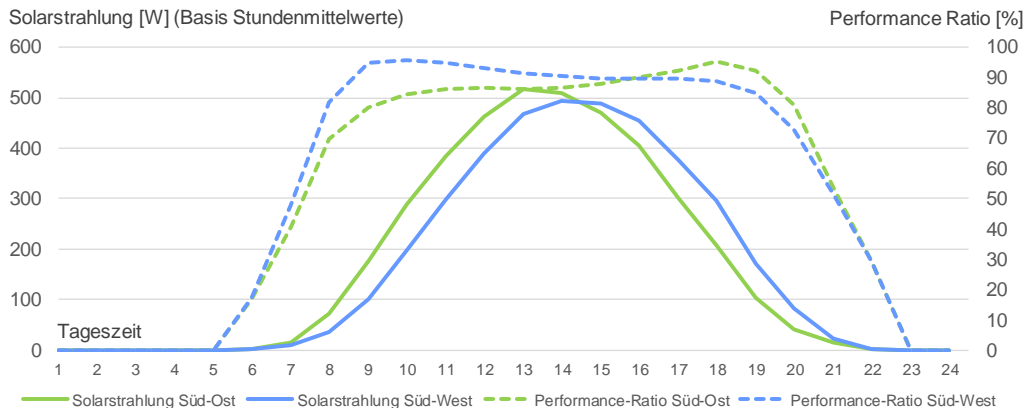
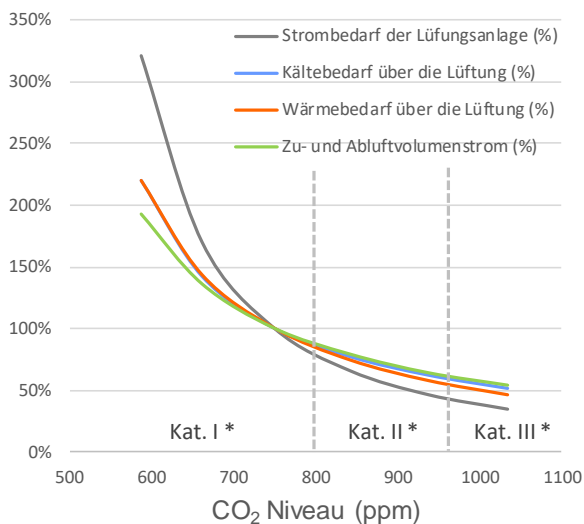


Abb. 34: Mittleres stündliches Performance-Ratio der beiden Photovoltaikanlagen im Vergleich zur mittleren Solarstrahlung



* Kategorie des Innenraumklimas für CO₂ nach DIN 15251:2012-12

Abb. 35: Einfluss des CO₂-Sollwertes für die Regelung der Lüftungsanlage auf den Luftvolumenstrom, den Strombedarf der Lüftung sowie den Wärme- und Kältebedarf der RLT-Anlage. Der 100%-Wert entspricht einer Regelungssollwert von maximal 800 ppm mit 100 ppm Hysterese. Im Ergebnis im Betrachtungszeitraum entspricht dies einer Konzentration von im Mittel 750 ppm. Zusätzlich dargestellt sind die drei Luftqualitätskategorien der DIN EN 15251:2012-12

In einer vertieften Untersuchung wurde die Abhängigkeit zwischen eingestelltem CO₂ Soll-Wert der Lüftungsanlage und dem Energieverbrauch am Beispiel des Hörsaals des Gebäudes mit einem detaillierten Simulationsmodell in der Software IDA ICE untersucht. Vergleicht man die mittlere CO₂-Konzentration (Abb. 36) mit dem Einfluss des CO₂-Soll-Wertes auf den Energieverbrauch (Abb. 35) so lässt sich der Grund für den erhöhten Energieverbrauch für Wärme und die Lüftungsanlage ableiten.

Die Messdaten der Gebäudeleittechnik sowie die Messdaten der Raumklimamessgeräte liefern einen fast identischen mittleren Tagesverlauf. Die Verläufe der Lufttemperatur weichen stärker voneinander ab. Dies liegt an der Positionierung der Messgeräte. Während das Raumklimamessgerät an einer Betonsäule in Fassadennähe installiert wurde, sitzt der Temperaturfühler im Abluftkanal. Die flachere Temperaturkurve lässt hier auf die Nähe der Betonsäule mit ihrer trägen Speichermasse hindeuten.

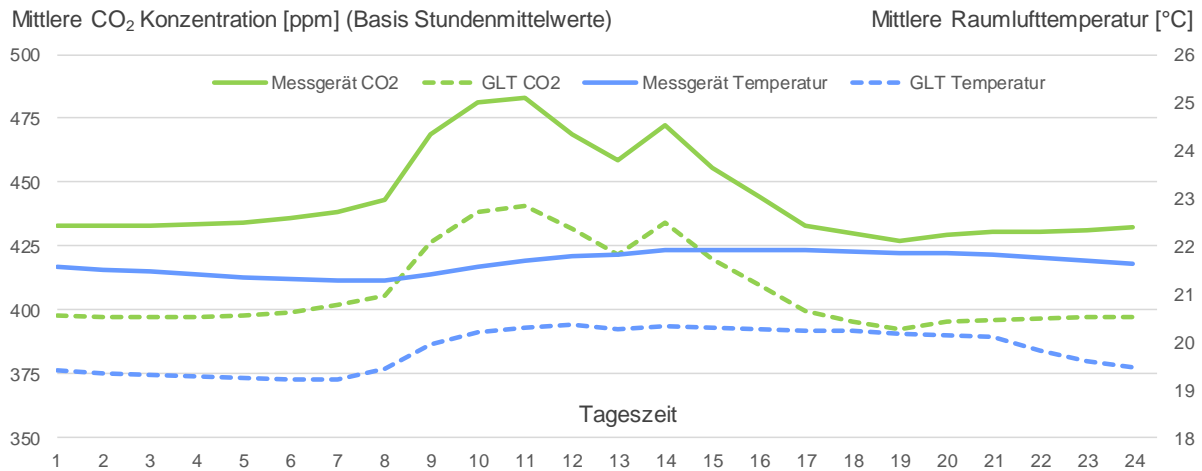


Abb. 36: Mittlerer stündlicher Verlauf der CO₂-Konzentration und Raumlufttemperatur im Vergleich zwischen den Messwerten der GLT und den installierten Raumklimamessgeräten im Hörsaal HC.

3.4.1.5 Erkenntnisse

Der Betreiber und Nutzer des Gebäudes hat zwar ein grundsätzliches Interesse an einem systematischen Energiemanagement, jedoch stehen ihm für die Thematik nach eigenen Angaben keine ausreichenden Ressourcen zur Verfügung. So liegt der Fokus hauptsächlich auf dem Betrieb und dem Störungsmanagement der Anlagen. Wichtige Energieeinsparpotentiale werden so nicht erkannt und können nicht umgesetzt werden. Eine systematische Verbrauchsdokumentation erfolgt für die universitären Gebäude bisher nicht. Verbrauchsdaten werden auch nicht an den Gebäudeeigentümer BLB übermittelt.

Durch das fehlende Energiemanagement und teilweise falsche CO₂-Sollwertvorgaben für Lüftungsanlagen kommt es zu einem signifikanten Mehrverbrauch der RLT im Gebäude. Vermutlich kam es hier betreiberseitig zu einer Fehlinterpretation der technischen Regeln. Sie geben keine absoluten CO₂-Konzentrationen an, sondern lediglich die CO₂-Konzentration über der Außenluftkonzentration. Je nach Gebäudeleittechnik werden die Soll-Werte aber auch unterschiedlich definiert und eingestellt, mal als absolute Werte oder mal als Überschreitungen. Dieses Beispiel unterstreicht die erforderlichen Fachkenntnisse, um Sollwertvorgaben zutreffend zu definieren. Trotz des Rückspiels der ersten Untersuchungsergebnisse und dem Wunsch einer Sollwertveränderung konnten im Rahmen der Projektlaufzeit keine Veränderungen erreicht und damit evaluiert werden. Die Pandemiesituation mit dem Wunsch nach besonders hohen Luftwechseln wird Maßnahmen weiter verzögern.

Wie bereits im Kapitel zu BIM beschrieben, war die Umsetzung der GLT-Schnittstelle zur Datenanalyse nur mit sehr großem Aufwand realisierbar. Hier mussten Sicherheitsbestimmungen des IT-Zentrums und des Gebäudemanagements beachtet und umgesetzt werden. Da von Seiten des Betreibers nur ein Lesezugriff auf die Gebäudeleittechnik vorhanden war, wurde durch die Herstellerfirma nachträglich auf einem eigens für das Projekt beschafften und gesonderten Rechner ein Exportmodul für den Datentransfer installiert. Der gesamte Prozess zog sich so über fast ein Jahr.

Neben der Umsetzung der GLT Schnittstelle, war auch die nachträgliche Installation der Photovoltaikanlage mit großen Hürden verbunden. Neben der Klärung aller rechtlichen Fragen musste eine Vereinbarung mit dem Bauherrn getroffen werden. Erst nach mehrmaliger Ausschreibung der Photovoltaikanlage konnte eine Fachfirma gefunden werden. Die öffentliche Hand ist als Auftraggeber durch einen großen Bürokratieaufwand gegenüber privaten Bauherren im Nachteil. Durch die nachträgliche Installation konnte das volle Solarpotential des Gebäudes nicht erschlossen werden (Blitzschutz, Abstandsflächen, Absturzsicherung, ...).

Die geplanten Zählernachrüstungen waren aufgrund von Gewährleistungsfragen und der Netzhydraulik nicht mit Fremdfirmen umsetzbar. Wegen voller Auftragsbücher sind Kleinaufträge im Nachgang für die Firmen nicht rentabel. Somit waren diese geplanten Arbeiten nicht in der Projektlaufzeit realisierbar.

Umbaumaßnahmen sind im Nachgang nur sehr schwer oder gar nicht umsetzbar. Daher muss von Beginn an die Überprüfung der Gebäudeperformance mit bedacht werden und gegebenenfalls durch Vorgaben eingefordert werden, da sonst dem effizienten und nachvollziehbaren Gebäudebetrieb große Hürden gegenüberstehen.

Erste Bundesländer beginnen damit, klare Vorgaben im Hinblick auf die Pflicht zur Erfassung und Mitteilung von Gebäudeenergieverbräuchen zu machen, sowie die Installation von Solarstromanlagen bei Neubauten im Nichtwohnungsbau verpflichtend vorzuschreiben (Novelle des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg, 2020 ²¹). Solche Entwicklungen sind vor dem Hintergrund der gemachten Erfahrungen im Rahmen des Projektes und der Notwendigkeit zur Einhaltung der Klimaschutzziele zu begrüßen. Würden sie in vergleichbarer Weise in NRW eingeführt, wären auch an der Universität Wuppertal Maßnahmen zwingend erforderlich und Energieeinsparpotentiale könnten gehoben werden. Der bestehende Sanierungsfahrplan für die universitären Gebäude wäre in Zusammenarbeit mit dem BLB mit einem Klimaschutzfahrplan zu vernetzen, damit das volle Potential gehoben werden kann. Nach den Erfahrungen stellt sich allerdings auch die Frage nach der Verfügbarkeit von geeignetem Fachpersonal.

²¹ https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/8000/16_8993_D.pdf

3.4.2 Kreisverwaltung Mettmann



Abb. 37 Luftaufnahme des VG2 in Mettmann. (Quelle: Kreisverwaltung Mettmann)

Das Verwaltungsgebäude VG 2 in Mettmann besitzt durchgehend zwei Geschosse und besteht aus insgesamt vier hintereinander gereihten Gebäudeteilen, die in der Mitte durch einen durchlaufenden Erschließungsriegel miteinander verbunden sind. Das Gebäude ist in Massivbauweise errichtet. Die Gebäuderiegel verfügen in östlicher und westlicher Richtung über eine klassische Lochfassade mit außenliegenden Stoffmarkisen als Sonnenschutz und an den Köpfen und im Erschließungsriegel über eine Pfosten-Riegel-Fassade.

Das Gebäude wird über eine Heizungsanlage mit Holzpellets betrieben. Die Wärmeübergabe in den Büroräumen erfolgt über Heizkörper im Fassadenbereich. Die Kreisverwaltung Mettmann hat sich beim Bau ihres Verwaltungsgebäudes bewusst für eine Bauweise ohne Lüftungsanlage entschieden.

Für jedes Geschoss in den einzelnen Riegeln sind eigene Wärmemengenzähler, sowie Unterzähler für den Gesamtstrom und die Beleuchtung installiert. Im Gebäude wurde stichprobenartig das Raumklima in 36 Büroräumen gemessen. Die verwendeten Geräte messen Raumlufttemperatur, CO₂ Gehalt der Raumluft und die relative Luftfeuchte. Im Februar 2020 wurden in 16 Büroräumen im Gebäudeflügel A CO₂-Ampeln aufgestellt. Für den Einsatz der Messgeräte vom Typ Netatmo wurde von Seiten des Projektpartners im Gebäude ein WLAN-Netz eingerichtet.

3.4.2.1 Raumklimaperformance

Betrachtet werden bei den Raumklimamessungen Stundenwerte von montags bis freitags für ein gesamtes Messjahr im täglichen Nutzungszeitraum von 7:00 – 16:00 Uhr.

Abb. 38 zeigt, dass die Raumlufttemperatur in der Regel zwischen 21°C und 25°C liegt. Während dieser Zeit liegen die CO₂-Werte in einem Bereich bis 2500 ppm und einige deutlich darüber bei bis zu 5000 ppm. Dieses Bild zeigt, dass in diesem Temperaturbereich offenbar verhältnismäßig wenig gelüftet wird. Im Bereich unter 20°C Raumlufttemperatur liegt die CO₂-Konzentration in einem Bereich um 400 bis 1000 ppm. Dies resultiert aus dem winterlichen Abfall der Raumlufttemperatur bei der Fensterlüftung oder deutet auf eine Nichtnutzung auf Grund von Teilzeitarbeitsplätzen hin.

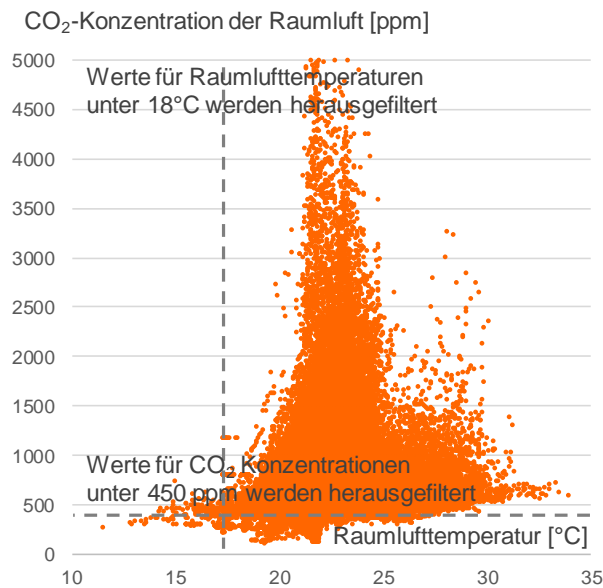


Abb. 38: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur Raumlufttemperatur für das Jahr 2019 für alle untersuchten Büroräume des VG 2 in Mettmann auf Basis von stündlichen Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum

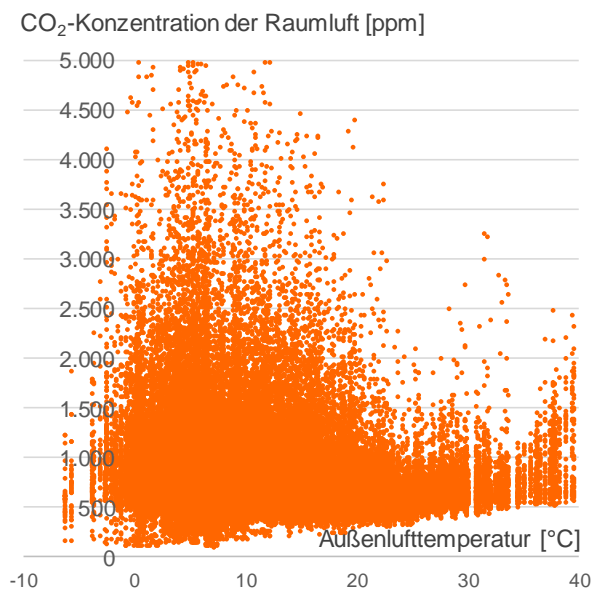


Abb. 39: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur Außenlufttemperatur für das Jahr 2019 für alle untersuchten Büroräume des VG 2 in Mettmann auf Basis von stündlichen Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum

Konzentration in den Büroräumen nimmt über 10°C Außenlufttemperatur stetig ab. Bei Temperaturen über 20°C bis 35 ist sie konstant niedrig. In diesem Temperaturbereich sind die Fenster vermutlich häufig bis konstant geöffnet.

Bei Raumtemperaturen über 25°C liegen die CO₂-Konzentration im Bereich zwischen 1000 und 1500 ppm. Es ist zu vermuten, dass bei höheren Temperaturen häufiger gelüftet wird. Zwischen 28°C und 31°C liegen einige Werte wieder deutlich über 1500 ppm. Hier ist davon auszugehen, dass bei sommerlicher Hitze die Fenster wieder eher geschlossen bleiben. Informationen zur Anwesenheit oder Fensteröffnung liegen nicht vor.

Für Raumtemperaturen unter 18°C und CO₂-Konzentrationen unter 450 ppm werden die Messwerte herausgefiltert und in den weiteren Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

In der Betrachtung aller Büroräume (Abb. 40) zeigt sich im Blick auf die CO₂-Konzentration eine deutliche Heterogenität. Die Raumluftqualität hängt offenbar sehr stark vom individuellen Lüftungsverhalten ab.

Schaut man auf die Raumlufttemperaturen so liegt im Jahresdurchschnitt in etwa 20% der Zeit Kategorie III und IV vor. In der weiteren Untersuchung wird der Fokus auf die sommerlichen Raumtemperaturen gelegt. Für die Raumluftfeuchte liegt fast ausschließlich Kategorie I und II vor und wird daher nicht weiter untersucht.

Die Abhängigkeit der CO₂-Konzentration der Raumluft zur Außenlufttemperatur zeigt (Abb. 39). Hohe CO₂-Werte treten fast ausschließlich bei Temperaturen bis 20°C auf. Im Temperaturkorridor zwischen 20 und 35°C streuen die CO₂-Konzentrationen seltener über 1000 ppm.

Daraus ist zu schließen, dass je wärmer die Außentemperatur ist, desto häufiger in den Büroräumen gelüftet wird. Die CO₂-

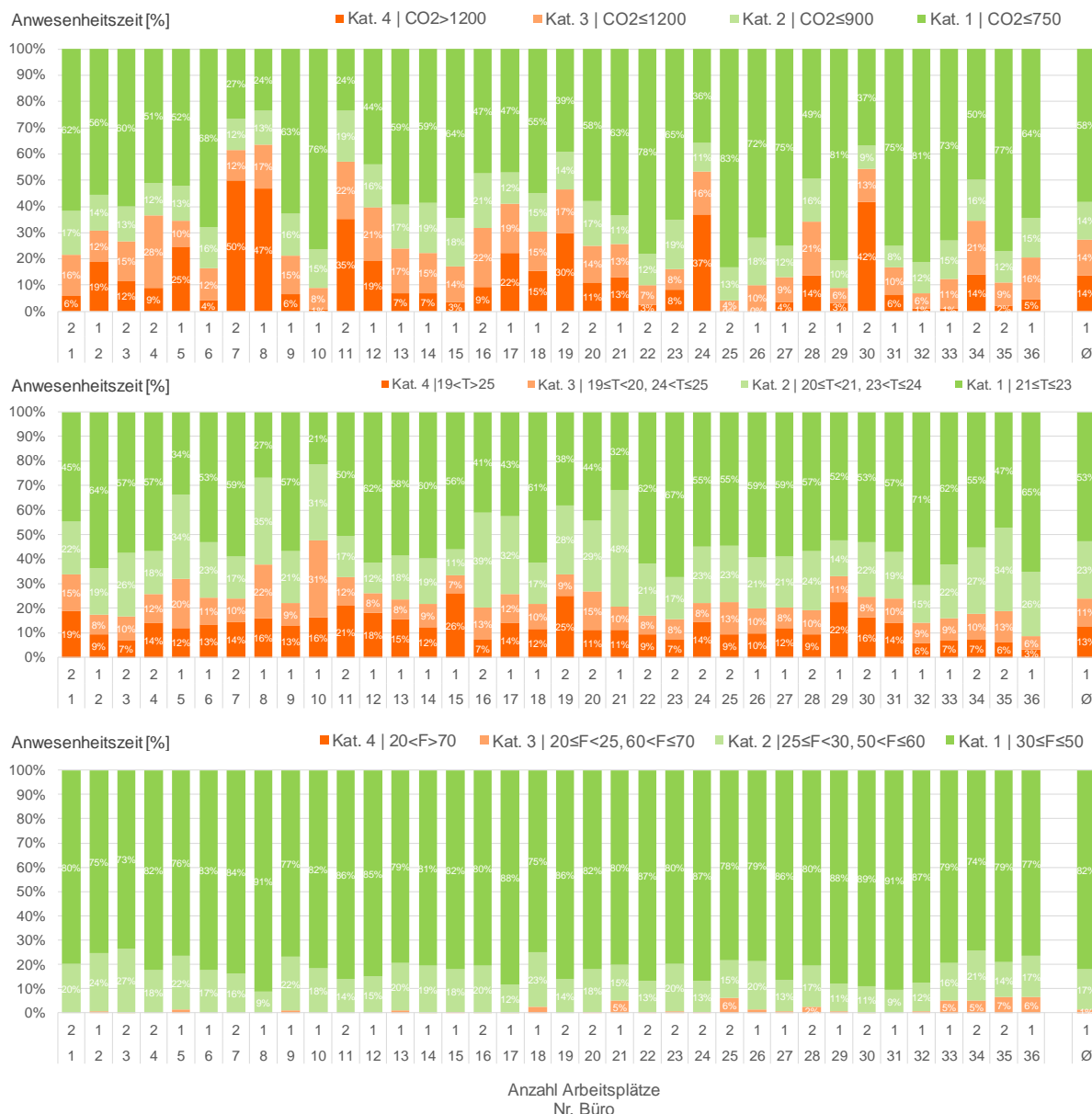


Abb. 40: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumluft, die Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte in den untersuchten Büroräumen des VG2 in Mettmann für ein Jahr jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume.

Die raumklimatischen Bedingungen werden für den Sommerfall in den Monaten Juni bis August 2019 und für den Winterfall in den Monaten November 2018 bis Februar 2019 betrachtet. Die Basis der Daten bieten stündliche Mittelwerte während der werktäglichen Nutzungszeit.

Die CO₂ Konzentrationen sind im Sommer über alle Büroräume gesunken und nur noch in wenigen Fällen tritt zu einem geringen Prozentsatz Raumklimakategorie IV auf. Dagegen sind die Raumtemperaturen zu mehr als 60% in Kategorie III und IV und in über 40% in Kategorie IV. Der Dialog mit den Nutzern*innen des VG2 unterstreicht die hohen Raumtemperaturen im Sommer. Ein Problem können hier die Markisen als außenliegender Sonnenschutz sein. Laut der ursprünglichen Planung und der Dokumentation für den Energieausweis sollten im VG2

Lamellenjalousien zum Einsatz kommen. Eingebaut wurden jedoch anthrazitfarbene Markisen, die durch einen Windwächter schon bei geringen Windgeschwindigkeiten wieder einfahren. Durch den sehr niedrig angesetzten Schwellwert des Windwächters ist oftmals kein ausreichender Sonnenschutz mehr gegeben. Auch der innenliegende Blendschutz trägt kaum zum Sonnenschutz bei, da dessen Nutzung montage-technisch im Konflikt mit dem Öffnen des Fensterflügels steht.

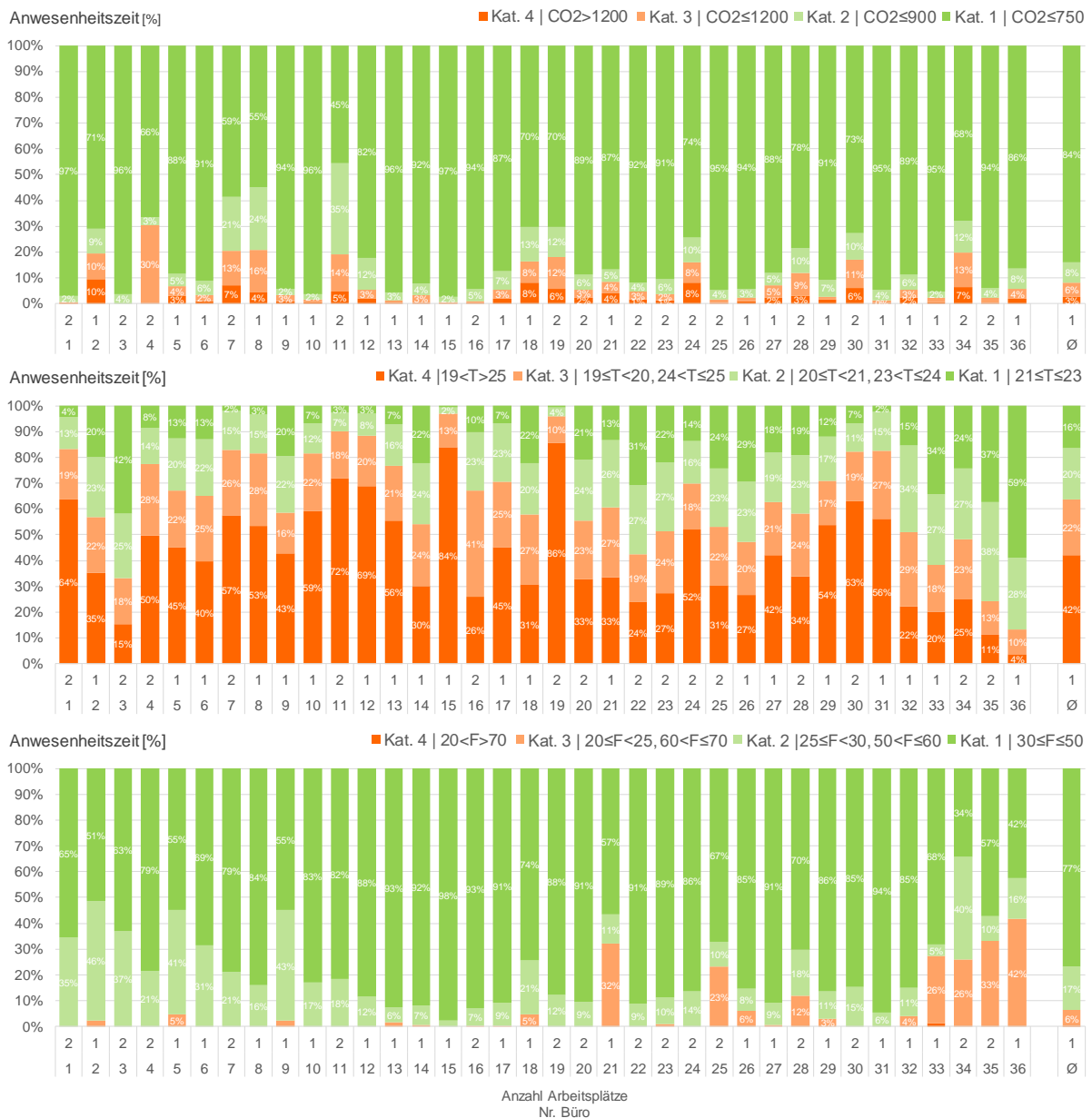


Abb. 41: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumluft, die Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte in den untersuchten Büroräumen des VG2 in Mettmann im Sommer (2019) jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume.

Betrachtet man den Winterfall (Abb. 42), so verhält sich die Verteilung der Raumklimakategorien konträr zur Sommersituation. Die CO₂-Konzentration in Kategorie III und IV liegt bei durchschnittlich 50% der Zeit und wogegen die Innenraumtemperaturen nur zu einem Anteil von unter 10% schlechter als Kategorie II ist.

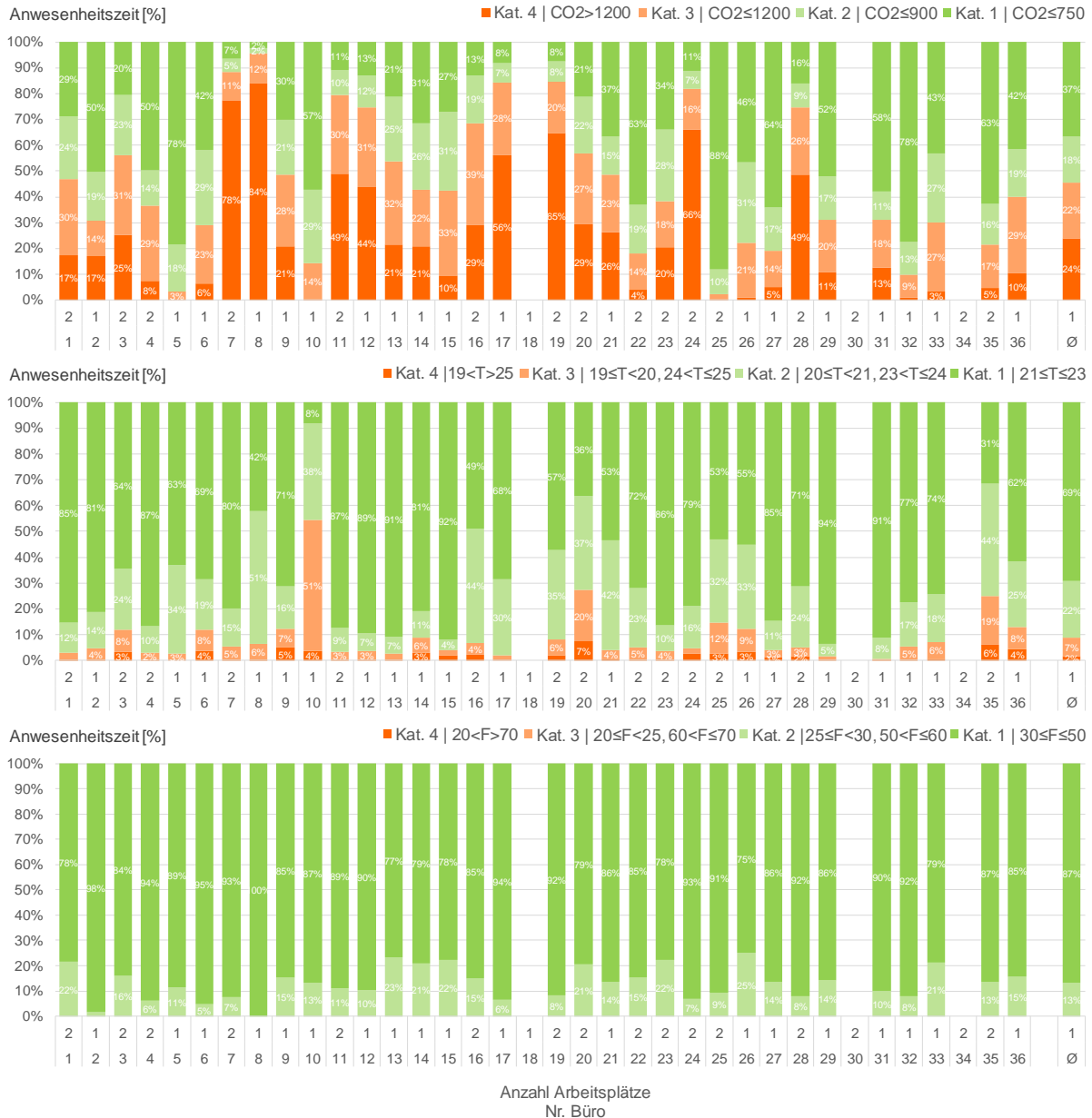


Abb. 42: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumluft, die Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte in den untersuchten Büroräumen des VG2 in Mettmann im Winter (2018/2019) jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume.

