

Prädiktiv gesteuerte passive Gebäudekühlung mittels natürlicher Nachtlüftung und tageslichtoptimierter Verschattung (CoolAIR)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 78/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

Ass.Prof.ⁱⁿ DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Daniela Trauninger, DI Albert Treytl, DI Markus Winkler, Ing. Klaus Winiwarter, DI Dr. Aleksey Bratukhin, Ing. Thomas Posniecek, DI Wolfgang Stumpf
(Universität für Weiterbildung Krems)

Prof.(FH) DI(FH) Dr. Christian Heschl, DI Florian Wenig, DI Bernhard Derler, DI(FH) DI Stefan Langerwisch, DI Lukas Unterpertinger, DI(FH) DI Johannes Schnitzer (Forschung Burgenland)

Ing. Johann Gerstmann

DI Paul Erdely, BSc., DI (FH) Gerald Peischl, Ing. Thomas Szuborics, Michael Woschitz
(Woschitz Engineering ZT GmbH)

Rainer Zach, Ing. Christian Heiligenbrunner, Mag. Benjamin Guzei (Zach Antriebe GmbH)

Manfred Fürstner (Fürstner RWA Systeme und Technik GmbH)

Wien, Krems 2025. Stand: Juni 2022

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	11
3.1.	Steigender Kühlbedarf von Gebäuden	11
3.2.	Lösungsansatz ventilative Kühlung	12
4	Projekthalt	15
4.1.	Forschungsansatz	15
4.2.	Zielsetzung des Projektes	16
4.3.	Methodik	16
4.4.	Projektinnovationen	17
5	Ergebnisse	19
5.1.	Evaluierungsmessungen und Datenanalyse	19
5.1.1.	Potentialanalyse unter klimatischen Randbedingungen	19
5.1.2.	Langzeitmonitoring und Datenvalidierung	22
5.1.3.	Basisdatensätze zur Modellbildung	29
5.1.4.	Zusammenfassung der Evaluierungsmessungen und Datenanalyse	37
5.2.	Modellierung und Simulation	38
5.2.1.	Raumübergreifendes Stromfadennetzwerk	38
5.2.2.	Hochauflösende CFD Simulationen	40
5.2.3.	Dynamische Gebäudesimulation über erweiterte Kühllastperiode	44
5.2.4.	Zusammenfassung Modellierung und Simulation	57
5.3.	Modellbasierte Regelung	58
5.3.1.	Modellprädiktives Regelkonzept - MPC	58
5.3.2.	Raummodelle für Einsatz in eingebetteten Systemen	60
5.3.3.	Sensorinfrastruktur	65
5.3.4.	Regelqualität	68
5.3.5.	Zusammenfassung modellbasierte Regelung	71
5.4.	Praktische Umsetzung und Evaluierung	72
5.4.1.	Testsetup Hofburg Wien	72
5.4.2.	Experimentelle Validierung	75
5.4.3.	Kostenanalyse	82
5.4.4.	Zusammenfassung Umsetzung und Evaluierung	87
5.5.	Begleitung Denkmalschutz und Wissenstransfer	88
5.5.1.	Dissemination und Einbindung von Stakeholdern	88
5.5.2.	Kontrolle der Denkmalschutzaspekte	88
5.5.3.	Normungsaktivitäten	90

5.5.4. Zusammenfassung der Denkmalschutzaspekte und des Wissenstransfers	92
6 Schlussfolgerungen	94
6.1. Technische Erkenntnisse.....	94
6.2. Zielgruppen	96
6.3. Markt- und Verbreitungspotential.....	96
7 Ausblick und Empfehlungen	98
8 Danksagung.....	100
9 Verzeichnisse.....	101
9.1. Abbildungsverzeichnis	101
9.2. Tabellenverzeichnis.....	105
9.3. Verzeichnis der Projektpublikationen.....	106
9.4. Verzeichnis der Vorträge zur Dissemination des Projektes.....	107
9.5. Literaturverzeichnis	109

1 Kurzfassung

Der Kühlenergiebedarf von Gebäuden rückt verstärkt in den Fokus von Planungsschaffenden, Gebäudeverwaltern und NutzerInnen. Vor allem im Bereich von Büro- und Verwaltungsgebäuden sind Klimageräte auch in unseren Breitengraden nicht mehr wegzudenken. Raumtemperaturen im Sommer über 30 °C sind mitunter keine Seltenheit mehr. In vielen Fällen muss mittlerweile die gesamte Zeit außerhalb der Heizperiode als Kühlperiode betrachtet werden. Der Anstieg der Außentemperaturen durch den Klimawandel, eine Erhöhung der Wärmelasten aufgrund solarer Einträge durch großzügige Fenster- bzw. Glasflächen und eine Erhöhung der inneren Wärmelasten durch technisches Equipment im Allgemeinen tragen zu einem rapiden Anstieg des Kühlenergiebedarfs bei.

CoolAIR verfolgte den Ansatz einer ressourcenschonenden Senkung des Kühlenergiebedarfs durch energieeffiziente natürliche Nachtlüftung in Kombination mit tageslichtoptimierter Verschattung. Ziel war die Entwicklung einer automatisierten und prädiktiven modellbasierten Regelstrategie für einen derartigen Low-Tech-Ansatz. Durch Herunterbrechen der Regelung auf Raumebene entsteht ein hoch flexibles System, das durch Nutzung und teilweise Automatisierung bereits vorhandener Lüftungsöffnungen, ohne Vernetzung durch die Gebäudeleittechnik, und mittels Plug&Play das passive Kühlpotential durch Nachlüftung voll ausschöpfen kann.

Die Projektergebnisse stellen eine wertvolle Basis für weitere Entwicklungsarbeiten sowie für eine kommerzielle Umsetzung dar. Folgende Innovationen sind im Projekt entstanden:

1. Es konnte eine intelligente Regeleinheit auf Basis der modellprädiktiven Regelung entwickelt werden. Basis für die Regelstrategie war ein Neuronales Netzwerk (Methode der Künstlichen Intelligenz), das sowohl mithilfe von Simulationsergebnissen als auch Messdaten aus den Testräumen trainiert und evaluiert wurde. Eine sinnvolle minimale Sensorkonfiguration von nur drei Sensoren wurde darin festgelegt. Weiters in die Mechanik und Steuerung inkludiert wurde die Option zur Spaltlüftung mittels teilweise geöffneter Außenflügel, welche die Wärmeabfuhr aus dem Kastenfensterzwischenraum ermöglicht und so die Effizienz von darin befindlichen Sonnenschutzbehängen wesentlich erhöht.
2. Durch umfangreiche Strömungssimulationen (CFD) und Tracergas-Messungen konnten die Einflussfaktoren auf den Raumluchtwechsel bei Fensterlüftung detailliert bestimmt und aus der Ergebnisanalyse eine Methodik zur Potentialabschätzung der ventilativen Kühlung identifiziert werden.
3. Im Projekt konnte zusätzlich zur ursprünglichen Planung eine Methode entwickelt werden, wie die Tageslichtversorgung eines Raumes, basierend auf dem Stand der Technik ohne dezidierten Simulationsaufwand berechnet werden kann. Das daraus abgeleitete Modell wurde in Normungskomitees eingebracht und steht damit zukünftig über die Normung breitenwirksam zur Verfügung.

Methodisch folgte das Projekt einem transdisziplinären Ansatz aus empirischer und simulationsbasierter Analyse der entwickelten Konzepte. Grundlagen dafür waren sowohl Daten aus der Literatur als auch ein über die gesamte Projektdauer durchgeführtes Langzeitmonitoring. Folgende wesentliche Ergebnisse können genannt werden:

- Es besteht in Österreich ein nächtlich nutzbares Kühlpotential, das sich insbesondere in den Übergangsjahreszeiten effizient nutzen lässt, auch wenn sich die Anzahl der durch den Klimawandel nutzbaren Nächte reduziert bzw. jahreszeitlich verschiebt.
- Für die modellprädiktive Regelung konnten Rahmenbedingungen erforscht werden und die Eignung für eine maximale nächtliche Speichermassenentladung unter Minimierung der Fensteröffnungszyklen auf einen einzigen Öffnungs- und Schließvorgang nachgewiesen werden. Dies jedoch unter gewissen Voraussetzungen.
- Es wurde gezeigt, wie sich Blendschutz unter guter Tageslichtnutzung bei alten Gebäuden mit hohen Räumen und Fenstern vereinbaren lassen.
- Es konnte an der Universität für Weiterbildung Krems und der Wiener Hofburg demonstriert werden, dass Kastenfenster unterschiedlicher Bauart (Wiener und Grazer Typ) für die ventilative Kühlung automatisiert werden können. Insbesondere wurde in der Wiener Hofburg ein minimal invasiver Einbau umgesetzt, der nicht nur funktional ist, sondern auch den Anforderungen des Denkmalschutzes entspricht.
- Wirtschaftlich gesehen punktet dieses System durch geringere Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu mechanischen Kühlkonzepten. Die Energiekosten für die Kettenantriebe sind so gering, dass sie de facto keine Rolle in den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen spielen.

Besonders hervorzuheben ist die Umsetzung in der Hofburg Wien, bei der ein Kastenfenster mit vier Fensterflügeln nicht nur mit nur zwei Motoren für die ventilative Nachtkühlung automatisiert werden konnte, sondern die Lösung auch den Anforderungen des Denkmalschutzes entsprach.

Verschattung und Fenster als Komponenten zur natürlichen Lüftung und Kühlung einzusetzen ist nichts Neues und wurde bereits in der Antike angewendet. Heute können diese Komponenten jedoch automatisiert und zur Potentialhebung derer Effekte eingesetzt werden. Zukünftige technische Entwicklungen sind Systembausätze, mit denen (Kasten-)Fenster mit nur geringem Vorbereitungsaufwand direkt vor Ort unkompliziert automatisiert werden können. Selbstlernende Algorithmen, die sich automatisch an die jeweils vorhandenen Umgebungen und Nutzungsszenarien anpassen, wären weitere Schritte. Letztendlich werden steigende Energiepreise aber auch legislative Maßnahmen passive Kühlkonzepte bzw. hybride Konzepte deutlich attraktiver machen.

Gebäude können nur durch ein Bündel von Maßnahmen dem Klimawandel angepasst werden. Dieses Forschungsprojekt hat Grundlagen geschaffen, Gebäude passiv und damit energieeffizienter zu kühlen.

2 Abstract

Planners, building facility managers and users are increasingly setting a focus on the cooling of buildings. Especially in office and administrative buildings, air-conditioning units have become indispensable even in our latitudes. Room temperatures of over 30 °C in summer are no longer uncommon. In many cases, the entire period outside the heating season must now be considered a cooling period. The increase in outdoor temperatures due to climate change, an increase in heating loads due to solar gain from large windows or glass surfaces and an increase in internal heating loads due to technical equipment in general contribute to a rapid raise in cooling energy demand.

CoolAIR pursued the approach of a resource-saving reduction of cooling energy demand through energy-efficient natural night ventilation in combination with daylight-optimized shading. The aim was to develop an automated and predictive model-based control strategy for such a low-tech approach. By breaking down the control to room level, a highly flexible system is created that can fully utilize the passive cooling potential through night ventilation by using and partially automating already existing ventilation openings, without interconnection through a central building management system, and by means of Plug&Play.

The project results provide a valuable basis for further development work as well as for commercial implementation. The following innovations were developed in the project:

1. An intelligent control unit based on model predictive control was developed. The basis for the control strategy was a neural network (artificial intelligence method), which was trained and evaluated with the help of simulation results as well as measurement data from the test rooms. A reasonable minimum sensor configuration of only three sensors was defined in it. Furthermore, the option for partially opened outer casements was included in the mechanics and control system, which enables heat to be dissipated from the space between the box-type windows and thus significantly increases the efficiency of the sunshade hangings located in them.
2. Through computational flow simulations (CFD) and tracer gas measurements, it was possible to determine in detail the factors influencing room air exchange during window ventilation and to identify a methodology for estimating the potential of ventilative cooling from the results analysis.
3. In addition to the original planning, the project was able to develop a method for calculating the daylighting of a room without the need for a dedicated simulation. The model derived was introduced into standardization and will thus be available to a broad public in the future.

Methodologically, the project followed a transdisciplinary approach of empirical and simulation-based analysis of the developed concepts. The basis for this was both data from literature and long-term monitoring carried out over the entire duration of the project. The following main results can be mentioned:

- The night-time cooling potential in Austria can be used efficiently, especially in the interim periods, even if the number of nights that can be used due to climate change is reduced or shifted seasonally.

- For the model predictive control, framework conditions have been researched and the suitability for a maximum nightly discharge of heat storage mass with minimisation of the window opening cycles to one has been proven.
- It was shown how glare protection can be combined with good daylight utilisation in old buildings with high rooms and windows.
- It was demonstrated at the University of Continuing Education Krems and the Hofburg Vienna that box-type windows of different designs (Viennese and Graz type) can be automated for ventilative cooling. A minimal-invasive application was implemented at the Hofburg Vienna, which is not only functional but also complies with the requirements for the protection of historical buildings.
- From an economic point of view, this system scores with lower investment and operating costs compared to mechanical cooling concepts. The energy costs for the drives are so low that they are negligible in the economic considerations.

Particularly noteworthy is the implementation in the Hofburg Vienna, where a box-type window with four casements could not only be automated with only two motors for ventilative night cooling, but the solution also met the requirements of monument protection.

Using shading and windows as components for natural ventilation and cooling is nothing new and was already used in ancient times. Today these components can be automated and used to enhance their potential effects. Future technical developments are system kits with which (box) windows can be automated directly on site in an uncomplicated way with only little preparation effort. Self-learning algorithms automatically adapting to the existing environments and usage scenarios will also be future areas of interest. Finally, rising energy prices as well as legislative measures will make passive cooling concepts or hybrid concepts much more attractive.

Buildings can only be adapted to climate change through a bundle of measures. This research project has created the basis for cooling buildings passively and thus more energy-efficiently.

3 Ausgangslage

3.1. Steigender Kühlbedarf von Gebäuden

Der Kühlenergiebedarf von Gebäuden nimmt immer mehr an Bedeutung zu. Vor allem im Bereich von Büro und Verwaltungsgebäuden sind Klimageräte auch in unseren Breitengraden nicht mehr wegzudenken. Raumtemperaturen im Sommer über 30 C sind keine Seltenheit und führen zu einer signifikanten Einschränkung der Leistungsfähigkeit des Personals [2]. In vielen Fällen muss zwischenzeitlich die gesamte Zeit außerhalb der Heizperiode als Kühlperiode betrachtet werden. Als Grund für den rapiden Anstieg des Kühlenergiebedarfs können mehrere Faktoren genannt werden:

Anstieg der Außentemperaturen durch den Klimawandel: Durch die Industrialisierung und den damit verbundenen anthropogenen Klimawandel ist in Österreich seit 1950 eine erhebliche Zunahme der Lufttemperatur zu verzeichnen. Auch für die Zukunft zeigen unterschiedliche Szenarien übereinstimmend signifikante Anstiege der jährlichen wie auch saisonalen Mitteltemperatur in ganz Österreich [11]. Aufgrund des urbanen Hitzeinseleffektes ist in urbanen Räumen mit einem noch deutlicheren Anstieg der Temperaturen zu rechnen. Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist in städtischen Gebieten mit einer Verdoppelung der Tropennächte mit Nachttemperaturen über 20° zu rechnen [38].

Erhöhung der äußeren Wärmelasten durch eine Zunahme solarer Erträge: Durch die energetische Weiterentwicklung im Fenstersegment ist es möglich geworden, mittels großzügigen Glasflächen helle lichtdurchflutete Räume zu schaffen. Der damit einhergehende höhere solare Energieeintrag kann zwar im Winter den Heizwärmebedarf reduzieren, führt aber gleichzeitig zu einem erheblichen Anstieg des Kühlenergiebedarfs. Zudem führen hochverglaste Außenflächen insbesondere bei Bildschirmarbeit zu einem erhöhten Blendschutz- und damit Verschattungsbedarf, wodurch oftmals sogar tagsüber die Beleuchtungsmittel aktiviert werden müssen, was wiederum zu höheren inneren Wärmelasten führt. Neben großen Fensterflächen führen auch unzureichende Verschattungsmaßnahmen und falsches Nutzerverhalten (z.B. zu späte Verschattungsaktivierung) zu hohen solaren Energieeinträgen, die nicht nur im Neubau sondern auch bei bestehenden Gebäuden einen Großteil der Kühllasten verursachen [2].

Erhöhung der inneren Wärmelasten: Die inneren Wärmelasten nehmen aufgrund der Zunahme an EDV-Geräten und elektronischen Arbeitshilfen v.a. im Bürobau mittlerweile einen immens hohen Stellenwert ein. Vor allem im Zusammenhang mit höheren Belegungsdichten können die inneren Lasten einen wesentlichen Anteil des Kühlenergiebedarfs ausmachen. Die Beleuchtung nimmt im Neubau eine eher untergeordnete Rolle ein, in Bestandsgebäuden kann sie durch ineffiziente Leuchtmittel und nicht vorhandener oder unzureichender Lichtregelung trotzdem zu bedeutenden Wärmelasten führen [6].