3.4.2.2 Sommerlicher Wärmeschutz

Das VG2 liegt nach DIN 4108 in der Klimaregion B. Damit liegt der Grenzwert für eine Übertemperaturstunde bei 26°C. Berechnet werden die Übertemperaturstunden nach DIN 4108 werktags für den Nutzungszeitraum von 7:00-18:00 Uhr und nach der realen Nutzung

von 7:00-16:00 Uhr. Die Zahl der Übertemperaturstunden wird auf Basis der Messwerte für das Jahr 2019 bestimmt.

Die Untersuchungen der Sommersituation unter 3.4.2.1 hat gezeigt, dass sehr häufig Raumtemperaturen über 25°C vorliegen. Da die Übertemperaturstunden normativ erst ab 26°C zählen zeigt sich in Abb. 43, dass es normativ nur zu wenigen Überschreitungen kommt. Vergleicht man die normativen Werte mit denen der realen Nutzungszeiten, so wird der Grenzwert von 500 Kh/a nicht mehr überschritten.

In der Regel ist der wärmste Zeitpunkt an einem Sommertag am späten Nachmittag. Da das Gebäude meist nur bis 16 Uhr genutzt wird, endet die Nutzungszeit vor dem täglichen Temperaturzenit und der Grenzwert wird so außerhalb der Nutzungszeit überschritten. Das in Abb. 43 auffällige Büro 15 war im Betrachtungszeitraum ungenutzt, wodurch der solare Eintrag weder durch den Sonnenschutz noch durch regelmäßiges Lüften reduziert wurde.

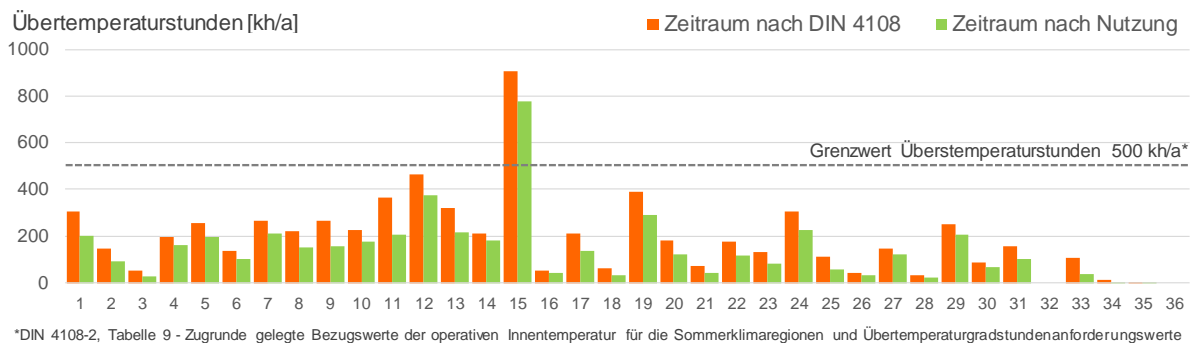
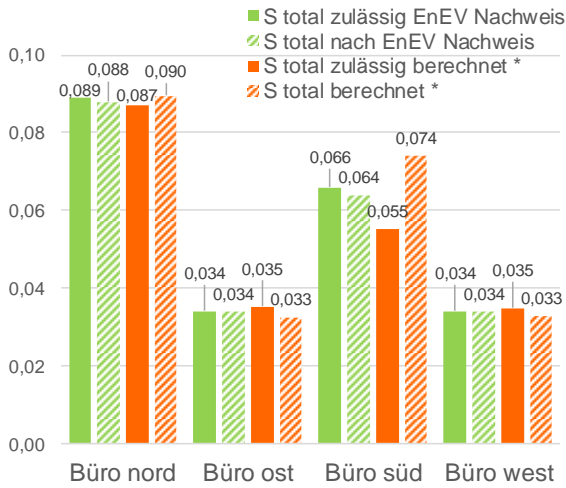


Abb. 43: Übertemperaturstunden im VG2 in Mettmann nach DIN 4108 und den realen Nutzungszeiten der Büroräume für ein Jahr

Die Untersuchung (Abb. 44) des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2:2013 stellt die zulässigen Sonneneintragskennwerte aus dem EnEV Nachweis den nach Norm selbst ermittelten Werten gegenüber. In allen untersuchten Räumen des Gebäudes wird nach dem EnEV Nachweis des VG2 der zulässige Sonneneintragskennwert nur haarscharf eingehalten. Durch immer wärmere Sommer im Zuge der Klimaerwärmung droht das Gebäude in Zukunft sehr schnell zu überhitzen. Die Untersuchung der Übertemperaturstunden in Abb. 43 hat gezeigt, dass der Grenzwert nur durch die typische Nutzungszeit nicht überschritten wird. Man kann davon ausgehen, dass die Nutzer*innen im Sommer nach Verlassen der Büroräume die Fenster auf Kippstellung öffnen und somit ein erhöhter Luftwechsel die Räume über Nacht herunterkühlt. Diese Art der Nachtlüftung wird in der Berechnung der Sonneneintragskennwerte nicht berücksichtigt und ist auf Grund des Einbruchschutzes nur in oberen Geschossen überhaupt möglich.

Sonneneintragskennwert [S]



* Errechnet nach DIN 4108-2:2013 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

Abb. 44: Sonneneintragskennwerte im Vergleich zwischen EnEV Nachweis der Planungsphase und nach realen Bedingungen im VG2 in Mettmann nach DIN 4108-2

3.4.2.3 Morgendliche CO₂ Konzentration vor Arbeitsbeginn

In der Regel ist davon auszugehen, dass durch Infiltration ein natürlicher Luftwechsel gegeben ist. Die Betrachtung des morgendlichen CO₂ Gehaltes über alle untersuchten Büroräume (siehe 3.4.2.1) hat gezeigt, dass in einigen Räumen noch nicht einmal in 40% der Zeit eine gute Raumluftqualität vorliegt.

Abb. 45 zeigt, zeigt die durchschnittliche CO₂-Konzentration in den Büroräumen jeweils um 6:00 Uhr am nächsten Morgen nach der regulären Nutzungszeit. Im Durchschnitt liegt die morgendliche CO₂ Konzentration über alle Büroräume bei 667 ppm. Einzelne starten schon mit einer Konzentration deutlich über 800 ppm und liegen so schon über der Raumluftkategorie

I. Hieran zeigt sich, dass die vorliegende Infiltration nicht ausreichend zur Absenkung der CO₂-Konzentration ist. Der Vergleich zwischen der mittleren morgendlichen CO₂-Konzentration im Sommer und im Winter bekräftigen die Untersuchungen der Raumklimakategorien und lassen auf eine nächtliche Kipplüftung im Sommer schließen.

CO₂ Konzentration der Raumluft [ppm]

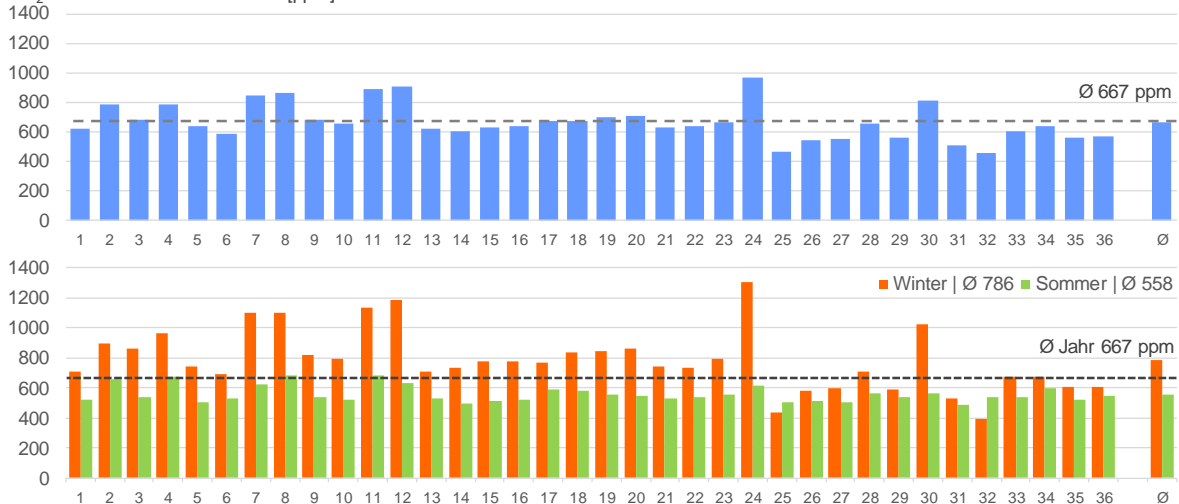


Abb. 45: Mittlere CO₂ Konzentration der Raumluft kurz vor Beginn der Nutzungszeit um 6 Uhr morgens im Zeitraum von Dienstag bis Samstag für das gesamte Jahr 2019 und für Sommer und Winter

3.4.2.4 CO₂-Ampeln

Im Bürogebäude in Mettmann kamen programmierte CO₂-Ampeln ab Februar 2020 zum Einsatz. Die gemessene CO₂-Konzentration in den jeweiligen Büroräumen wurde jeweils für die Monate November 2019 bis Januar 2020 (ohne CO₂-Ampel) und Februar bis Mitte März 2020 (mit CO₂-Ampel) verglichen.

Die folgende Grafik (Abb. 46) zeigt den Einfluss der aufgestellten CO₂-Ampeln auf die Raumluftqualitäten in den entsprechenden Büroräumen. Für die Raumlufttemperaturen sowie die relative Luftfeuchtigkeit haben die CO₂-Ampeln keinen Einfluss. Betrachtet man den Zeitraum in dem der CO₂ Gehalt über 1200 ppm (Kategorie IV) liegt, so ist hier der mittlere zeitliche Anteil durch den Einsatz der CO₂-Ampeln um 50% gesunken. Der Zeitraum, in dem die beste Kategorie (CO₂ Gehalt < 800 ppm) vorliegt, liegt nach der Inbetriebnahme der Ampeln bei über 50%.

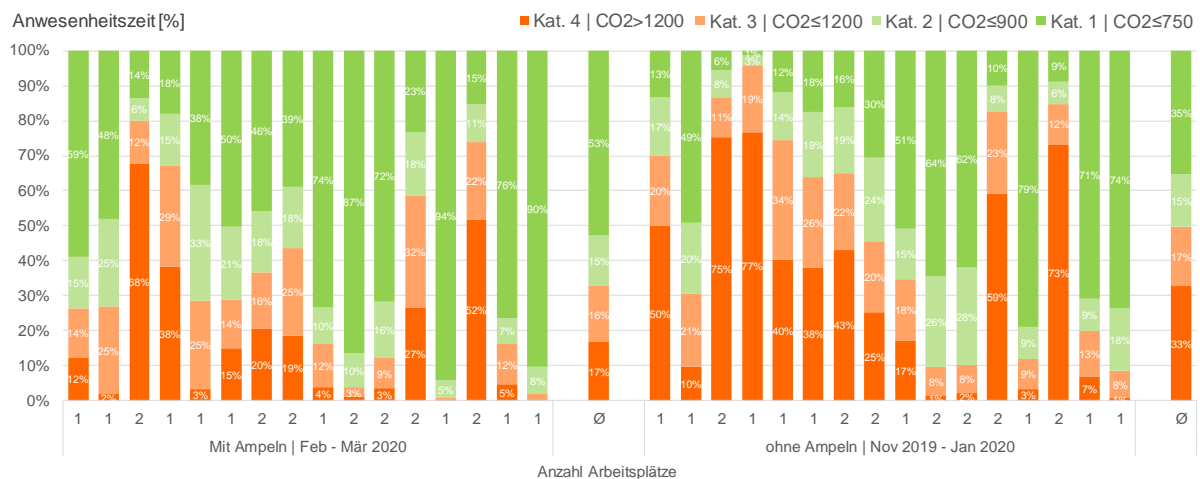


Abb. 46: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumluft in den untersuchten Büroräumen des VG2 in Mettmann im Winter mit und ohne installierte CO₂-Ampeln jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume der Räume.

Durch den kurzen Betrachtungszeitraum der Raumklimauntersuchungen mit CO₂-Ampeln, wird die CO₂-Konzentration in Relation zur Außenlufttemperatur betrachtet. Die folgenden Grafiken (Abb. 47) zeigen, dass die CO₂ Konzentration in den Büroräumen durch die CO₂-Ampeln grundsätzlich geringer wird. Die Streuungen über 1500 ppm nehmen deutlich ab. Bei den Einzelbüros zeigt sich dieses Bild noch deutlicher als im Gruppenbüro (unten links). Betrachtet werden die Nutzungszeiträume werktags von Montag bis Freitag, 7:00 Uhr bis 16:00 Uhr. Das Messintervall liegt bei 5 Minuten Mittelwerten. Leerlaufzeiten aufgrund von Teilzeitarbeit können nicht ausgeschlossen werden.

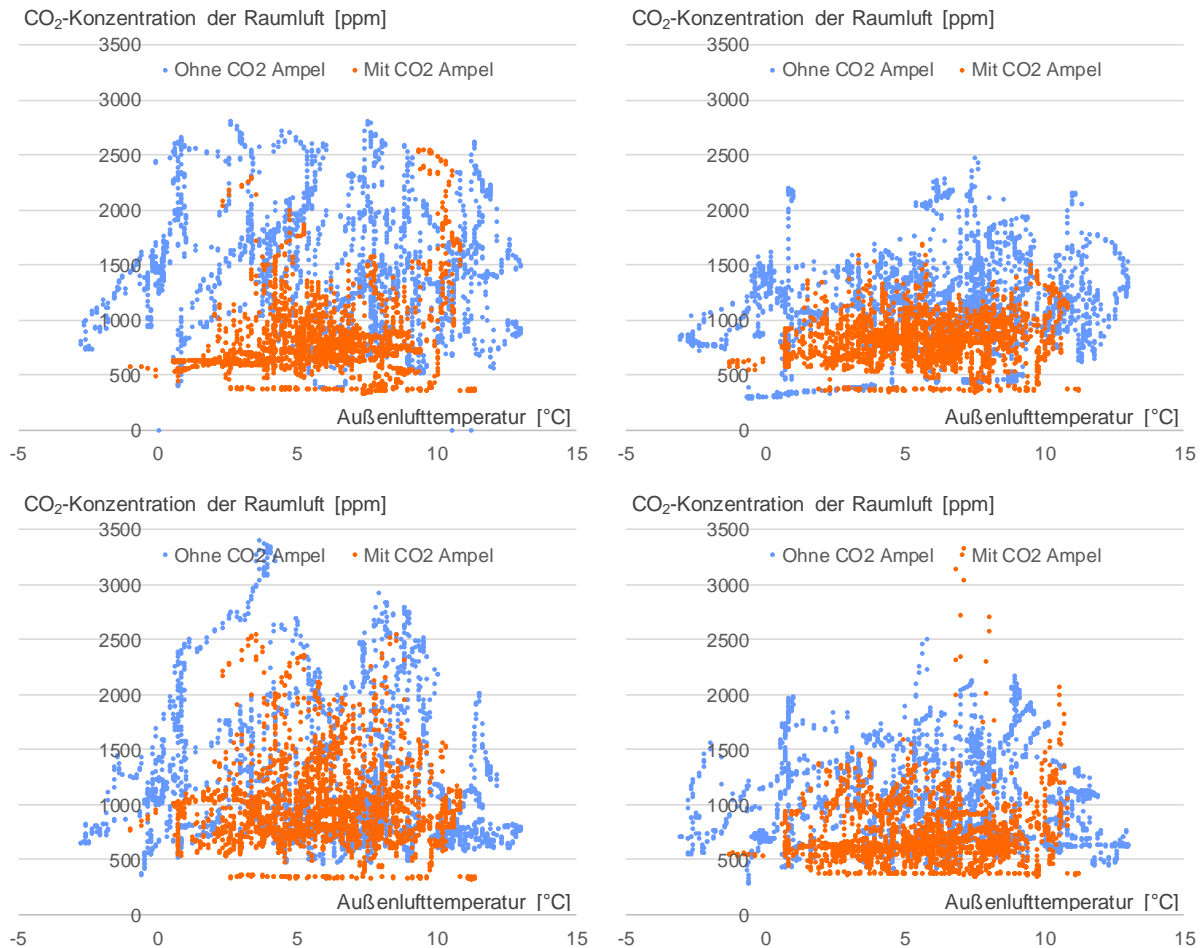


Abb. 47: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur Außenlufttemperatur für ausgewählte Büroräume jeweils mit (Februar 2020) und ohne installierte CO₂-Ampel (Januar 2020) auf Basis von 10-Minuten Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum. (Oben links Büro 5 - Einzelbüro; oben rechts Büro 17 - Einzelbüro; unten links Büro 20 - Gruppenbüro; unten rechts Büro 21 - Einzelbüro)

Der für den EnEV Nachweis angesetzte und nach DIN V 18599-2:2018-09 berechnete Mindestluftwechsel bei Fensterlüftung ist in der Regel deutlich größer als die realen Luftwechsel im Gebäude. Durch die deutlich niedrigeren Luftwechsel kommt es zu weniger Lüftungswärmeverlusten, aber auch zu einer schlechteren Raumluftqualität. Durch diesen Effekt liegt der Wärmeverbrauch im Gebäude unter dem zuvor berechneten Endenergiebedarf. Wird nun durch den Einsatz einer CO₂-Ampel häufiger gelüftet, steigen damit auch die Lüftungswärmeverluste.

Da im VG2 in Mettmann die Wärmemengen je Geschoss und Flügel erfasst werden, wurden die CO₂-Ampeln nur in Flügel A installiert. So soll untersucht werden, ob der erhöhte Luftwechsel, welcher durch die CO₂-Ampeln ausgelöst wird, auch zu einer messbaren Steigerung des Wärmeverbrauchs führt. Die Wärmemengen werden im täglichen Turnus erfasst und gegen die Außentemperatur aufgetragen. Verglichen wurden die Wintermonate mit CO₂-Ampel (Februar – Mitte März 2020) mit den Vorjahresmonaten und vorangehenden Monate im Winter 2019/2020. Betrachtet man die Steigung (Abb. 48) des Wärmeverbrauchs

für die jeweiligen Zeiträume, so lassen sich hier keine eindeutigen Abhängigkeiten erkennen. Vergleicht man die Monate im Winter 2019/ ist der Wärmeverbrauch mit Ampeln höher als ohne Ampel. Im Vergleich zwischen Februar 2020 und Februar 2019 ist diese Veränderung nicht zu erkennen. Da der Betrachtungszeitraum, auch durch die Corona-Krise, zusammengeschrumpft ist, kann hier kein eindeutiges Ergebnis abgeleitet werden.

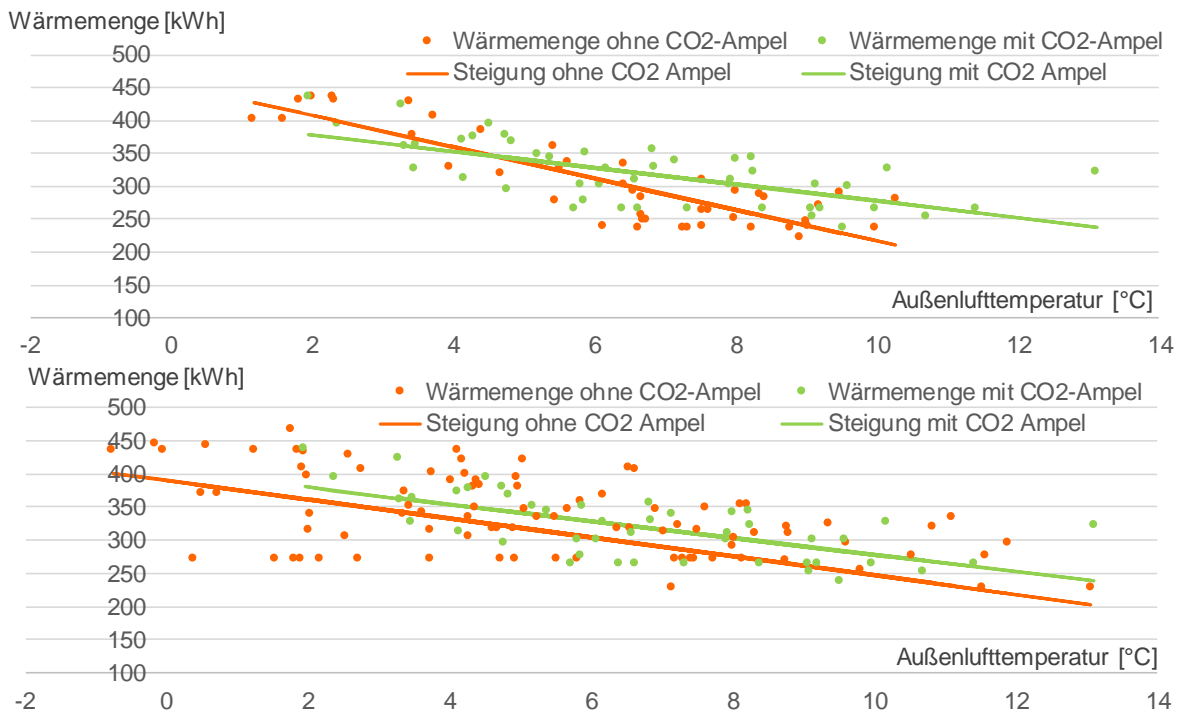


Abb. 48: Wärmemenge in Relation zur Außentemperatur im Flügel A in Mettmann jeweils für die Zeit mit (Feb-Mär 2020) und ohne (Feb-Mär 2019) installierter CO₂ Ampel (oben) und mit (Feb-Mär 2020) und ohne (Nov 2019-Jan 2020) installierter CO₂ Ampel (unten) auf Basis täglicher Mittelwerte

3.4.2.5 Energieperformance

Die Besonderheit des VG2 ist die getrennte Wärme- und Stromerfassung in den einzelnen Gebäudeflügeln und Geschossen. Da die Messungen hinter dem Pellet-Heizkessel erfolgen, wird der Nutzwärmeverbrauch inkl. Verteilung betrachtet. Als Besonderheit liegt der Energieverbrauch für die Beleuchtung getrennt vor. Als Bezugsgröße wird nur die Grundfläche der einzelnen Flügel ohne die Erschließungsriegel zwischen den Flügeln herangezogen.

Der Energieverbrauch aufgeteilt auf die einzelnen Monate zeigt die typische Verteilung der Heizwärme zwischen Sommer und Winter. Man kann erkennen, dass es auch in den Sommermonaten einen minimalen Heizwärmeverbrauch gibt.

Der Nutzungsstrom in den Gebäudeflügeln ist über das Jahr konstant. Beim Beleuchtungsstrom kann man erkennen, dass dieser in den Wintermonaten minimal größer ist. Durch den flächendeckenden Einsatz von LED-Leuchtmitteln ist der Beleuchtungsstromverbrauch mit monatlich maximal 0,5 kWh/m² im Vergleich zum Gesamtstromverbrauch sehr gering.

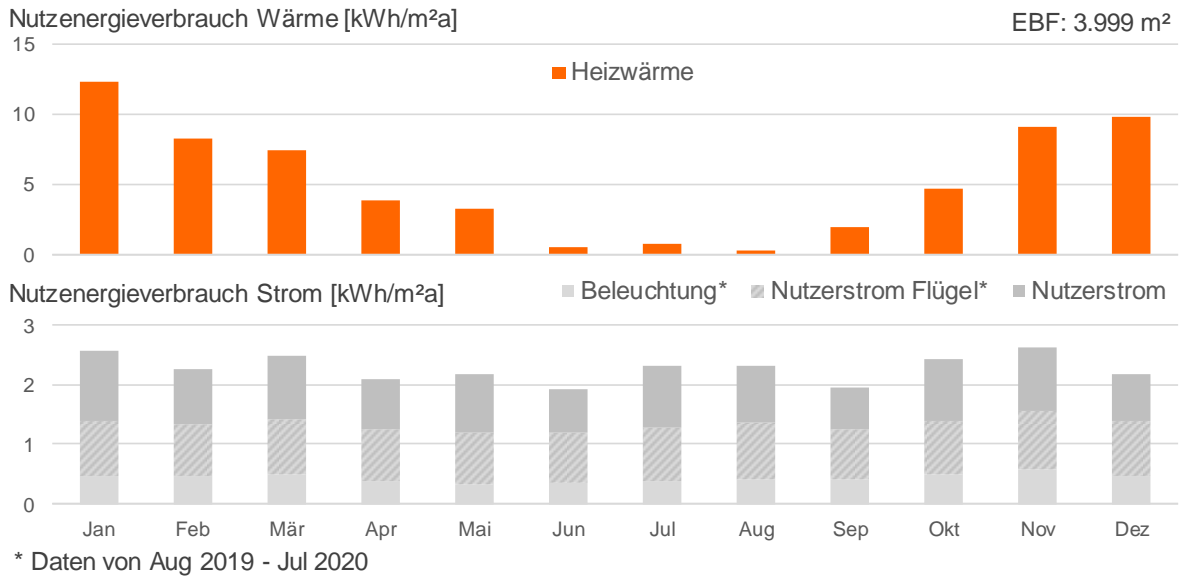


Abb. 49: Jahresbilanz des Nutzenergieverbrauchs des VG2 in Mettmann auf Monatsebene.

Das Kennfeld für die Nutzwärmeleistung basiert aufgrund der händischen Ablesungen im VG2 auf täglichen Mittelwerten. Das Kennfeld bekräftigt die Energiebilanz aus Abb. 50. Die Wärmeleistung ist abhängig von der Außentemperatur. Je niedriger die Außenlufttemperatur desto höher ist die Wärmeleistung. Vereinzelt treten Wärmeleistungen bei Temperaturen über 20°C auf. Daher sind auch in der Jahresbilanz wenige Verbräuche im Sommer erkennbar.

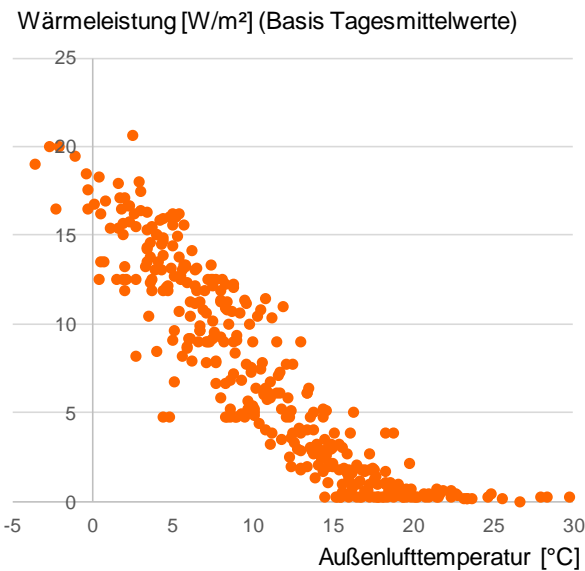


Abb. 50: Kennfeld der spezifischen mittleren täglichen Wärmeleistung im VG2 in Mettmann für das Jahr 2019.

Abb. 51 zeigt den mittleren täglichen Lastgang, der an der Trafostation des Gebäudes anliegt, im Zeitraum von Januar bis Juni 2020. Da im Zuge der Corona Pandemie viele Mitarbeiter*innen ab Mitte März in Mettmann ins Homeoffice gewechselt sind, werden die Zeiträume getrennt betrachtet. Die Grundlast des Gebäudes liegt bei etwa 6 kW und ist im Wochenendverlauf erkennbar. Auffällig am täglichen Verlauf ist, dass das Leistungsmaximum im Mittel zwischen 10 und 11 Uhr vormittags liegt. Man kann davon ausgehen, dass ein nicht unerheblicher Anteil an Mitarbeitern*innen halbtags arbeitet. Man kann erkennen, dass die Lastspitze durch den gesteigerten Homeoffice-Anteil um ca. 40 % geringer ist.

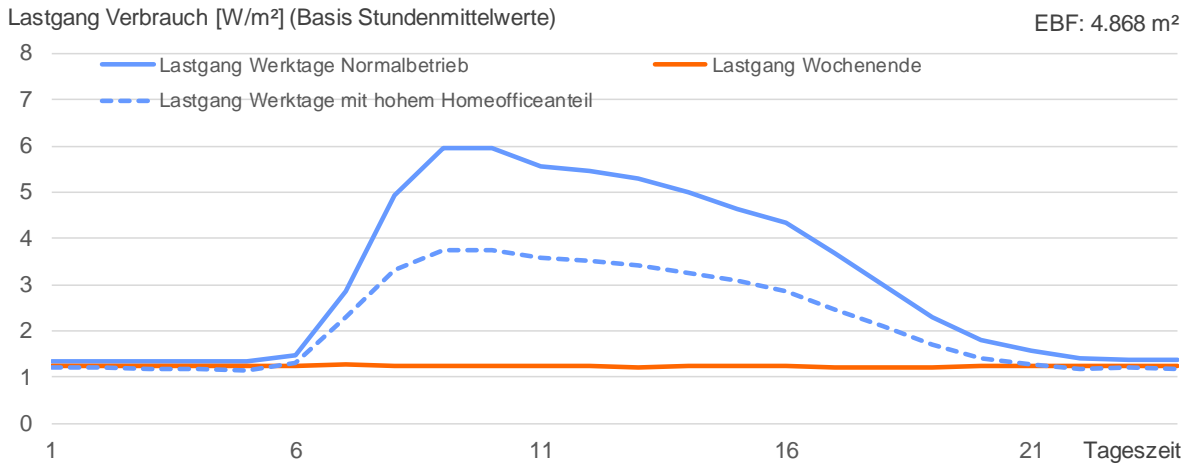


Abb. 51: Mittlerer täglicher Lastgang für Strom im VG2 für Januar bis Juni 2020 (Normalbetrieb Jan-Mär, hoher Homeoffice-Anteil Mär-Jun)

Die Energieperformance des Gebäudes wurde nach Nutz- und Endenergie getrennt betrachtet. Hierbei fallen die großen Unterschiede zwischen dem normativ berechneten Endenergiebedarf und gemessenen Endenergieverbrauch auf. Der normative Endenergiebedarf für Wärme ist etwa 20% größer als der reale Wärmeverbrauch. Der normativ angesetzte Luftwechsel für ein Gebäude mit Fensterlüftung liegt nach Ergebnissen der Raumklimamessungen tendenziell in der Realität nicht vor. Durch die Raumklimauntersuchungen wurde festgestellt, dass winterliches Lüften zu gering ausfällt und somit auch die Lüftungswärmeverluste sinken. Der Verbrauch für die RLT der WC Räume kann nicht gesondert ausgewiesen werden, der Beleuchtungsstromverbrauch ist minimal niedriger als der Energiebedarfswert.

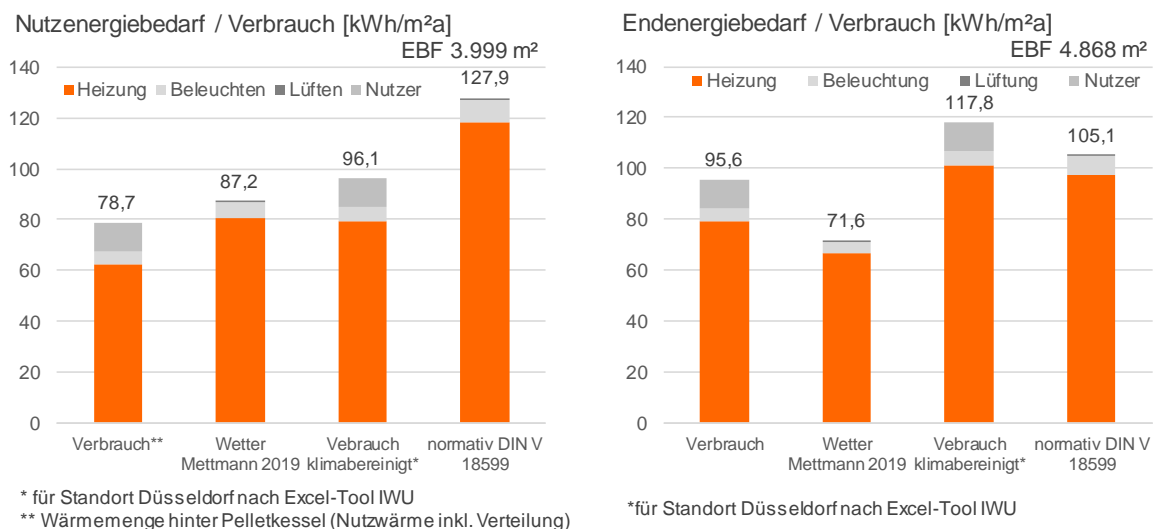


Abb. 52: Energieperformance des VG2 in Mettmann auf Nutz- und Endenergieebene, Bedarfswerte wurden mit dem Bilanzierungstool EnerCalc erstellt.

3.4.2.6 Erkenntnisse

Von Seiten der Bauherrschaft ist Interesse und Engagement in Richtung eines systematischen Energiemanagements vorhanden, jedoch bisher noch nicht systematisch eingeführt. In gemeinsamer Abstimmung wurden umfangreich Zähler nachgerüstet, wodurch die Erkenntnistiefe über das Gebäude gesteigert wurde. Während der Projektlaufzeit konnte jedoch durch die Bauherren keine Einbindung der Daten in die zentrale Gebäudeleittechnik realisiert werden. Personelle Wechsel und Engpässe waren und sind ein wesentliches Hemmnis. Damit standen die Daten nicht in ausreichender zeitlicher Auflösung für vertiefte Analysen zur Verfügung. Über einen zentralen Monitor wurden die Wärmemengen täglich fotografisch dokumentiert. Die einzelnen Stromzähler, die auch die Erfassung des Beleuchtungsstroms ermöglichen, wurden monatlich abgelesen. Hier zeigt sich, dass ohne eine automatisierte Einbindung keine hochaufgelösten Analysen möglich sind und die Erfassung der Daten nur mit sehr hohem personellem Aufwand möglich war. Zukunftsfähig mit Blick auf die Erstellung eines gebäudebezogenen Klimaschutzfahrplans ist ein solcher Ansatz nicht.

Durch die in der Praxis reduzierte winterliche Fensterlüftung und dadurch geringere Lüftungswärmeverluste liegt der Heizenergieverbrauch des Gebäudes unter den Erwartungswerten.

Durch die zweigeschossige Bauweise bietet das Gebäude viel freie Dachfläche, die zur Installation einer Solarstromanlage genutzt werden kann, um so stromseitig eine anteilige Eigenversorgung zu realisieren. Auch hier liegt der Engpass bei den personellen Ressourcen, um die Planungen anzustoßen und zu begleiten.

Das bestehende Lüftungskonzept der Fensterlüftung ist erst durch die Ergänzung von CO₂-Ampeln in der Lage, eine ausreichend gute Luftqualität während der Heizperiode zu erreichen. Dabei ist jedoch zu erwarten, dass durch vermehrtes Lüften der Heizwärmeverbrauch zunehmen wird. Auf Seiten des Bauherrn wird die flächendenkende Anschaffung von CO₂-Ampeln erwogen, da sich eine überzeugende Kosten/Nutzen-Relation ergibt.

Im Sommer wurde kein überzeugendes thermisches Raumklima erreicht. Hier hat sich bereits aus dem EnEV Nachweis gezeigt, dass der sommerliche Wärmeschutz nur knapp eingehalten wurde und mit Blick auf den Klimawandel nicht zukunftsfähig ist. Im Dialog mit den Nutzern*innen hat sich herausgestellt, dass in der Steuerung des Sonnenschutzsystems noch ein Verbesserungspotential liegt. Dieses Potential sollte erschlossen werden. Ggf. sind langfristig Änderungen an den Geweben der Behänge anzustreben, um die Strahlungstransmission weiter zu verringern.

Bei der Analyse der Raumklimamessungen mit den mobilen Messstationen hat sich eine sehr breite Streuung der Messergebnisse gezeigt. Für zukünftige Querschnittsuntersuchungen wird empfohlen, in mindestens 10 Räumen zu messen, um eine Gebäudecharakteristik näherungsweise zu erfassen.

3.4.3 Kreishaus Siegen-Wittgenstein

Das Kreishaus ist ein 17-geschossiges Bürogebäude und steht quer zur Talachse des Siegtales in der Kreisstadt Siegen. Das Gebäude aus den 1970er Jahren wurde von 2006-2010 saniert. Dabei wurde die bestehende Lüftungsanlage in den Büroräumen durch ein freies Lüftungskonzept ersetzt.²² Die Büroräume werden nach der Sanierung über Kühldecken klimatisiert.



Abb. 53: Aufnahme des Kreishauses Siegen-Wittgenstein in Siegen nach der Sanierung (Quelle: Kreis Siegen-Wittgenstein)

Über Zu- und Abluftventile in der Fassade im Bereich der Büroräume sollte zusammen mit der Öffnung von opaken Lüftungsflügel ein ausreichender Luftwechsel sichergestellt und übermäßiger Luftzug vermieden werden. Eine durch die Ventile definierte Luftmenge wird auf der Luv-Seite in die Büroräume eingebracht, über eine Überströmung durch Luftkanäle oberhalb der Flure in die Büroräume auf der Lee-Seite überführt und dort über die Fassade wieder abgeführt. Je nach Windrichtung kehrt sich so die Belüftungsrichtung um. Dieses

Belüftungsprinzip wird geschossweise angewendet. Die Fassadenventile lassen nur einen bestimmten maximalen Volumenstrom zu und regeln diesen je nach Windstärke ab.

Zur Untersuchung des Raumklimas wurden zunächst in fünf Büroräumen mobile Raumklimamessgeräte vom Typ IC-Meter aufgestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass Büros mit vornehmlich geschlossenen Türen genommen wurden, um das Lüftungskonzept nicht stören.

Nach der ersten Messperiode und für eine konstante Lüftung ungewöhnlich hohen CO₂-Konzentrationen in den untersuchten Räumen, wurde bei einer Recherche vor Ort ein Ausführungsfehler festgestellt. So wurden die Lüftungskanäle, die für die Überströmung ursprünglich geplant wurden, baulich nicht ausgeführt bzw. wurden früher vorhandene Öffnungen verschlossen. Dadurch kommt es in dem Gebäude bei geschlossenen Türen nicht zu der geplanten Querlüftung.

Um die Methode dennoch prüfen zu können, wurden im zweiten Messjahr die Geräte in Büroräumen platziert, in denen die Angestellten in der Regel die Bürotür offenstehen lassen. So kann über den Flurbereich die Überströmung der Luftmenge von der Luv zur Lee-Seite des Gebäudes gewährleistet werden. Da die Flurbereiche in den einzelnen Geschossen über eine Zu- und Abluftanlage verfügen, wird die Raumluftqualität durch die geöffneten Türen verbessert.

²² <https://www.jung-ingenieure.com/projekte/atmende-fassade/>

Tabelle 6 Übersichtstabelle über die eingesetzten Messgeräte und deren Randbedingungen im Kreishaus in Siegen

Geschoss	Ausrichtung	Modul-Nr.	Tür	Belegung	Messzeitraum
10	nord-ost	KVSW 2	geschlossen	3	02.08.18 - 27.06.19
10	süd-west	KVSW 3	geschlossen	2	02.08.18 - 01.08.19
11	nord-ost	KVSW 2	geschlossen	1	27.06.19 – 01.08.19
11	süd-west	KVSW 5	geschlossen	2	02.08.18 - 01.08.19
12	nord-ost	KVSW 4	geschlossen	2	02.08.18 - 01.08.19
12	nord-ost	KVSW 1	geschlossen	4	02.08.18 - 01.08.19
4	süd-west	KVSW 3	geöffnet	2	seit 02.08.19.
11	nord-ost	KVSW 2	geöffnet	2	seit 02.08.19.
13	nord-ost	KVSW 4	geöffnet	2	seit 02.08.19.
13	süd-west	KVSW 5	geöffnet	3	seit 02.08.19.
14	süd-west	KVSW 1	geöffnet	2	seit 02.08.19.

3.4.3.1 Raumklimaperformance

Es wurden die raumklimatischen Bedingungen in den beispielhaften Büroräumen mit vornehmlich geschlossener Bürotür (2018/2019) und den Büroräumen mit vornehmlich geöffneter Bürotür (2019/2020) gemessen und in der Auswertung gegenübergestellt. Betrachtet werden dabei jeweils Stundenwerte von montags bis freitags für ein gesamtes Messjahr im täglichen Nutzungszeitraum von 7:00 – 16:00 Uhr.

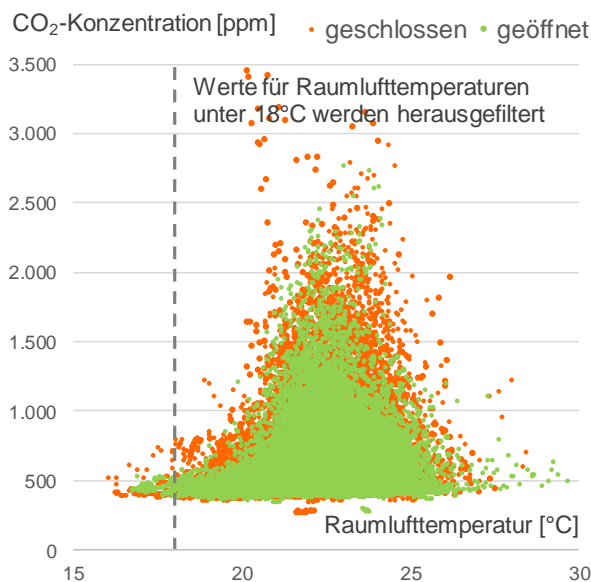


Abb. 54: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur für die untersuchten Büroräume mit geschlossener und mit geöffneter Bürotür des Kreishauses in Siegen auf Basis von stündlichen Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum

Abb. 54 zeigt die Abhängigkeit zwischen CO₂ Konzentration der Raumluft und der Raumlufttemperatur. Es ist erkennbar, dass der CO₂ Gehalt der Raumluft zwischen 400 ppm und 2000 ppm und einer Raumlufttemperatur im Bereich zwischen 20°C und 26°C liegt. Darüber hinaus gibt es einzelne CO₂-Werte die deutlich über 2000 ppm liegen.

Grundsätzlich lässt sich erkennen, dass in den Räumen mit geöffneter Bürotür die Anzahl der höheren CO₂-Konzentrationen kleiner ist als in den Situationen mit geschlossener Bürotür.

In der Betrachtung der Büroräume im Kreishaus in Siegen zeigt sich für den CO₂-Gehalt ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Untersuchungssituationen. So liegt für den Fall der geschlossenen Bürotür im Durchschnitt in 40% des Nutzungszeitraumes eine sehr gute

Raumluftqualität (Kategorie 1) vor, jedoch auch in durchschnittlich 22% der Zeit die schlechteste Kategorie. Bei geöffneter Bürotür liegt Kategorie IV nur noch zu 2% vor. In fast 75% der Zeit liegt somit per Definition bei diesen Büroräumen eine sehr gute Luftqualität vor.

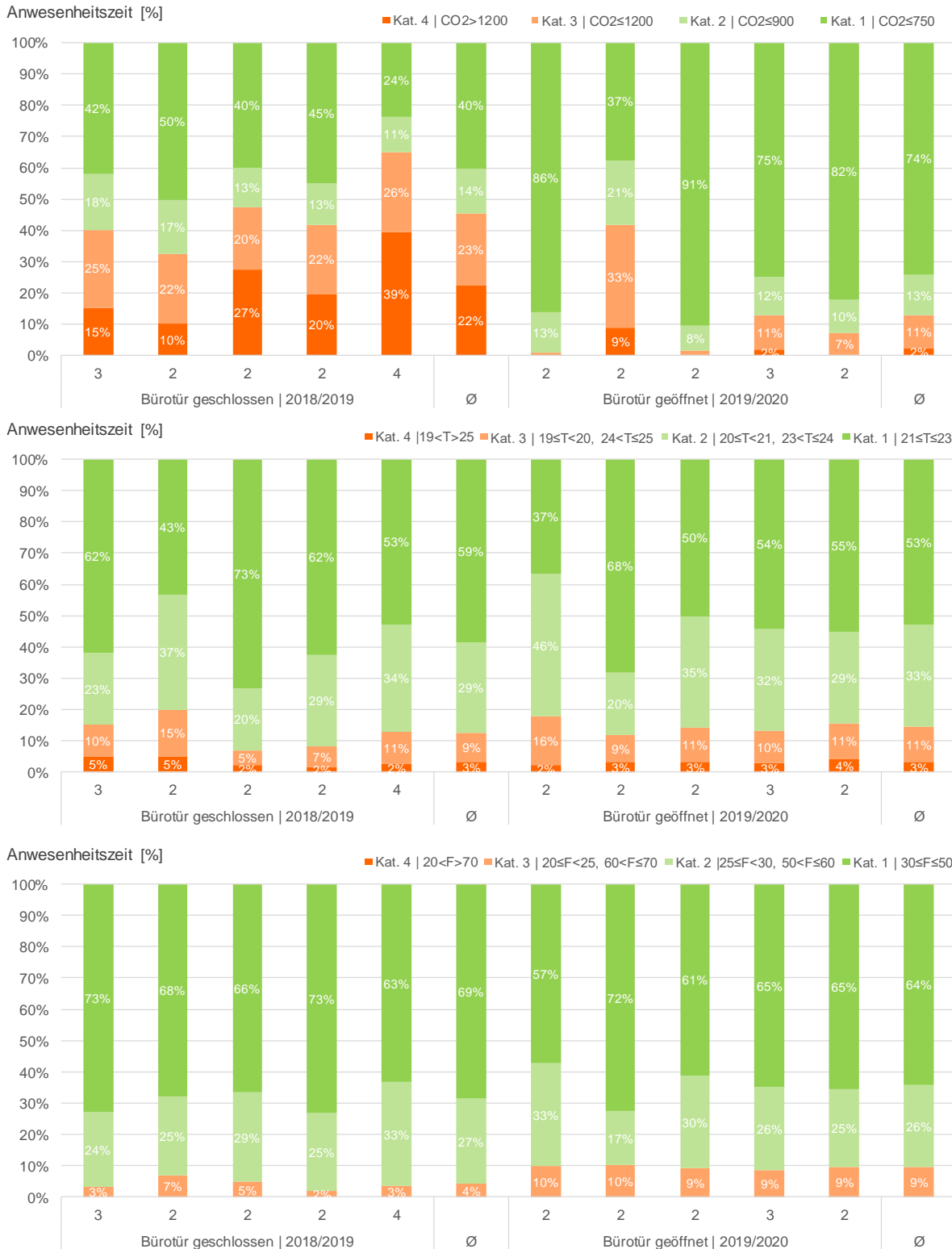
In einem Büroraum mit vorwiegend geschlossener Bürotür liegt in fast 40% der Zeit eine Raumluftqualität der Kategorie IV vor. In diesem Fall hat das Büro von allen untersuchten Räumen mit vier Personen die höchste Belegung.

Eines der untersuchten Büros mit geöffneter Bürotür weist eine vergleichbare Verteilung der Raumklimakategorien wie die Büroräume mit geschlossener Bürotür auf. In diesem Fall kann man davon ausgehen, dass sich hier die Öffnungssituation der Tür gegenteilig verhält und die Tür häufiger geschlossen ist. Das Beispiel verdeutlicht, dass die Anzahl an Stichproben für die Raumklimauntersuchungen nicht unerheblich ist, um einzelne Abweichungen besser deuten zu können.

Betrachtet man die zeitliche Verteilung der Kategorien für die Raumlufttemperatur und die relative Raumluftfeuchte, so liegt für die Raumlufttemperatur fast ausschließlich Kategorie I und II vor und nur in durchschnittlich 10% der Zeit Kategorie III und IV. In Betrachtung der Raumluftfeuchte verhalten sich die Messsituationen fast gleich und es liegt zu keinem Zeitpunkt Kategorie IV vor.

Die raumklimatischen Bedingungen (Anhang 2 und Anhang 3) wurden für den Sommerfall in den Monaten Juni bis August und im Winterfall für die Monate November bis Februar im täglichen Nutzungszeitraum von 7:00 – 16:00 Uhr betrachtet. Die zeitliche Verteilung der Raumklimakategorien nach DIN EN 15251:2012 verhält sich für den CO₂ Gehalt der Raumluft der beiden Untersuchungssituationen im Sommer und Winter analog zu den Verteilungen über ein Untersuchungsjahr und ist im Sommer nur leicht besser. Betrachtet man die Verteilung der Kategorien für die Raumlufttemperatur, so ist der Anteil der Kategorie IV im Sommer größer als im Jahresdurchschnitt. Daraus lässt sich schließen, dass es im Sommer zu in einigen Fällen zu Innenraumtemperaturen über 25°C kommt. Unter 3.4.3.2 werden die Übertemperaturstunden für die Büroräume detaillierter auf ihre Zulässigkeit überprüft.

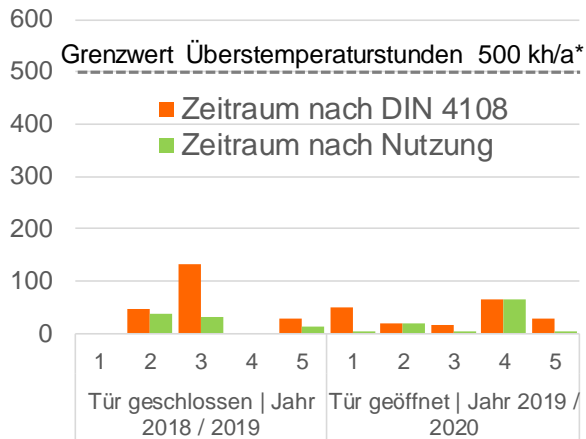
Im Winter liegen schlechtere Raumklimabedingungen im Blick auf die CO₂ Konzentration vor. Der zeitliche Anteil von Kategorie III und IV ist größer als in der Sommer- und Jahresverteilung. Die Temperaturbedingungen im Winter zeigen einen kleineren Anteil an Kategorie IV und einen größeren Anteil an Kategorie I.



Büroräume mit Anzahl der Arbeitsplätze

Abb. 55: Zeitliche Verteilung nach den Raumlufthumiditätskategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumlufthumidität, die Raumlufthumidität und relative Raumlufthumidität in den untersuchten Büroräumen des Kreishauses in Siegen für ein Jahr jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume.

Übertemperaturstunden [kh/a]



* DIN 4108-2, Tabelle 9 - Zugrunde gelegte Bezugswerte der operativen Innentemperatur für die Sommerklimaregionen und Übertemperaturgradstundenanforderungswerte

Abb. 56: Übertemperaturstunden im Kreishaus in Siegen nach DIN 4108 und den realen Nutzungszeiten der Büroräume für ein Jahr

Übertemperaturstunden im Kreishaus in Siegen selbst bei normativer Betrachtung fast 300 Übertemperaturstunden unter dem maximal zulässigen Gesamtwert bleiben. In Anbetracht der vorhandenen Kühlung war dies zu erwarten.

3.4.3.3 Raumklimabedingungen vor Arbeitsbeginn

Durch das freie Lüftungskonzept mit den Fassadenklappen ist ein dauerhafter Luftwechsel, auch über Nacht, in den Büroräumen gegeben. Dies zeigt auch Abb. 57. Die mittlere CO₂-Konzentration morgens um 6 Uhr vor Arbeitsbeginn liegt bei 508 ppm und damit nur knapp über dem Außenluftniveau.

Die Abklingkurve (Abb. 58) der mittleren CO₂ Konzentration in den Büroräumen festigt das Bild aus Abb. 57. Die Kurve sinkt bei beiden untersuchten Raumsituationen bis morgens um 6 Uhr auf knapp über 500 ppm. Das Abklingen der CO₂ Werte bei geschlossener Bürotür weist ein stärkeres Gefälle auf, da am Abend zu Beginn des Abklingprozesses, die CO₂-Konzentration höher ist als in den Büroräumen mit geschlossener Raamtür.

3.4.3.2 Übertemperaturstunden

Die Büroräume sind durchgehend mit Kühldecken ausgestattet. Im Regelbetrieb laufen diese nur während der Nutzungszeit. Sie waren so eingestellt, dass sie ab einer mittleren täglichen Außenlufttemperatur über 25°C auch während der Nacht zur Vorkühlung in Betrieb gehen.

Das Kreishaus in Siegen liegt in der Klimaregion A nach DIN 4108. Damit liegt der Grenzwert für eine Übertemperaturstunde bei 25°C. Die Zahl der Übertemperaturstunden wird auf Grundlage der Messwerte immer für ein gesamtes Jahr betrachtet. Die Untersuchungen der Sommersituation unter Anhang 2 hat gezeigt, dass nur zu einem geringen Zeitraum Raumtemperaturen über 25°C vorliegen. Auch Abb. 56 zeigt, dass die

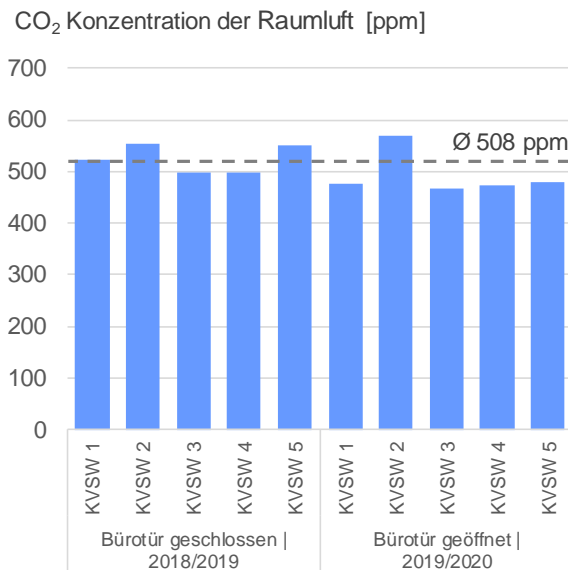


Abb. 57: Mittlere CO₂ Konzentration der Raumluft kurz vor Beginn der Nutzungszeit um 6 Uhr morgens im Zeitraum von Dienstag bis Samstag

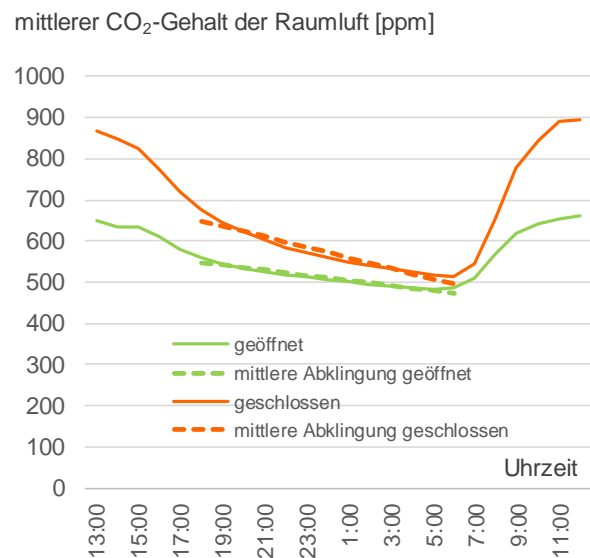


Abb. 58: Mittlere CO₂ Konzentration in Siegen nach Uhrzeit und geöffneter und geschlossener Bürotür in Relation zur mittleren Abklingkurve außerhalb der Nutzungszeit wochentags von 18:00 Uhr bis 6:00 Uhr.

3.4.3.4 Morgendliche Raumtemperaturen vor Arbeitsbeginn

Die guten CO₂ Konzentrationen am Morgen (siehe 3.4.3.3) weisen auf einen hohen Luftwechsel während der Nacht hin. Es ist dadurch möglich, dass es innerhalb der Heizperiode zu höheren Wärmeverlusten kommt. Im Konzept wurde empfohlen, die Ventile nachts und am Wochenende zu schließen. Eine genaue Untersuchung der Energieverbräuche des Gebäudes ist diesbezüglich nicht möglich, da das Gebäude sich den Fernwärmeanschluss und damit den Zähler mit einem benachbarten Altbau teilt und so keine gebäudescharfe Analyse möglich ist.

Eine Betrachtung der Raumtemperaturen in Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur um 6 Uhr morgens im Zeitraum von montags bis freitags zeigt, dass es hier zu keinen auffälligen Auskühlungen kommt. Auch eine Betrachtung der Temperaturen an den Wochenenden zeigt keine übermäßige Absenkung der Raumlufttemperaturen in diesem Zeitraum. Der Vergleich (Abb. 59) zwischen den Werktagen (links) und den Wochenenden zeigen eine nahezu identische Verteilung. Es ist davon auszugehen, dass durch die Heizung die Lüftungswärmeverluste ausgeglichen werden.

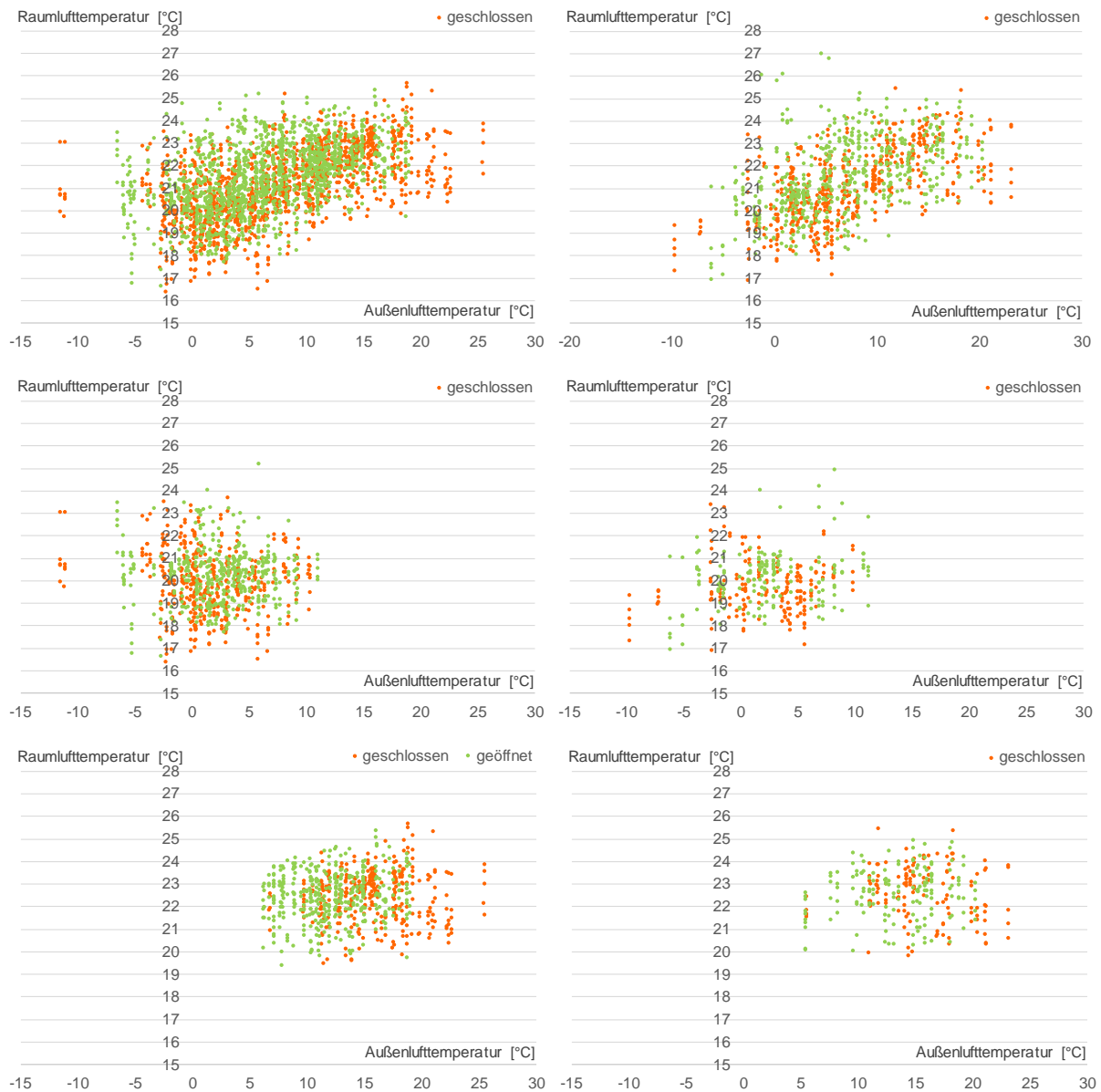


Abb. 59: Raumlufttemperatur kurz vor Beginn der Nutzungszeit um 6 Uhr morgens in Relation zur Außenlufttemperatur. Oben links: werktags, oben rechts: Samstag u. Sonntag, Mitte links: werktags im Winter, Mitte rechts: Samstag u. Sonntag im Winter, unten links: werktags im Sommer, unten rechts: Samstag u. Sonntag im Sommer

3.4.3.5 Erkenntnisse

Die nicht ausgeführten Lüftungsöffnungen zur Querlüftung im Gebäude haben gezeigt, dass gerade bei anspruchsvollen und nicht konventionellen Lüftungskonzepten eine qualifizierte Kontrolle in der Umsetzungsphase notwendig ist. Dies kann durch eine durchgängige Dokumentation verbessert werden (siehe Kapitel 2) wenn es damit gelingt, die planerischen Überlegungen besser in der Umsetzungsphase zur Verfügung zu stellen.

Da die Messung des Raumklimas eine Abhängigkeit zwischen geöffneter und geschlossener Bürotür gezeigt hat, rückt einmal mehr das Nutzerverhalten als ein zentrales Element für die

Lufthygiene in den Fokus. Der Aspekt offener oder geschlossener Türen bedarf einer weiteren forschenden Betrachtung, da hierzu bisher wenig Erkenntnisse vorliegen. Die Bedeutung ist hoch. Innerhalb üblicher Simulationsverfahren wird dieser Aspekt meist nicht berücksichtigt.

Für das Projekt soll mit einer verbesserten Nutzerinformation auf die Einflüsse von Türöffnungen und die Bedienung der Lüftungsklappen und -ventile hingewiesen werden, damit die vollen Potentiale des Konzeptes gehoben werden können, ohne einen Mehrverbrauch an winterlicher Heizwärme zu verursachen.

Da über die Energieversorgung im Pilotgebäude ein Nachbargebäude mit angeschlossen ist, konnte kein Gebäude bezogenes Energiemonitoring durchgeführt werden. Somit kann auch kein Soll-/Ist-Vergleich durchgeführt werden. Ebenso kann dadurch auch nicht beurteilt werden, ob es durch die windbasierte Durchströmung des Gebäudes außerhalb der Nutzungszeiten zu einem erhöhten Wärmeverbrauch kommt. Die Betreiber des Gebäudes haben Kenntnis um die fehlende Zählerinfrastruktur und streben die Nachrüstung der Zähler an. Dass dies bisher nicht erfolgt ist, liegt u.a. den personellen Engpässen im technischen Gebäudemanagement.