Hoher Dämmstandard der Gebäudehülle: Durch die hohen thermischen Anforderungen an Gebäuden gemäß der EU-Gebäuderichtlinie [20], respektive der in Österreich umgesetzten OIB Richtlinie 6 [43], konnte der Heizwärmebedarf von Neubauten in den letzten Jahren drastisch gesenkt werden. In einer dänischen Studie der Aalborg University [39] konnte jedoch auch festgestellt werden, dass bei hochwärmegeprägten und luftdichten Gebäuden die Problematik der sommerlichen Überwärmung bereits in den Übergangszeiten und teilweise sogar in den Wintermonaten gegeben ist. Durch den

relativ niedrigen Sonnenstand im Frühjahr und Herbst waren dabei auch konstruktive Vorstände zur Beschattung wirkungslos. Einzig Gebäude mit effizienten Außenverschattungselementen und/oder ventilativen Kühlsystemen wiesen signifikant geringere Tage mit Überhitzungspotential auf. Dies zeigt, dass gerade im Bereich von Neubauten, aber auch bei thermisch sanierten Bestandsgebäuden dem Kühlenergiebedarf mehr Gewicht als in den derzeit gültigen Richtlinien beizumessen ist.

Um eine aktive Kühlung mit hohem energetischem Aufwand zu vermeiden, müssen Wege gefunden werden, die Gebäude passiv (also ohne aktive Kühlsysteme) auf eine entsprechend angenehme Raumtemperatur abzukühlen. Neben architektonischen und bautechnischen Maßnahmen wie z.B. Beschattungsvorrichtungen sowie der Verwendung massiver Baustoffe spielt dabei vor allem die nächtliche Abkühlung durch eine ausreichende Lüftung eine maßgebliche Rolle.

Lt. Eicker/Schulze [19] sind durch eine gezielte Nachtlüftung Raumtemperaturabsenkungen bei optimalen Bedingungen bis zu 6 K möglich. Im Normalfall werden Absenkungen von 1-3 K erzielt. Wobei für die Funktionsfähigkeit der Kühlung durch natürlichen Lüftung, Kühllasten von weniger als 30W/m² und eine ausreichend thermische Masse empfohlen werden.[18] Gemäßigte Klimazonen mit einer großen Tag/Nacht-Temperaturspanne sind prinzipiell sehr gut für Nachtlüftungen geeignet. Lt. Artmann/Manz/Heiselberg [5] bietet das Klima in Mitteleuropa dafür auch in Zukunft sehr günstige Bedingungen [5], obwohl die Problematik urbaner Wärmeinseleffekte die Wirksamkeit einer Nachtlüftung im städtischen Bereich beeinträchtigen wird.

3.2. Lösungsansatz ventilative Kühlung

Die Potentiale und Einsatzbereiche der natürlichen Kühlung mittels Nachtlüftung wurden u.a. im IEA-EBC Annex 62 untersucht. Die Ergebnisse in Form einer Roadmap zeigen, dass ein „*vielfacher Entwicklungsbedarf in der Systemintegration der Mess-Regel-Steuertechnik von Ventilativer Kühlung*“ und hier v.a. in der „*simplen, dezentralen Einheiten aus Sensor, Regeleinheit und Stellantrieb als auch an gut aufeinander abgestimmten Komponenten (Sensoren, Aktoren, Regler) zur Systemintegration*“ besteht.[32] In weiterer Folge wurde der IEA EBC Annex 80 – Resilient Cooling of Buildings¹ initiiert für den das vorliegende Projekt einen maßgeblichen Input im bereits bestehenden internationalen Netzwerk liefert.

Bisherige Publikationen und Forschungsarbeiten befassen sich v.a. mit den automatisierten Zielwertbestimmungen wie CO₂-Konzentrationen und Innenraumtemperatur.[4][28][12] Derartige Ansätze wurden in den letzten Jahren verstärkt im Bereich von Sanierungen großer Dienstleistungsgebäude zumindest als unterstützendes System zur Kühlung angewandt. Beispielsweise wurde bei der Sanierung des Chemiehochhauses der TU Wien neben der Installation eines Sonnenschutzes und der Optimierung der inneren Lasten durch Geräte auch der Gebäudekern über einen Schacht zur Nachtlüftung des Gebäudes genutzt, indem die Aufenthaltsräume thermisch an den Kern gekoppelt sind. Auch die Universität Innsbruck nutzt den Effekt der natürlichen Nachtlüftung über den Gebäudekern, indem die Räume mittels Überstromöffnungen an den Oberlichten an den Gangbereich gekoppelt sind. In beiden Fällen findet jedoch keine prädiktive Steuerung von Fenstermotoren statt, welche das Potential der Nachtlüftung um ein Vielfaches vergrößern würde.

¹ <https://annex80.iea-ebc.org/>

Die Forschungsprojekte KonLuft [18] und HybVent [29] sind in ihren Untersuchungen dabei schon einen Schritt weiter gegangen, indem sie auch prädiktive Strategien zur Regelung auf Basis von extern zur Verfügung gestellten Wettervorhersagen einsetzen. Im Gegensatz zu CoolAIR weisen diese Projekte statische, an die Räume angepasste Regelmodelle auf und nutzen zur Verteilung der Steuerbefehle eine zentrale Gebäudeleittechnik sowie externe Daten wie Wetterberichte.

Auch die Steuerung von Verschattungseinrichtungen erfolgt meist zentral direkt über die Helligkeit (Lichtsensor). Teilweise werden diese auch jahreszeitenabhängig unterschiedlich angesteuert und mit externen Wettervorhersagen verknüpft. Nachteilig dabei ist, dass die Lichtqualität z.B. durch nicht optimale Lamellenposition in den Räumen variieren kann und die Steuerung nicht raumindividuell ist was dazu führt, dass Arbeitsbereiche zu viel oder zu wenig beschattet werden und die Systeme von den NutzerInnen zumindest temporär deaktiviert werden. Zusätzlich stellt die Gewerketrennung (Fassade / E-Technik) ein weiteres großes Hindernis für eine optimale Parametrisierung und Einstellung dar und führt dazu, dass oft unzureichend geregelt bzw. nicht nachjustiert wird.

Ein weiteres Problem in der Anwendung ventilativer Kühlung besteht unter anderem auch darin, dass die natürliche Lüftung sowohl in nationalen als auch internationalen Normen und Richtlinien nicht oder nur unzureichend abgebildet wird. Geeignete Rechen- und Planungsmethoden sind ebenso wie der Effekt auf den Kühlenergiebedarf undefiniert bzw. schlichtweg nicht vorhanden. Dies wurde im internationalen Projekt Venticool (IEA – Annex 62) bestätigt [27]. Zwar gibt es bereits einige Forschungsberichte, die sich mit der Entwicklung einfacher Planungstools und Rechenmethoden beschäftigen,[8][18][23][13] dennoch stellt dies eine der größten Herausforderungen im Bereich der ventilativen Kühlung dar. Für die Abbildung der natürlichen Nachtlüftung können dabei zwei relevante Antriebsfaktoren identifiziert werden: thermische Auftriebskräfte durch Temperatur und damit Dichteunterschiede zwischen dem Luftvolumen im Inneren und einer gleich hohen Luftsäule außerhalb des Gebäudes und Winddruckkräfte, die an Fassaden und Dächern für lokale Über- und Unterdrücke sorgen. Die Auftriebskräfte stehen in direktem Zusammenhang mit dem Wärmeübergang zwischen der durchströmenden Raumluft und den Bauteiloberflächen, welcher in den meisten Simulationsansätzen unter Inkaufnahme großer Unsicherheiten mit empirischen Gleichungen abgeschätzt wird. Die Winddruckkräfte hängen von den lokalen Umgebungsverhältnissen ab und unterliegen zudem großen statistischen Schwankungen. Selbst wenn Auftriebs- und Winddruckkräfte bekannt sind, hängt der resultierende Luftvolumenstrom vom komplexen Widerstandsnetzwerk der Luftwege (Stromfäden) im Inneren des Gebäudes ab, für dessen Einzelwiderstände wiederum nur Richtwerte existieren.

Das Projekt Komfort Büro [51] wählte diesen Ansatz jedoch ohne strömungsmechanischer Koppelung mit den umgebenen Räumen, sodass die Volumenströme direkt als Randbedingung aufgeprägt wurden. CoolAIR geht hier einen Schritt weiter indem neben dem gekoppelten Stromfadenmodell innerhalb der CFD Simulation das thermische Verhalten der angrenzenden Bauteile dreidimensional mitberücksichtigt wird. Diese Koppelung von CFD mit weiteren Simulationsansätzen wird generell als vielversprechende Lösung für die exakte Berechnung angesehen, steht jedoch noch am Beginn der Entwicklung, da auch von Seiten der CFD Simulation etwa Strategien zur Behandlung von wandnahen Strömungen oder die verwendeten Turbulenzmodelle als offenen Punkte angesehen werden können. In Sachen vereinfachter Planungstools schlägt IEA/Annex 62 [27] für zukünftige Forschungen einen statistischen Ansatz vor, in dem die kaum bezifferbaren Randbedingungen thermischer Auftrieb und Winddruckkräfte in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in einfachen Modellen berücksichtigt werden.

Auch das Projektkonsortium hat auf den obigen Gebieten langjährige Erfahrung und betreibt intensive Forschung, die als Grundlagen für dieses Projekt dienen:

Im FFG Projekt Klima-Engineering Neue Burg wurden die Potentiale unterschiedlicher Low-Tech-Ansätze wie z.B. die Verwendung denkmalverträglicher Verschattungselemente und die Nutzung vorhandener Luftbrunnen zur natürlichen Kühlung untersucht und Lösungen zur Verbesserung der innenraumklimatischen Situation erarbeitet. Anwendungsbeispiele waren die umsichtige Verbesserung der Gebäudehülle und die Erneuerung haustechnischer Anlagen der Hofburg Wien.

Zur Reduktion des Energieverbrauchs in Industriebetrieben wurden im Projekt MANUbuilding Gebäude- und Fertigungsautomation verbunden, um automatisiert Synergien zwischen Fertigungsprozessen und dem energetischen Bedarf des Gebäudes zu nutzen. Eines der wesentlichen Forschungsgebiete des ZISS/UWK in diesem Projekt war die Erkennung von Situationen auf MES-Ebene (Manufacturing Execution System). Die in MANUbuilding gemachten Erfahrungen zur modellbasierten Regelung und prädiktiven Steuerung wurden gewinnbringend angewendet und wesentlich erweitert.

4 Projektinhalt

4.1. Forschungsansatz

Um das Potential der passiven Kühlung bestmöglich ausschöpfen zu können, müssen sowohl die Kühlung als auch die tageslichtoptimierte Verschattung automatisch und in einer sinnvollen Kombination geregelt werden. Die im Gebäude vorhandenen Speichermassen können nur dann genutzt werden, wenn sie täglich, durch eine ausreichende Nachtlüftung „entladen“ werden. Ansonsten haben derartige Speichermassen sogar einen negativen Effekt, weil sie die tagsüber gespeicherte Wärme nachts wieder abgeben und damit den Raum zusätzlich phasenverschoben aufheizen. Lt. Ferk [22] ist „eine relevante temperaturabsenkende Wirkung der Speichermassen nur unter der Voraussetzung einer den Speichermassen entsprechenden kühlungswirksamen Lüftung gegeben“. Vielmehr noch konnte die wesentlich höhere Wirksamkeit einer passiven Kühlung durch Nachtlüftung im Vergleich zu speicherwirksamen Massen in der Studie belegt werden.

Bisherige Systeme setzten entweder auf eine manuelle oder auf eine gebäudezentrale Regelung, die nur durch einen ausgebildeten Techniker programmiert, kalibriert und gewartet werden kann. Selten bis kaum findet dabei eine kombinierte und gegenseitig abgestimmte Steuerung der Lüftung und Verschattung statt.

Im Projekt CoolAIR wurde deshalb ein raumbasierter Ansatz gewählt, der ohne große Konfigurationstätigkeiten sowohl die Beschattung als auch die Fensterflügel zur Kühlung ansteuert. Das Systemkonzept ist in Abbildung 1 dargestellt. Jeder Raum besteht aus einer Motoreinheit zum Öffnen der Fenster, einer aktiven beweglichen Verschattung, einer minimalen Anzahl an (bei Bedarf auch drahtlos angebundenen) Sensoren sowie einer passiven Lüftungsöffnung ins Gebäudeinnere (Türspalte, Oberlichter, Lüftungsgitter).

Wie in Abbildung 1 dargestellt ist in der Steuereinheit eine modellbasierte prädiktive Regelung (MPC) implementiert, die auf Basis der Sensordaten den Luftstrom über die Fenster sowie die Verschattungselemente regelt. Einflüsse des Gesamtgebäudes wie Kamineffekte oder sich einstellende Querlüftung werden dabei nur über die resultierenden Luftströme an der Raumgrenze abgebildet, die entweder direkt über Strömungssensoren oder indirekt über den Temperaturverlauf erfasst werden.

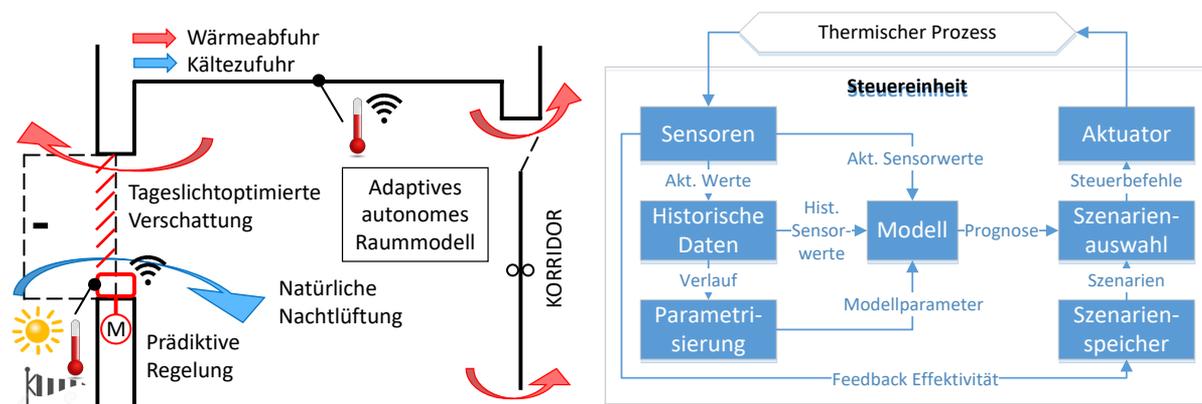


Abbildung 1: Systemkonzept (links) und Prozessgrafik (rechts)

Der geringe Installations- und Engineeringaufwand des Systems erlaubt zudem einen Einsatz in einer Vielzahl von Gebäuden vom Neubau über Bestandsbauten und historischen bis hin zu denkmalgeschützten Gebäuden.

4.2. Zielsetzung des Projektes

Das Projekt CoolAIR verfolgt einen innovativen Low-Tech-Ansatz, um mittels autonomer modellbasierter prädiktiver Regelung die (operative) Raumtemperatur durch natürliche Nachtlüftung in Verbindung mit einer tageslichtoptimierten Verschattung zu regeln und dadurch eine Überhitzung zu vermeiden bzw. hintanzustellen. Die Lüftung wird lediglich durch die Nutzung und teilweise Automatisierung bereits vorhandener Lüftungsöffnungen (Fenster, Braundrauchentlüftungen, Türschlitze, etc.) gewährleistet. Die Ansteuerung der Lüftung sowie der Verschattung erfolgt raumweise ohne Notwendigkeit zur (IT) Vernetzung der einzelnen MSR-Einheiten, womit ein minimaler Engineering- und Installationsaufwand gewährleistet wird. Speziell analysiert wurde eine Anwendung in denkmalgeschützten Dienstleistungsgebäuden.

Die technische Zielsetzung konzentriert sich dabei auf

- die Entwicklung eines adaptiven, thermischen Raummodells, das in ausreichender Genauigkeit über einen Zeitraum von 12 Stunden das Raumverhalten vorhersagt, sowie
- die Implementierung einer intelligenten Regeleinheit, die aus dem individuellen Raummodell unter Nutzung von minimaler Sensorik autonom und modellbasiert Steuerbefehle zur Raumtemperaturreglung ableitet.
- die Untersuchung des Kühlpotentials ventilativer Nachlüftung bei Nutzung vertikaler Gebäudestrukturen und Querlüftung

4.3. Methodik

Basis für die modellbasierte Regelung ist ein reduziertes thermisches Modell, das auf eingebetteten Mikrocontrollern ausführbar ist. Im Projekt wurde sowohl ein elektrisches (R-C-) Ersatzmodell als auch ein neuronales Netz (KI-Modell) verwendet, wobei besonderes Augenmerk sowohl auf das langfristige Verhalten zur Prognose als auch auf die Berücksichtigung kurzfristiger dynamischer Vorgänge gelegt wird, um Änderungen der Sensordaten rasch interpretieren zu können. Ziel war es, das Modell dabei so zu gestalten, dass es automatisiert parametrisierbar und konfigurierbar ist. Die Parametrisierung erfolgt durch maschinelles Lernen z.B. mittels neuronaler Netzwerke, wobei eine Kombination aus trainierten Grundkonfigurationen für verschiedene Raumklassen angewendet wird.