3.4.4 Bürogebäude Goblet Lavandier & Associés, Luxemburg

Das vom Ingenieurbüro Goblet Lavandier & und Associés in Luxemburg geplante und überwiegend selbst genutzte Bürogebäude ist ein fünfgeschossiger Bau mit drei unterirdischen Tiefgaragenebenen.



Abb. 60: Aufnahme des GoLav Firmensitzes in Niederanven (Luxemburg) (Quelle: Markus Lichtmeß, Goblet Lavandier & Associés Ingénieurs-Conseils).

Das Gebäude besitzt durch seine einfache kubische Form eine sehr kompakte Bauweise. Im Erdgeschoss befinden sich der Empfang, mehrere Besprechungsräume sowie eine kleine Kantine. Über die Obergeschosse erstrecken sich die Büroräume als kleine Gruppenbüros.

Geheizt und gekühlt wird das Gebäude über Erdsonden, die im Heizfall mit einer Wärmepumpe betrieben werden. Die Übergabe im Gebäude erfolgt im Wesentlichen mittels Bauteiltemperierung. Darüber hinaus gibt es

beispielsweise zusätzliche, individuell regelbare Wandheizungen in den Eckbüros. Belüftet wird das Gebäude über eine Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Die Kühlung erfolgt über die Bauteiltemperierung im Zusammenspiel mit dem Erdsondenfeld und durch eine Nachtlüftung über Fensterelemente und den im Gebäudekern positionierten Lichthof. Zur Reduzierung der solaren Einträge, besitzt das Gebäude einen automatisierten außenliegenden Sonnenschutz, der über die Gebäudeleittechnik automatisiert ist. Das Gebäude besitzt auf dem Dach eine Photovoltaikanlage mit rund 40kW_p in Kombination mit einem kleinen 4kWh Batteriespeicher. Die Anlage ist in Segmente für vier unterschiedliche Orientierungen und flachem Neigungswinkel von 15° aufgeteilt, um über den Tag ein gleichmäßigeres Erzeugungsprofil zu erreichen.

Das Technikkonzept wurde von Goblet Lavandier & Associés entwickelt und simulationsgestützt evaluiert. Die Energieperformance wird während des Gebäudebetriebs kontinuierlich über die Gebäudeleittechnik überwacht und dokumentiert.

Die Messergebnisse und Energieverbräuche wurden von Seiten des Betreibenden für das Jahr 2019 für das Projekt zur Verfügung gestellt.

3.4.4.1 Raumklimaperformance

Die raumklimatischen Bedingungen wurden in zwei nahezu identischen und übereinanderliegenden Büroräumen gemessen. Dazu waren mobile Sensoren in die Datenhaltung der Gebäudeautomation eingebunden. Betrachtet werden nachfolgend jeweils Stundenwerte von montags bis freitags für ein gesamtes Messjahr im täglichen Nutzungszeitraum von 8:00 – 18:00 Uhr. Die genaue Belegung der Räume ist nicht bekannt. Sie variiert aufgrund nicht fester Nutzungszeiträume und auch temporärer Abwesenheit. Für den Sommerfall wurden die Messwerte für die Monate Juni – August 2019 und für den Winterfall die Monate Januar – Februar 2019 und November – Dezember 2019 betrachtet. Die

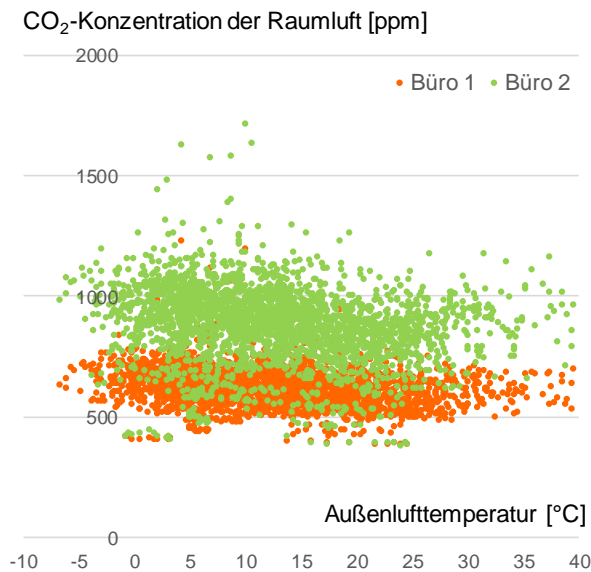


Abb. 61: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur Außenlufttemperatur für das Jahr 2019 für die untersuchten Büroräume in Luxemburg auf Basis von stündlichen Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum

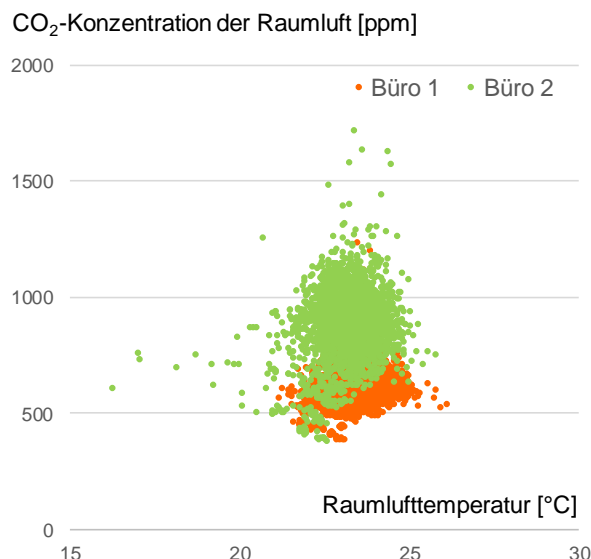


Abb. 62: CO₂ Gehalt der Innenraumluft in Relation zur Raumlufttemperatur für das Jahr 2019 für die untersuchten Büroräume in Luxemburg auf Basis von stündlichen Mittelwerten im täglichen Nutzungszeitraum

zeitliche Verteilung der Raumklimakategorien nach DIN EN 15251:2012 ist für die Innenraumtemperatur und die relative Raumluftfeuchte über beide Messräume vergleichbar.

Betrachtet man die Verteilung des CO₂-Gehaltes der Raumluft, so ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Die Unterschiede zwischen Büro 1 und 2 können durch unterschiedliche Luftmengen, unterschiedliche Belegungsdichte oder weitere Einflüsse verursacht sein. Ein weiterer Einflussfaktor können die mehr oder weniger geöffneten Raumtüren, wie im Projekt in Siegen beobachtet, sein.

Im Allgemeinen ist im Bürogebäude in Luxemburg bei der Betrachtung der relativen Raumluftfeuchte der Anteil von Kategorie I deutlich kleiner und in Kategorie II deutlich größer als in den Pilotprojekten ohne raumlufttechnische Anlage. Hier sorgt die Zufuhr von mehr Außenluft zu veränderten Raumluftfeuchten. Die Nachtlüftung über die Kippfenster im Sommer begünstigt die Situation.

Die Auftragung der mittleren stündlichen CO₂-Konzentration gegenüber der Außenlufttemperatur (Abb. 61) lassen den Unterschied zwischen den beiden Büroräumen ebenfalls gut erkennen. Der Vergleich zur Innenraumtemperatur (Abb. 62) zeigt hier sehr anschaulich, dass Heizung und Kühlung im Gebäude gut eingeregelt sind und die Raumtemperaturen zwischen 21°C und 25°C liegen. Einzelne Ausreißer sind wahrscheinlich auf geöffnete Fenster zurückzuführen.

Betrachtet man die mittlere CO₂-Konzentration (Abb. 63) über den Tagesverlauf, so kann man die typischen Bürozeiten im Gebäude erkennen. Ab der Mittagszeit sinken die Werte und ab 18 Uhr sinken sie dank der Lüftungsanlage sehr

konstant bis zum Arbeitsbeginn am nächsten Morgen. Auch der mittlere Verlauf mit einem Maximum über 900 ppm lässt in diesem Fall auf eine höhere Belegungsdichte in Büro 2 schließen (Luftmengen, Belegung, Türöffnung,...).

Alles in allem lässt sich am Beispiel des Gebäudes in Luxemburg gut erkennen, dass die RLT-Anlage einen positiven Einfluss auf die Raumluftqualität hat. Je nach Belegungsdichte und Luftwechsel je Raum sind Unterschiede zwar erkennbar, aber im Großen und Ganzen ist die Gefahr einer schlechten Raumluftqualität nicht gegeben.

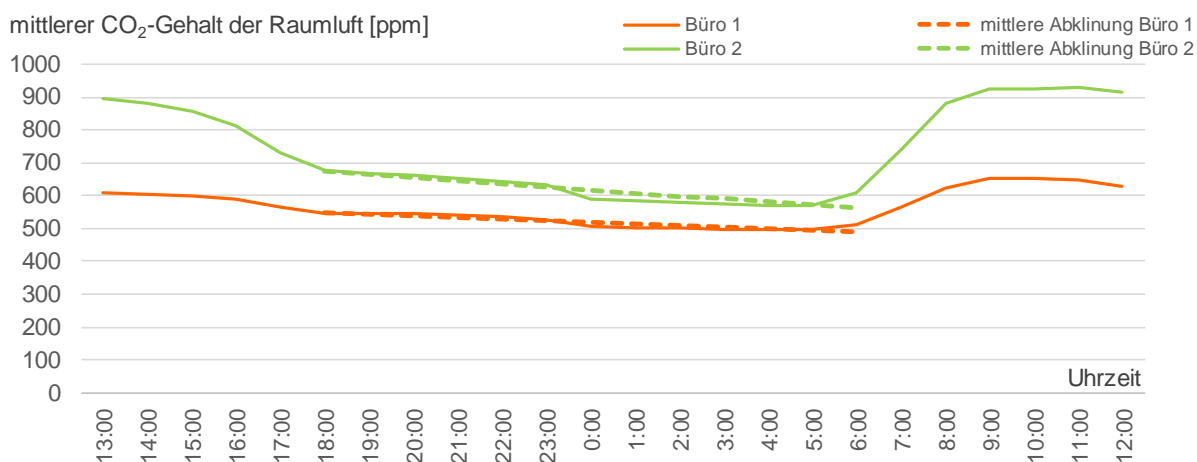


Abb. 63: Mittlere CO₂ Konzentration für die untersuchten Büroräume in Luxemburg in Relation zur mittleren Abklingkurve außerhalb der Nutzungszeit von 18:00 Uhr bis 6:00 Uhr.

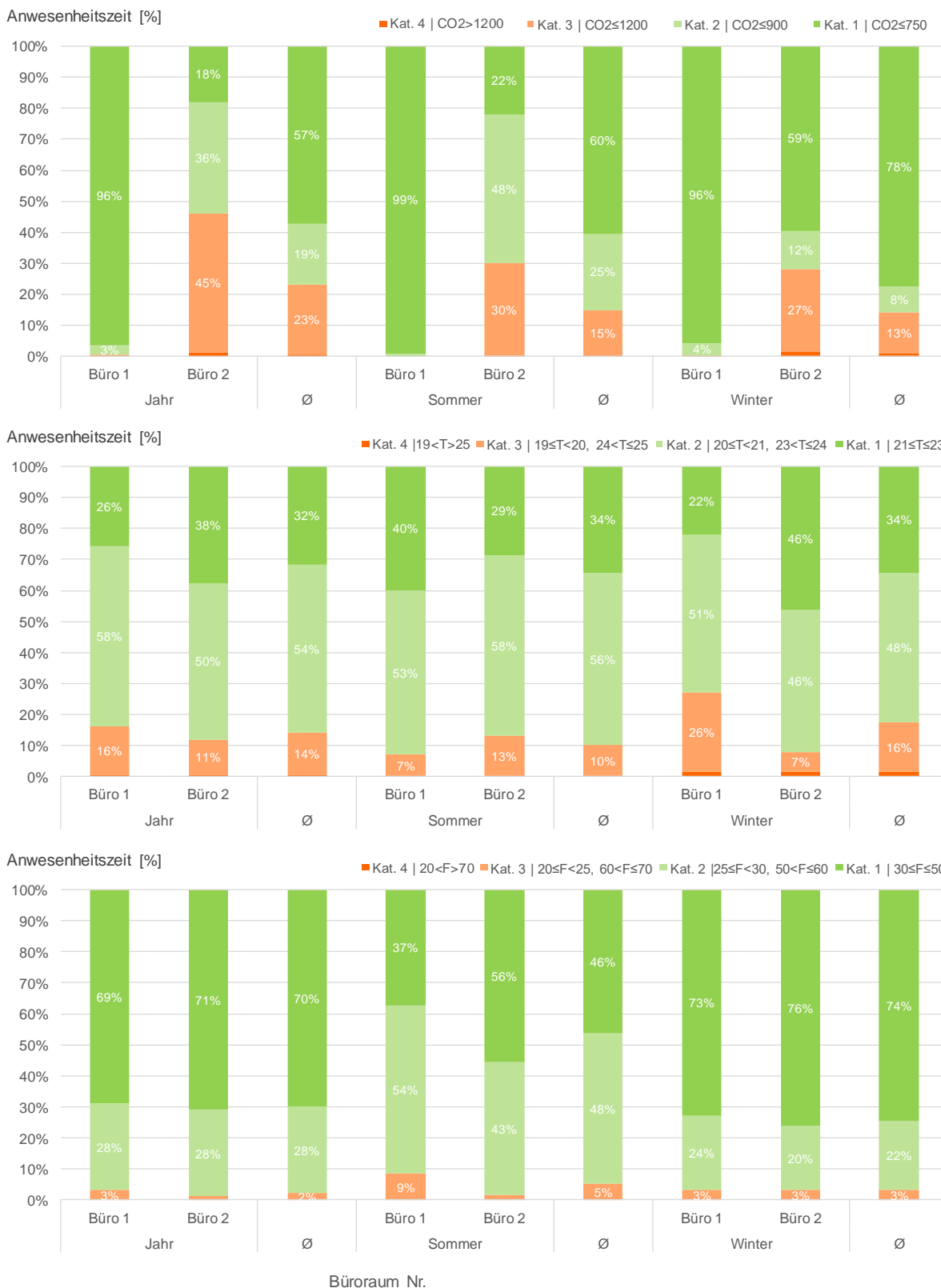


Abb. 64: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumlucht, die Raumlufttemperatur und relative Raumluffeuchte in den untersuchten Büroräumen in Luxemburg jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume der Räume im Jahr 2019.

3.4.4.2 Energieperformance

Da das Gebäude über eine Wärmepumpe mit Sondenfeld beheizt wird, bezieht sich die Energiebilanz ausschließlich auf den Stromverbrauch. Bedingt durch das Versorgungskonzept entfällt der Stromverbrauch der Wärmepumpe auf die Wintermonate (3,4 kWh/m²a). Im Sommer erfolgt eine direkte Kühlung über das Erdsondenfeld komplett ohne den reversiblen Einsatz der Wärmepumpe. Nicht zu vernachlässigen sind die Verbräuche in den Pumpenkreisen (Heizsaison: 1,8 kWh/m²a, Kühlsaison: 1,5 kWh/m²a). Die zusätzliche RLT-Kältemaschine verursacht nur geringe Verbräuche und dient überwiegend zur Entfeuchtung (0,3 kWh/m²a).

Der Energieverbrauch der Lüftungsanlage sowie der Nutzungsstrom sind über das Jahr nahezu konstant. Der Anteil des Nutzungsstroms überwiegt den Gebäudestromverbrauch sehr deutlich. Photovoltaikanlage 1 speist den Strom direkt in das Stromnetz ein und Anlage 2 direkt in das Gebäude. In Summe können die beiden Photovoltaikanlagen bis zu 50% des gesamten monatlichen Stromverbrauchs in den Sommermonaten decken. Es ist deutlich erkennbar, dass bei einem Gebäude mit sehr effizienter Gebäudetechnik der Anteil des Nutzungsstromverbrauchs eine viel größere Bedeutung bekommt.

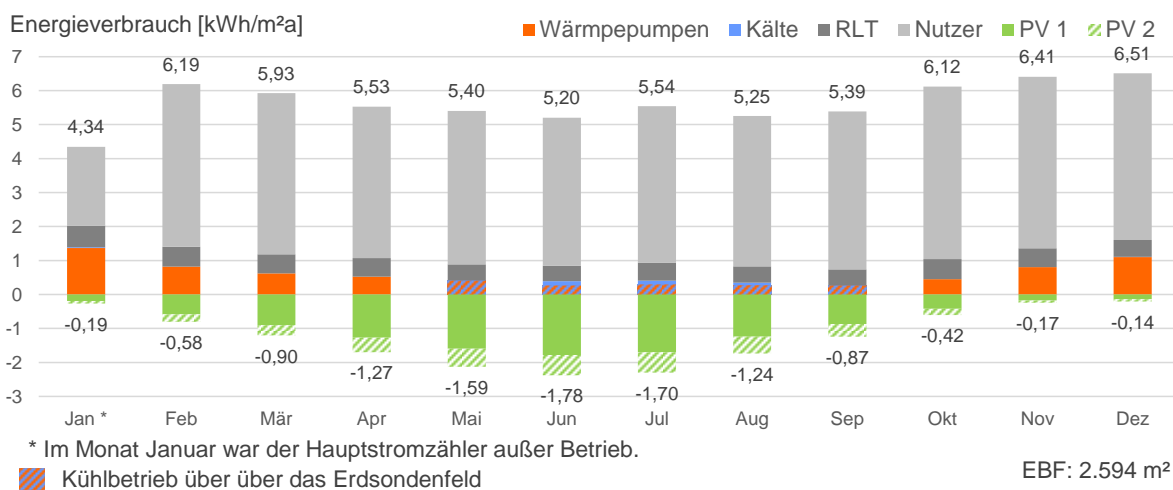


Abb. 65: Jahresbilanz des Gesamtenergieverbrauchs im Bürogebäude in Luxemburg auf Monatsebene. Der Verbrauch der Wärmepumpe inkludiert den Stromverbrauch der Umwälzpumpen.

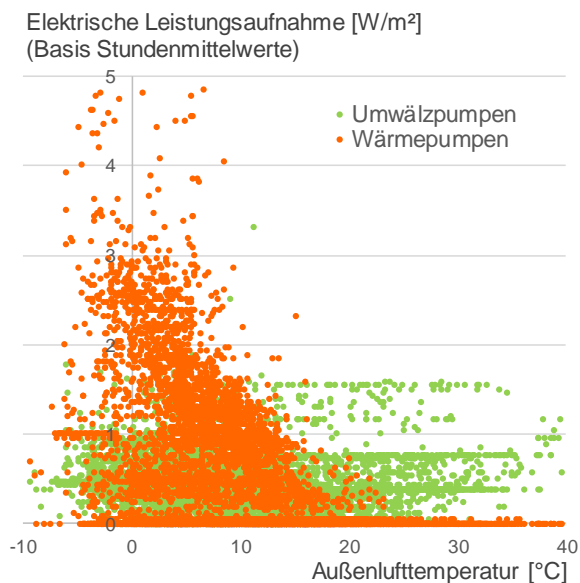


Abb. 66: Kennfeld der spezifischen elektrischen Leistungsaufnahme zwischen Wärmepumpe und den Umwälzpumpen

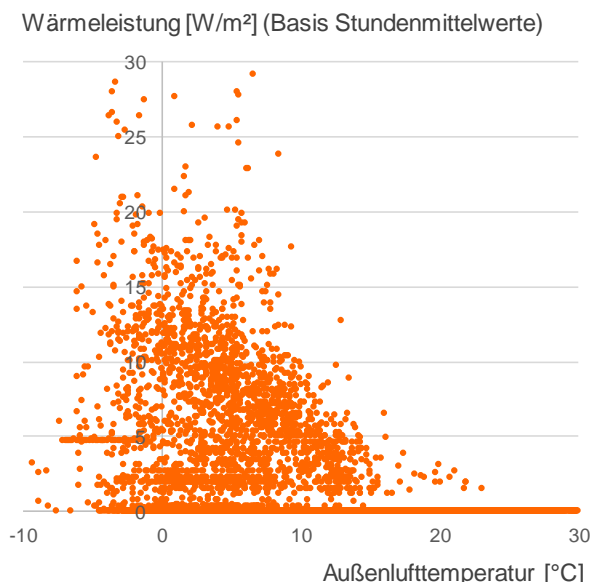


Abb. 67: Kennfeld der spezifischen mittleren stündlichen Wärmeleistung im Bürogebäude in Luxemburg

Abb. 66 zeigt das Kennfeld der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe sowie der Umwälzpumpen. Es ist erkennbar, dass die Umwälzpumpen konzeptbedingt nahezu unabhängig von der Außentemperatur konstant laufen. Bei Außentemperaturen unter 20°C erfolgt der Heizbetrieb in Verbindung mit der Wärmepumpe, bei Temperaturen über 20°C erfolgt die Kühlung im Direktbetrieb via Erdsonden. Der Kälteleistungsbedarf ist niedrig genug, um in Verbindung mit der großen Systemträgheit via Erdsondenfeld gedeckt zu werden.

Betrachtet man das Kennfeld der Wärmeleistung (Abb. 67) ist erkennbar, dass die Heizgrenze bei etwa 15°C Außentemperatur liegt. Der Unterschied zwischen elektrischer Leistungsaufnahme der Wärmepumpe (Endenergie) und Wärmeleistung (Nutzenergie) des Heizsystems verweist auf die Leistungszahl des Gesamtsystems. Die Zahlen sind allerdings mit Vorsicht zu betrachten, da die Messung der Wärmeleistung bei den systembedingt sehr niedrigen Differenzen zwischen Vor- und Rücklauftemperatur einen hohen Fehler aufweisen kann.

Die elektrische Grundlast des Gebäudes (nachts und Wochenende) liegt bei etwa 5 W/m². Während der Woche steigt die Lastaufnahme zu Arbeitsbeginn stark und besitzt kaum Lastspitzen über den Tag. Am Nachmittag sinkt sie wieder konstant schnell ab. Dies liegt am großen Anteil des Nutzerstroms gegenüber dem TGA Strom. Grundsätzlich passt die Solarstromerzeugungskurve zur mittleren Lastkurve des Gebäudes. Die solare Eigenverbrauchsdeckung liegt auf Basis der Stundenmittel bei 31%. In der Jahresbilanz werden 21% des Gesamtstromverbrauchs mit den Solarstromanlagen ausgeglichen.

Der Vergleich zwischen berechnetem Endenergiebedarf und -verbrauch zeigt, dass der Gesamtverbrauch noch leicht unter den berechneten Werten liegt (

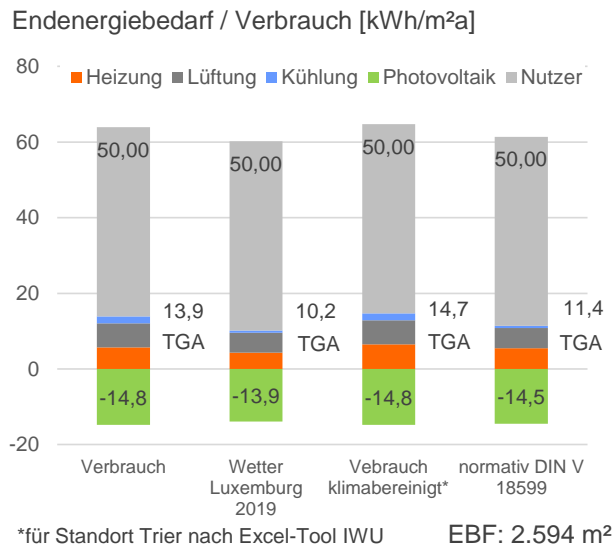


Abb. 69). Der Endenergiebedarf für

Beleuchtung ist ähnlich hoch wie der Energiebedarf für die Lüftungsanlage kann jedoch auf Verbrauchsseite nicht ausgewiesen werden (Anteil des Nutzungsstroms). Dies ist der Regelfall in der Realität von Gebäuden. Die Solarstromanlage deckt in der Jahresbilanz über 80% des jährlichen TGA-Strombezugs.

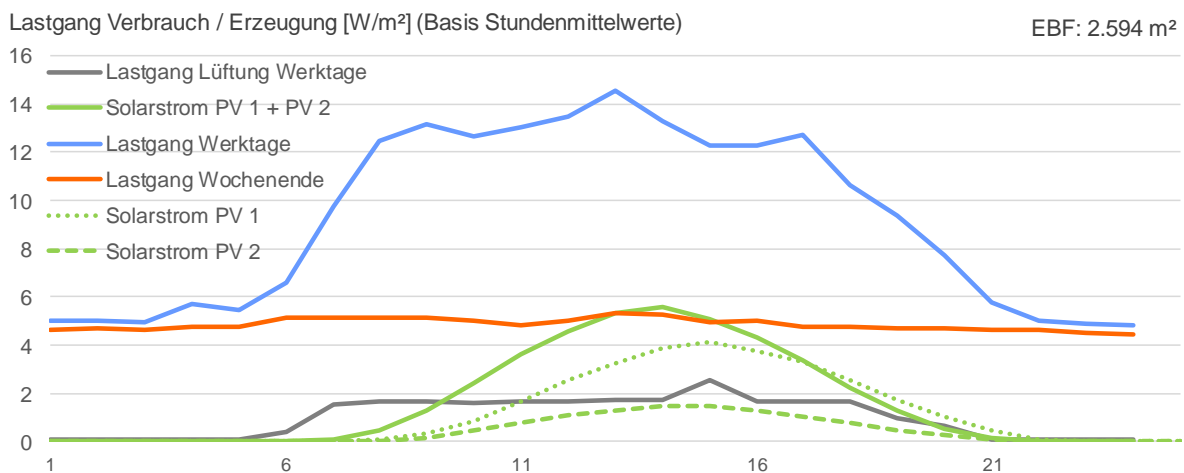


Abb. 68: Mittlerer täglicher Lastgang für Strom im Bürogebäude in Luxemburg

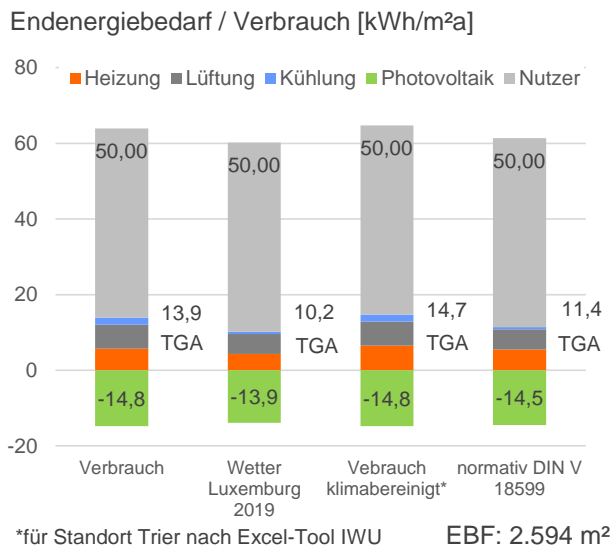


Abb. 69: Energieperformance des Bürogebäudes in Luxemburg. Die normativen Bedarfswerte (rechter Balken) wurden mit dem Bilanzierungstool EnerCalC ermittelt. Der Nutzerstrom entspricht in allen Fällen dem gemessenen Verbrauch.

3.4.4.3 Erkenntnisse

Der Energieverbrauch im TGA Bereich liegt sehr niedrig und im Zielbereich der Sollwerte. Hieran zeigt sich die Qualität von Planung, Ausführung und Betriebsführung.

Ein hohes Gebäude mit seiner kompakten Bauweise hat relativ zur Grundfläche für eine Photovoltaikanlage nur eine kleine Dachfläche zur Verfügung. So kann bei einem Nur-Strom-Haus trotz einer sehr hohen Effizienz kaum der Jahresstromverbrauch durch die Solarstromanlage bilanziell ausgeglichen werden. Dies ist im vorliegenden Fall nur auf der TGA-Stromseite möglich, da der Nutzerstrom hoch ist und anteilig überwiegt.

Im Bereich der Anlagentechnik spart die Intervallregelung für die Betonkerntemperierung Pumpenstrom, regelungstechnisch wäre zusätzlich ein Totband zwischen Heiz- und Kühlbetrieb als Neutralbetrieb günstig, ist aber laut Betreiber schwierig umzusetzen. Auf Grund der geringen Praxiserfahrung im Bereich Wärmepumpen für Gebäude mit sehr niedrigem Wärme-/Kältebedarf sind die Aggregate tendenziell zu groß dimensioniert. Sie waren insbesondere für den Betrieb für die Kühlung bei nachlassender Ergiebigkeit des Erdsondenfelds dimensioniert, was in der Praxis bisher nicht vorkommt. Im Nachgang wurden dieser Nachteil durch eine Kaskadierung abgefangen, was ohne die Performancekontrolle nicht aufgefallen wäre. So konnte die Effizienz des Gebäudes weiter gesteigert werden.

Das sommerliche Raumklima kann durch die BKT in Kombination mit dem Erdsondenbetrieb überzeugend eingehalten werden. Die winterlichen Temperaturen sind, verglichen mit den anderen Gebäuden, in der Tendenz etwas zu hoch. Hier könnte eine weiter verbesserte Regelung Abhilfe schaffen.

In Bezug auf die CO₂-Konzentrationen in den Büroräumen, scheint der CO₂-Sensor im Abluftstrang dazu geeignet zu sein, die Luftmengen zu regeln und in Kombination mit der individuellen Fensterlüftung für ein gutes Raumklima zu sorgen. Einen großen Einfluss werden auch hier die Türöffnungen haben, da es bei diesem kombinierten System aus RLT und Fensterlüftung zu einer gesteigerten Überströmung kommt

3.4.5 Hauptverwaltung WSW Wuppertal



Abb. 70: Rendering der geplanten WSW Hauptverwaltung in Wuppertal (Quelle: WSW Wuppertal)

Die Wuppertaler Stadtwerke (WSW) planen bereits in 2017 am bestehenden technischen Betriebsstandort ein neues Büro- und Verwaltungsgebäude für rund 450 Mitarbeiter*innen als Ersatz für die beiden Verwaltungshäuser aus den 1970er Jahren. Die geplante Bruttogeschoßfläche lag bei rund 12.000 m². Neben einem Erdgeschoß mit Allgemeinflächen waren darin Büroetagen mit einem hohen Anteil von Großraumstrukturen vorgesehen.

Das Verfahren wurde im Sommer 2019 unterbrochen und Alternativen durch Anmietung von Flächen untersucht. Vor diesem Hintergrund wurden keine weiteren Arbeiten an diesem Pilotprojekt seitens der Universität weitergeführt²³.

Bis zu diesem Zeitpunkt gab es im Rahmen des Projektes zahlreiche Kontakte zwischen unserer Projektgruppe und der Bauherrenvertretung. Gegenstand waren der Einsatz von BIM basierter Planung und insbesondere die Definition von überprüfbareren Leistungsmerkmalen für das geplante Gebäude. Dies betraf die Bereiche Energiebedarf, sommerliches Raumklima, Tageslicht, Luftqualität und Raumakustik. Den aufgenommenen Planungen des Generalplaners ist zu entnehmen, dass Hinweise auf Anweisungen des Bauherrn aufgenommen wurden.