Voraussetzung zur Entwicklung eines autonomen Raummodells ist die Identifikation relevanter Einflussgrößen sowie die detaillierte Charakterisierung beteiligter physikalischer Effekte, weshalb sowohl umfangreiche experimentelle als auch simulationsgestützte Untersuchungen durchgeführt wurden. Als Basis dafür wurden an der UWK und in der Wiener Hofburg vorhandene Räumlichkeiten mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet und flexibel mit unterschiedlichen Lüftungsszenarien bespielt. Zur akkuraten Bestimmung der Raumluftwechsel und Volumenströme kam zusätzlich ein mobiles Tracergas Messequipment zum Einsatz. Die generierten Basisdatensätze dienen in weiterer

Folge zur Kalibrierung und Verifizierung eines gekoppelten Simulationsansatzes sowie zur Planung des Testsetups.

Parallel zur Datenerfassung erfolgte die Identifizierung eines Stromfadennetzwerkes, das über die messtechnisch erfassten Testräume hinaus die Struktur der Luftwege abbildet und als Randbedingung für eine hochauflösende CFD Strömungssimulation dient. Dies ist in Einklang mit dem Annex 62 [26], der auch Forschung in Richtung hochauflösender CFD Strömungssimulationen anregt, um auf Raumebene die Strömungsverhältnisse akkurat darstellen zu können. Die Ergebnisse der rechenintensiven CFD Simulationen erlaubten ein tiefgreifendes Systemverständnis sowie die Vereinfachung der komplexen, instationären Strömungsvorgänge zu Luftwechselkennfeldern, die anschließend in eine thermisch dynamische Gebäudesimulationen über die gesamte Kühllastperiode einfließen. Darüber hinaus wurde auf Basis der thermisch dynamischen Simulation eine Potentialanalyse der Verschattung durchgeführt, um feststellen zu können, inwieweit die Nachtabkühlung über den Tag transportiert werden kann und wie sehr das Verhalten bzw. die Positionierung der Verschattung die Nachtkühlung beeinflusst.

Vorrangig wurde dabei herausgearbeitet inwieweit es möglich ist, Regel- und Entscheidungsfindungsalgorithmen zu definieren, die im Sinne einer Low-Tech Lösung eine Konzentration von Aktuator(en) und Sensor(en) im Bereich des Fensters erlauben, um damit die Systemkomplexität und den Installationsaufwand zu reduzieren. Durch Simulationen konnte hier der Einfluss von Anzahl, Art und Position von im Raum auch ggf. abgesetzten Sensoren bewertet werden.

Die Ergebnisse wurden aber auch dazu verwendet, um durch Simulationen und Messergebnisse validierte verbesserte Berechnungsansätze für das tatsächliche Verhalten der Beschattungen inkl. Verglasung (g_{tot}) bereit zu stellen und auf Grundlage des bereits identifizierten Stromfadenmodells neue Methodiken zur Abschätzung des Kühlpotentials der natürlichen Nachtlüftung für die Gebäudeplanung aufzuzeigen. Damit konnten neue bzw. verbesserte Ansätze in die Normung eingebracht werden.

4.4. Projektinnovationen

Die Hauptforschungsfrage, ob es möglich ist mit einem kombinierten Ansatz aus ventilativer Nachtlüftung und tageslichtoptimierter Verschattung Gebäude zu kühlen bzw. kühl zu halten, konnte mit folgenden nachstehenden Projektinnovationen beantwortet werden. Detailfragen zur Nutzung vorhandener Gebäudeelemente wie Fenster, Kamineffekte in Stiegenhäusern oder notwendige Sensorinformationen wurden erforscht und sowohl simulationsgestützt (CFD- und dynamische multizonale Gebäudesimulation) als auch experimentell untersucht und validiert.

Kern des Lösungsansatzes ist eine modellbasierte prädiktive Regelung, die Modelle auf Basis von neuronalen Netzen nutzt, um den Raum mittels Nachtlüftung optimal zu kühlen und die Komfortgrenzen am Morgen einzuhalten. Diese Steuerung hat den Vorteil, dass sie minimal invasiv aufgebaut werden kann. Um den Installations- und Betriebsaufwand zu minimieren wurde Sensorik und Aktuatorik möglichst an den Fenstern konzentriert und in Richtung Gebäudekern passive (Bau-)Elemente (Schlitze, Türspalte ...) verwendet. Mit drei über Funk angebotenen Sensoren konnte eine minimale Konfiguration gefunden werden.

Um auch tagsüber eine Optimierung des Benutzerkomforts während der Nutzungszeiten des Gebäudes zu gewährleisten, wurde ein tageslichtoptimiertes Verschattungskonzept entwickelt und umgesetzt. Die kombinierte Steuerung regelte dieses aktiv für den Erhalt der Raumtemperatur bei gleichzeitig sehr guten Tageslichtverhältnissen im Raum. Durch die kombinierte Steuerung von Verschattung und Nachtlüftung konnte das Kühlpotential wesentlich effizienter genutzt werden.

Aber auch auf theoretischer und normativer Seite wurden wichtige Ergebnisse erreicht: Ein kombinierter Ansatz aus Stromfadentheorie und CFD Simulation zur exakten Abbildung der Strömungsverhältnisse und eine nachgeschaltete dynamische Gebäudesimulation über die gesamte Kühllastperiode wurden genutzt, um damit neben einer prädiktiv modellbasierten Regelung schlussendlich auch eine vereinfachte Methodik zur Potentialabschätzung der natürlichen Nachtlüftung in der Planung ableiten zu können. Die Teilergebnisse aus dem Verschattungsbereich konnten bereits während der Projektlaufzeit in das Normungswesen eingebracht werden.

5 Ergebnisse

5.1. Evaluierungsmessungen und Datenanalyse

5.1.1. Potentialanalyse unter klimatischen Randbedingungen

Der Energietransport und die damit einhergehende Kühllast, die mittels Fensterlüftung für den betrachteten Raum verringert werden kann, hängt im Wesentlichen vom realisierbaren Luftwechsel bzw. Massenstrom sowie der Temperaturdifferenz zwischen der Innenraum- und der Außenluft ab. In einem ersten Schritt soll das verfügbare Potential der Nachtlüftung unter den klimatischen Randbedingungen, d.h. in ausschließlicher Abhängigkeit der Außenlufttemperaturen, untersucht werden.

Die Datengrundlage für die nachfolgenden Auswertungen bildet die Meteonorm Datenbank von Meteotest (2017). Die für das Projekt aktuellsten verfügbaren Datensätze für Temperatur und Strahlung basieren auf der Periode 2000 bis 2009. Abbildung 2 gibt einen Überblick der aus der Datenbank zu exportierenden Standorte im und um das österreichische Staatsgebiet. Für eine flächendeckende Analyse wurden aus Jahrestemperaturdaten der verfügbaren Standorte neue Temperaordaten für ca. 1000 gleichverteilte Standorte interpoliert. Die Contour-Grafik der derart ermittelten Jahresmitteltemperatur entspricht mit guter Übereinstimmung der Jahresmitteltemperaturverteilung aus den Daten der nationalen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

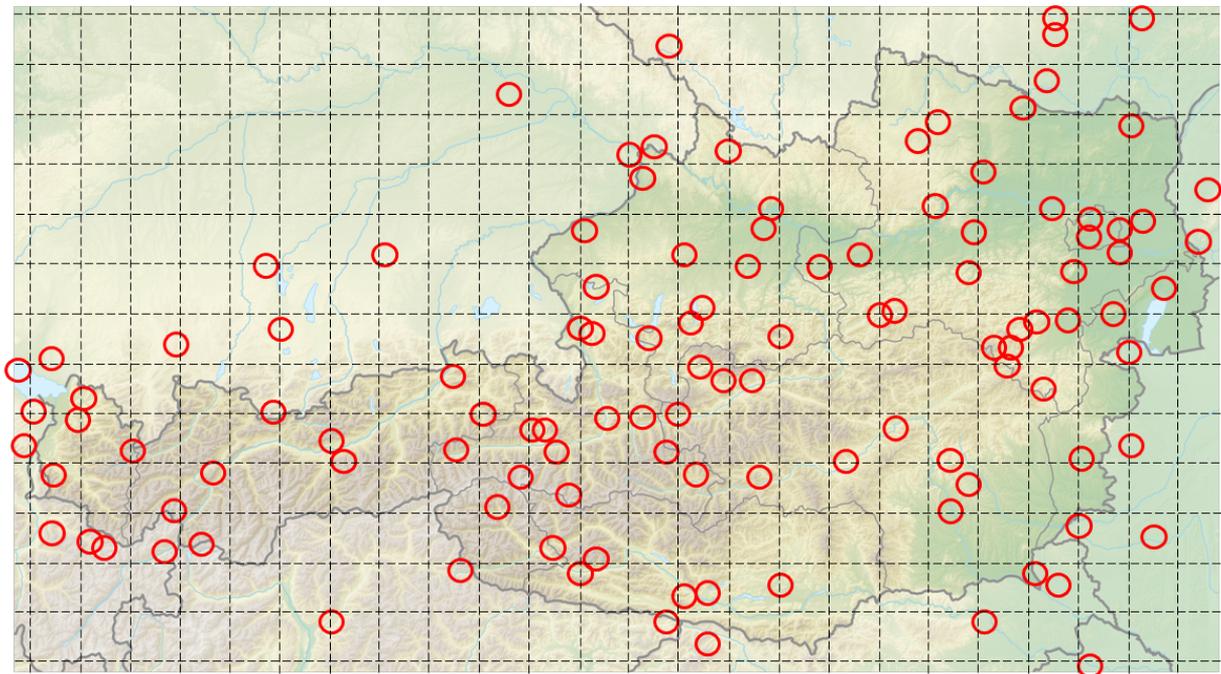


Abbildung 2: Verteilung der verwendeten Messstationen in der Meteonorm Datenbank (rot) und daraus interpolierte, gleichverteilte Standorte für eine flächendeckende Analyse -Schnittpunkte (schwarz strichliert) (adaptiert)

Für die Analyse des Nachtlüftungspotentials können, in Anlehnung an die Methodik von Artmann et al. [5], die verfügbaren Kühlgradstunden je Tag aus einer Gegenüberstellung eines beliebigen Außentemperatur-Jahresdatensatzes zu einem synthetischen Innenraumtemperaturprofil errechnet

werden. Die Festlegung des synthetischen Innenraumtemperaturprofils erfolgte anhand einer Messdatenanalyse des klimatisierten Forschungsgebäudes ENERGETIKUM am Campus der FH Burgenland in Pinkafeld, innerhalb der vier (kontinuierlich) heißesten Wochen im Jahr 2018. Abbildung 3 zeigt die Stundenmittelwerte der fünf in der Analyse einbezogenen Räume mit unterschiedlicher Orientierung. Trotz Klimatisierung sind Differenzen zwischen minimaler und maximaler Raumtemperatur im Bereich von zwei Kelvin vorhanden, deren Phasenverschiebung sich nach der Fassadenausrichtung orientiert. Das in der Literatur vorgeschlagene Temperaturprofil entspricht für die Phasenverschiebung dem exemplarisch für Österreich gewählten Standort einer Westausrichtung, mit dem Maximalwert um ca. 19:00 Uhr Ortszeit. Zur Anpassung der Potentialabschätzung an die lokalen Verhältnisse werden zwei neue synthetische Temperaturprofile vorgeschlagen, die den Hochpunkt jeweils um 17:00 Uhr aufweisen. Die beiden Profile weisen eine Amplitude von +/- 2 bzw. 3 K und einen Mittelwert von 24 bzw. 25 °C auf und repräsentieren zwei unterschiedliche Akzeptanz-Niveaus in Bezug auf den thermischen Komfort.

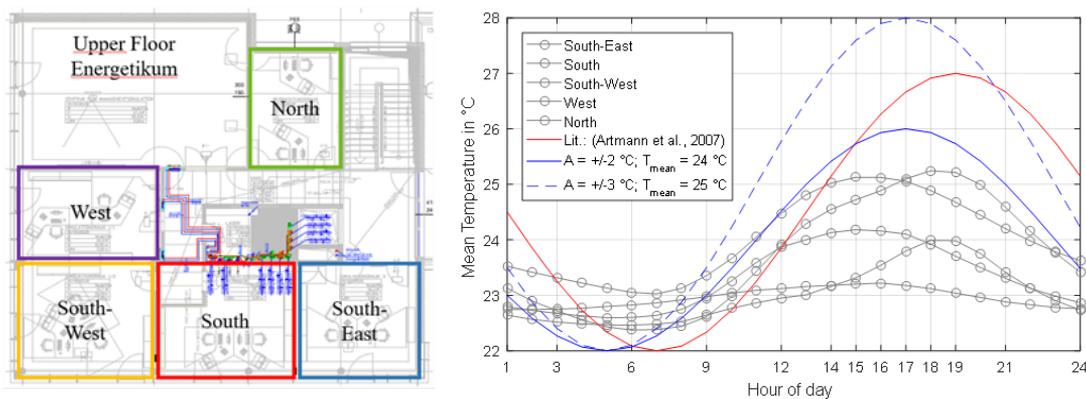


Abbildung 3: Ausrichtung der Vergleichsräume (links) und deren Stunden-Mitteltemperaturen in den vier heißesten Wochen 2018 in grau, synthetisches Temperaturprofil aus der Literatur in rot und in der Potentialanalyse verwendete synthetische Temperaturprofile in blau (rechts)

Abbildung 4 zeigt das errechnete Nachtlüftungs-Potential in Kühlgradstunden je Tag an fünf exemplarischen Standorten, für zwei unterschiedliche hinterlegte Innenraum-Temperaturprofile mit hohem und niedrigem thermischem Komfort. Unter Annahme einer absoluten Einsatzgrenze der Kühllastabfuhr durch Nachtlüftung von mindestens 20 Kh je Tag (schwarz strichlierte Linie) und der Akzeptanz eines niedrigen thermischen Komforts, ist für den Wiener Temperaturdatensatz an ca. 30 Tagen pro Jahr kein ausreichendes Potential vorhanden. Für viele Vergleichsstandorte (z.B. Klagenfurt, Linz, etc.) reduziert sich dieser Wert auf unter 10 Tage pro Kalenderjahr. Werden die Anforderungen an die Potentialauswertung verschärft, d.h. eine Forderung von mindestens 50 Kh Nachtlüftungspotential (schwarz durchgezogene Linie) kombiniert mit einem Temperaturprofil für hohen thermischen Komfort, sind für Wien bereits 65 Kalendertage nicht mehr zur Nachtlüftung geeignet. Bei der Annahme verschärfter Anforderungen an die Nachtlüftung ist bei den österreichischen Vergleichsstandorten bis zu einem Monat je Kalenderjahr nicht oder nur bedingt eine Nachtlüftung geeignet.

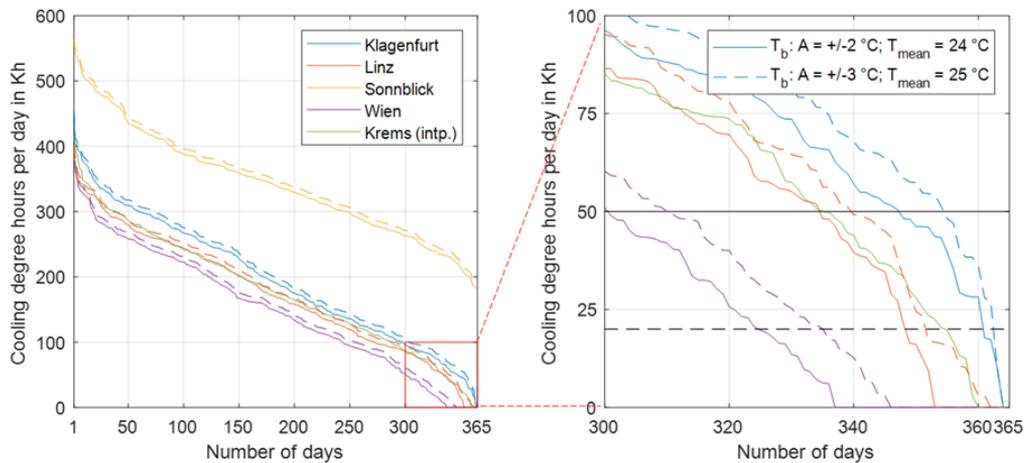


Abbildung 4: Errechnetes tägliches Kühlgradstunden-Potential für fünf ausgewählte Standorte für das Innenraum-Temperaturprofil mit hohem (-) und niedrigem (--) Komfortniveau.

Wird die Analyse für alle verfügbaren realen und interpolierten Standorte durchgeführt, kann eine Contour-Karte des Nachtlüftungspotentials in Österreich erstellt werden, vgl. Abbildung 5. Die rot dargestellten Areale zeigt die Anzahl der Tage an denen das Kühlpotential weniger als 20 Kelvinstunden pro Tag beträgt. Für die Berechnung wurde das Innenraumprofil mit höherem Temperaturniveau verwendet, das einem niederen thermischen Komfort entspricht. Selbst für dieses Best-Case Szenario sind in Teilen von Ober- und Niederösterreich, in Wien, im nördlichen Burgenland und der Südost-Steiermark mehr als 10 Tage kein ausreichendes Potential zur Nachtlüftung vorhanden (türkiser bis gelber Farbverlauf). Wien und Umgebung sowie das nördliche Burgenland sind die dabei generell die kritischsten Landesteile.