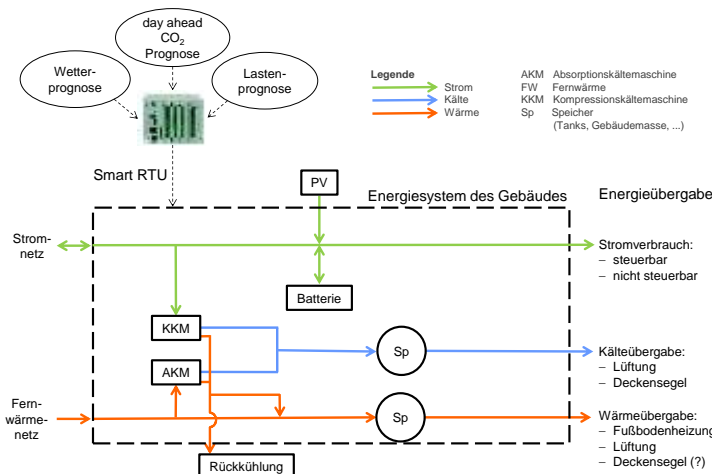


Abb. 71 Prinzipielle Darstellung der projektierten Energieversorgung in Verbindung mit einem möglichst netzdienlichen Betriebskonzept. Quelle: Universität Wuppertal

Aufgrund der Umstellung von den bisher kleinen Bürostrukturen auf Großraumstrukturen kommt der Individualisierbarkeit des Raumklimas und der Beleuchtung am Arbeitsplatz eine besondere Bedeutung mit Blick auf die Nutzer*innenzufriedenheit zu. Hierzu wurde ein Stufenkonzept ausgearbeitet und dem Bauherrn vorgestellt. Unterschiedliche Konzepte für die Beheizung, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung wurden mit einer

²³ Gemäß aktueller Information des Bauherrn wurden die Planungsarbeiten mit dem Ziel wiederaufgenommen, den Neubau am geplanten Standort bis 2023 zu erstellen.

Skala von 1 bis 4 bewertet. Aufgrund des Stufenmodells konnten Lösungen favorisiert oder ausgeschlossen werden.

In Abstimmung mit dem Bauherrn wurde in 2018 ein erstes Monitoringkonzept für die Bereiche Wärme, Kälte und Strom erstellt und Fragen eines möglichst netzdienlichen Betriebskonzepts diskutiert.

3.4.6 Ausblick

Das Thema des Energiemonitoring, auch im Gebäudebestand, gewinnt mit der Konsequenz der Verfolgung der Klimaschutzziele an Bedeutung. Firmen haben das Potential erkannt und machen diesbezüglich professionelle Dienstleistungsangebote. Auch die Nutzung von erneuerbarer Energie an Gebäuden wird mehr und mehr eingefordert. Erste Bundesländer führen eine Monitoringpflicht für Nichtwohngebäude ein und verweisen auf eine Solarpflicht für Neubauten²⁴.

Auf Seiten der Betreiber ist die Bedeutung des Energiemanagements angekommen, wird aber oft durch fehlende Personalkapazitäten noch nicht umgesetzt. Es hat sich im Projekt gezeigt, dass falsch eingestellte Anlagentechnik, aber auch Ausführungsmängel zu signifikanten Mehrverbräuchen führen. Eine jährliche Berichtspflicht in Verbindung mit einer systematisierten Gegenüberstellung mit Sollwerten der Planung könnte ein wirksamer Hebel sein, um Mängel abzustellen. Hier könnte die öffentliche Hand mit ihrem umfangreichen Gebäudebestand ebenso vorgehen wie die Besitzer großer Liegenschaften.

Ein jährlich erstellter Nachhaltigkeitsbericht auf kommunaler Ebene ebenso wie auf Landesebene dokumentiert die Entwicklungen, trägt das Thema in die Öffentlichkeit und verweist auf mögliche Defizite verglichen mit einem Klimaschutzplan. Auf Landesebene sind mit dem Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW große Teile der öffentlichen Gebäude in eigener Verwaltung und Nutzung, aber auch anteilig vermietet. Auch die Verbrauchsdaten vermieteter Liegenschaften sollten jährlich zu einem Stichtag an den BLB weitergeleitet werden, um einen vollständigen Datensatz zu erstellen und darauf basierend Ziele auf dem Weg zu einem konsequenten Klimaschutz zu definieren bzw. fortzuschreiben und vor allen Dingen zu verfolgen.

Mit Ausnahme des gezielt als best-practice ausgewählten Projektes in Luxembourg hat sich der Aufwand zur Erhebung von Energiedaten und Vergleich mit den Zielwerten als groß und deutlich zu hoch im Verhältnis zum Nutzen herausgestellt. Einerseits gilt es, den Aufwand durch verbesserte Informationshaltung (siehe Kapitel 2), standardisierte Datenpunkte, Schnittstellen und Exportformate bei Gebäudeautomationssystemen zu verringern. Andererseits gilt es, den Nutzen zu erhöhen. Beispiele dafür sind die vereinfachte Fehlererkennung bei Messdaten mit hoher Zeitauflösung oder die Entwicklung von Strategien zur Energieverbrauchsminderung auf Basis von Teilenergiekennwerten und –analysen.

²⁴ https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/8000/16_8993_D.pdf

Die eingesetzte Sensorik zur Raumklimaanalyse hat sich bewährt und ermöglicht bei vergleichsweise geringen Kosten aussagekräftige Analysen. Für die Bewertung der Verhältnisse in einem gesamten Gebäude ist aber eine hohe Anzahl von Messstellen erforderlich, da die Ergebnisse deutlich streuen. Ursächlich dafür sind die Belegungsdichten und Präsenzzeiten, sowie das Nutzerverhalten im Umgang für Sonnenschutzsystemen, Fensterlüftung und Zimmertüren.

Das Thema Raumluftqualität ist im Zuge der Corona Pandemie verstärkt in den Fokus gerückt. Daran zeigt sich, wie entscheidend eine gute Lüftung der genutzten Räume ist. In fenstergelüfteten Räumen sollten CO₂-Sensoren in Kombination mit einem Informationssystem fester Bestandteil werden, um eine durchgehend gute Raumluftqualität zu erzielen. Die Kosten dafür erscheinen vertretbar. Bei mechanisch gelüfteten Räumen liefert eine CO₂-basierte Luftmengenreglung in zentralen Kanälen eine gute Grundlage zur Ermittlung geeigneter Luftmengen.

Sommerliche Raumtemperaturen in Bestandsgebäuden bilden unter Berücksichtigung gestiegener und weiter steigender Belastungen durch den Klimawandel ein Schwerpunktthema. Richtig gewählte Einstellungen bei der Automatisierung von Sonnenschutzsystemen und ggf. Verbesserungen der Systeme selbst zeigen ein erstes Potential auf. Angepasstes Nutzerverhalten kann weitere Potenziale erschließen. Dazu liefern Information und Aufklärung wichtige Beiträge.

4 Gebäude-Netz-Interaktion

Aufgrund des Transformationsprozesses im Rahmen der Energiewende steigt der Anteil an volatilen und dezentralen Erzeugungsanlagen. Durch die fluktuierende Einspeisung der erneuerbaren Energien und der steigenden Anzahl an leistungsintensiven Netzteilnehmern (E-Autos) steigt der Bedarf nach flexiblen und steuerbaren Lasten. Deshalb rückt die Gebäude-Netz-Interaktion weiter in den Focus, um Gebäude von bisher statischen zu dynamischen Netzteilnehmern zu transformieren.

4.1 Netzautomatisierungslabor

Um untersuchen zu können, wie ein Gebäude das Netz beeinflussen kann, wurde im Rahmen dieses Projektes ein Netzautomatisierungslabor aufgebaut. Neben diesem wurde ein reales Testnetz aufgebaut, welches von einem Netzautomatisierungssystem überwacht und geregelt werden kann. Dafür wurde das Testnetz mit Komponenten ausgestattet, die es ermöglichen dynamisch auf den Netzzustand einwirken zu können. Diese dynamischen Komponenten können auch das Verhalten eines steuerbaren Gebäudes im Netz darstellen. Mithilfe von Messtechnik kann der Netzzustand erfasst und der Einfluss des Gebäudes auf den Netzzustand analysiert werden.

4.1.1 Aufbau, Komponenten und Messtechnik

Der Aufbau des Testnetzes ist in Abb. 72 dargestellt. Es wird von einem Ortsnetztransformator mit einer Größe von 630 kVA versorgt. Mit diesem ist ein Spannungslängsregler verbunden, welcher die Spannung im Netz anpassen kann und somit einen regelbaren Ortsnetztransformator nachbildet. Der Spannungslängsregler speist die Sammelschiene des Topologie Schaltschranks in welchem verschiedene Netztopologien geschaltet werden können. Eine vereinfachte Darstellung dazu ist in Abb. 72 gegeben. Durch schalten der Lasttrennschalter können beliebige Netztopologien konfiguriert werden, um beliebige Niederspannungsnetze nachzubilden. Insgesamt sind 15 Knoten vorhanden zwischen denen jeweils 50 m Niederspannungskabel verlegt ist. Auf diese 15 Knoten können unterschiedliche Komponenten geschaltet werden, die es ermöglichen die unterschiedlichsten Herausforderungen an ein Niederspannungsnetz nachzubilden. So sind 10 mal 4-Quadranten AC/AC Steller (Umrichter) installiert, welche als Erzeuger aber auch als Verbraucher arbeiten können. So werden beispielsweise PV-Anlagen oder andere Erzeuger im Niederspannungsnetz nachgebildet. Zusätzlich sind 5 steuerbare Lastbänke mit jeweils 9 kVA vorhanden. Mit diesen können z.B. Haushalte nachgebildet werden. Des Weiteren sind acht elektrische Ladepunkte auf dem Campus Freudenberg vorhanden, welche über Schalter mit dem Testnetz verbunden werden können. Auch kann die 120 kVA PV-Anlage, welche bereits auf dem Campus Freudenberg installiert wurde, an das Testnetz gekoppelt werden. Die aufgeführten Komponenten können über Leistungsschütze mit dem Testnetz verbunden

werden. In Abb. 73 sind die unterschiedlichen Möglichkeiten dargestellt, welche Komponenten und welche Leistungen auf die jeweiligen Knoten geschaltet werden können.

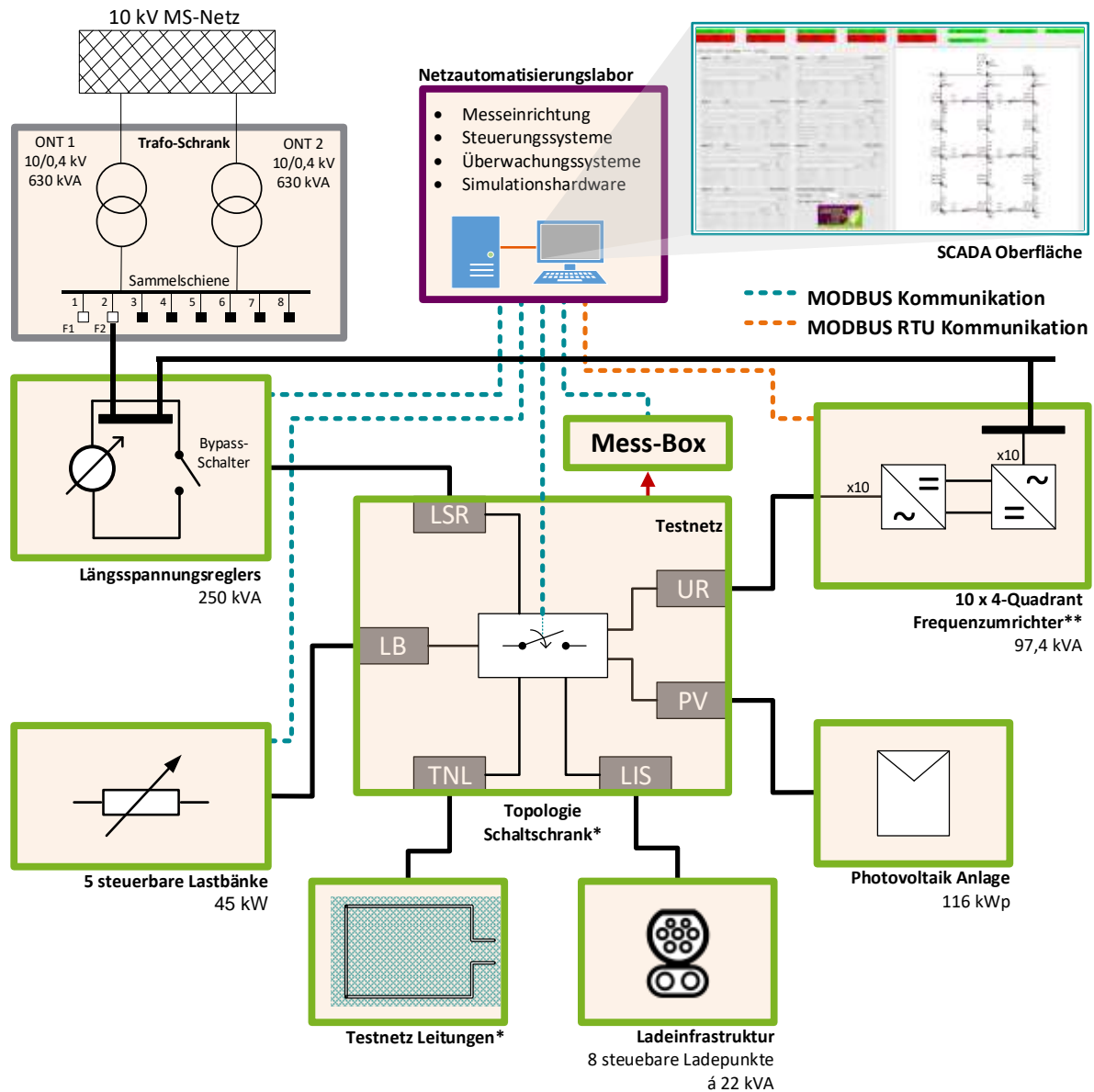


Abb. 72: Aufbau Netzautomatisierungslabor Campus Freudenberg (LSR: Längsspannungsregler; UR: Umrichter; PV: Photovoltaik Anlage; LIS: Ladeinfrastruktur; TNL: Testnetz Leitungen; LB: Lastbänke; *: teilweise durch dieses Forschungsprojekt finanziert; **: vollständig durch dieses Forschungsprojekt finanziert)

Um das Netz überwachen zu können, sind Messboxen im gesamten Netz installiert, welche Spannung, Strom, Phasenwinkel, Frequenz und die Leistung im Netz aufzeichnen. Diese sind in der Lage dreiphasig aber auch Einphasig zu messen. Die Spannungseingänge sind für Nennwerte von $230 V_{eff}$ und für einen Messbereich von $45-300 V_{eff}$ ausgelegt. Die Stromeingänge sind für Nennwert von $1 A_{eff}$ und einen Messbereich von $0,012-1,2 A_{eff}$ ausgelegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass vor den Messboxen Messwandler installiert sind,

welche den realen Strom mit einem Verhältnis von 400:1 oder 250:1 heruntertransformieren. Der Phasenwinkel kann zwischen $\pm 180^\circ$ gemessen werden. Die Frequenz wird zwischen 46-55 Hz gemessen. Der Nennwert der Leistungsmessung ist bei 230 VA und der Maximale Wert welcher gemessen werden kann ist bei 450 VA.

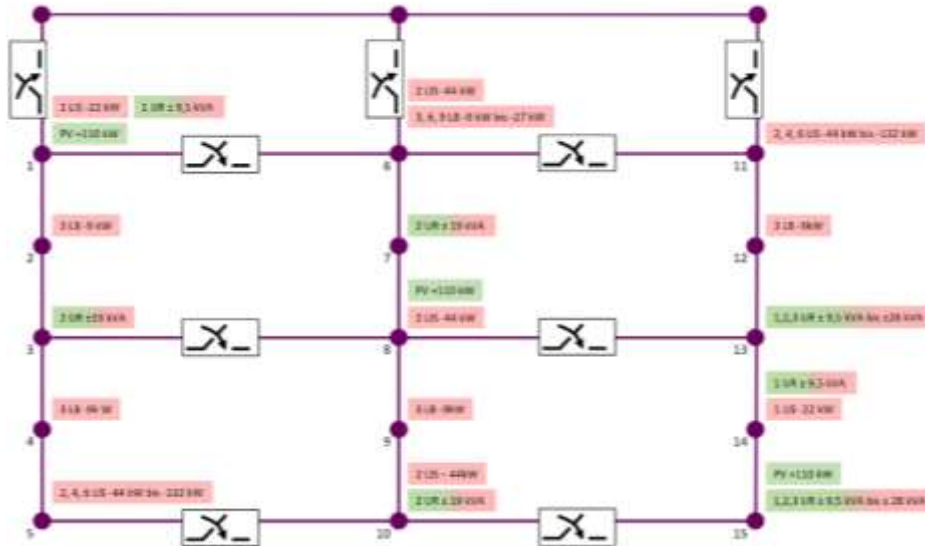


Abb. 73: Vereinfachter Aufbau der Topologie im Netzautomatisierungslabor (Grün = Einspeiser; Rot = Verbraucher)



a)



b)



c)



d)

Abb. 74 Netzautomatisierungslabor in Freudenberg Campus des Bergischen Universität Wuppertal

In Abb. 74 sind Bilder des Netzautomatisierungslabors dargestellt. Bild a) zeigt den Container, in dem das SCADA-System läuft. Die Bilder b) und c) zeigen die Schränke für den LSR, die UR, die LB. Das Bild d) zeigt im Hintergrund die Ladesäulen für die Elektroautos und dahinter den Container.

4.1.2 Kommunikation zwischen Labor und Komponenten

Alle oben genannten Aktoren, die im Testnetz berücksichtigt wurden, und alle Messgeräte können in dem innerhalb des Vorhabens entwickelten SCADA-System (*Supervisory Control and Data Acquisition*) gesteuert bzw. überwacht werden. Dieses SCADA-System wurde vollständig in Matlab entwickelt und kann auf dem Rechner des Netzautomatisierungslabors ausgeführt werden. Die Funktion des SCADA-Systems wird durch die Verwendung der richtigen Kommunikationsprotokolle der Geräte erreicht.

Ein kurzer Einblick in die Kommunikationsanforderungen ist Abb. 75 dargestellt. Grundsätzlich werden zwei Kommunikationsprotokolle verwendet: Modbus RTU und Modbus TCP/IP. Das erstgenannte Kommunikationsprotokoll wird nur von den Frequenzumrichtern verwendet. Damit die Frequenzumrichter mit dem Rechner kommunizieren können, wird ein zusätzlicher USB/Modbus-RTU-Konverter innerhalb des Netzautomatisierungslabors benutzt. Später erfolgt die entsprechende Geräteparametrierung mithilfe der Software jedes Gerätes.

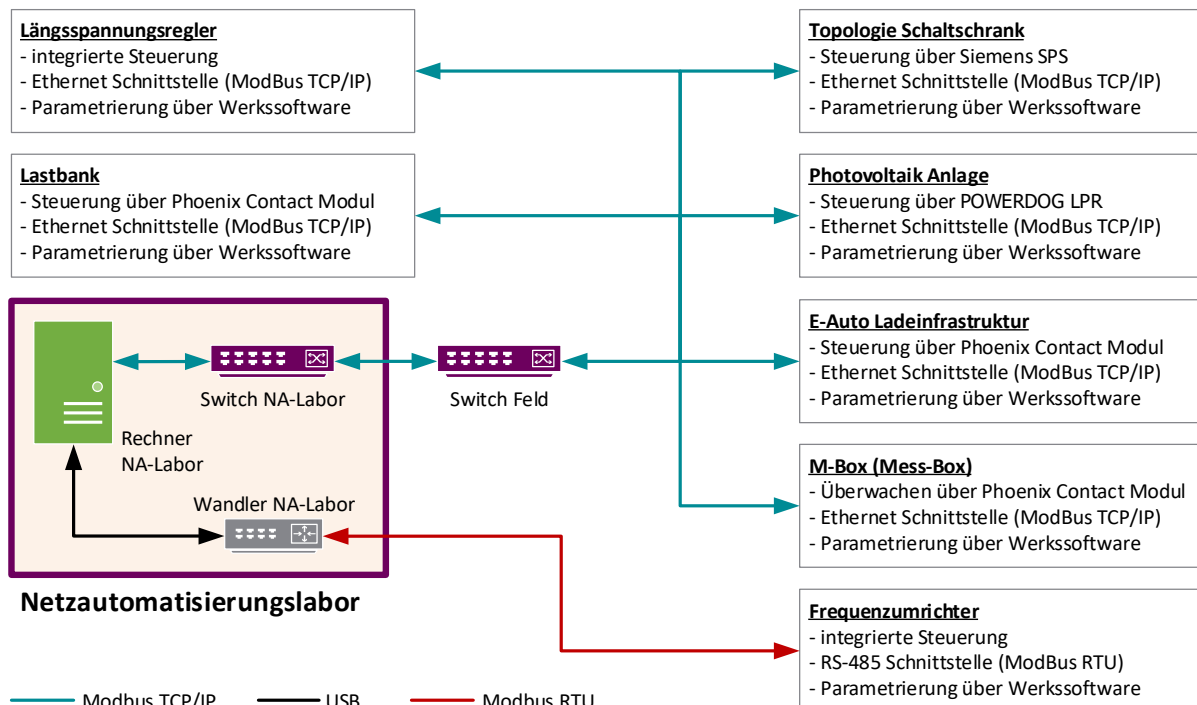


Abb. 75: Kommunikationsstruktur zwischen dem Labor und dessen Komponenten

Zur Steuerung bzw. Überwachung der folgenden Geräte ist das Modbus-TCP/IP-Protokoll erforderlich: Längsspannungsregler, Lastbänke, Topologie Schaltschrank, Photovoltaikanlage, Ladeinfrastruktur und Messboxen. Die Parametrierung dieser Aktoren

wurde mithilfe der Werkssoftware durchgeführt. Alle Komponenten des Testnetzes, die Modbus TCP/IP verwenden, sind mit einem Feld-Switch verbunden, der mit dem Container-Switch verbunden ist, welcher wiederum an dem Netzautomatisierungslabor Rechner angeschlossen ist, auf dem das SCADA-System läuft.

Der Längsspannungsregler verfügt über ein integriertes Steuersystem, wobei die Arbeitssollwerte auch über dessen Kommunikationsprotokoll ferngesteuert eingestellt werden können. Die Lastbänke werden über ein eigenes Modul gesteuert. Dasselbe gilt für die Steuerung der Photovoltaikanlage, die Steuerung der Ladeinfrastruktur und die Überwachung der M-Box-Messgrößen. Der Topologie Schrank wird über ein speicherprogrammierbares Steuerungsmodul (SPS) angesteuert.

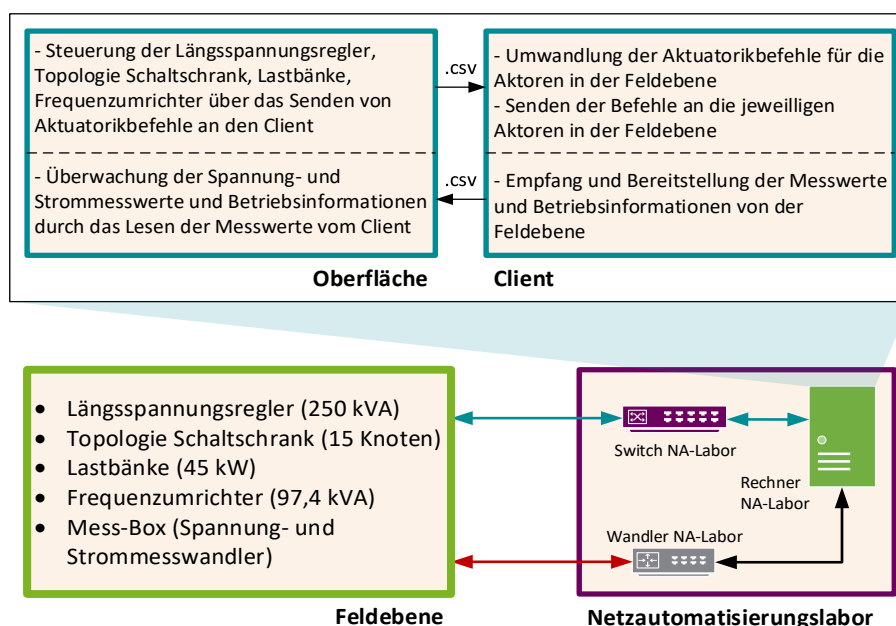


Abb. 76: Beschreibung des SCADA-Systems

Im Netzautomatisierungslabor ist das SCADA-System zuständig für: 1) das Senden der Steuerbefehle an die Geräte in der Feldebene und 2) das Lesen der Messgrößen auf der Feldebene mithilfe der verschiedenen Messgeräte. Die Funktionsweise des SCADA-Systems ist in Abb. 76 kurz beschrieben. Dieses System besteht aus zwei wichtigen Elementen: dem Client und der grafischen Benutzeroberfläche.

Der Client ist eine Schnittstelle zwischen den feldseitigen Elementen (Aktoren und Messgeräte) des Netzautomatisierungslabors und der grafischen Benutzeroberfläche des SCADA-Systems. Der Client ist in der Lage, den Kommunikationsstatus zwischen dem Rechner des Netzautomatisierungslabors und den Feldelementen zu überwachen. Der Client stellt die gemessenen Daten im richtigen Format der grafischen Benutzeroberfläche für deren Visualisierung zur Verfügung; andererseits sendet der Client die Betriebssollwerte, die in der grafischen Benutzeroberfläche eingestellt wurden, über das richtige Kommunikationsprotokoll an die feldseitigen Elemente.

4.1.3 Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche zur Steuerung des Testnetzes

Zur Ansteuerung der beschriebenen Komponenten, wurde eine Grafische Oberfläche entwickelt, welche einen vereinfachten und zentralisierten Zugriff auf das Testnetz bietet. In Abb. 77 ist die grafische Oberfläche dargestellt. In a) ein Abbild des Netzes dargestellt. Die Messwerte der Messboxen zu Spannung und Strom sind hier an den jeweiligen Knoten abgebildet. Dies ermöglicht einen einfachen Überblick über das aktuelle Geschehen im Netz und erlauben Rückschlüsse auf getätigte Schalt Handlungen. Weiterhin sind in Abb. 77a) alle Schalter des Netzes dargestellt. Diese können bei Bedarf geschlossen oder geöffnet werden, um die aktuell geschaltete Netztopologie nach zu führen. Die Netztopologie muss per Hand geschaltet werden, da hier Sicherungen verbaut worden sind, die eingesetzt oder gezogen werden müssen. Im obersten Bereich des Netzabbildes ist der LVR visualisiert. Dieser zeigt an, wie viel Leistung das Netz bezieht oder in das überlagerte Netz zurückgespeist wird. Auf der linken Seite von Abb. 77a) ist die aktuelle Konfiguration der Lasttrennschalter dargestellt. Diese müssen geschlossen werden, um Komponenten wie die Lastbänke, Umrichter, Ladeinfrastruktur oder die PV-Anlage auf das Netz schalten zu können. Dafür muss nur der Schalter des jeweiligen Lasttrennschalters gedrückt werden. Im Anschluss wird der Schalter seine Farbe auf Gelb wechseln und signalisieren das der Befehl an den Client weitergegeben wurde. Sobald die Bestätigung vom Client kommt das der Schalter geschlossen wurde wechselt die Farbe des Schalters in Rot. In gleicher Weise wechselt der Schalter seine Farbe von gelb nach grün wenn ein Schalter geöffnet wird.

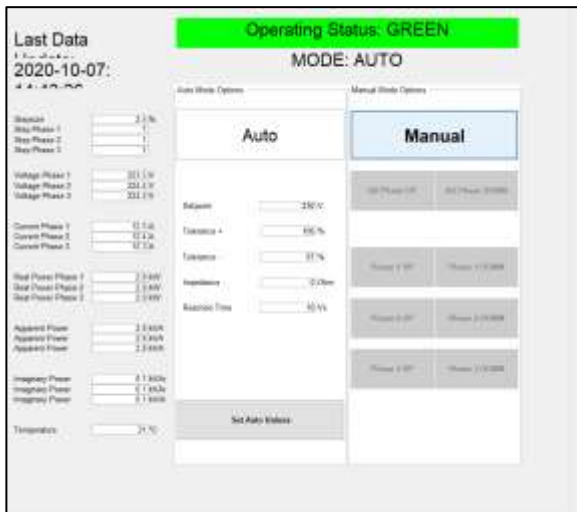
In Abb. 77b) ist der Reiter des Längsspannungsreglers dargestellt. Es kann zwischen zwei Betriebsweisen gewählt werden, einmal dem automatischen und dem manuellen Betrieb. Im automatischen Betrieb kann ein Setpoint für die Spannung vorgegeben werden und ein Toleranzband. Sollte die Spannung am Längsspannungsregler außerhalb dieses Toleranzbandes laufen stuft der Längsspannungsregler automatisch um die Spannung wieder in das gewünschte Toleranzband zu bringen. In diesem Beispiel liegt das obere Toleranzband bei 100 % und der Setpoint bei 230 V, sollte die Spannung also größer als 230 V werden würde der Längsspannungsregler die Spannung sofort herunterstufen. Für die Untere Grenze der Spannung wurde hier 97 % gewählt, sollte die Spannung also unter 223 V fallen würde der Längsspannungsregler sofort nach oben stufen. Weiterhin kann ein Parameter Impedanz eingestellt werden. Hier kann ein Parameter von 0 bis 0,5 Ω eingestellt werden. Dieser Wert würde der Impedanz des Kabels entsprechen welches vor dem Längsspannungsregler liegt. Mithilfe der Impedanz und dem Strom welcher über den Längsspannungsregler läuft, kann dieser berechnen welcher Spannungsabfall über die Leitung auftritt. In einem nächsten Schritt wird der Längsspannungsregler dann seine Spannung derart verändern, sodass am Ende der Leitung der Setpoint der Spannung anliegt. Als letzter Parameter ist die Reaction Time angegeben. Mit dieser kann angegeben werden, wie schnell der Längsspannungsregler stufen soll. In diesem Fall wären es 10 Volt pro Sekunde. Im Manuellen Modus kann die Transformatorstufe per Hand gestuft werden. So können Einspeisedominerte Netze mit hohen Spannungen aber auch Lastdominerte Netze mit niedrigen Spannungen nachgestellt werden. Weiterhin kann auch jede Phase einzeln gestuft werden um eine Asymmetrie im Netz nachzubilden.

In Abb. 77c) ist der Reiter der Lastbänke dargestellt. Hier kann die Konfiguration der Lastbänke eingestellt werden. Dafür wird zunächst im oberen Fenster gewählt, welche Lastbänke auf welche Knoten geschaltet werden. Pro Lastbank stehen Widerstände bereit, welche einen Lastbezug von 3 kW pro Phase ermöglichen. Die vorhandenen Widerstände haben dabei jeweils einen Leistungsbezug von 250 W. Es kann als nur in 250 W Stufen geschaltet werden. Nachdem eine passende Konfiguration gewählt wurde, werden die nötigen Lasttrennschalter in Abb. 77a) automatisch geschaltet sobald der Button „Set Config“ gedrückt wird. Sobald dieser gedrückt wurde wechselt er seine Farbe zu grün und die Beschriftung verändert sich zu „Clear“. Deshalb ist in Abb. 77a) der Button „Set Config“ nicht zu sehen. In einem nächsten Schritt wird ausgewählt, ob eine symmetrische oder unsymmetrische Belastung eingestellt werden soll. Wird wie in dem Beispiel hier eine symmetrische Belastung eingestellt, kann nur der Schieberegler zu Phase 1 verwendet werden. Der Wert der zwei anderen Phasen wird automatisch an den der ersten Phase angepasst. Wird eine unsymmetrische Belastung gewählt, können alle drei Regler bewegt werden. Ist die Konfiguration abgeschlossen und der gewünschte Leistungsbezug an den Knoten eingestellt, muss der Button „Send Load“ gedrückt werden. Nachdem er gedrückt wird, wechselt er für ein paar Sekunden seine Farbe zu grün und wechselt die Beschriftung zu „Send“. Dies kennzeichnet das die eingestellten Leistungsbezüge an den Client übermittelt werden. Anschließend wechselt zurück in den Zustand „Set Load“ und es können neue Leistungsbezüge an den Knoten eingestellt werden. Sollte eine neue Konfiguration gewünscht werden kann der Button Clear betätigt werden. Sobald dies geschieht, werden die Leistungsbezüge aller Lastbänke zu null gesetzt und alle Leistungstrennschalter welche für die vorherige Konfiguration geschlossen wurden wieder geöffnet. Anschließend wechselt der Button seine Farbe wieder zu Rot und die Beschriftung verändert sich zu „Set Config“. Es kann eine neue Konfiguration der Lastbänke für die Netzknoten ausgewählt werden.

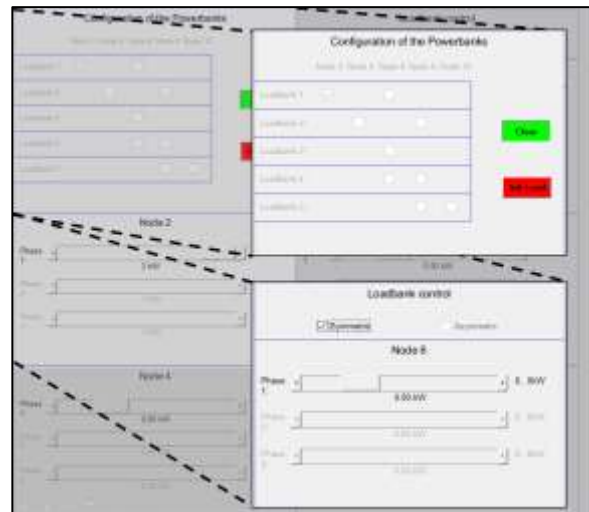
In Abb. 77d) ist der Reiter der Umrichter dargestellt. Hier kann zunächst ausgewählt werden welche Umrichter Pärchen an welchem Knoten aktiviert werden sollen. Sobald Sie aktiviert wurden, wird auch hier automatisch der Lasttrennschalter in Abb. 77a) geschaltete, welcher die Umrichter mit dem Testnetz verbindet. Der Betriebsmodus, in welchem die Frequenzumrichter laufen, bestimmt, ob sie sich im Testnetz wie Energieverbraucher oder -einspeiser verhalten. Wenn der Frequenzumrichter als Last arbeitet, kann es sich um eine ohmsche Last mit ($\cos \varphi \neq 1$) oder ohne ($\cos \varphi = 1$) kapazitive oder induktive Komponente handeln. Im Energieversorger Modus sind die Umrichter in der Lage, eine Blindleistungskompensation im Testnetz zu berücksichtigen. Über Schieberegler kann die Leistung eingestellt werden, die von den Frequenzumrichtern bezogen oder bereitgestellt wird. Der Leistungsfaktor kann auch über Schieberegler eingestellt werden, und kann über die Optionsfelder entweder zu Kapazitiv oder Induktiv gesetzt werden. Zusätzlich wird ständig die von jedem Frequenzumrichter abgegebene oder verbrauchte Wirk- und Blindleistung und seine Ausgangsspannung angezeigt.



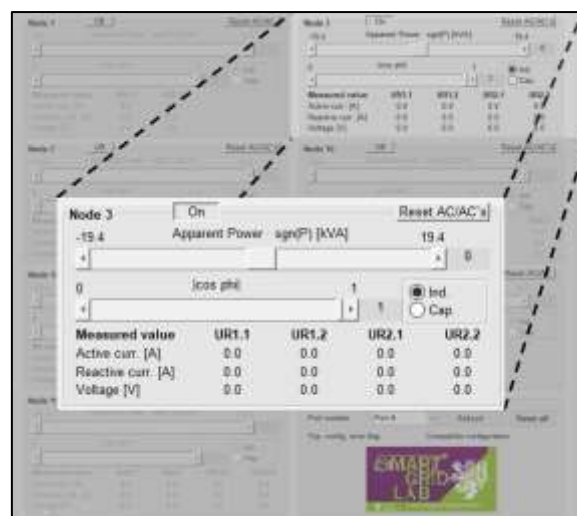
a) Reiter für die Topologie Schalter und Topologie Schema mit echtzeitige Messwerte auf den Knoten



b) Reiter zu dem Längsspannungsregler



c) Reiter Lastbänke



d) Reiter Frequenzumrichter

Abb. 77: Elemente der graphischen Oberfläche

4.1.4 Anwendungsfälle

Der wachsende Einfluss der erneuerbaren Energiequellen führt zu neuen Herausforderungen im Verteilungsnetz. Die Volatilität der erneuerbaren Energiequellen steigert die Forderung nach Flexibilität in elektrischen Verteilnetzen. Diese Nachfrage könnte durch flexible Komponenten im Netz wie Photovoltaikanlagen, Ladestationen für Elektrofahrzeuge und elektrische Energiespeicher bedient werden. Insbesondere Nichtwohngebäude rücken aufgrund ihres hohen Potentials eines flexiblen Energieverbrauchs oder der möglichen Energieerzeugung in den Fokus des Interesses. Auch die Mischung flexibler Komponenten im Gebäude ist von großem Interesse. Darüber hinaus kann dies wirtschaftliche Vorteile bringen, von denen sowohl der Stromnetzbetreiber als auch der Gebäudeeigentümer profitieren können.

Die Einzelheiten einiger Anwendungsfälle, in denen das Gebäude das Verteilnetz unterstützen kann, sind in Abb. 78 dargestellt. In Abb. 78a) ist ein Stromnetz mit hohem elektrischem Energieverbrauch dargestellt. Der letzte Verbraucher des Knotens, der sich weit entfernt vom Transformator des lokalen Netzes befinden, wäre nicht im Spannungsband betreibbar. Dies ist ein nicht erwünschter Betriebszustand. Eine konventionelle Lösung ist z.B. die Vermaschung des, die für den Netzbetreiber hohe Kosten verursacht. Eine nicht konventionelle Lösung besteht jedoch darin, dass das Gebäude vor dem kritischen Benutzer seinen Verbrauch im kritischen Moment reduziert. Das Gebäude kann durch die Unterstützung des Netzes Anreize erhalten, und der Netzbetreiber kann Investitionskosten sparen.

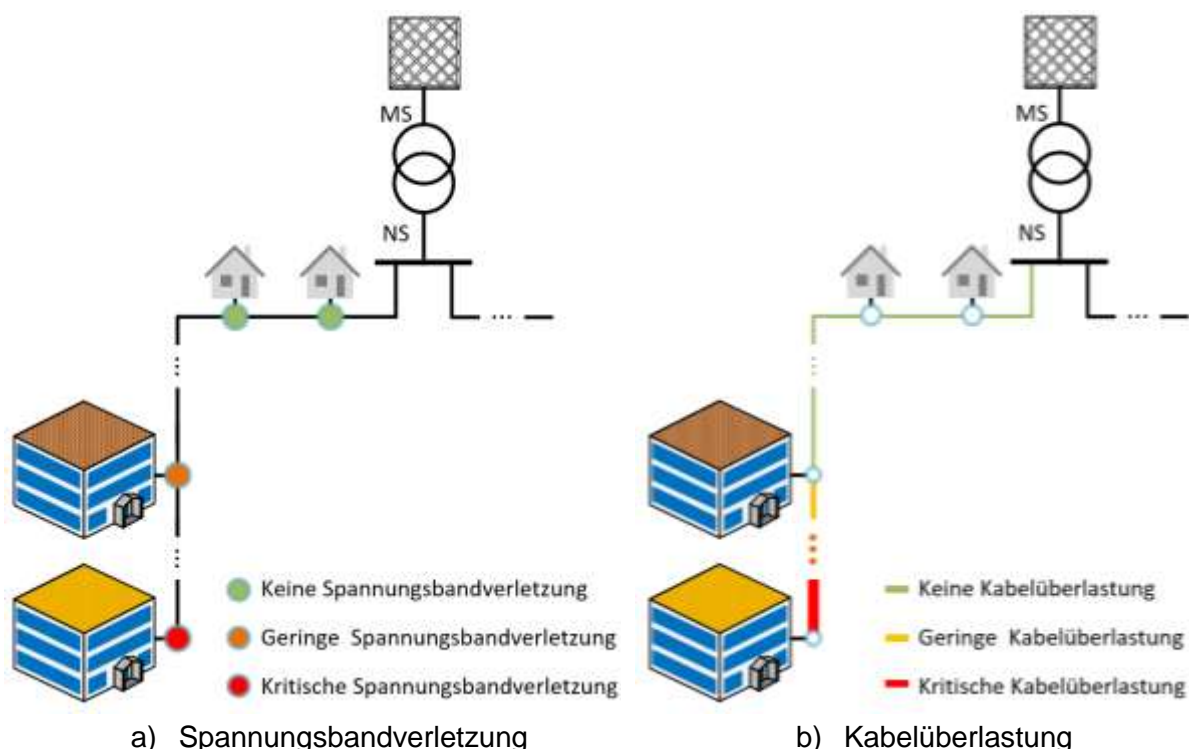


Abb. 78: Beispiele zur Spannungsbandverletzung und Kabelüberlastung in Niederspannungsnetzen

In Abb. 78b) ist noch einmal ein Stromnetz mit hohem Stromverbrauch dargestellt. Anstatt jedoch eine Spannungsbandverletzung tritt aufgrund der Strommenge, die aus dem Netz bezogen wird, eine Überlastung in einer Leitung auf. Anstatt den Leitungsabschnitt zu verstärken, was in der Regel geschieht, könnte das flexible Gebäude seinen Energieverbrauch in dem kritischen Moment senken und damit die fließende Strommenge reduzieren. Beide Parteien können von der unkonventionellen Lösung profitieren.

In der Regel werden sowohl die vorgestellten Szenarien als auch verschiedene Netzwerkkonstellationen simuliert und später analysiert. Diese Simulation basiert auf dem Simulationsmodell des Gebäudes, welches reale Gebäudemessdaten, relevante Eigenschaften und flexible Komponenten berücksichtigt. Zusätzlich ist eine Simulation des vorhandenen Verteilnetzes erforderlich, um den Einfluss des Gebäudes auf das Netz zu analysieren.

Ein weiterer Vorteil des Netzautomatisierungslabors besteht darin, dass es in der Lage ist, die Simulationsergebnisse an der Praxis zu validieren. Dadurch können auch im Gebäudebetrieb Diskrepanzen zwischen dem Erwarteten und dem Realen verringert werden (Performance Gap). Mehrere kritische Szenarien können berücksichtigt werden, um die Netzdienlichkeit des Gebäudes zu bewerten.

Die Modularität, in der das Netzautomatisierungslabor aufgebaut wurde, ermöglicht die Integration neuer Akteure und neuer Technologien, die eine Auswirkung auf die Netzdienlichkeit haben. Auf diese Weise bietet das Netzautomatisierungslabor eine Vielzahl von Möglichkeiten für neue Forschungsprojekte, bei denen mehr Gebäudearten in Betracht gezogen werden können. Zum Beispiel kann das Netzautomatisierungslabor als ein Testsystem dienen, um Smart Grid Systeme auf Funktionalität zu testen. Durch eine definierte Testumgebung ist es möglich kritische Szenarien im Netz zu erzeugen, welche das Smart Grid System beherrschen muss.

In dem ursprünglichen Anwendungsfall wurde vorgesehen, die Flexibilität des Gebäudes HC zu erhöhen bzw. zu erreichen. Es war geplant, kritische Szenarien im Gebäudebetrieb zu definieren, die durch Simulation des Gebäudes analysiert werden sollten. Basierend auf den repräsentativen Szenario Ergebnissen sollte die Gebäudebetriebsweisen in dem Netzautomatisierungslabor nachgebildet werden. Anschließend sollten praktische Arbeiten im Gebäude umgesetzt werden, um die Flexibilitäten des Gebäudes nutzen zu können. Dies konnte jedoch vor dem Hintergrund der sich zeigenden schwierigen bzw. nicht möglichen baulichen Umsetzbarkeit und der eingeschränkten Bereitschaft des Gebäudebetreibers an diesen praktischen Arbeiten nicht umgesetzt werden.

4.2 Netzdienliche Potenzialanalyse des Gebäudes HC

Zur ersten Einschätzung der Netzdienlichkeit eines Gebäudes ist es sinnvoll, eine Potentialanalyse der technischen Gebäudekomponenten vorzunehmen. Besondere Beachtung erhalten hier große elektrische Verbraucher der Versorgungstechnik und die dezentrale Energieerzeugung. Neben den reinen Anschlusswerten muss die Nutzungsart sowie deren flexibler Einsatz evaluiert werden. In dem hier betrachteten Universitätsgebäude HC genügen die Lüftungs-, die Kälte- sowie die Photovoltaikanlage diesen groben Anforderungen und machen eine detailliertere Untersuchung sinnvoll. Die Heizungsanlage

hingegen wurde nicht betrachtet, da ihr Verteilsystem mit hocheffizienten Umwälzpumpen ausgestattet ist, die eine sehr geringe elektrische Leistung darstellen.

In Abb. 79 ist die Dachfläche des Gebäudes dargestellt. Deutlich zu erkennen sind zwei große Lüftungsanlagen, eine mittig und die andere rechts. Diese versorgen im Wesentlichen den Hör- und Speisesaal, die Büro- sowie Seminarräume mit Zu-/Abluft und verfügen über eine elektrische Lüfterleistung von 13 kW und 7,7 kW. Da der Hörsaal sowie die Seminarräume über CO₂-Sensoren verfügen und die normativ geforderten Grenzen der Raumluftqualität weit gefasst sind, eignen sich diese Komponenten besonders für einen zeitlich verschiebbaren Einsatz. Die drei kleineren Anlagen wurden in den nachfolgenden Untersuchungen dagegen vernachlässigt, da diese einen konstanten Luftstrom aus den WC-Anlagen sowie der Essenszubereitung abführen und dessen Betrieb sich nicht verschieben lässt.

Links unten in der Abb. 79 ist ein Rückkühlwerk zu erkennen, welches der Kompressions-Kältemaschine im Keller des Gebäudes zugeordnet ist. Die elektrische Anschlussleistung dieser beiden Geräte beträgt 7,5 kW bzw. 22 kW. Durch den zusätzlich vorhandenen 1000 l Kältespeicher eignen sie sich hervorragend für eine zeitlich flexible Betriebsweise.

Am linken Bildrand der Abb. 79 ist eine PV-Anlage zu erkennen, die aus zwei Modul-Feldern besteht (Süd-Ost, Süd-West), wobei jedes Feld mit einem Strahlungssensor ausgestattet ist, der potentiell kurzfristige Erzeugungsprognosen ermöglicht. Die Anschlussleistung beträgt insgesamt ca. 24 kW.



Abb. 79: Technische Komponenten auf der Dachfläche des Gebäudes HC

4.2.1 Erzeugung charakteristischer Typtage auf Basis historischer Messdaten

Für die spätere Simulation der elektrischen Flexibilität und dessen Einflusses auf das Gebäude bedarf es Profile charakteristischer Typtage. Um diese zu erstellen, wurde eine relationale Datenbank implementiert, welche die täglich erfassten Messwerte speichert und einem Algorithmus für die Auswertung zur Verfügung stellt. Daneben ermöglicht die automatische Lastganganalyse es, den Einfluss von externen Randparametern, wie z.B. der Belegung, auf

die Betriebsweise der technischen Gebäudekomponenten zu ermitteln, zu visualisieren und zu exportieren.

Der Nutzer des Programms kann einen oder mehrere Datenpunkte der Gebäudeleittechnik auswählen, die analysiert werden sollen. In einer geführten Abfrage ist es möglich, den maximalen Analysezeitraum von einem Jahr einzuschränken und eine Auswahl für die Art des Tages zu treffen, für die ein typischer Tagesverlauf generiert werden soll. Eine Übersicht der möglichen Wahlkombinationen und ihrer zugehörigen Analyse Kürzel bietet Tabelle 7.

Tabelle 7: Analysetypen

Belegung: Mit, Ohne, Egal		Zeitraum		
		Jahr	Jahreszeit	Monat
Restriktion	Wochentag	j_wo_xb	jz_wo_xb	m_wo_xb
	Typtag	j_tt_xb	jz_tt_xb	m_tt_xb
	Alle Tage	j_at_xb	jz_at_xb	m_at_xb

Neben den kalendarischen Monaten und Wochentagen, ist es möglich die Analyse auf eine der nachstehend dargestellten Jahreszeiten oder auf einen Typtag zu beschränken. Es ist zu beachten, dass wenn ein Feiertag auf einen Werktag fällt, dieser dem Typtag Sonntag zugeordnet wird.

Nach Wahl von Restriktion und Zeitraum wird der Nutzer gefragt, ob in der Analyse der einzelnen Datenpunkte die Belegung berücksichtigt werden soll. Die Auswahlmöglichkeiten sind: Nur Tage ohne Belegung, nur Tage mit Belegung und alle Tage unabhängig von der Belegung. Wird mit oder ohne Belegung gewählt, wird die Datenbank für jeden Datenpunkt nach Tagen mit/ohne Belegung abgefragt, bei »egal« werden alle Tag innerhalb des zuvor bestimmten Zeitraums betrachtet. Dies ist möglich, da die Datenpunkte der Gebäudeleittechnik in der Datenbank mit einem, keinem oder mehreren Räumen verknüpft sind.

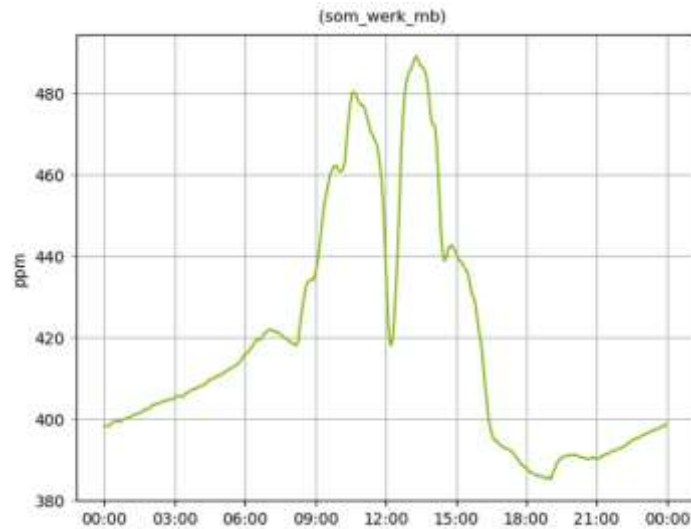


Abb. 80: Beispielhafte Ausgabe des Programms

In Abb. 80 ist beispielhaft die Ausgabe des Programms dargestellt, der Titel beschreibt den angefragten Datenpunkt, hier der CO₂-Konzentration im Hörsaal, gefolgt vom gewählten Analyse Kürzel »som_werk_mb«. Diesem ist zu entnehmen, dass in die Berechnung des typischen Verlaufes nur Werktage im Sommer eingeflossen sind, an denen der Hörsaal belegt war. Das generierte Profil wird zusätzlich in einer csv-Datei ausgegeben, dieses universelle Datenformat und erlaubt eine spätere Nutzung durch andere Programme.

4.2.2 Modellierung des Gebäudes und dessen relev. techn. Komponenten

Um gewährleisten zu können, dass sich ein Gebäude für einen flexiblen Betrieb eignet, müssen die Komfortbedingungen in diesem eingehalten werden. Diese beinhalten unter anderem die Temperatur und CO₂ Konzentration in der Luft. Deshalb wurde eine vereinfachte Simulation geschaffen, um zu überprüfen ob die Komfortbedingungen bei einem flexibilisierten Betrieb des Gebäudes eingehalten werden können. Dafür wurde das Gebäude als Last zunächst mathematisch in Analogie zu einem Widerstand-Kapazitäten-Netzwerk moduliert. Mithilfe dieser Analogien kann ein Beispielgebäude wie in Abb. 81 dargestellt in ein elektrisches Ersatzschaltbild umgewandelt werden. Dieses Ersatzschaltbild kann dann mit Formel (4-1) beschrieben werden. Für eine bessere Genauigkeit wurden später die Wände zwischen den Knoten mit drei seriellen Widerständen und zwei parallelen Kapazitäten beschrieben. Zusätzlich wurde in dieser Formel auch der Einfluss von externen Wärme- oder Kältequellen, wie z.B. einer Heizung oder einer Klimaanlage, betrachtet und mit \dot{Q}_i berücksichtigt. Auch der Einfluss von Wärmequellen wie Personen ($\dot{Q}_{P,i}$) und der solaren Einträge ($\dot{Q}_{S,i}$) wurden berücksichtigt. Wichtig ist außerdem der Einfluss welcher eine möglicherweise vorhandene Lüftung auf die Temperatur des Gebäudes hat, weshalb in der Gleichung die Enthalpie der Zuführten und abgeführten Luft (ΔH_i) berücksichtigt wurde.

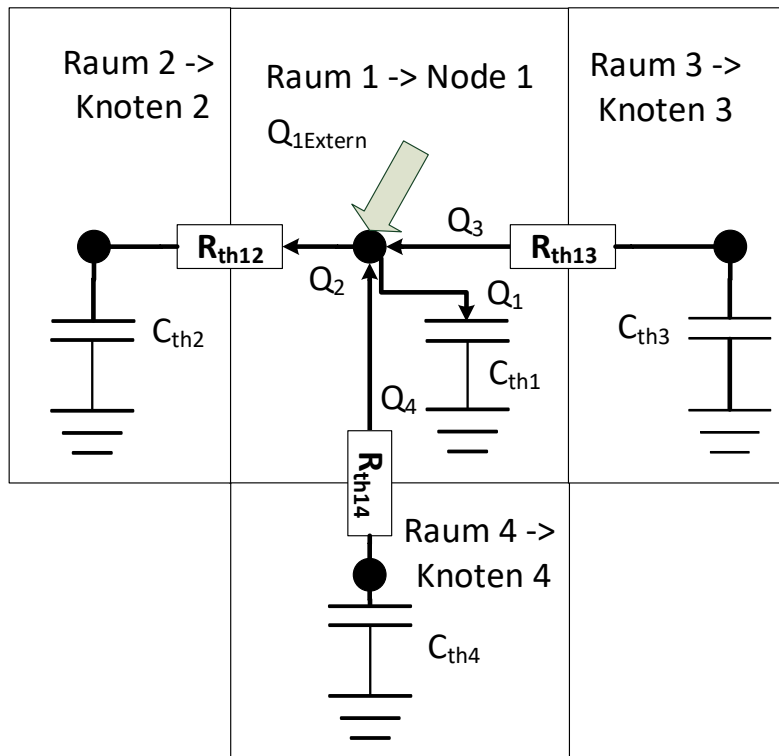


Abb. 81: Beispielgebäude als Thermisches Ersatzschaltbild

Um den Einfluss von Heiz-, Kühl- und Lüftungssystem ($\dot{Q}_i, \Delta H_i$) auf die Temperatur im Raum bestimmen zu können müssen diese Komponenten zunächst modelliert werden. Da es sich bei diesen um Komponenten handelt welche dynamisch auf eine Sollwertabweichung reagieren, wurden diese mit Reglern modelliert. Der Regelkreis dazu ist in Abb. 82 beschrieben. Mithilfe dieses Regelkreises können die dynamischen Komponenten auf eine Regelungsabweichung mit einer angepassten Regelungsgröße antworten. Ein Beispiel wäre z.B. das ein nach einem Flexibilitätsabruf des Gebäudes die Innentemperatur um 2 °C gesunken ist. Das Heizsystem würde auf diese Abweichung mit einer Erhöhung der Heizleistung antworten um wieder den Sollwert der Innentemperatur zu erreichen. Heiz- und Kühlsystemregler wurden in diesem Fall mit einem PI-Regler modelliert um den Temperatur Sollwert genau zu erreichen. Für das Lüftungssystem wurde ein P-Regler verwendet, da dieser die CO₂-Konzentration im Raum mit ausreichender Genauigkeit regelt. Um die Leistungsgrenzen der Systeme zu beachten, wurden Anti-Windup Funktionen ergänzt. Weiterhin wurden die Regelungsstrecke mit einer Verzögerungsfunktion ausgestattet um das langsame erwärmen und abkühlen des Heiz- und Kühlsystems nachzubilden.

$$\begin{bmatrix} C_1 \dot{T}_1 \\ C_2 \dot{T}_2 \\ C_3 \dot{T}_3 \\ C_4 \dot{T}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{14}}\right] & \frac{1}{R_{12}} & \frac{1}{R_{13}} & \frac{1}{R_{14}} \\ \frac{1}{R_{12}} & -\left[\frac{1}{R_{12}}\right] & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_{13}} & 0 & -\left[\frac{1}{R_{13}}\right] & 0 \\ \frac{1}{R_{14}} & 0 & 0 & -\left[\frac{1}{R_{14}}\right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Q}_1 \\ \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_3 \\ \dot{Q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Q}_{P,1} \\ \dot{Q}_{P,2} \\ \dot{Q}_{P,3} \\ \dot{Q}_{P,4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Q}_{S,1} \\ \dot{Q}_{S,2} \\ \dot{Q}_{S,3} \\ \dot{Q}_{S,4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \Delta H_3 \\ \Delta H_4 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

Neben den dynamischen Komponenten, welche sich bei verschiedenen Gebäudezuständen anders verhalten, sollen auch andere statische Komponenten von Gebäuden betrachtet werden welche ein großes Flexibilitätspotential haben. Dazu gehören Photovoltaik Anlagen, Elektrische Energiespeicher und Ladesäulen für Elektroautos. Diese haben keinen direkten Einfluss auf den Gebäudebetrieb, weshalb sie als statische Komponenten bezeichnet werden. Modelle zu diesen Komponenten sind bereits am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik vorhanden und wurden in das Gebäudemodell integriert.

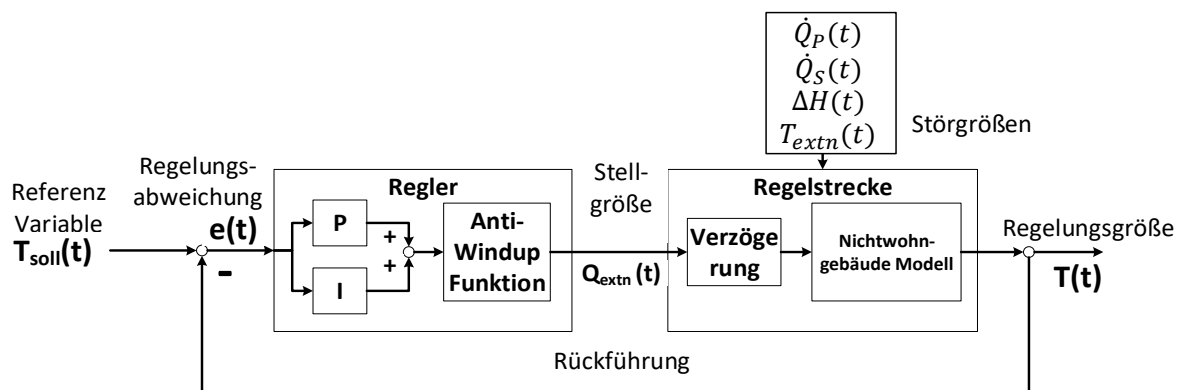


Abb. 82: Regelungskreis der dynamischen Aktoren

Zur Validierung des erstellten Modells, wurde der Hörsaal des Gebäudes HC modelliert. Die Ergebnisse der Simulation wurden dann mit den realen Temperaturen und CO_2 -Konzentrationen des Hörsaals verglichen, sowie ein Abgleich mit dem detaillierteren Simulationsmodell in IDA ICE in Abb. 35 durchgeführt. Außerdem wurden die realen Leistungsbezüge des Kühl- und Lüftungssystem mit denen der simulierten Leistungsbezüge verglichen. Dafür wurden mithilfe der entwickelten Datenbank Typ Tage für einen Werktag im Winter, Sommer und Übergang erstellt und mit simulierten Daten für diese Tage verglichen. Die Ergebnisse für einen Übergang Werktag sind in Abb. 83 dargestellt. Die simulierte Temperatur hat maximal eine Abweichung von 5 % von der realen Temperatur im Hörsaal. Die Simulation ist hier also sehr genau. Ähnliches gilt für die simulierte CO_2 -Konzentration im Hörsaal (maximale Abweichung von 15 %). Dies ist auch noch im Rahmen, wenn man gemachte Modelvereinfachungen berücksichtigt. Für die Leistung der Kühlung und der Lüftung ergeben sich deutlich größere Abweichung. Der Grund dafür ist, dass nur zu wenigen Räumen der Verlauf der CO_2 -Konzentration gemessen wurde und somit nicht auf die Anzahl an Personen in den Räumen geschlossen werden konnte. Somit konnte nur geschätzt werden wie viele Personen sich in den Räumen aufhalten und wie dementsprechend stark die Kühlung oder Lüftung arbeiten musste. Es wird trotzdem deutlich, dass die Simulation die Realität hinreichend genau nachbildet, um den Einfluss eines flexiblen Betriebs auf das Gebäude deutlich machen zu können.

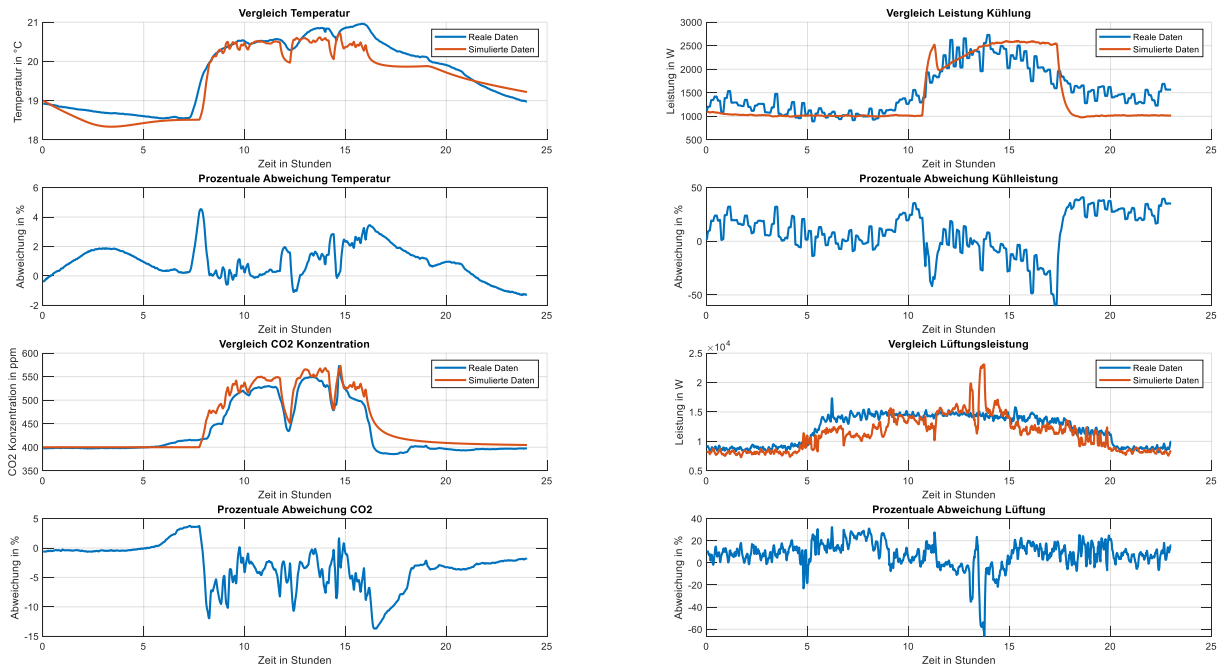


Abb. 83: Vergleich der realen und simulierten Daten am Beispiel eines Hörsaals

Mithilfe der Simulationsumgebung wird nun der Flexible Gebäudebetrieb untersucht. Dafür wurde ein einfacher Regler entwickelt, welcher die verfügbaren Flexibilitäten nutzen kann, um den Leistungsbezug des Gebäudes zu senken oder zu erhöhen. In Abb. 84 ist ein Flexibilitätsabruf dargestellt. Hier wurde die bezogene Leistung des Gebäudes für fünf Minuten um mehr als die Hälfte reduziert. Als Konsequenz ergibt sich ein Effekt, bei welchem sich die bezogene Leistung des Gebäudes auf kurzzeitig 42 kW erhöht. Dieser Effekt kann anhand Abb. 85 und Abb. 86 erläutert werden. Aufgrund des verringerten Leistungsbedarfs arbeiten die Lüftungs- und Kühlsysteme im Gebäude mit weniger bzw. keiner Leistung mehr. Als Konsequenz steigt die Temperatur und die CO₂ – Konzentration im gesamten Gebäude. Beispielhaft dafür ist in Abb. 85 und Abb. 86 die Temperatur und CO₂ – Konzentration im Hörsaal des Gebäudes dargestellt. Innerhalb von 5 Minuten steigt die Temperatur im Hörsaal um 0,7 °C und die CO₂ – Konzentration um 75,8 ppm. Nachdem die Flexibilität abgerufen wurde, können sich alle Komponenten wieder wie im Normalbetrieb verhalten. Da sich aber nun die Komfortbedingungen im Raum stark von den Sollbedingungen entfernt haben, reagiert das Gebäude mit einem typischen Regler Verhalten, um die Sollbedingungen schnellstmöglich wiederherzustellen. Dafür arbeiten alle Komponenten kurzzeitig mit einem erhöhten Leistungsbezug. Dieser Effekt wird auch Rebound Effekt genannt.