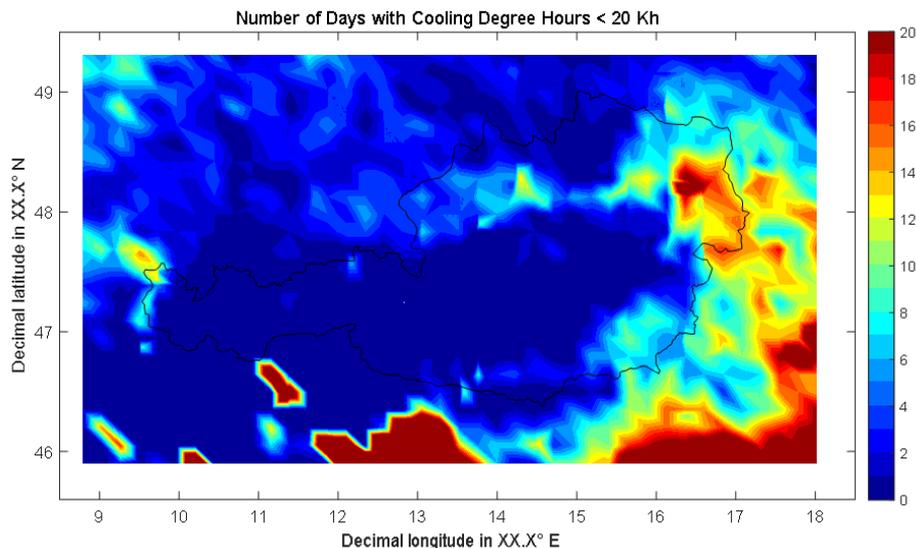


Abbildung 5: Contour-Karte Österreichs mit Anzahl an Tagen mit weniger als 20 Kelvinstunden Nachtlüftungspotential bei Akzeptanz eines niedrigen thermischen Innenraumkomforts laut Abbildung 3 errechnet aus den Datensätzen der interpolierten Standorte aus Abbildung 2.

5.1.2. Langzeitmonitoring und Datenvalidierung

Die aus dem universitätsinternen Vorprojekt CoolDUK gewonnen Erkenntnisse über die Machbarkeit einer automatisierten Nachtlüftung mit Kastenfenstern erwiesen sich als sehr hilfreich, was die erforderlichen MSR-Komponenten für CoolAIR betrifft. Die Auswahl des zentralen Testraumes im Altbau der UWK erfolgte nach folgenden Randbedingungen: möglichst ein Regelbüro/-raum, zentral in der Süd-Fassade situiert, voraussichtliche Nutzung über die Projektlaufzeit gleichbleibend. Gewählt wurde ein 23 m² großer Raum im 2. OG mit einem 8-flügeligen Kastenfenster, einer Zugangstür sowie einer Raumhöhe von 4,1 m. Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Lage dieses Testraumes im Geschoß, Abbildung 7 verdeutlicht die groben räumlichen Randbedingungen von Innen und Außen betrachtet.

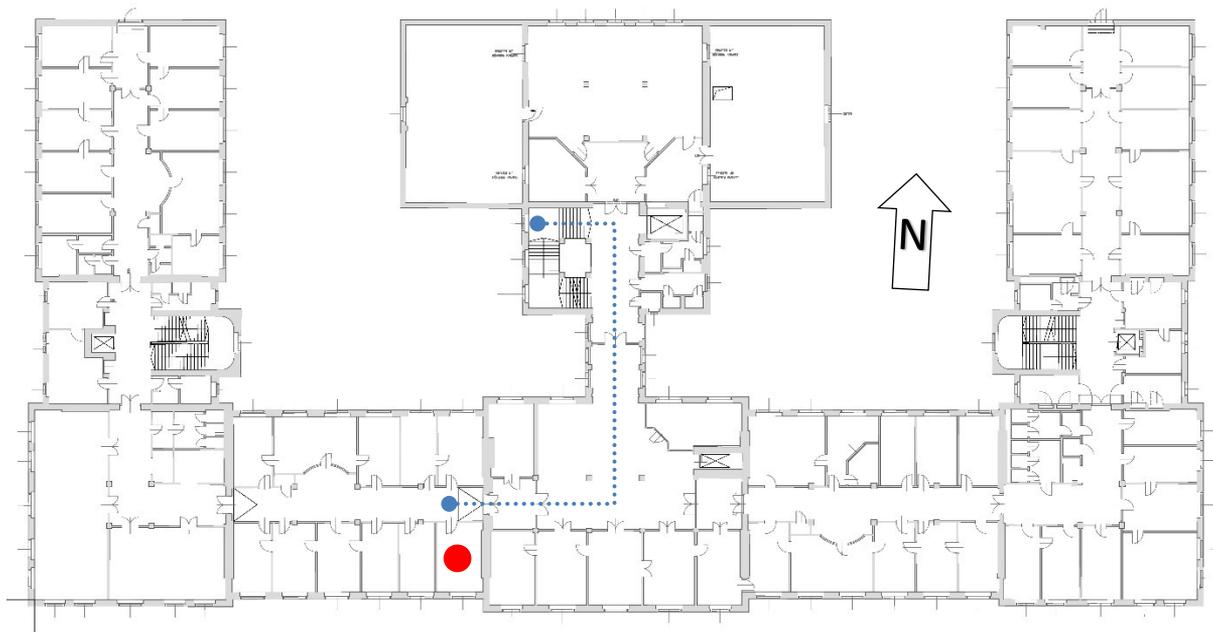


Abbildung 6: Übersicht Grundriss 2. OG mit Testraum (rot markiert) und Luftverbindung (blaue Linie) zum Stiegenhaus mit Abluftfenster Höhe 3. OG (Planquelle: FM Plus; adaptiert)

Die Verdrehung des Grundrisses um 3 Grad aus der exakten Südausrichtung wird in weiterer Folge nicht näher berücksichtigt bzw. in den Gebäudesimulationen in Abschnitt 5.2.3 als vernachlässigbar betrachtet.

Das Kastenfenster wurde mit zwei getrennten, automatisiert verfahrbaren Rollos (Soltis92-Gewebe, Modell 2046) im Scheibenzwischenraum (SZR) ausgestattet, die nach dem Gesichtspunkt hoher Verschattungswirkung bei gleichzeitig hohem, anpassbarem Tageslichteintrag ausgewählt wurden. Vier der acht Flügelpaare (jeweils Innen- + Außenflügel) erhielten entsprechende Fensterantriebe von WindowMaster, Modell WMX 804, wobei die Außenflügel mit je zwei Antrieben zwecks Schlagregendichtheit im Bereich der oberen und unteren Nebenschließkanten ausgerüstet wurden. Diese handelsüblichen Kettenantriebe erfordern eine manuelle Bearbeitung des steifen Kettenrückens, um bei den gegebenen Einbaumöglichkeiten im Scheibenzwischenraum eine volle 90° Öffnung der Flügel samt Windsicherung bewerkstelligen zu können (vgl. Abbildung 7 u. Abbildung 8). Zur Steuerung der Fassadenflügel selbst wurde ein Motorcontroller vom Typ WindowMaster WCC 310 Plus eingebunden, die zwischen der MSR-Technik und den Antrieben die Umsetzung der Öffnungs- und Schließbefehle in Hardware übernahm.

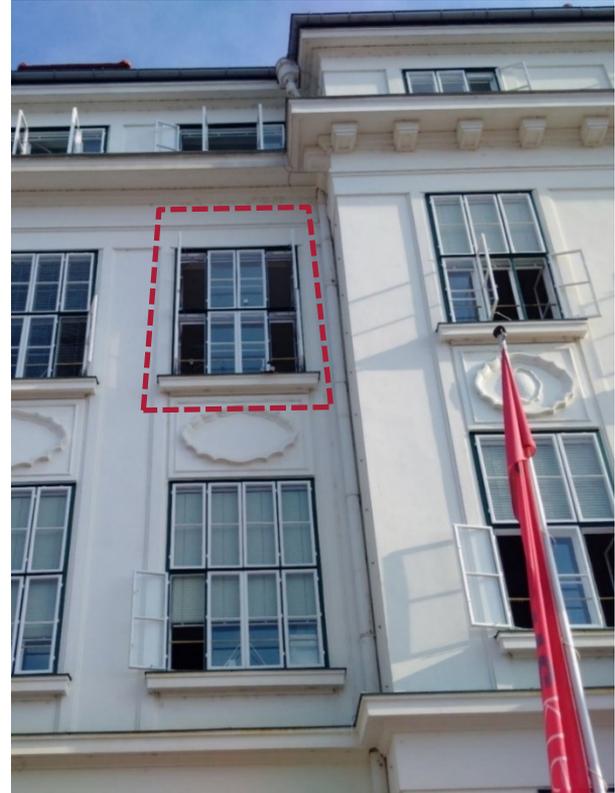


Abbildung 7: Gewählter südorientierter Testraum im Altbau (2. OG) mit adaptiertem Kastenfenster



Abbildung 8: Kettenantrieb WMX 804 im eingebauten Zustand (links), unteres Rollo mit appliziertem mitfahrendem Oberflächentempersensor an Kabelkette (rechts)

Diese Steuerung bietet über ein Touch Display vollen Zugriff auf sämtliche Lüftungsparameter sowie v.a. die projektrelevante Zuordnungsmöglichkeit und Auswahl von Funktionen der ein- und ausgehenden Kontakte. So kann z.B. ein Kontakt als Öffnen, Schließen, Stopp oder Anfahren einer bestimmten (Lüftungs-)Position hinterlegt und auch jederzeit wieder geändert werden. Per Datenkommunikation "MotorLink" ist es möglich, stufenlos die Position der Antriebe rückgemeldet zu bekommen. Die Antriebe selbst sind in Geschwindigkeit, Öffnungsweite, Kraft sowie Reduzierung der Schließkraft, z.B.

als Klemmschutz, direkt programmierbar. Zur Umsetzung gelangen zwei Positionen: geschlossen bzw. 90 Grad geöffnet.

Zur Steuerung der beiden von der Fa. Hella beigestellten Rollos kam je ein Hella ONYX.NODE (Aktuator) zur Anwendung, der ebenfalls zwischen die MSR-Technik und dem jeweiligen Rohrmotor verbaut wurde.

Die Zugangstüre erhielt ein Ersatztürblatt mit eigens im Projekt entwickelter automatisierbarer Überströmöffnung (siehe Abbildung 9), die mittels Motorcontroller vom Typ WindowMaster WUC 102 unter zusätzlicher Verwendung von Zeitrelais fünf Stellungen anfahren konnte. Die für eine Querlüftung des Testraumes notwendigen Abluftöffnungen wurden in Form von zwei weiteren Kastenfensterflügeln im nächstgelegenen Stiegenhaus im 3. OG gefunden, welche analog jenen des Testraums nachgerüstet wurden.

Sämtliche Antriebe der drei zentralen Projektelemente (Flügel, Rollos, Überströmöffnung Türblatt) bzw. deren Controller/Aktuatoren konnten so via Fernsteuerung direkt bedient bzw. in MSR-Szenarien für automatische Abläufe eingebunden werden.



Abbildung 9: Adaptiertes Türblatt des Testraumes mit Überströmöffnung von innen (links) und außen (rechts) betrachtet

Die unmittelbar an den Testraum angrenzenden vier thermischen Raumzonen (östlich, westlich, unterhalb und oberhalb) wurden hinsichtlich einer automatisierbaren Lüftung und Verschattung nicht verändert und unterlagen somit den freien manuellen NutzerInneneingriffen. Diese thermisch angekoppelten Zonen wurden im Laufe des ersten Projektjahres mit diversen (Funk-)Sensorknoten (Nodes) ausgestattet und in das projektinterne MSR-Netzwerk eingebunden. Die eigens angefertigten und bestückten Platinen dieser Nodes, untergebracht in Aufputzdosen, beherbergten je nach Messposition und dortigen Anforderungen diverse Anschlüsse für unterschiedliche Sensorik, die vorab

in einer Sensorliste (Pflichtenheft) definiert und ggf. erweitert wurde. So wurden im zweiten Projektjahr auf Basis erster Temperaturverlaufsanalysen je zwei Unterputztemperatursensoren in der östlichen (massiven) und westlichen (leichten) Trennwand des Testraumes in zwei Tiefenstufen als indirekte Kennwerte der Speichermassenbe- und -entladung nachgerüstet. Sie dienen v.a. auch der modellprädiktiven Regelung (MPC) in Abschnitt 5.3. Bei den Temperatursensoren, handelte sich um digitale programmierbare 1-Wire Modelle von Maxim vom Typ DS18B20 mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ K.

Die Außentemperatursensoren wurden sowohl an der Südfassade des Altbaus (2. OG) unmittelbar am Fenster des Testraumes als auch in einem nordorientierten Innenhof (3. OG) positioniert, da die beiden Sensorgehäuse weder entsprechend belüftet noch strahlungsgeschützt waren. Durch Heranziehung der Temperaturminima untertags sowie nachts konnte die Außentemperatur richtig erfasst werden. Dies war insofern relevant, da die MSR auf diese Messwerte zurückgriff, um daraufhin den jeweiligen Minimalwert als relevante Außentemperatur heranziehen zu können.

Zum Erhalt der Freigabe nachts geöffneter Fensterflügel seitens des Facility Managements des Campus Krems (Fa. FM Plus) kam ein kombinierter WindowMaster Wind-/Regensensor vom Typ WLA 330 an den automatisierten beiden Fenstern (Testraum u. Stiegenhaus) zur Anwendung, die im Sinne einer programmierten Vorrangschaltung von der WCC 310 Plus oberste Priorität im Falle von Regen- und Sturmereignissen bekamen und die Flügel verlässlich schlossen bzw. geschlossen hielten. Die Auslösewindgeschwindigkeit wurde projektspezifisch auf die Stufe von 8 m/s bei einer Windanzugverzögerung von 5 sek. Gestellt. Die Freigabezeit nach einem Ereignis betrug 10 min. Damit schlossen einerseits die Flügel bei kurzen Böen nicht sofort und andererseits blieb die Sicherheit der gesamten Antriebsmechanik und Flügel gewährleistet.

Die betrachteten thermischen Zonen inkl. dem Außenraum wiesen am Ende der Projektlaufzeit knapp 60 Messparameter bzw. diverse Status auf, die minütlich in eine Datenbank geschrieben wurden:

- Luft-, Oberflächen- und operative Temperaturen (Testraum und im SZR inkl. Rollo)
- Strömungsgeschwindigkeiten (Testraum und Erschließungsbereiche)
- Windgeschwindigkeit an der Fassade
- Beleuchtungsstärke an der Fassade
- CO₂-Konzentration (Testraum)
- Reed-Kontakt Status (Zugangstür Testraum, Brandschutztüren Erschließungsbereiche)
- Protokollierung manuelles Tasterdrücken (für Overtaking der Flügel- und Rollostellungen)
- Szenencode für Verschattung und Flügelstellungen
- Zeitstempel

Diese Messparameter wurden durch ein MSR-System aufgezeichnet. Die Abbildung 10 zeigt den Systemaufbau, bestehend aus folgenden Komponenten:

- Datenbank
- Webserver
- Basisstation
- Sensor Nodes zur Ansteuerung von Fenstern und Jalousien sowie Messwernerfassung
- Datenauswertung
- Wartungszugang (Remote Control)

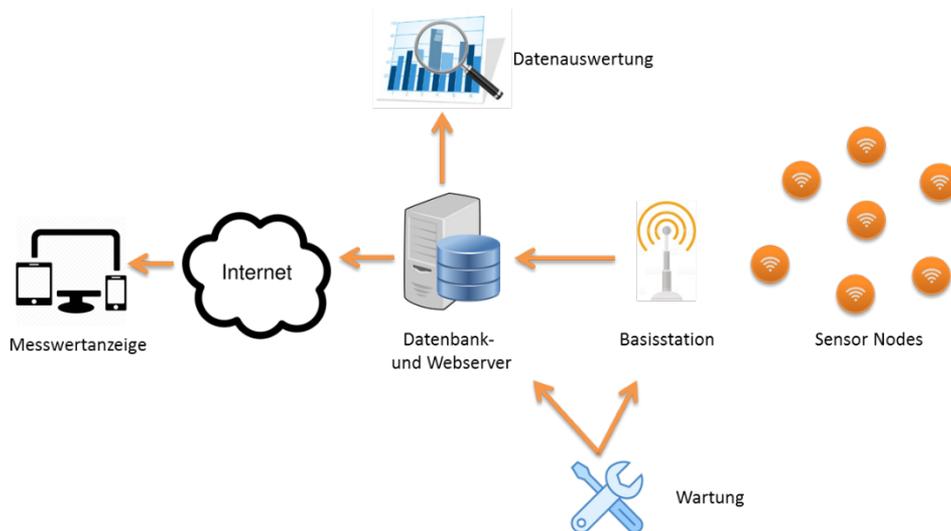


Abbildung 10: Übersicht Nodes und Basisstation

Kernelement ist dabei die Basisstation, die sowohl die Kommunikation mit den Sensoren als auch der Datenbank übernimmt. Auf diesen Single Board Computern (SBC) werden die Algorithmen für die Lüftungs- und Verschattungsszenarien ausgeführt. Hier wurde der sehr universeller Raspberry Pi 3 Model B verwendet, damit auch die Funktionen für die neuronalen Netzwerke verwendet werden konnten. Nach einer Initialisierungsphase wird eine Endlosschleife aufgerufen, in der periodisch alle 2 Sekunden jeder Sensornode abgefragt bzw. Steuerdaten an diesen gesendet werden. Die empfangenen Daten werden in die Datenbank und in eine lokale Logdatei geschrieben. Ebenfalls alle 2 Sekunden wird das jeweilige Szenario, das über entsprechende Parameter konfiguriert werden kann, zum Ansteuern der Aktuatoren ausgeführt.