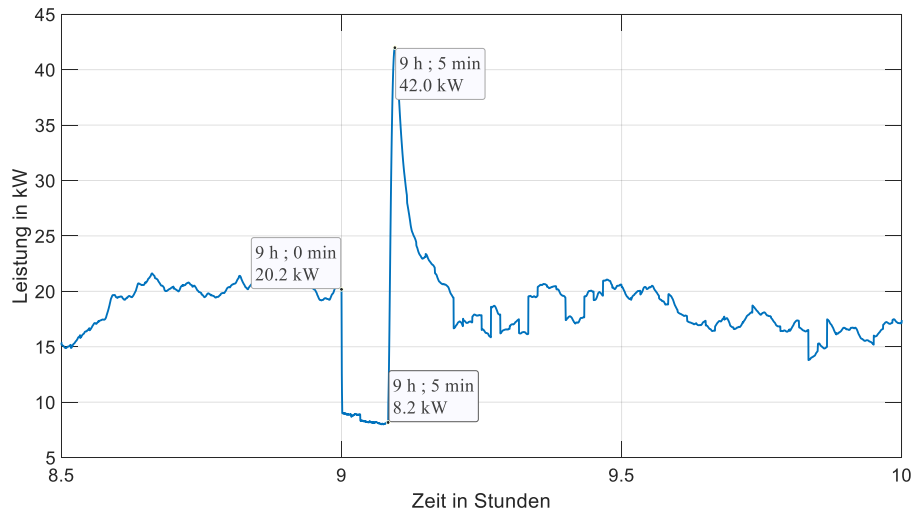


Abb. 84: Flexibler Gebäudebetrieb: Gebäudelast

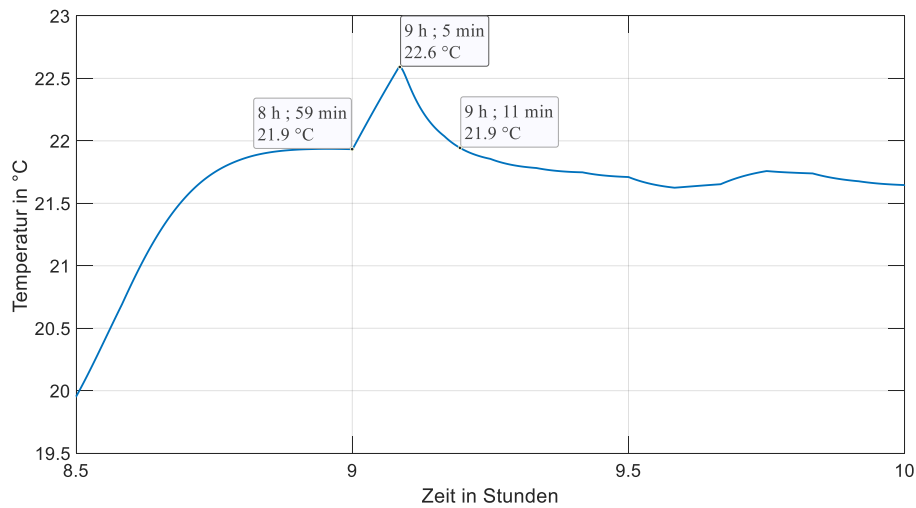


Abb. 85: Flexibler Gebäudebetrieb: Temperatur im Hörsaal

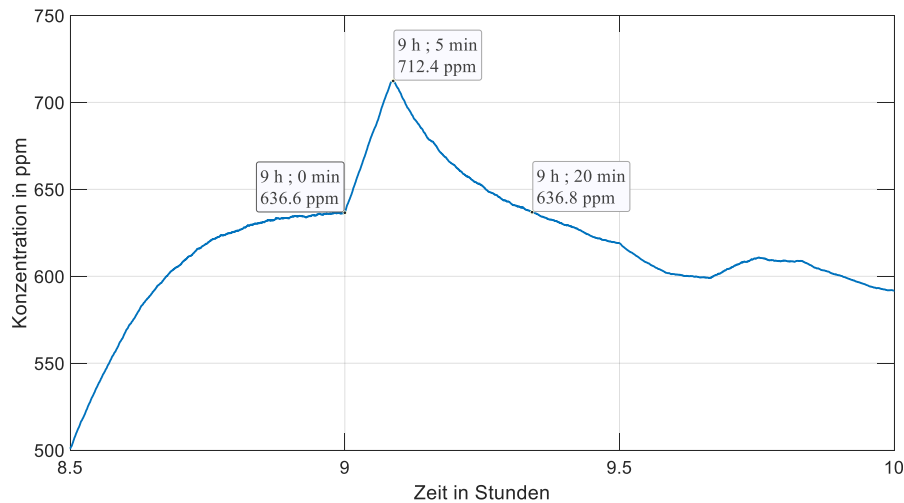


Abb. 86: Flexibler Gebäudebetrieb: CO₂ - Konzentration im Hörsaal

4.2.3 Definition eines Netzdienstlichkeitsindikators

Die Bewertung der Netzdienstlichkeit eines Gebäudes ist derzeit oftmals qualitativer Natur, um diese vergleichbarer und objektiver zu gestalten, wurde im Rahmen der Forschungsuntersuchungen ein quantitativer Faktor entwickelt. Besonderer Fokus gilt, im Gegensatz zu bestehenden Faktoren, dem potentiellen Netzeinfluss, den ein energieflexibles Gebäudes hat. Die Berechnungsvorschrift wurde bewusst einfach gehalten, damit selbst rudimentäre Informationen über das Gebäude zur Bestimmung genügen. Ausgangspunkt für die Definition des Faktors war eine im Rahmen des Annex 67 erstellte detaillierte Literaturrecherche zu Flexibilitätsindikatoren.

Der im Projekt erstellte Netzdienstlichkeitsindikator (4-4) wird in Prozent ausgedrückt und besteht aus zwei Teilen, die mit dem Faktor A gewichtet werden, der den Wertebereich 0...1 besitzt. Der erste Summand (4-2) beschreibt die potenzielle Netzauswirkung, indem er die Sensitivität des Hausanschlussknotens mit der des sensitivsten Knotens im betrachteten Netzabschnitt in Beziehung setzt. Die Zusammenhänge verdeutlicht das Beispiel des Netzstrangs, hier stellt die Sensitivität bildlich gesehen die Position des Gebäudes dar. Befindet es sich am Anfang des Strangs hat es nur wenig Einfluss auf die hinter ihm liegenden Gebäude. Befindet es sich jedoch an Ende des Strangs, kann es durch seine Position Einfluss auf alle vorgelagerten Gebäude nehmen.

Die tatsächliche Flexibilität des Gebäudes wird mit dem zweiten Teil (4-3) berücksichtigt. Dieser Summand setzt die flexible Leistung zu einem Zeitpunkt t in Beziehung zur Anschlussleistung des Gebäudes. Um eine fundierte Aussage treffen zu können, muss der Indikator I_{ND} für alle Zeitschritte eines Typtages, bspw. dem Werktag, bestimmt und dann gemittelt werden. Aufgrund der gewählten Berechnungsregel weisen hohe prozentuale Werte auf Gebäude hin, die sich für einen netzdienstlichen Einsatz besonders eignen.

$$I_{PN} = \frac{S_i}{S_{max}} \quad (4-2)$$

$$I_{GF} = \frac{P_{flex}(t)}{P_{Anschluss}} \quad (4-3)$$

$$I_{ND} = A * I_{PN} + (1 - A) * I_{GF} \quad (4-4)$$

- I_{PN} : Indikator des potentiellen Netzeinflusses
- S_i : Sensitivität des Hausanschlusspunktes
- S_{max} : Maximale Sensitivität im betrachteten Netzabschnitt
- I_{GF} : Indikator der flexiblen Gebäudeleistung
- $P_{flex}(t)$: Flexible Leistung des Gebäudes zum Zeitpunkt t
- $P_{Anschluss}$: Anschlussleistung des Gebäudes
- I_{ND} : Netzdienstlichkeitsindikator
- A: Skalierungsfaktor

4.2.4 Validierung der potentiellen Netzdienstlichkeit

Im Folgenden wird zur Überprüfung des zuvor definierten Netzdienstlichkeitsindikators ein lastdominiertes Testszenario in einer Strang-Topologie vorgestellt, siehe Abb. 87. Zu Beginn der Untersuchung befinden sich im 15-Knoten-Netz fünf Häuser, die jeweils 18 kW verbrauchen. Ausgehend von hier wurde der Verbrauch jedes Hauses nacheinander in zwei Stufen von 18 kW zu 9 kW auf 0 kW reduziert, wobei nach dem „Hauswechsel“ zunächst das Ausgangsszenario wiederhergestellt wird. Bei der Netzberechnung werden zur späteren Bewertung die Spannungen an allen Knoten aufgenommen. Es ergibt sich eine Messreihe mit 15 Spalten (Knoten) und 11 Zeilen (Szenarien).

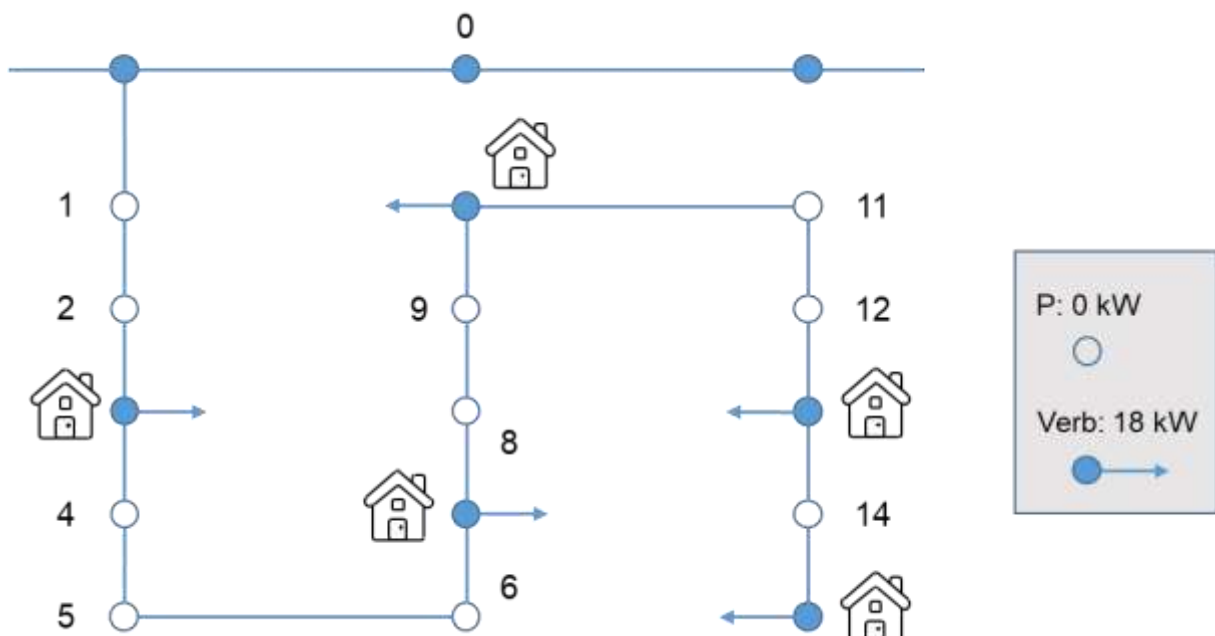


Abb. 87: Lastdominiertes Ausgangsszenario in der Strang-Topologie

In Abb. 88 ist die relative Sensitivität der einzelnen Hauspositionen und in Abb. 89 der berechnete Netzdienstlichkeitsindikator dargestellt. Die Form der dreidimensionalen Darstellung, mit einem Maximum beim letzten Netzknoten und bei maximaler Flexibilität, fällt mit sinkender Sensitivität deutlich stärker als mit abnehmender Flexibilität. Daraus ist

abzuleiten, dass Gebäude die am Ende des Strangs angeordnet sind einen höheren Faktor aufweisen, als Gebäude am Anfang.

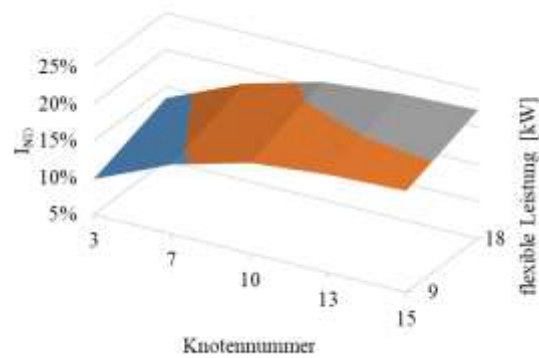
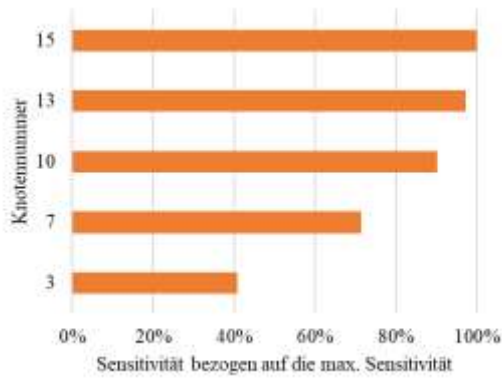


Abb. 88: Faktor I_{PN} für den lastdominierten Strang

Abb. 89: Netzdienstlichkeitsindikator I_{ND} für den lastdominierten Strang

Die Ergebnisse der Lastflusssimulation und die Messergebnisse aus dem Netzautomatisierungslabor sind in Abb. 90 dargestellt. Als Bewertungskriterium für den möglichen netzunterstützenden Einfluss eines Gebäudes im Verteilnetz wurde die mittlere Änderung der Knotenspannungen gewählt. Behobene Spannungsbandverletzungen sowie die thermische Überlastung von Betriebsmitteln wurden bewusst nicht berücksichtigt, da daraus nur diskretere Aussagen abgeleitet werden können und diese stark vom gewählten Szenario abhängen. Die Formen des simulierten und gemessenen Einflusses des flexiblen Gebäudes auf das Netz sind sehr ähnlich. Es ist zu erkennen, dass wie beim Indikator mit zunehmender Sensitivität und zunehmender elektrischer Flexibilität mehr Änderungen im Spannungsband verursacht wird. Die Form des zuvor gezeigten Netzdienstlichkeitsindikators korreliert mit der Veränderung des Spannungsbandes, was die Aussagekraft des entwickelten Indikators stärkt.

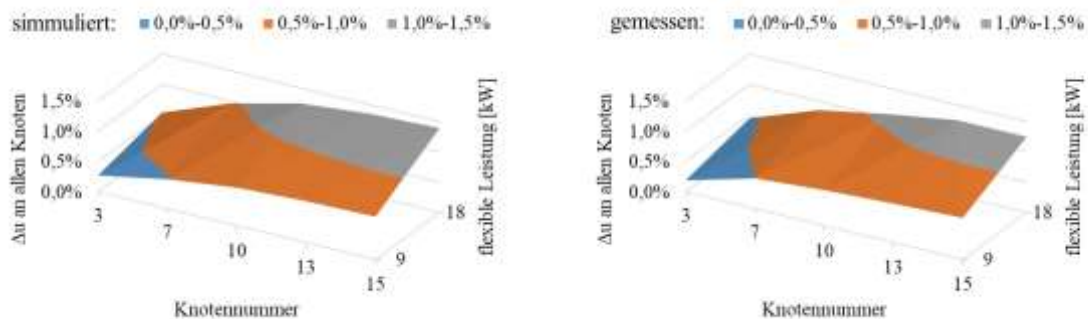


Abb. 90: Mittlere Änderung der Netzspannung an allen Knoten, ermittelt durch Simulation und Messungen im Netzautomatisierungslabor

5 Schnittstellen

In der Vorhabenbeschreibung zum Forschungsprojekt LivingLab Gebäudeperformance wurden die Aufgaben der interdisziplinären Forscherteams in Arbeitspaketen definiert. Dabei wurde vor dem Hintergrund der vielschichtigen Thematik besonderer Wert auf die fachübergreifende Zusammenarbeit gelegt. Nachfolgend bieten wir einen Überblick zu den Schnittstellen und gemeinschaftlich erreichten Arbeitsergebnissen.

5.1 Schnittstelle Gebäudeperformance

Die Forschungsschwerpunkte im Rahmen des Projekts lassen sich im Bereich Performance unter vier übergreifenden Schritten einordnen:

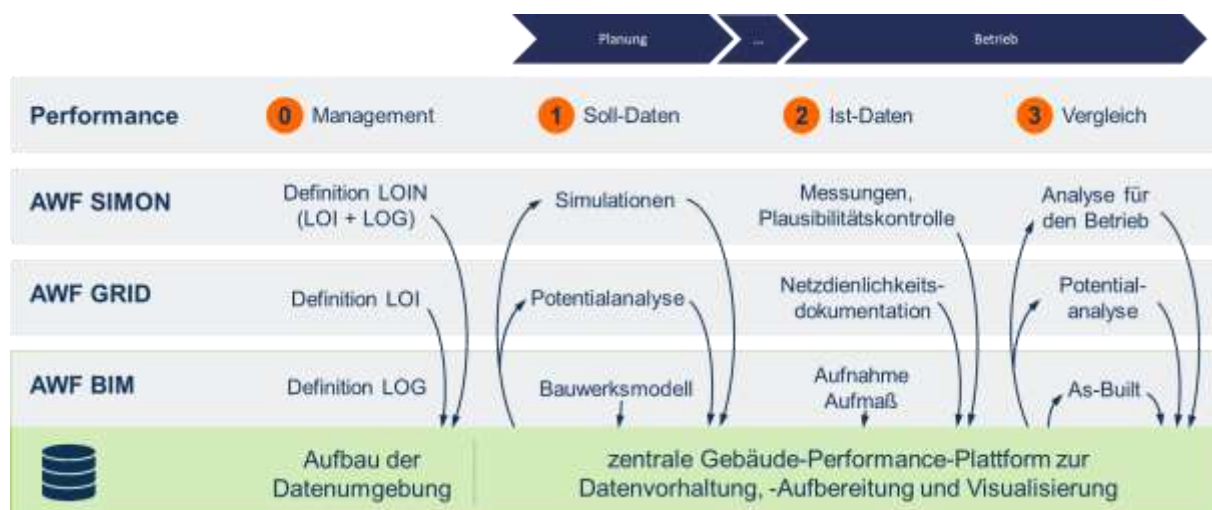


Abb. 91: Übersichtsmatrix Forschungsschwerpunkte der Arbeitspakete

Aufgegliedert nach den drei fachlichen Blickwinkeln SIMON, GRID und BIM lässt sich eine Übersichtsmatrix ableiten. Auf der horizontalen Achse erfolgt die Unterteilung in die vier zuvor beschriebenen, übergreifenden Schritte. Die vertikale Achse hingegen beinhaltet die fachlichen Blickwinkel. In den Feldern sind die Forschungsschwerpunkte der jeweiligen Blickwinkel den Schritten zugeordnet. Die eingetragenen Pfeile beschreiben die für die Gebäudeperformance notwendigen Informationsflüsse zwischen den Forschungsschwerpunkten.

Die weiterführenden Abschnitte gliedern sich nach den vier definierten Schritten und beschreiben die Zusammenarbeit sowohl auf der Ebene der Forschung als auch der Anwendung in den Pilotprojekten.

5.2 Schnittstelle Management

Ein zentrales Element zur Betrachtung der Gebäudeperformance ist die Sammlung, Aufbereitung und Bereitstellung relevanter Informationen. An dieser Stelle ist eine Zusammenarbeit der Arbeitspakete unter zwei Gesichtspunkten erfolgt. Zum einen wurde aus dem Arbeitspaket BIM heraus die Struktur für den Informationsfluss etabliert und das gesamte Forscherteam für die Definition von Informationsanforderungen sensibilisiert. Zum anderen wurden die Skizzen und Prozessbeschreibungen der Anwendungsfälle, nach Strukturen des

Arbeitspaketes BIM, aus den Arbeitspaketen SIMON und GRID heraus mit fachlichem Wissen gefüllt und stets inhaltlich validiert. Dabei sind mehrere Dokumente entstanden, welche die Grundlage für den Aufbau der Plattform bilden.

Das gesammelte Wissen um die Anwendungsfälle ist zudem nach Bedarf den Pilotprojekten über Gespräche und Unterlagen zur Verfügung gestellt worden. Beispielsweise wurden die Wuppertaler Stadtwerke (WSW) im Rahmen der Planung für den Neubau der Unternehmenszentrale bei der Definition von Anwendungsfällen und Performance-Zielen sowie der möglichen Implementierung in die Planung und den Betrieb von den Arbeitspaketen einander ergänzend unterstützt.

5.3 Schnittstelle Soll-Daten

Der Bereich der Soll-Daten betrifft im Wesentlichen die Erstellung und Nutzung von Bauwerksinformationsmodellen, insbesondere des Pilotprojektes Campus Haspel. Grundlage für die erste Modellierung durch das Arbeitspaket BIM waren originale Planunterlagen, die über das AP SIMON und die dort aufgebauten Kontakte zum Eigentümer, dem Bau- und Liegenschaftsbetrieb Nordrhein-Westfalen, eingeholt wurden. Der erste Stand wurde unter verschiedenen Gesichtspunkten gemeinsam untersucht und weiterentwickelt. Zum einen wurde die Modellierung dahingehend angepasst, dass die auf dem Modell aufbauenden Simulationen fachlich korrekte Ergebnisse erwarten ließen. Zum anderen wurde gemeinsam überprüft, inwieweit das Modell über das standardisierte Austauschformat Industry Foundation Classes (IFC) zwischen dem Autorentsystem und den Simulations-Systemen (hier IDA ICE) ausgetauscht werden kann. Rücksprachen mit den Software-Herstellern erfolgen in gemeinsamen Sitzungen. Im AP Simon wurden Simulationsmodelle in EnerCalc und in IDA ICE erarbeitet und die energetischen Soll-Daten zu definiert.

Darüber hinaus werden relevante technische Gebäudedaten, welche das energetische Verhalten in Bezug auf Lastflexibilitäten widerspiegeln, zusammengefasst und im Rahmen des AP GRID genutzt um die netzdienlichen Eigenschaften des Gebäudes abzuleiten. Diese definieren einen Soll-Kennwert, welcher das aus der Planung resultierende Unterstützungspotential des Stromnetzes bei netzreaktiver Betriebsführung widerspiegelt.

5.4 Schnittstelle Vergleich

Für die weitere Verarbeitung sind insbesondere die Rohdaten aus der Gebäudeleittechnik nicht unmittelbar geeignet. Es fehlte eine eindeutige und dauerhafte Zuordnungsmöglichkeit der Daten zu Datenpunkten. Die Daten wurden gemeinsam auf Anhaltspunkte zur automatisierten Beseitigung der mangelhaften Eigenschaften hin untersucht. Über das Arbeitspaket SIMON wurden Listen der Datenpunkte eingeholt. Das Arbeitspaket BIM lieferte Skripte, die darauf aufbauend die Daten nach den Anforderungen der beiden anderen Arbeitspakete umstrukturieren.

6 Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse

6.1 Projektbeirat

Bereits zu Beginn des Projektes wurde ein Projektbeirat mit Vertretern aus der Praxis eingerichtet. Diesem Beirat gehörten die folgenden Institutionen bzw. Personen an:

- Dirk Bessert, eTASK Immobilien Software GmbH, Köln
- Patrick Jung, IPJ Ingenieurbüro P. Jung GmbH, Köln
- Holger Krings, Phoenix Contact Electronics GmbH, Bad Pyrmont
- Fabian Hutzler, Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW, Düsseldorf
- Michael Müller, Architektur Contor Müller Schlüter, Wuppertal
- Julius Otto, Apleona Real Estate GmbH, Düsseldorf

Dieser Beirat trat während der Laufzeit dreimal zusammen, um den Projektfortschritt zu diskutieren und insbesondere die Praxisrelevanz der Arbeiten zu schärfen. Eines der Pilotprojekte wurde auf Vorschlag des Projektbeirats aufgenommen (Kreishaus Siegen Wittgenstein).

6.2 Veranstaltungen

Im Oktober 2019 fand im Rahmen des Projektes ein Symposium unter dem Titel „Gebäudeperformance“ an der Universität Wuppertal unmittelbar im Living Lab, Gebäude HC statt. Veranstaltet wurde es gemeinsam von den am Projekt beteiligten Lehrstühlen der Fakultäten für Architektur und Bauingenieurwesen sowie Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik. Rund 140 Teilnehmerinnen und Teilnehmern kamen und diskutierten mit Expertinnen und Experten die vielfältigen Aspekte des Themas.



Abb. 92: Eindrücke vom gut besuchten Symposium „Gebäudeperformance“ am 2.10.2019 an der Wuppertaler Universität, Campus Haspel. Quelle: Universität Wuppertal

Aus Anlass des Projektabschlusses ist am 24.3.2021 ein Webinar zur weiteren Verbreitung der Ergebnisse vorgesehen.

6.3 Lehre und Weiterbildung

6.3.1 Ausbildung

Nachfolgend sind die Lehrangebote an der Bergischen Universität Wuppertal zusammengestellt, die im Kontext des Projektes entwickelt bzw. weiterentwickelt und teilweise bereits durchgeführt wurden.

Tabelle 8: Studienseminar zum Thema BIM im Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Building Information Modeling (BIM) für Bauingenieure und Architekten	
Lehrende	Dr. Anica Meins-Becker, Prof. Holger Hoffmann, Diverse aus der Praxis
Veranstaltungsart	Wahlfach, 16-20 Studierende
Studiengang/Studiengänge	MSc Architektur, MSc Bauingenieurwesen in den neu akkreditierten Studiengängen gemäß Ordnung 2019. Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Living Lab Gebäudeperformance“, insbesondere die erarbeiteten BIM-Anwendungsfälle können kurzfristig in das Wahlfach implementiert werden, Modulbeschreibung siehe https://www.arch.uni-wuppertal.de/de/studium-bewerbung/master-of-science.html https://www.bauing.uni-wuppertal.de/de/studium/msc-bauing.html
Lernziel	Lernziel ist das Gewinnen eines vertieften Verständnisses zur Anwendung der Methode BIM u.a. auch in Zusammenhang mit den aktuellen Entwicklungen zur Simulation und dem Monitoring physikalischer Informationen in Bezug auf Raumklima in Gebäuden insbesondere bezogen auf Temperatur, Feuchte, CO ₂ , aber auch Stromverbräuche.

Das Seminar „Nachhaltiges Bauen und Gebäudeperformance“ war besonders eng mit den Projekterfahrungen verbunden. Dabei wurden mit Studiereden messtechnische Methoden aus dem Projekt eingesetzt und deren Ergebnisse denen von Simulationsrechnungen gegenübergestellt. Das betrifft die Bereiche Tageslicht sowie Raumklima in Innenräumen. Dazu liegt ein interner Erfahrungsbericht mit Erläuterung der didaktischen Prinzipien vor [walther 2020]. Die Erfahrungen wurden im Rahmen der „Ständigen Konferenz der Professuren für Bauphysik und TGA“ geteilt. Die wurde Anlass dazu, ein separates Austauschforum über den didaktisch zielführenden Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Lehre im März 2021 anzugehen.

Tabelle 9: Studienseminar zum Thema Gebäudeperformance im Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Nachhaltiges Bauen und Gebäudeperformance 2 (NB 2)	
	Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss, Dipl.-Ing. Karl Walther
Veranstaltungsart	Seminar, 10 – 20 Studierende
Studiengang/Studiengänge	MSc Architektur, MSc Bauingenieurwesen in den neu akkreditierten Studiengängen gemäß Ordnung 2020. Die Überlegungen aus dem laufenden Vorhaben sind die Konzeption der Studienordnung bereits eingeflossen, siehe https://www.arch.uni-wuppertal.de/de/studium-bewerbung/master-of-science.html https://www.bauing.uni-wuppertal.de/de/studium/msc-bauing.html
Lernziel	Lernziel ist ein vertieftes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge beim Raumklima in Gebäuden insbesondere bezogen auf Temperatur, Feuchte, CO ₂ .

Tabelle 10: Zweisemestriges Vertiefungsseminar zum Thema Gebäudeperformance im Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Studio Nachhaltiges Bauen und Gebäudeperformance (S NB)	
Lehrende	Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss, Prof. Annette Hillebrandt, M. Eng. Malin Berges, Dipl.-Ing. Karl Walther, Dipl.-Ing. Petra Riegler-Floors
Veranstaltungsart	Seminar, 2-semesterig, ca. 10 Studierende
Studiengang/Studiengänge	MSc Architektur im neu akkreditierten Studiengang gemäß Ordnung 2020. Die Überlegungen aus dem laufenden Vorhaben sind die Konzeption der Studienordnung bereits eingeflossen, siehe https://www.arch.uni-wuppertal.de/de/studium-bewerbung/master-of-science.html
Lernziel	Lernziel ist die Fähigkeit ein komplexes Bestandsgebäude in seinem Istzustand zu erfassen und darauf basierend eine Weiterentwicklung zu konzipieren, die erkannte Defizite beseitigt.

Tabelle 11: Studienseminar zum Bewertung von Baustoffen im Gebäudebestand im Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Bestandsbewertung und Bauschadensanalyse (Teilmodul)	
Lehrende	Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders
Veranstaltungsart	Seminar, ca. 10 Studierende
Studiengang/Studiengänge	MSc Bauingenieurwesen im neu akkreditierten Studiengang gemäß Ordnung 2020. Die Überlegungen aus dem laufenden Vorhaben sind die Konzeption der Studienordnung bereits eingeflossen, siehe https://www.bauing.uni-wuppertal.de/de/studium/msc-bauing.html
Lernziel	Die Studierenden kennen unterschiedliche Möglichkeiten, um Bestandsbauwerke zu bewerten.

Tabelle 12: Studiensseminar zum Thema Smart Grid Systeme im Fachbereich Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Veranstaltungsname	Smart Grid Systeme
Lehrende	Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek, Dr.-Ing. Michael Popp
Veranstaltungsart	Wahlfach, 10 – 30 Studierende, Wintersemester
Studiengang/Studiengänge	MSc Elektrotechnik, MSc Wirtschaftsingenieurwesen
Lernziel	Lernziel ist ein vertieftes Verständnis von Smart Grid Systemen durch die Hervorhebung der Notwendigkeit im zukünftigen Energieversorgungssystem. Der inhaltliche Fokus der Lehrveranstaltung liegt auf den theoretischen Grundlagen hinsichtlich der Funktionalität sowie der praktischen Anwendung.

6.3.2 Weiterbildung

Das Vorhaben hat wesentliche Impulse dafür gegeben, einen breit aufgestellten Weiterbildungsstudiengang zur Thematik des Nachhaltigen Bauens zu konzipieren. Dabei ist u.a. ein Modul „Gebäudemonitoring und –performance“ vorgesehen.

Tabelle 13: Studiengang Nachhaltiges Planen und Bauen an Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen

Veranstaltungsname	Berufsbegleitender Master-Studiengang „Nachhaltiges Planen und Bauen“ / Modul: Gebäudemonitoring und -performance
Lehrende	Professorinnen und Professoren der Universität Wuppertal sowie Lehrende anderer NRW Hochschulen und aus der Praxis
Veranstaltungsart	Vorlesung, max. 25 Studierende
Studiengang/Studiengänge	M.Sc. Nachhaltiges Planen und Bauen
Lernziel	Lernziel ist das Gewinnen eines vertieften Verständnisses zur Anwendung der Methode BIM u. a. auch in Zusammenhang mit den aktuellen Entwicklungen zur Simulation und dem Monitoring physikalischer Informationen in Bezug auf Raumklima in Gebäuden insbesondere bezogen auf Temperatur, Feuchte, CO ₂ , aber auch Stromverbräuche.
Ausblick	Die Integration der Erkenntnisse aus dem Projekt „Living Lab Gebäudeperformance“ in den Master-Studiengang sind erstmalig für das Jahr 2022 geplant.

6.4 Wissenschaftlich-fachlicher Anschluss und Veröffentlichungen

Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte und auf Demonstrationsebene umgesetzte BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ wird in naher Zukunft auf verschiedenen Ebenen veröffentlicht und weiter validiert werden. Die Veröffentlichung wird im Rahmen von diversen Präsentationen und des Verfassens von nationalen und internationalen Papern, wie z.B. ISARC erfolgen. Parallel dazu wird der Demonstrator der BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ im BIM-Labor an der Bergischen Universität Wuppertal ausgestellt und der Öffentlichkeit im Rahmen von Aus- und Weiterbildungen demonstriert werden. Der

Demonstrator steht der Öffentlichkeit zur Verfügung und kann nach terminlicher Absprache jederzeit an der Bergischen Universität Wuppertal besichtigt werden.

Um die BIM-Anwendung „Gebäudeperformance“ auch für weitere Living Labs anwenden zu können, sollte die BIM-Anwendung in der Praxis validiert werden und bestenfalls als abgestimmter Standard der Praxis zur Verfügung gestellt werden. Hierfür stehen beispielsweise Initiativen, wie der buildingSMART Deutschland oder der VDI zur Verfügung. Der buildingSMART ist das Kompetenznetzwerk für digitales Planen, Bauen und Betreiben von Bauwerken. Er agiert als Teil der internationalen Community interdisziplinär, anwender- und praxisorientiert. Der buildingSMART ist eine NON-Profit Organisation.²⁵ Der buildingSMART organisiert Fachgruppen, die in Abstimmung BIM-Anwendungen erstellen und validieren. Fertig gestellte BIM-Anwendungen werden im Rahmen des deutschen Chapters des Use-Case Management²⁶ von buildingSMART Schweiz veröffentlicht und so auch anderen Ländern zur Verfügung gestellt.

Der VDI hat vor einigen Jahren die Richtlinie 2552²⁷ mit diversen Unterblättern ins Leben gerufen. Im Rahmen des VDI 2552 Blatt 11 werden unterschiedliche BIM-Anwendungen von der Praxis beschrieben. Eine neu zu standardisierende BIM-Anwendung muss beim VDI angemeldet werden und dann im Rahmen einer Fachgruppe erstellt und validiert werden. Die Initiierung der Einrichtung entsprechender Fachgruppen wird nach Projektabschluss erfolgen.

Die Arbeiten zur Raumklimaperformance werden durch Nachfolgeprojekte bei weiteren Büro- und Verwaltungsgebäuden fortgesetzt u.a. beim Wilo Campus in Dortmund. Das Vorgehen dabei resultiert aus den gemachten Erfahrungen bei den Pilotprojekten. Eine zusammenfassende wissenschaftliche Veröffentlichung ist vorgesehen. Auch die Ergebnisse der Arbeiten zur dynamischen U-Wert-Bestimmung bei Bestandsgebäuden sollen in einer wissenschaftlichen Publikation zusammengefasst werden.

Die wichtige Wirkung des Nutzerverhaltens in Bezug auf das sommerliche Raumklima wird im Rahmen einer Dissertation und unter Nutzung der erweiterten experimentellen Infrastruktur weiterverfolgt.

Beim für 2022 geplanten „Living Lab NRW“ liegt als Fortsetzung des Solar Decathlon Europe in Wuppertal einer der Schwerpunkte des auf drei (bis fünf) Jahre angelegten Vorhabens auch auf der Erforschung des „Performance Gap“, in diesem Falle für das energetische und raumklimatische Verhalten von energieeffizienten Wohngebäuden²⁸. Dazu soll u.a. ein Doktoradennetzwerk mit Förderung durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen etabliert werden.

²⁵ <https://www.buildingsmart.de/buildingsmart/wer-wir-sind> (Stand: 21.10.2020)

²⁶ <https://ucm.buildingsmart.org/> (Stand: 21.10.2020)

²⁷ <https://www.vdi.de/richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-2552> (Stand 21.10.2020)

²⁸ www.sde21.eu

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zur Gebäude-Netz-Interaktion haben das Potential für das zukünftige Energienetz aber auch den zukünftigen Gebäudebetrieb aufgezeigt. Deshalb wird diese in dem Konsortialprojekt „InFlex – Integration gebäudetechnischer Flexibilitäten und kombinierter Fahrzeugladeinfrastruktur in ein dezentrales Verteilnetzautomatisierungssystem“ weiter untersucht. Auch hieran arbeiten wieder die Teams von Prof. Zdrallek und Prof. Voss zusammen. Das Ziel der Arbeit ist, Gebäude als steuerbare Aktoren in eine dezentrale Verteilnetzautomatisierung einzubinden. Dafür soll ein Gebäuderegler entwickelt werden, welcher das Gebäude möglichst wirtschaftlich, unter der Berücksichtigung von Komfortbedingungen und der Steuerbarkeit durch die Verteilnetzautomatisierung, betreibt. Dafür können viele Ergebnisse aus dem Projekt Living Lab Gebäudeperformance weiterverwendet werden. Das entwickelte Netzautomatisierungslabor wird als Testumgebung für den entwickelten Regler genutzt, um diesen auf Funktionalität in einem realen Netz zu untersuchen. Die Datenbank mit den enthaltenen Gebäudemessdaten wird zur Entwicklung von Prognosealgorithmen genutzt, welche das Gebäudeverhalten prognostizieren sollen und dem Regler so eine effektivere Regelung ermöglichen. Die entwickelte Simulationsumgebung wird zum Testen des Reglers in einem simulierten Gebäude genutzt, damit der Regler anschließend hinsichtlich des Gebäudebetriebs bewertet werden kann. Weiterhin können mit der Simulationsumgebung Regelungseingriffe simuliert werden und entschieden werden, ob ein Regelungseingriff im realen Gebäude durchgeführt wird oder nicht. Der entwickelte Netzdienstleistungsindikator wird genutzt, um abschätzen zu können, ob der Einbau eines Gebäudereglers in ein bestehendes Gebäude sinnvoll ist. Das Projekt wird gefördert von EFRE.NRW, der Landesregierung Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union.

6.5 Schutzrechte

Im Rahmen des Vorhabens wurde keine Schutzrechte angemeldet.

7 Literaturverzeichnis

DIN EN ISO 29481-1 (2018): *Bauwerksinformationsmodelle - Handbuch der Informationslieferungen -Teil 1: Methodik und Format* (ISO 29481-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 29481-1:2017

Donath (2008): Donath D.: *Baufaufnahme und Planung im Bestand. Grundlagen – Verfahren – Darstellung – Beispiele*, 1. Auflage Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008

Helmus et al. (2020): *Handlungsempfehlung zur digitalen Bestandserfassung*, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2020

Luhmann (2017): Luhmann T.; Maas H.: *Industriephotoграмmetrie*. In: Heipke C.: *Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie*. 1. Auflage Springer Verlag Berlin, 2017

Steinmann, R. (2018). *IFC certification of BIM software*. In *Building Information Modeling* (pp. 139-153). Springer International Publishing, 2018

VDI 2552 Blatt 2 (Entwurf) (2018): *Building Information Modeling. Begriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2552 Blatt 10 (Entwurf) (2020): *Building Information Modeling. Auftraggeber-Informations-Anforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungspläne (BAP)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN V 18599-2:2018-09, *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*, Kapitel 6.3.2 Fensterlüftung, Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN 4108-2:2013-02, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Kapitel 8.4 Anforderungen und Randbedingungen für thermische Gebäudesimulationen, Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN 4108-2:2013-02, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Kapitel 8.3 Verfahren Sonneneintragskennwerte, Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN EN 15251:2012-12, *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, Beuth, Berlin

Lichtmeß, M., *EnerCalc*, Excel-Werkzeug für Vereinfachte Energiebilanzen in Anlehnung an DIN V 18599:2011-12, Version 5.27.149, Luxemburg, 2017

Technische Hochschule Rosenheim, *MoniSoft*, Software für Monitoring und energetische Betriebsoptimierung, Version 17-10-2017, Rosenheim, 2017

Lichtmeß, M.: *Neues Bürogebäude – Energiekonzept und Nachhaltigkeit*, Online unter https://www.revue-technique.lu/wp-content/uploads/HS_2018_02_-web.pdf

Institut Wohnen und Umwelt GmbH, *Gradtagzahlen in Deutschland*, Excel-Berechnungstool zur Bestimmung der tatsächlichen Heizgradtage (HGT) bzw. der Gradtagzahl (GTZ) für 42 deutsche Wetterstationen, Version Aug 2020, Darmstadt, 2020

Wissenschaftliche Begleitforschung ENERIEWENDEBAUEN, Leitfaden Monitoring, *Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“*, RWTH Aachen University, Aachen, 2018

Walther, Karl: *Nachhaltiges Bauen und Gebäudeperformance 2 - Raumkomfort verstehen, Methoden & Erfahrungen im Sommersemester 2020*, Bergische Universität Wuppertal, interner Bericht, Wuppertal, 2020

EQUA Solutions AG, *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)*, Software zur Gebäudesimulation, Zug (Schweiz), 2020

Conrad Connect GmbH, *Conrad Connect*, Online Plattform zur Verknüpfung smarterer Geräte, <https://conradconnect.com/de> (Zugriff 23.11.2020), Hirschau, 2020

R. Junker et al. *Characterizing the energy exibility of buildings and districts*. Applied Energy, 225, 175-82, 2018

Roesl De Cononck, Lieve Helsen. *Quantification of flexibility in buildings by cost curves Methodology and application*. Applied Energy 162, 653-665, 2016

K. Korotkiewicz et al. *Autarkic State Control in Electrical Distribution Grids Innovative Distribution Grids by Decentralized Intelligence*. 2018 3rd International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), pp. 1-5, 2018

M. Ahmadi et al. A. *Optimizing Load Control in a Collaborative Residential Microgrid Environment*. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 3, pp. 1196-1207, 2015

Wazifehdust, Tafuro. *Smart Grid Lab (2019)*. Abgerufen am 22. September 2020, von <https://bit.ly/35ZdGVO>

K. Voss et al. *Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings*. EuroSun, Austria, 2010

Oerter. *Autarke, koordinierte Spannungs- und Leistungsregelung in Niederspannungsnetzen*, Doctoral dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2014

Hurtado, et al. *Quantifying demand flexibility based on structural thermal storage and comfort management of non-residential buildings: A comparison between hot and cold climate zones*. Applied Energy 195, 1047–1054, 2017

Deutsche Energie Agentur, GmbH. *Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025*. S.620, Berlin, 2010

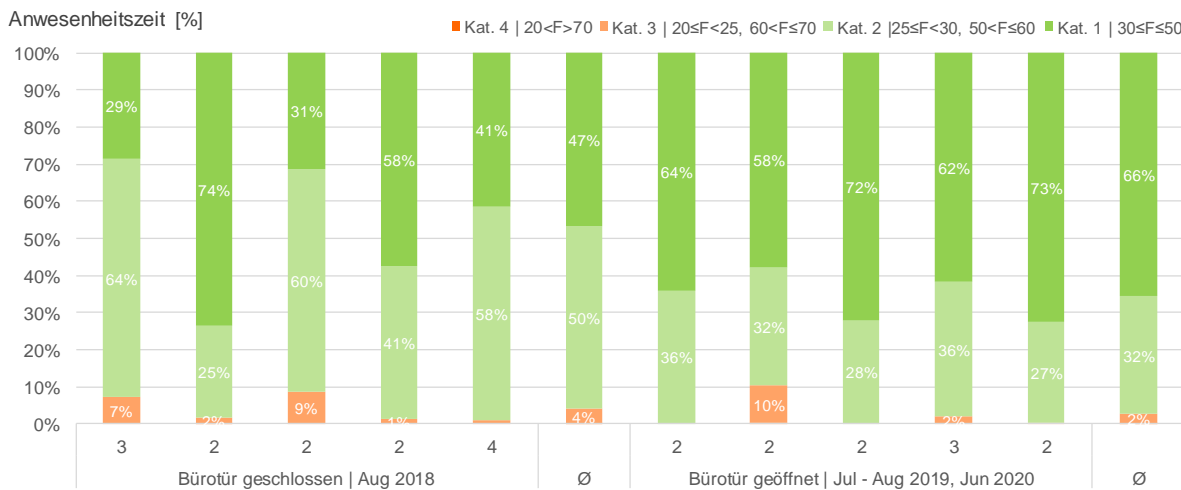
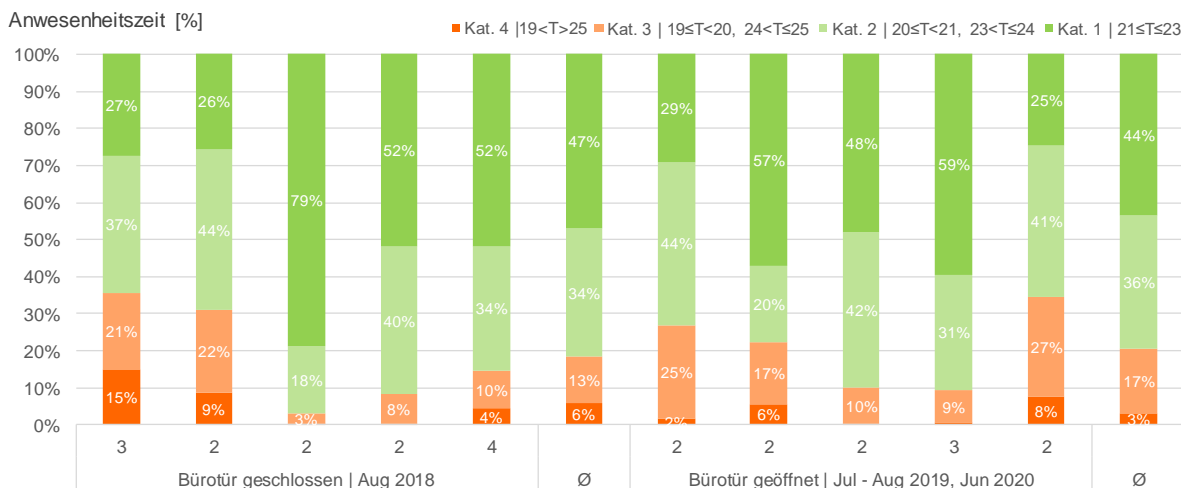
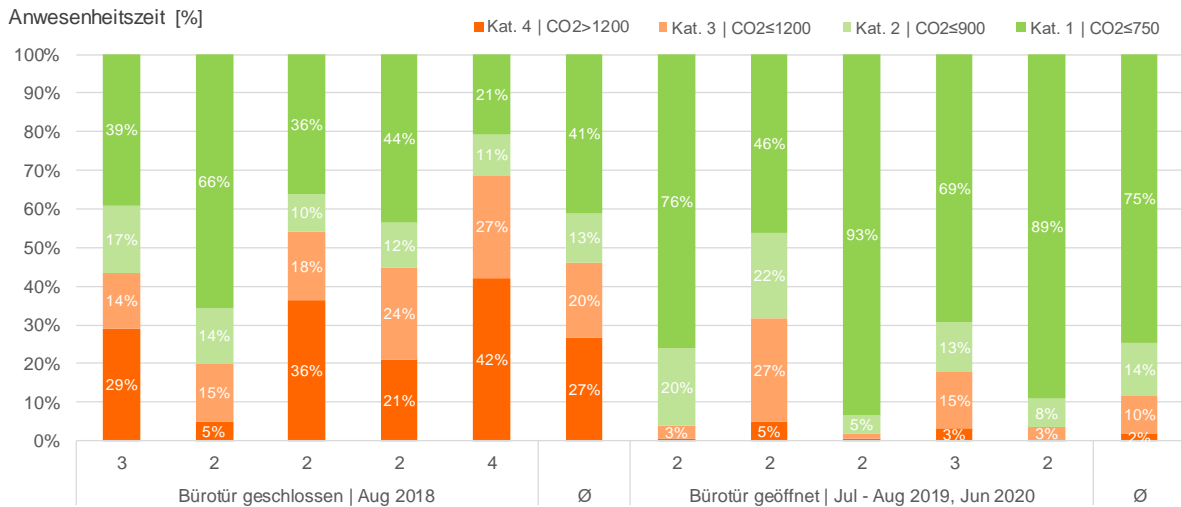
Modbus Organization. *Modbus Protocol Specifications*, 2020. Abgerufen am 24. November 2020, von <https://www.modbus.org/specs.php>

International Energy Agency. *Examples of Energy Flexibility in Buildings: Energy in Buildings and Communities*, Programme Annex 67 Energy Flexible Buildings, 2019

8 Anhang

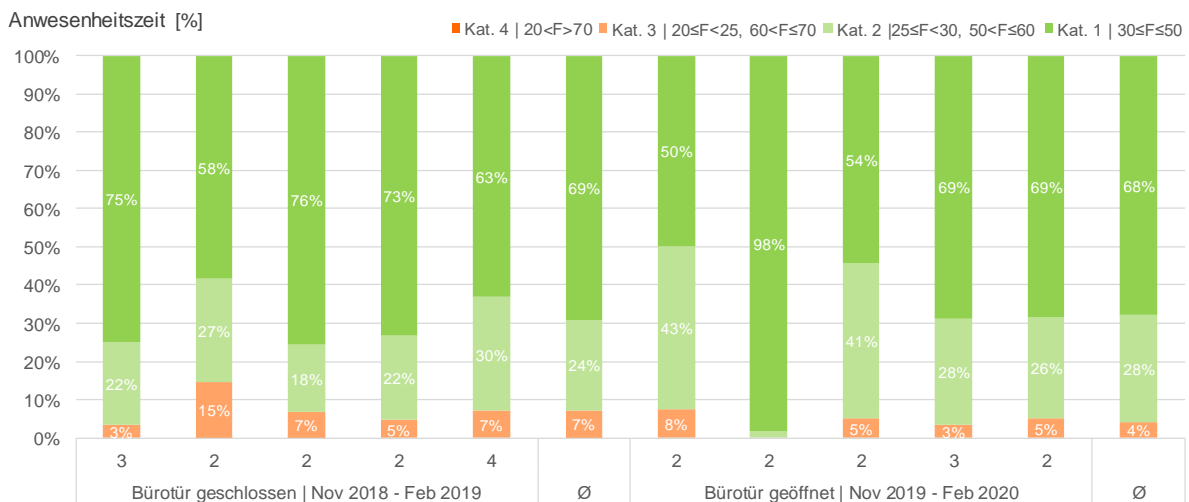
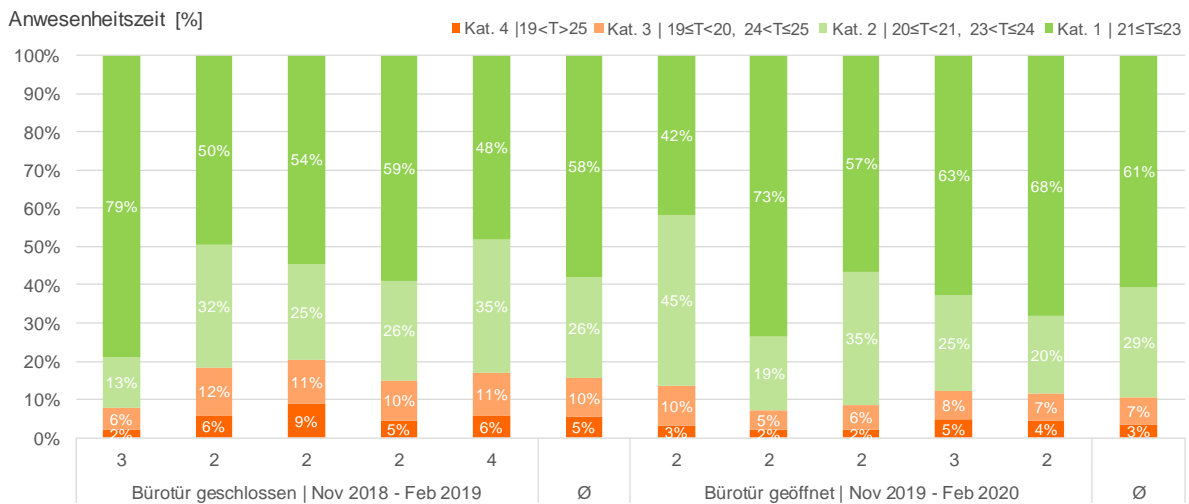
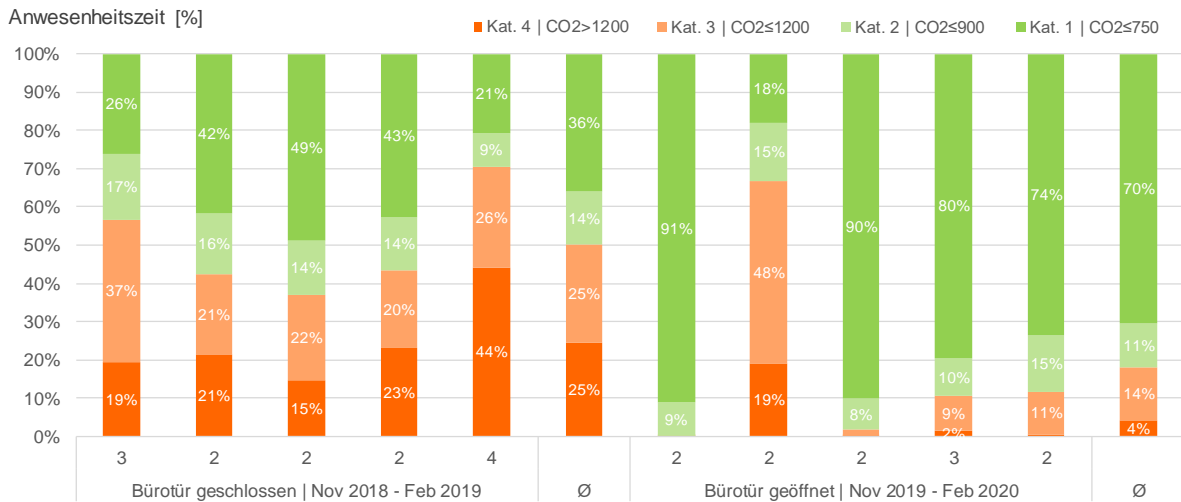
Anhang 1: Übersichtstabelle über die eingesetzten Messgeräte und deren Randbedingungen im VG 2 in Mettmann

Flügel	Ausrichtung	Büro-Nr.	CO ₂ -Ampel	Belegung	Messzeitraum
C	west	1	-	2	
C	nord	2	-	1	
C	west	3	-	1 ab 29.10.18 2	
C	ost	4	-	2	bis 30.11.2019
A	ost	5	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	süd	6	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	ost	7	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	west	8	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
B	west	9	-	1	
B	ost	10	-	1	
B	west	11	-	2	
B	ost	12	-	1	
D	west	13	-	1	
D	süd	14	-	1	
D	ost	15	-	1	verloren gegangen
D	ost	16	-	2	
A	west	17	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	west	18	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	ost	19	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	ost	20	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	nord	21	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	west	22	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	west	23	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	ost	24	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
B	west	25	-	2	
B	ost	26	-	1	
B	ost	27	-	1	
B	ost	28	-	2	
A	west	29	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	ost	30	ja	2	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	west	31	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
A	west	32	ja	1	ab 1.2.2020 mit Ampel
B	west	33	-	1	
B	west	34	-	2	
B	west	35	-	2	
B	süd	36	-	1	



Büroräume mit Anzahl der Arbeitsplätze

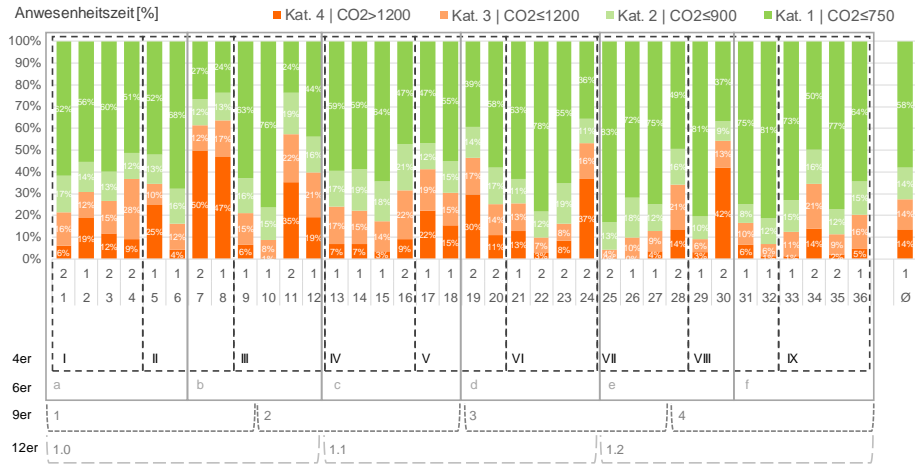
Anhang 2: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumluft, die Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte in den untersuchten Büroräumen des Kreishauses in Siegen im Sommer jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume der Räume.



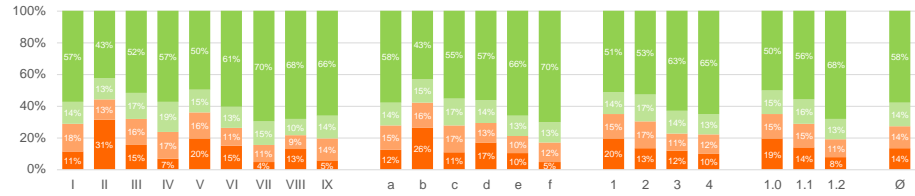
Büroräume mit Anzahl der Arbeitsplätze

Anhang 3: Zeitliche Verteilung nach den Raumluftklimakategorien der DIN EN 15251:2012 für den CO₂ Gehalt der Raumluft, die Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte in den untersuchten Büroräumen des Kreishauses in Siegen im Winter jeweils für die täglichen Nutzungszeiträume der Räume.

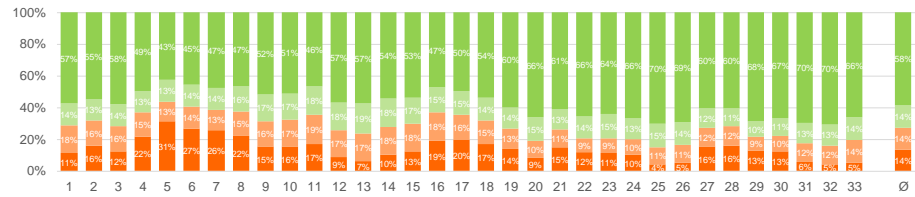
Ausgangslage



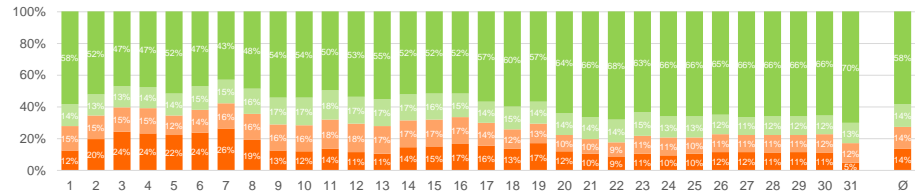
Aufteilung in Pakete



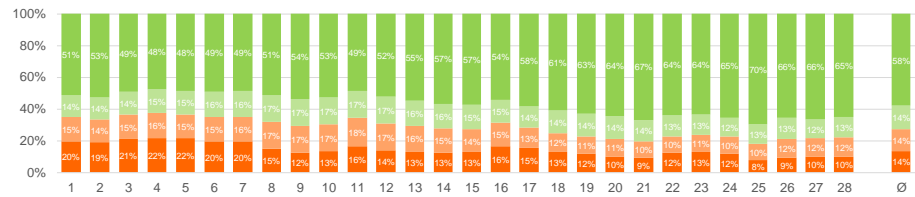
gleitendes 4er Paket



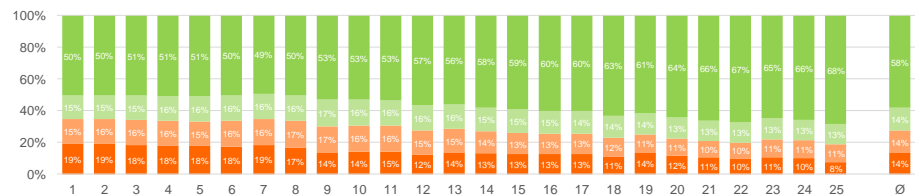
gleitendes 6er Paket



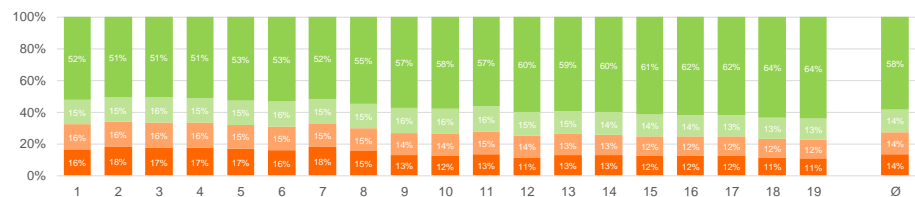
gleitendes 9er Paket



gleitendes 12er Paket



gleitendes 18er Paket



Anhang 4: Mittelwertuntersuchungen auf Grundlage der gemessenen Raumklimakategorien nach DIN EN 15251:2012 für den CO₂-Gehalt der Raumluft für das Jahr 2019