Alle weiteren Komponenten sind über einheitliche Funkknoten angeschlossen. Kern eines Sensornodes ist der Mikrocontroller Atmega328P. Dieser kommuniziert mit den angeschlossenen Sensoren und übermittelt die erfassten Daten über die Funkschnittstelle an die Basisstation. Des Weiteren steuert er auch die Aktuatoren an. Für das Projekt wurde eine eigene Platine entwickelt, die unterschiedliche Sensoren aber auch Aktuatoren ansteuern kann. Abbildung 11 zeigt diese Platine in einer Bestückungsoption für 12 V und der Anschlussmöglichkeit für Strömungs- und Temperatursensoren. Rechts oben ist das Funkmodul sichtbar, das mit einer integrierten Antenne arbeitet.

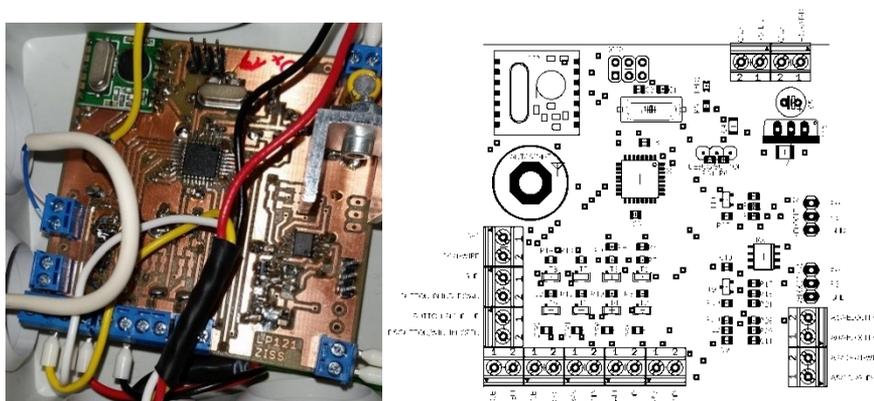


Abbildung 11: Platine und Bestückungsplan eines Sensorknotens

Zum Erfassen verschiedenster physikalischer Größen wurden die in Tabelle 1 gelisteten Sensoren eingesetzt.

Tabelle 1: Sensortypen

Sensor	Beschreibung
Raum-, Oberflächen-, Außen-, Strahlungs- Temperatur	Temperatursensor DS18B20. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ im Bereich von -10°C bis $+85^{\circ}\text{C}$.
Luftströmung	Thermischer Strömungssensor FLW-122. Bereich 0 bis 100m/s
Reedkontakt	Reedkontakt MMPSA 240/30 RH NO BLUE Für die Erfassung der Position des Sonnenschutzes. Sowie für die Erfassung der Position der Verbindungstüren in Raum 3.208.
Windgeschwindigkeit	Windsensor PCE-FST 200-201 Messbereich 0,5 bis 50 m/s
CO2	Infrarot CO2 Modul MH-Z19 Messbereich 0 bis 2000 ppm
Beleuchtungsstärke	Ambient Light Photo Sensor APDS-9301

Abbildung 12 zeigt die unterschiedlichen verbauten Sensoren. In den teilweise sichtbaren Installationsdosen ist die zugehörige Sensorplatine installiert. Dies ist ein Zugeständnis an den Forschungsbetrieb, der höchste Flexibilität erfordert. Kommerzielle Knoten haben diese zwei Komponenten oft gemeinsam integriert, wobei es auch Sensormodule mit abgesetzten Sensoren gibt.



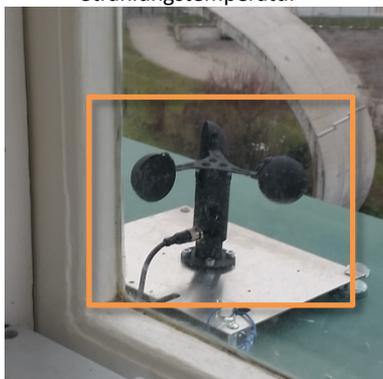
Oberflächentemperatur/
Strahlungstemperatur



Luftströmung



Reedkontakt



Windgeschwindigkeit



CO₂



Beleuchtungsstärke

Abbildung 12: Beispiele installierter Sensoren

Im Zuge des Projektverlaufes wurden weiters standortbezogene Messdatensätze (Standort Krems a.d. Donau) auf Stundenbasis von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für die Jahre 2020 und 2021 angekauft. Die darin verwendeten Parameter

- Außentemperatur
- rel. Luftfeuchtigkeit
- Solarstrahlung
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung

wurden analysiert und Datenlücken sowie Ausreißer entsprechend korrigiert. Der Vergleich mit den am Standort gemessenen Außentemperaturen (blaue Kurve, jeweiliges Minimum aus Nord- und Südtemperatur) weist eine gute qualitative sowie quantitative Übereinstimmung auf (siehe Abbildung 13 u. Abbildung 14).

Abseits der Prüfung der wesentlichen äußeren Randbedingungen am Gebäude erfolgten für sämtliche weitere Messparameter regelmäßige Plausibilitätsprüfungen. Zu diesem Zweck wurde an der UWK eine interne Website gehostet, die einerseits sämtliche Messdaten und Status in Tabellenform (vgl. Tabelle 2 in 5.1.3) als auch grafisch live darstellte, und andererseits erlaubte, die Minuten- und gemittelten Stundenwerte via xlsx-Datei für frei wählbare Zeiträume zu laden. Via VPN-Verbindung war der Zugang zwecks Kontrolle auch von außerhalb der UWK jederzeit möglich. Offensichtliche Messausfälle wurden entsprechend protokolliert und deren Ursachen erhoben. Diese Art des Checks erfolgte meist täglich (werktags), protokolliert in Stichworten in Form eines in der internen Cloud liegenden „Diarys“ (Mess- und Szenarien-Tagebuch), das den wertvollen Überblick über den gesamten Messzeitraum bewahrte.

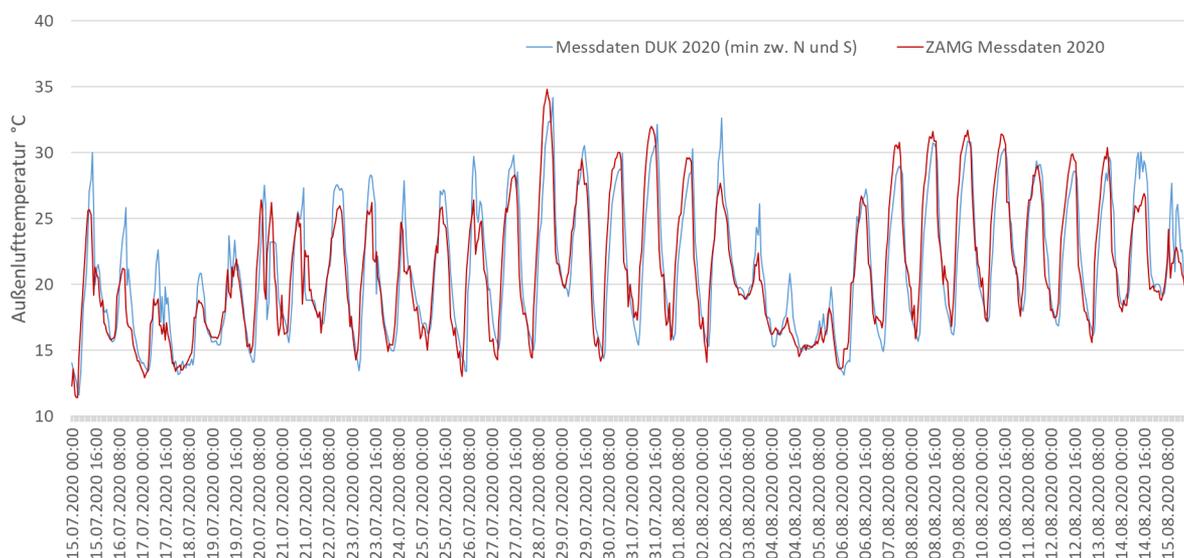


Abbildung 13: Außentemperaturverlauf Auszug Sommerperiode 2020 (Gegenüberstellung Minimalwerte aus Nord- u. Südsensor (blaue Kurve) mit ZAMG Messdaten (rote Kurve))

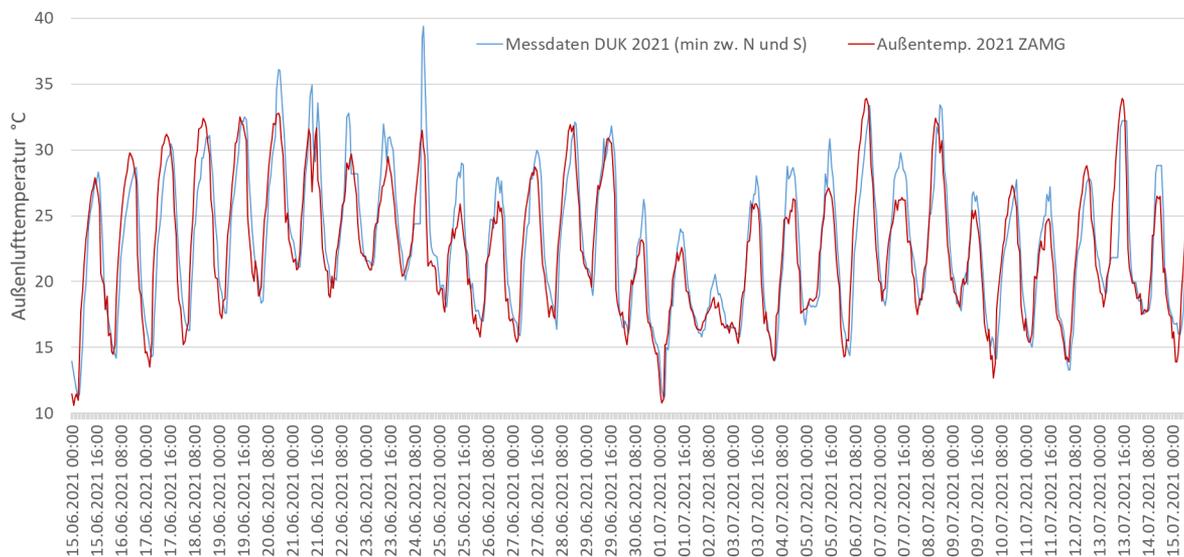


Abbildung 14: Außentemperaturverlauf Auszug Sommerperiode 2021 (Gegenüberstellung Minimalwerte aus Nord- u. Südsensor (blaue Kurve) mit ZAMG Messdaten (rote Kurve))

Die in weiterer Folge dokumentierten Simulationsergebnisse basieren auf den Messdaten der ZAMG als Randbedingungen, wobei der Fokus auf das durchschnittlich wärmere Jahr 2021 gelegt wurde (siehe Abschnitt 5.2.3).

5.1.3. Basisdatensätze zur Modellbildung

Aus dem letztendlich bis zum Projektende laufenden Langzeitmonitoring wurden, basierend auf verschiedensten real durchgeführten MSR-Szenarien, Zug um Zug umfangreiche Messdatensätze gewonnen. Aus diesen Messungen ließen sich anschließend Basisdatensätze generieren, die eine Korrelation zwischen durchgeführtem Szenario und Auswirkung in thermischer Hinsicht, v.a. auf den Testraum, ermöglichte. Diese bestanden aus knapp 60 Parametern bzw. Statusinformationen (vgl. 5.1.2).

Diese Zusammenhänge erlaubten den Aufbau und die Abstimmung eines Simulationsmodells für die erweiterte Kühllastperiode (April bis Oktober), das nicht nur den zentralen Testraum mit adiabaten Grenzen beinhalten sollte, sondern weiter über den Testraum hinausgehende Zonen enthielt. In den so angekoppelten 28 Zonen fand jedoch weder real noch in den Simulationen eine Nachlüftung oder eine geregelte Verschattung statt.

Neben der Simulationsmodellbildung dienten diese aufbereiteten Basisdatensätze als erste Grundlage für das Training der MPC seit Beginn der Installation des Langzeitmonitorings im Testraum bzw. dessen Umgebung. Der Fokus lag hier auf zahlreichen Innenraumparametern sowie dem Verlauf der Außentemperatur, da am Standort keine umfassende Wetterstation geplant bzw. vorhanden war. Die zahlreichen Temperaturmessstellen im Testraum bzw. im Kastenfenster erlaubten ein detailliertes thermisches, zeitlich hochaufgelöstes Zustandsbild über den gesamt betrachteten Messzeitraum, v.a. ab Mitte 2019 aufgrund der Nachrüstung von Bauteil- bzw. Unterputztemperatursensoren. Tabelle 2 zeigt einen kleinen Ausschnitt der tabellarisch aufbereiteten Messdaten, generiert aus der zentralen Datenbank.

Tabelle 2: exemplarischer Messdatenauszug (Screenshot Ausschnitt CoolAIR Livedaten-Website)

Last 1000 records

ID	Timestamp	Scenario	P1_T_air1	P1_T_air2	P1_T_op	P1_V_air1	P1_V_air2	P1_V_air3	P1_V_air4	P2_T_air1	P2_T_air2	P2_T_op	P2_V_air1	P2_V_air2	P2_CO2	P2_TASTER
2071850	2022-05-19 22:38:46	S1	25.8	27	25.6	178	171	175	175	25.4	0	25.2	171	170	451	0
2071849	2022-05-19 22:37:46	S1	25.8	27	25.6	178	171	175	176	25.4	0	25.2	171	170	451	0
2071848	2022-05-19 22:36:46	S1	25.8	27	25.6	178	171	174	175	25.4	0	25.2	171	170	450	0

Das Fehlen einer dezidierten Wetterstation am Standort veranlasste das Projektteam im weiteren Projektverlauf, zusätzlich ZAMG-Messdaten des Außenklimas für den Standort Krems miteinzubeziehen, um in Abschnitt 5.2.3 auch die wesentlichen Solarstrahlungsverläufe über die Jahre 2020 und 2021 korrekt in der Simulationsumgebung IDA ICE (Fa. EQUA²) mitberücksichtigen zu können. Messfehler bzw. -lücken wurden durch lineare Interpolation korrigiert, die Messdatensätze der ZAMG in für IDA ICE nutzbare Formate umgerechnet (vgl. Tabelle 3 und Abbildung 15t) und damit der Klimadatensatz finalisiert. Der Datensatz gliedert sich dabei in folgende Parameter:

1. Außenlufttemperatur, °C
2. Relative Feuchtigkeit, %
3. Windrichtung, Grad
4. Windgeschwindigkeit, m/s
5. Direktnormalstrahlung, W/m²
6. Diffusstrahlung auf horizontale Oberflächen, W/m²

Tabelle 3: Umrechnung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung (ZAMG) in Vektorkomponenten für IDA ICE nach SIA Definition

Beispiele anhand der 4 Haupthimmelsrichtungen	SIA 2028	IDA Klima und Energie
1 m/s von Nord nach Süd	Windgeschwindigkeit 1 m/s Windrichtung 0°	WindX = 0 WindY = -1
1 m/s von Ost nach West	Windgeschwindigkeit 1 m/s Windrichtung 90°	WindX = -1 WindY = 0
1 m/s von Süd nach Nord	Windgeschwindigkeit 1 m/s Windrichtung 180°	WindX = 0 WindY = +1
1 m/s von West nach Ost	Windgeschwindigkeit 1 m/s Windrichtung 270°	WindX = +1 WindY = 0

² <https://www.equa.se/de/ida-ice>

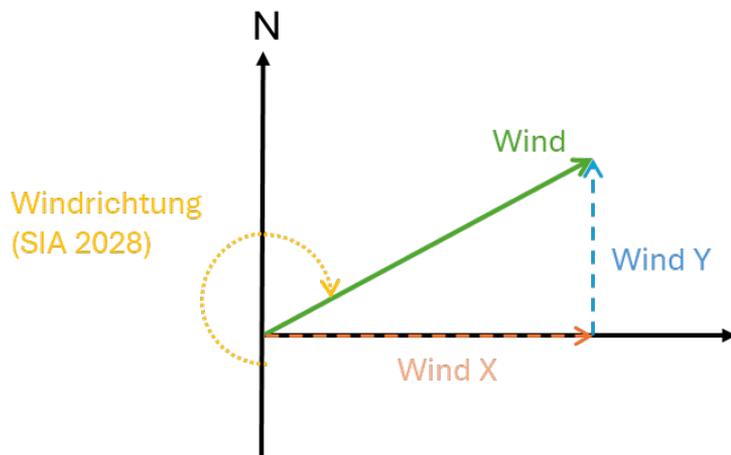


Abbildung 15: Definition der Windrichtung und Windgeschwindigkeit in IDA ICE gemäß SIA 2028

Erst auf Basis der Verwendung von ZAMG-Messdaten für den Standort, kombiniert mit Messdatensätzen aus dem MSR-System vor Ort, konnten die Basisdatensätze für die Modellbildung in IDA ICE und der MPC zielgerichtet verfeinert werden.

Die messtechnische Analyse des Raumlufwechsels, als bestimmende Größe für die mit Fensterlüftung erzielbare Kühllast, erfolgte in CoolAIR mittels umfangreicher Tracergas-Messungen (Abbildung 16). Auf Grundlage der Massenerhaltung des Tracergases kann aus der Konzentrationsmessung und zum Teil durch das eingebrachten Tracergas auf den Volumen-Austausch zwischen Raum und Umgebung bzw. auf den Raumlufwechsel rückgeschlossen werden.

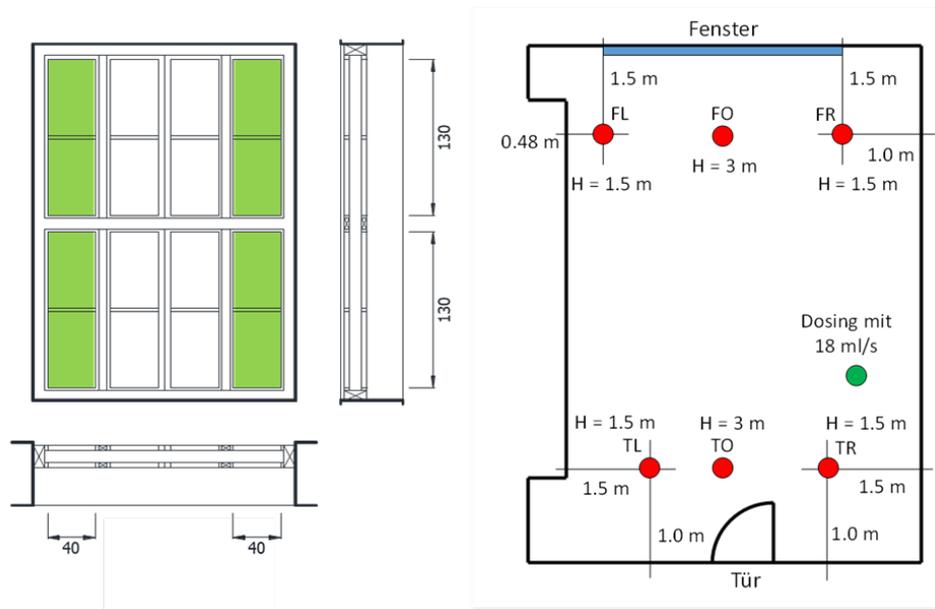


Abbildung 16: Fenstergeometrie mit automatisch öffnenden Fensterflügel in grün (links) und Aufbau der Tracergasmessung zur Raumlufwechselbestimmung (rechts) mit einer Tracergaseinbringung (grün) und mehreren verteilten Tracergasmessstellen (rot) im Testraum der Universität für Weiterbildung Krems

In der Literatur wird für die Raumlufwechselformung für Lüftungsszenarien üblicherweise die „Concentration decay“ Methode beschrieben. Dabei wird eine vergleichsweise hohe und gleichmäßig verteilte Tracergaskonzentration im Raum bei abgeschalteter Lüftung bzw. geschlossenen Fenstern erzeugt. Anschließend wird die Tracergaszugabe beendet und das Lüftungsszenario gestartet – in

CoolAIR die Fenster geöffnet. Der Luftaustausch mit der unbelasteten Außenluft führt zu einer Abnahme der Tracergaskonzentration, deren zeitlicher Verlauf aufgezeichnet wird. Abbildung 17 zeigt die Messdaten eines exemplarischen Versuchs im Testraum der Universität für Weiterbildung Krams. Die verteilten Messstellen werden zu einer mittleren Raumkonzentration gemittelt und die Daten im Zeitbereich der aktiven Lüftung mit einer exponentiellen Abnahmefunktion angenähert (rote Linie). Die exponentielle Funktion kann aus der Massenerhaltung abgeleitet werden, wobei der Koeffizient dem Raumlufthwechsell entspricht. In mehreren Messkampagnen wurden im Testraum unterschiedliche Lüftungsszenarien simuliert und die Luftwechsellraten bestimmt. Für das einseitig geöffnete Fenster im Testraum ergibt sich bspw. ein Raumlufthwechsell von $n = 14 \text{ h}^{-1}$, für das beidseitig geöffnete Fenster ein Raumlufthwechsell von $n = 23 \text{ h}^{-1}$, vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18. Der erhöhte Luftwechsell bei beidseitig geöffnetem Fenster ist bereits an der schnelleren Abnahme der Tracergaskonzentration erkennbar.

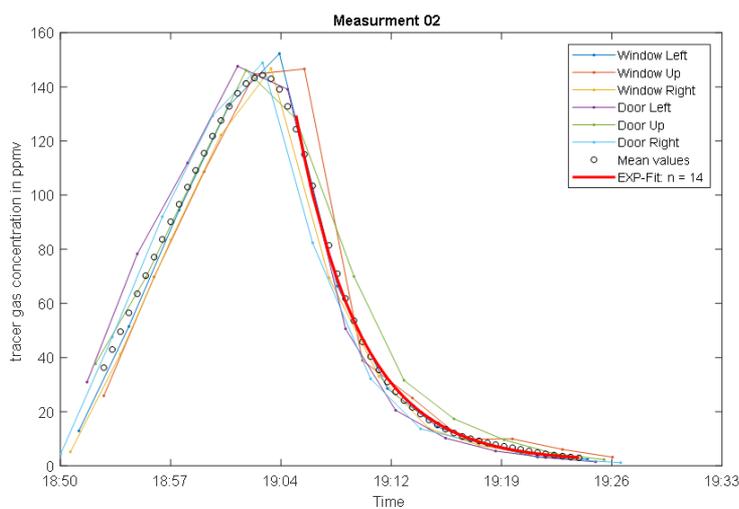


Abbildung 17: Raumlufthwechsellmessung mit Tracergasmethode „Concentration decay“ im Testraum der Universität für Weiterbildung Krams bei einseitig geöffnetem Fenster.

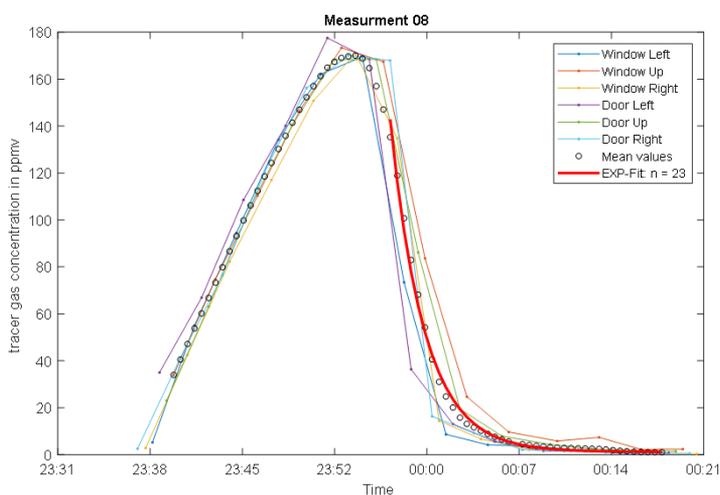


Abbildung 18: Raumlufthwechsellmessung mit Tracergasmethode „Concentration decay“ im Testraum der Universität für Weiterbildung Krams bei beidseitig geöffnetem Fenster.

Aufgrund der zeit- und humanressourcenintensiven Versuchsdurchführung ist der vorgestellte „Concentration decay“ in der praktischen Anwendung auf die Analyse von wenigen Lüftungsszenarien pro

Messkampagne beschränkt. Für die Beurteilung der hochgradig stochastischen Vorgänge steht also nur eine beschränkte Anzahl an Messungen zu Verfügung. Im konkreten Fall der Nachtlüftungsanalyse wird zudem immer nur der Luftwechsel unmittelbar nach der initialen Fensteröffnung untersucht. Aufgrund des Temperatenausgleichs nimmt nach dem ersten Luftaustausch die Luftwechselrate jedoch ab und nähert sich einem konstanten, quasistationären Wert an, der aufgrund zu geringer Tracergaskonzentrationen nicht mehr bestimmt werden kann.

Die messtechnische Beurteilung wurde daher in der zweiten Projekthälfte mit der „Constant emission“ Methode ergänzt. Dabei wird in den Raum während eines aktiven Lüftungsszenarios eine konstante Menge an Tracergas eingebracht. Bei Vorliegen von stationären Lüftungsverhältnissen mit konstantem Luftaustausch zur Außenluft stellt sich eine konstante Tracergaskonzentration ein, die bei bekanntem Tracergasvolumenstrom in den Raumlufthauswechsel umgerechnet werden kann. Unter Inkaufnahme eines hohen Tracergasverbrauches kann so eine kontinuierliche Messung des Raumlufthauswechsels über längere Zeiten erfolgen. Abbildung 19 zeigt exemplarische Messungen im Testraum der Universität für Weiterbildung Krens über einen Zeitraum von drei Nächten bei durchgehend beidseitig geöffnetem Fenster während der Nachtstunden. Die in grau eingezeichneten Messungen der Einzelmessstellen verdeutlichen die stochastischen Vorgänge der Raumlufthausströmung. Auch der volumengewichtete schwarze Mittelwert weist noch eine deutliche Streuung auf. Aufgrund der Vielzahl an Messwerten können jedoch Korrelation bspw. zur parallel gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft erstellt werden, vgl. Abbildung 20. Für das beidseitig geöffnete Fenster wurde über alle drei Nächte ein mittlerer Luftwechsel von $n = 7 \text{ h}^{-1}$ mit einer Standardabweichung $\pm 2 \text{ h}^{-1}$ gemessen, bei einer Temperaturdifferenz von um die 5 K zwischen Raum- und Außenluft. Die Grafik zeigt zudem eine Abschätzung des Luftwechsels in Abhängigkeit der Fenstergeometrie und der Temperaturdifferenz nach VDI 2078 (2015) für das beidseitig geöffnete Fenster. Die Näherungsgleichung überschätzt den Luftwechsel zum Teil um das Doppelte.

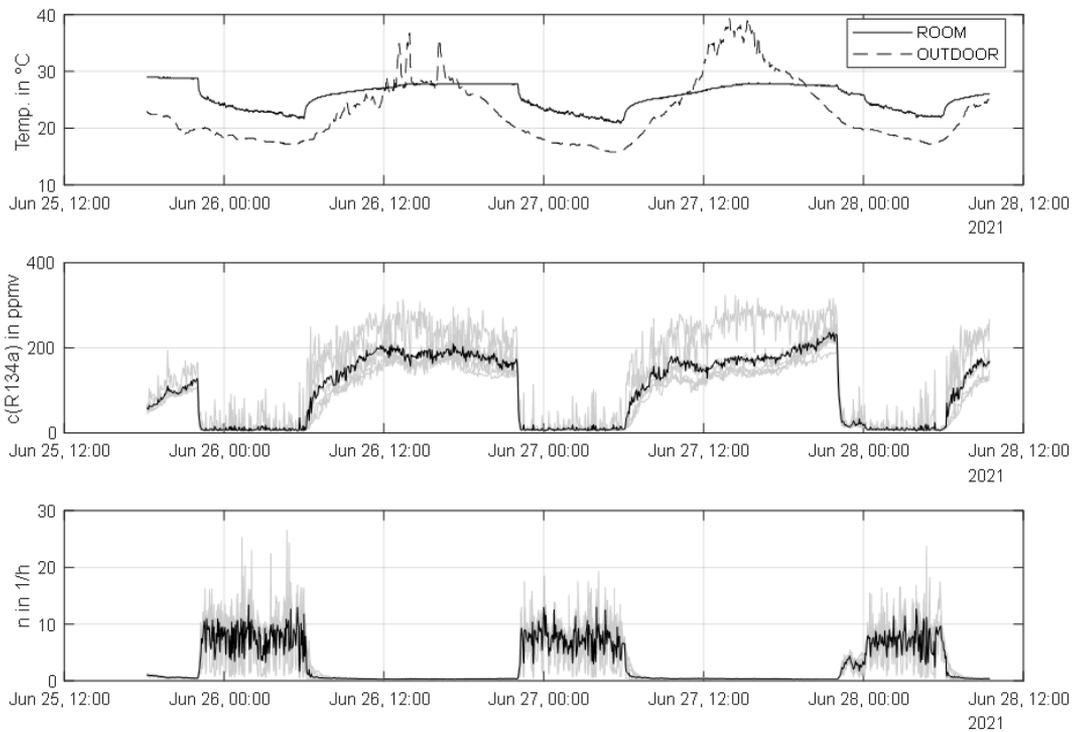


Abbildung 19: Raumlufwechselsmessung mit Tracergasmethode „Constant emission“ im Testraum der Universität für Weiterbildung Krets bei beidseitig geöffnetem Fenster

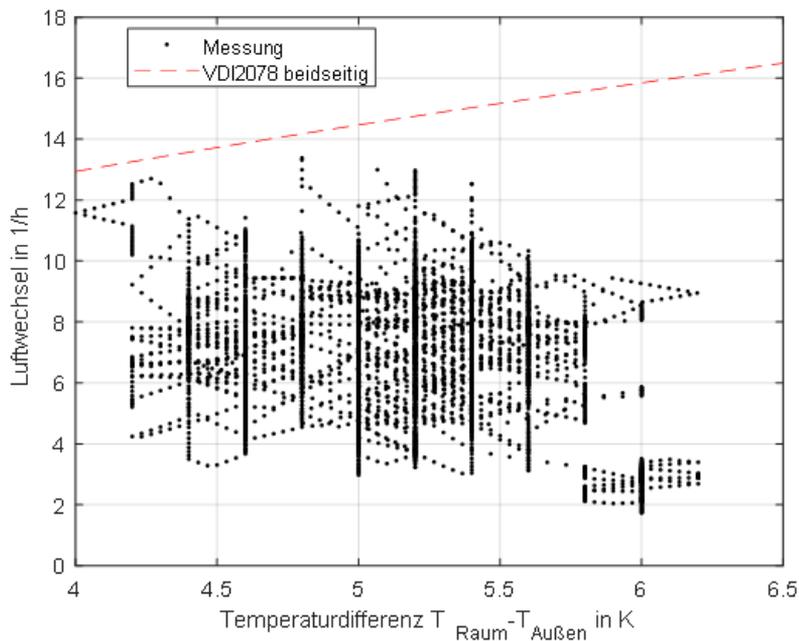


Abbildung 20: Korrelation der Raumlufwechsel zur Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft im Testraum der Universität für Weiterbildung Krets bei beidseitig geöffnetem Fenster und Vergleich zur Abschätzung nach VDI2078

Neben den Temperatur-induzierten Druckdifferenzen beeinflussen bei geöffnetem Fenster auch externe Winddruckkräfte die Raumlufströmungen. Um die Einflüsse von Winddruckkräften auf den Raumlufwechsel zu analysieren, wurden auch im Testgebäude Energetikum am Campus der FH Burgenland in Pinkafeld Tracergas Messungen durchgeführt. Abbildung 21 zeigt den Aufbau des

Systems in einem exemplarischen Testraum mit mechanischer Belüftung. Eine vorbereitend durchgeführte Validierung der Raumlüftungsbestimmung mit der „Constant emission“ Methode bei geschlossenem Fenster und aktiver mechanischer Belüftung zeigte eine gute Übereinstimmung.

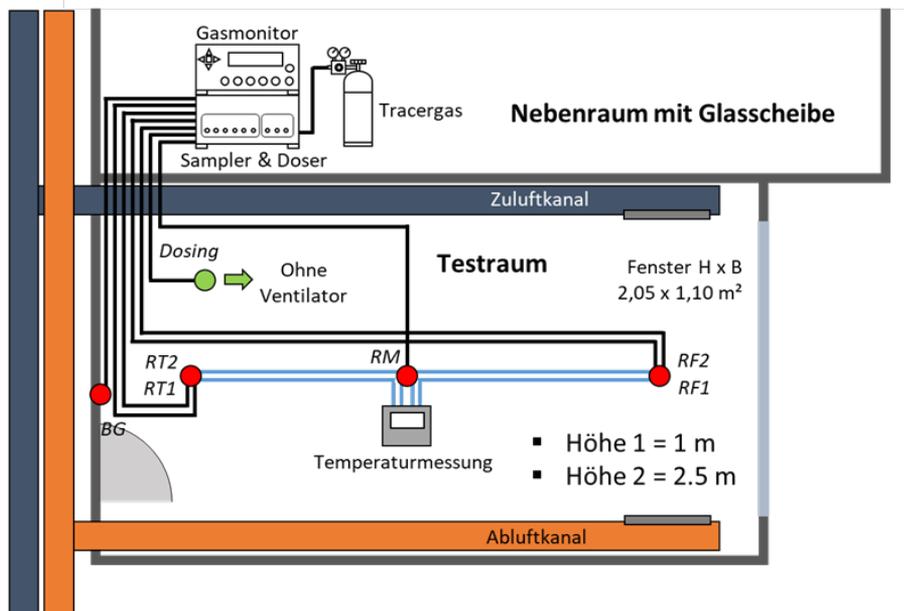


Abbildung 21: Aufbau der Tracergasmessung in einem Testraum im Energetikum am Campus der Fachhochschule Burgenland in Pinkafeld

In Abbildung 22 sind die Außen- und Raumtemperaturen, die am Gebäudedach gemessene Windgeschwindigkeit sowie die Raumlüftung über einen Zeitraum von ca. zehn Tagen abgebildet. Bis zum 29.04.2021 um 18:30 Uhr Ortszeit wurde ein Lüftungsszenario mit durchgehend geöffnetem Fenster simuliert, danach wurde das Fenster durchgehend gekippt. Die auf der logarithmisch skalierten Wertachse in grau gezeichneten Luftwechselraten, errechnet aus den Einzelmessungen der Tracergas Konzentrationen, zeigen die hohe Volatilität im Experiment.

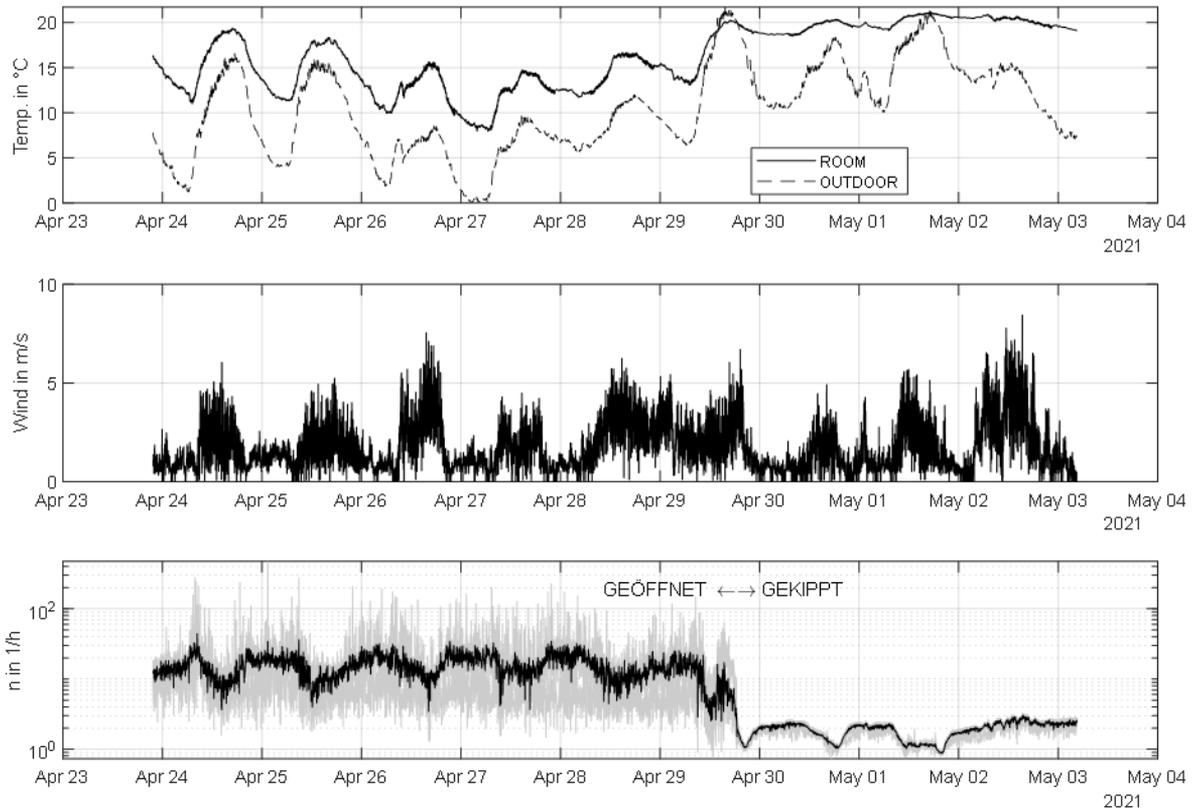


Abbildung 22: Außen-, Raumtemperatur und Windgeschwindigkeit sowie mittels dem Tracergas Verfahren „Constant emission“ bestimmter Raumlufwechsels im Testraum in Pinkafeld bei durchgehend geöffnetem bzw. gekippten Fenster während der längsten Messkampagne

Die Korrelationen der Luftwechselrate zur Temperaturdifferenz und zur Windgeschwindigkeit zeigen die Abbildung 23 für das geöffnete Fenster und Abbildung 24 für das gekippte Fenster. Die Luftwechselraten laut dem Näherungsverfahren nach VDI2078 sind in den Temperaturkorrelationen eingetragen. Die Abhängigkeit der Luftwechselrate von der Temperaturdifferenz ist erkennbar, wobei aber eine hohe Streuung der Daten vorliegt. Die Näherungsgleichung nach VDI2078 beschreibt im Mittel das Szenario mit offenem Fenster, das Szenario mit gekipptem Fenster wird zum Teil um die Hälfte unterschätzt. Für die Korrelation der Windmessung ist bei beiden Szenarien kein eindeutiger direkter Zusammenhang ersichtlich.

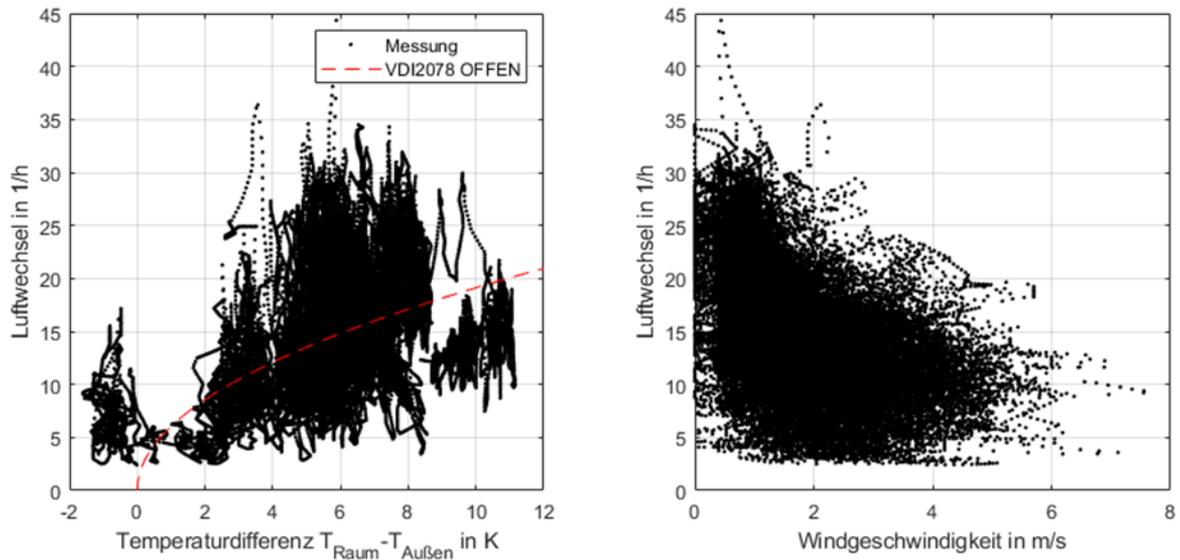


Abbildung 23: Korrelation der messtechnisch erfassten Luftwechselraten zur Temperaturdifferenz zwischen Raum und Außenluft mit Vergleich zum Näherungsverfahren nach VDI2078 (links) und Korrelation zur am Gebäude(flach)dach gemessenen Windgeschwindigkeit bei durchgehend geöffnetem Fenster über einen Zeitraum von ca. 6 Tagen

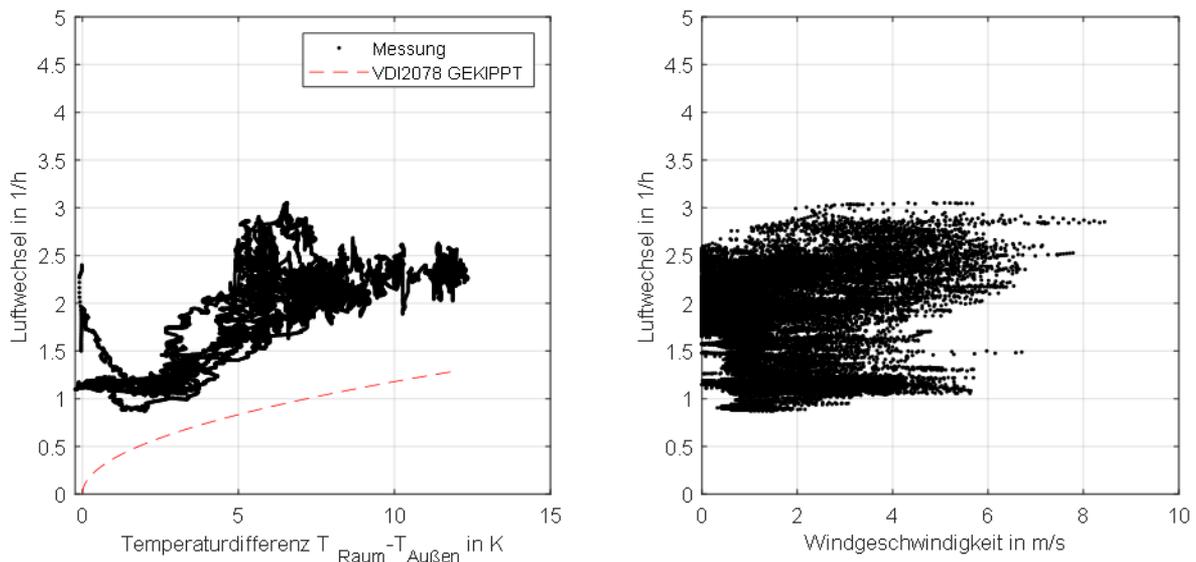


Abbildung 24: Korrelation der messtechnisch erfassten Luftwechselraten zur Temperaturdifferenz zwischen Raum und Außenluft mit Vergleich zum Näherungsverfahren nach VDI2078 (links) und Korrelation zur am Gebäude(flach)dach gemessenen Windgeschwindigkeit bei durchgehend gekipptem Fenster über einen Zeitraum von ca. 3 Tagen.

5.1.4. Zusammenfassung der Evaluierungsmessungen und Datenanalyse

Unter Berücksichtigung eines zunehmend steigenden Außentemperaturniveaus aufgrund des fortschreitenden Klimawandels, kann bereits zum aktuellen Zeitpunkt von einer weiteren Reduktion des Nachtkühlpotentials für alle österreichischen Standorte ausgegangen werden. Vor diesem Hintergrund ist aus Sicht der klimatischen Randbedingungen die Erzielung einer mit konventioneller Kühlung vergleichbaren Lastabfuhr mittels Nachlüftung im Hochsommer aufgrund des stark reduzierten Potentials

eher kritisch zu sehen. Mit vermehrtem Bedarf von Kühlanwendungen in den Übergangszeiten, ebenfalls eine Randerscheinung des Klimawandels, erweiterten sich jedoch die für die Nutzung von passiver Nachtlüftung geeigneten Zeitperioden wieder. Die Anforderungen an den thermischen Komfort können das vorhandene Potential ebenfalls wesentlich beeinflussen. Bei einer breiten Definition des Komfortbegriffs mit höheren zulässigem Temperaturniveau und -gradienten als oft normativ gefordert, hat die Nachtlüftung in vielen Standorten nur an wenigen Tagen im Jahr ein unzureichendes Potential.

Die Evaluierungsmessungen bestätigten einerseits die subjektive Wahrnehmung des Innenraumklimas über den gesamten Messzeitraum, andererseits ließ sich trotz umfangreicher Temperatursensorik in den angrenzenden Zonen bzw. in Trennwandbauteilen schwer feststellen, welche Wärmeströme in welcher Höhe Einfluss auf das Raumtemperaturverhalten nahmen. Der größte Einfluss war das unbekannte NutzerInnen-Verhalten (z.B. Öffnung von Fenster oder Verschattung), das aus Datenschutzgründen nicht aufgezeichnet werden durfte.

Unabhängig davon und speziell im Hinblick auf die Generierung von Basisdatensätzen zum Training der Model Predictive Control (MPC) war dies weniger relevant, als dies am Beginn des gesamten Messzeitraumes noch vermutet wurde. Als entscheidend für die MPC stellte sich heraus, möglichst viele Zustandsänderungen des thermischen Raumverhaltens in Abhängigkeit diverser unterschiedlicher Nachtlüftungsszenarien zu messen oder synthetisch zu generieren, weshalb auch vereinzelte Messfehler bzw. -ausfälle nicht von großer Bedeutung waren. Die thermische Trägheit des Raumes erwies sich als eine der Schlüsselgrößen im Hinblick auf das Training der MPC, weshalb sich hier die Nachinstallation der Unterputztemperatursensoren als sinnvoll erwies.

Die messtechnische Erfassung der erzielbaren Raumlüftung mit der Tracergasmethode zeigte eine große Schwankung innerhalb vergleichbarer Szenarien aufgrund der stark streuenden Randbedingungen (vor allem Winddruck) und der generellen, stochastischen Natur der Raumlüftung. Die Bandbreite beträgt von Fenster geschlossen ($\sim 0,1 \text{ h}^{-1}$), Fenster gekippt ($\sim 1 \text{ h}^{-1}$), Fenster geöffnet ($\sim 10 \text{ h}^{-1}$) bis zu Querlüftungsszenarien ($\sim 100 \text{ h}^{-1}$) rund vier Zehnerpotenzen. Für eine Abschätzung des erwartbaren, quasistationären Luftwechsels mit Einbeziehung der (geöffneten/gekippten) Fenstergeometrie und des Temperaturunterschiedes zwischen Innenraum- und Außenluft wird die Näherungsformel nach VDI 2078 empfohlen. In den Messungen wurden jedoch bei unterschiedlichen Szenarien Abweichungen zur Näherungsformeln von -50 bis +100 % beobachtet. Eine Korrelation zur parallel gemessenen richtungsunabhängigen Windgeschwindigkeit konnte messtechnisch nicht festgestellt werden.

5.2. Modellierung und Simulation

5.2.1. Raumübergreifendes Stromfadennetzwerk

Um die lokalen Strömungs- und Temperaturverhältnisse innerhalb eines Raumes besser zu verstehen, wurden die Effekte der Wärmeübertragung während vorhandener solarer Einstrahlung, gezogener Verschattung und Spaltlüftung im äußeren Teil des Kastenfensters in einer separaten Simulationsumgebung evaluiert. In der Simulation sollten insbesondere die Auswirkungen der Spaltlüftung auf das Temperaturniveau untersucht werden. Das dazu entwickelte statische Modell berücksichtigt die Wärmeströme zwischen der Umgebung, dem Kastenfenster (geöffnet und

geschlossen) und dem Raum. Als geometrische Basis dient das Kastenfenster im Altbau der Universität für Weiterbildung Krems. In der Abbildung 25 wird die Bilanzierung der Wärmeströme innerhalb des definierten Systems schematisch veranschaulicht.

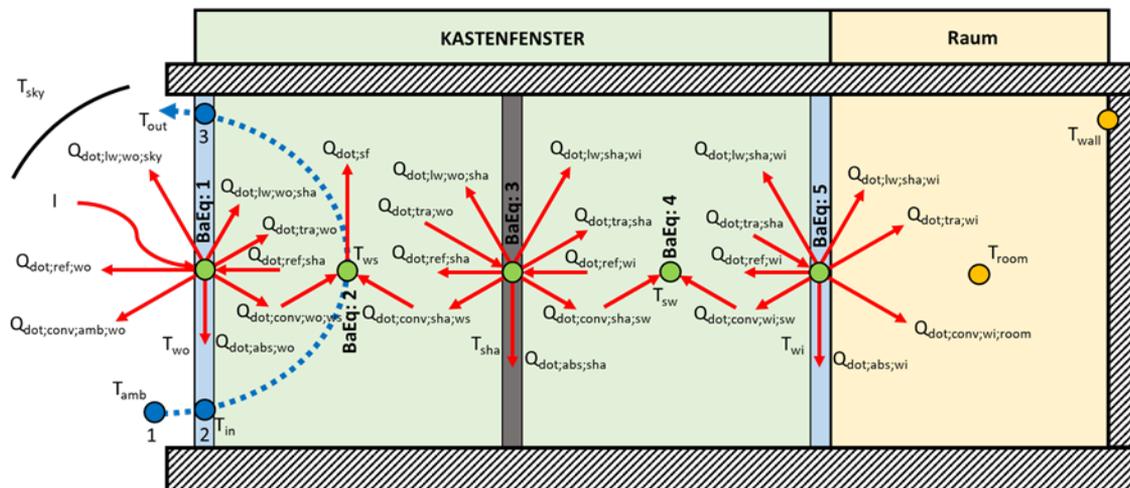


Abbildung 25: Bilanzierung eines Kastenfensters mit Darstellung der beteiligten Wärmeströme

Für die Bilanzierung wurden fünf Temperatur-Knotenpunkte definiert, in denen die stationären Energieerhaltungsgleichungen (BaEq: 1 bis 5) zur Anwendung kommen. Zudem ist die Massenerhaltung bzw. Kontinuitätsgleichung sowie die Bernoulli-Gleichung zur Berücksichtigung des thermischen Auftriebs und der Druckverluste der Ein- und Ausströmung im äußeren Kastenfensterabschnitt (Punkt 1 bis 3 in Abbildung 25) implementiert.

Folgende Annahmen wurden zur Vereinfachung getroffen:

- Lineare Temperaturzunahme entlang des Stromfadens über die Fensterhöhe
- Temperaturabhängige Dichtebestimmung der Luft nach idealer Gasgleichung
- Vernachlässigung jeglicher Dynamik (keine Speicherwirkung der Bauteile)
- Vernachlässigung der Wärmeleitung in Glasscheiben und Verschattung
- Konvektiver Wärmetransport mit konstanten Wärmeübertragungskoeffizienten
- Strahlungsbedingter Wärmetransport durch Annahme von partiellen grauen Strahlern mit konstanten Strahlungseigenschaften für jeweils kurzwellige (Sonnentemperatur) und langwellige Strahlung (Umgebungstemperatur bis max. Oberflächentemperatur)

Das Modell wurde mit gemessenen Temperaturdaten bei geschlossenem Fenster kalibriert. Abbildung 26 zeigt die Tagesverläufe der errechneten Temperaturen in den jeweiligen Knotenpunkten sowie die Verläufe der Himmels-, Umgebungs- und Raumtemperatur als Randbedingung.

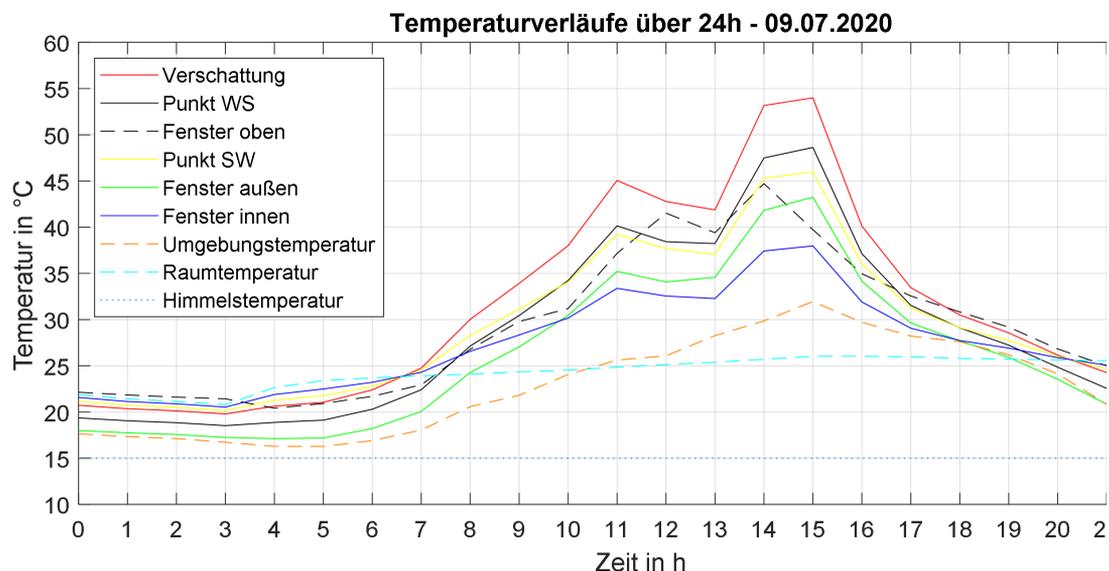


Abbildung 26: Angenommene Himmelstemperatur (···) und simulierte (–) Temperaturverläufe aus dem Kastenfenstermodell und Vergleich zu stündlich gemittelten Messdaten (–)

Zur Überprüfung der Plausibilität ist in der Abbildung 26 die Gegenüberstellung der Temperaturmesswerte innerhalb des Kastenfensters mit den Werten aus dem Modell, für den Knotenpunkt WS im äußeren Kastenfensterzwischenraum, dargestellt.

Mit dem kalibrierten Modell wurden in einer Parameterstudie die Einflüsse der solaren Einstrahlung und der Druckverlustbeiwerte der Ein- und Ausströmöffnungen des Kastenfensters untersucht. Berechnet wurden jeweils der resultierende Massenstrom sowie die Austrittstemperatur aus der Spaltlüftung.

5.2.2. Hochauflösende CFD Simulationen

Laut Theorie ist der Raumlufthechsel sowohl von thermischen Druckdifferenzen, resultierend aus dem thermischen Auftrieb (in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds und der Höhendifferenz), als auch von der im Wind enthaltenen Druckenergie beeinflusst. Beide Effekte können vergleichbare Größenordnungen von Druckdifferenzen hervorrufen und werden daher in CoolAIR in umfassenden CFD-Studien untersucht. In einer globalen Simulation des gesamten Gebäudekomplexes wird die Windumströmung des Altbaus der Universität für Weiterbildung Krams statisch simuliert und die resultierenden Druckverhältnisse an der Fassade analysiert. In der zweiten Studie werden die lokalen Lüftungsverhältnisse innerhalb des Testraums durch thermisch induzierte Druckverhältnisse mit Hilfe einer dynamischen CFD Simulation untersucht.

Für die Simulation der Gebäudeumströmung wurde ein Berechnungsmodell von 900 x 900 m² um den Altbau der UWK mit einer Höhe von 300 m aus insgesamt 8,9 Mio finiten Volumenelementen erstellt (vgl. Abbildung 27). Durch Drehung des Gebäudes im Simulationsgebiet konnten unterschiedliche Windrichtungen mit dem gleichen Simulationsgitter abgebildet werden. Die vorkommende Hauptwindrichtung ist WSW mit 247,5°. Als Randbedingung wurden zwei verschiedene Windprofile mit einer Referenzgeschwindigkeit von 1 bzw. 3 m/s auf 10 m Höhe über Boden aufgebracht.

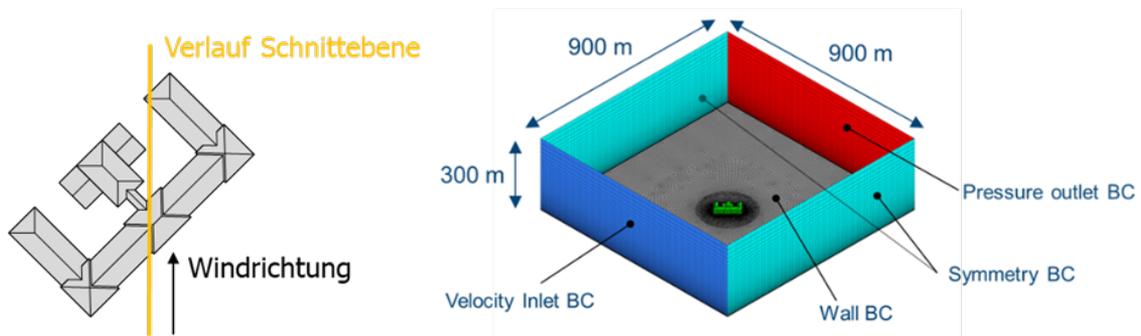


Abbildung 27: Hauptwindrichtung und Randbedingungen für das CFD Modell zur Simulation der Gebäudeumströmung und Analyse der resultierenden Fassadendrücke

Eine stationäre Simulation mit Standard k-epsilon Modell und Standard Wall-Function zeigt die Druckverhältnisse an der Fassade bei der Anströmung aus der Hauptwindrichtung laut Abbildung 28. Für den Testraum wird exemplarisch ein möglicher Luftweg durch das Gebäude bei einem Querlüftungsszenario analysiert. Die Einströmung erfolgt bei offenem Fenster des Testraums, die Ausströmung durch ein Fenster im Stiegenhaus im hinteren Teil des Gebäudes. Bei einer Referenzgeschwindigkeit von 1 m/s ergibt sich zwischen den beiden Fenstern ein Differenzdruck von 1,4 Pa, mit der Referenzgeschwindigkeit von 3 m/s steigt der Differenzdruck auf 13,5 Pa. Die Contour-Plots der statischen Druckverteilung zeigen, dass der aus der Umströmung resultierende Druckunterschied stark von der Lage der Fassadenöffnungen und den Windverhältnissen abhängt.

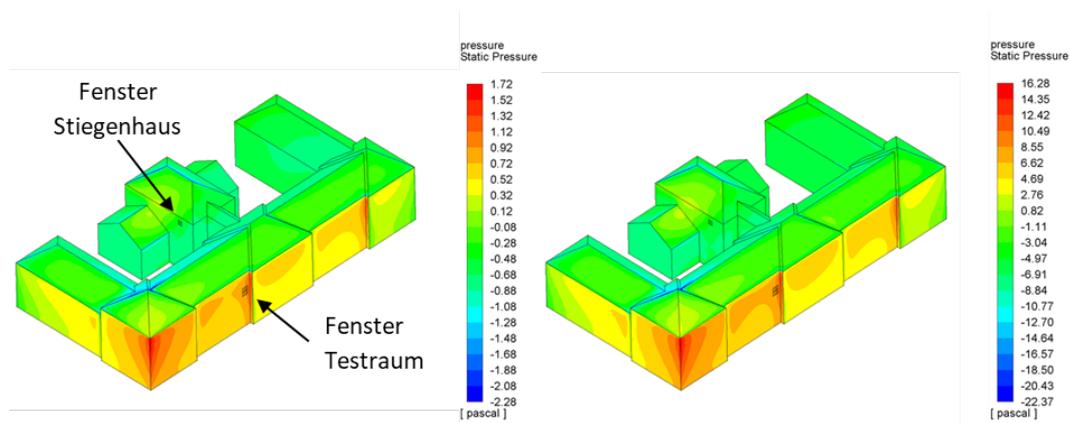


Abbildung 28: Druckverhältnisse an der Fassade bei Windprofilen mit 1 m/s (links) und 3 m/s Referenzgeschwindigkeit auf 10 m Höhe (rechts)

Um das Druckpotential unabhängig von der Lage der Fassadenöffnungen und der vorherrschenden Windrichtung beurteilen zu können, wurde die statistische Verteilung der flächengewichteten statischen Fassadendrücke je Windrichtung in Histogramm-Form erstellt. Die Analyse des Potentials berücksichtigt nur Drücke, welche auf mindestens 1 m² auftreten. Dies soll einer Mindest-Fensterfläche entsprechen. Für eine Referenzgeschwindigkeit von 1 m/s auf 10 m Höhe ist das Resultat in Abbildung 29 ersichtlich.

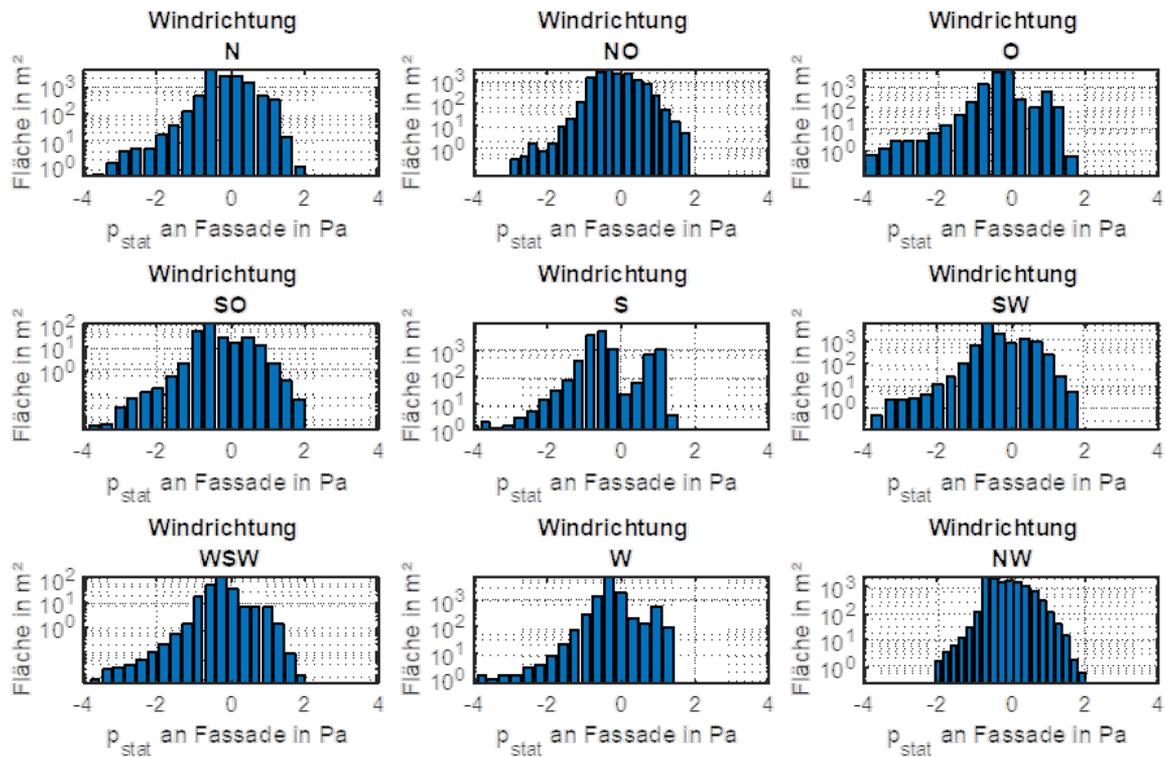


Abbildung 29: Flächengewichtete Druckverteilung an der Gebäudefassade bei unterschiedlichen Windrichtungen und 1 m/s Referenzgeschwindigkeit auf 10 m Höhe

Bei optimaler Lage der Lüftungsöffnungen sind somit je Anströmrichtung maximale Differenzdrücke von 4 bis 6 Pascal realisierbar. Zum Vergleich, für ein Pascal an thermisch induziertem Differenzdruck muss eine 3 m hohe Luftsäule einen Temperaturunterschied zur Umgebung von 3 K aufweisen. Die durch Winddruck induzierten Druckverhältnisse haben daher ein großes Potential zur Steigerung des Raumluf austausches, die konkrete Nutzung ist jedoch stark von der individuellen Situierung und den zumeist volatilen Windverhältnissen abhängig.

Die Analyse der thermisch induzierten Raumluf twechsel im Testraum der Universität für Weiterbildung Krems erfolgte anhand eines hochauflösenden Raummodells mit gekoppeltem Luftvolumen außerhalb des Fensters. Abbildung 30 zeigt den Detaillierungsgrad des Raummodells aus ca. 38 Millionen finiten Volumenelementen (finite volumes) sowie die aufgeprägten Anfangs- und Randbedingungen der dynamischen Simulation. Die Zellen der Raumluf t und der Speichermassen wurden bspw. mit 28 °C und die Außenluft mit 18 °C initialisiert. Je nach Lüftungs-Szenario wurden unterschiedliche Fensterflächen an der Grenzfläche Außenluft/Raumluf t durchlässig geschaltet und die Simulation gestartet.

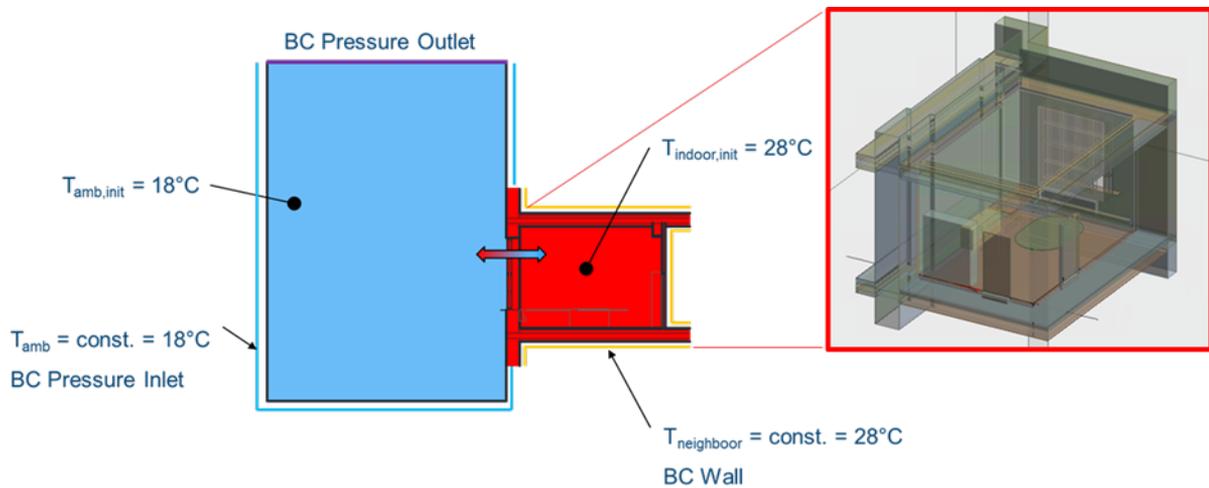


Abbildung 30: Simulationsgebiet, Anfangs- und Randbedingungen der dynamischen Simulation zur Bestimmung des thermisch induzierten Luftwechsels im Testraum der UWK

Der Simulationsstart entspricht dem Zeitpunkt der Fensteröffnung und die stationären Strömungsverhältnisse werden je Zeitschritt berechnet. Abbildung 31 zeigt dazu exemplarisch die Contour-Plots der Lufttemperatur im Raumquerschnitt bei einem Szenario mit einem einzelnen offenen Teilfenster nach 1, 10 bzw. 60 min geöffnetem Fenster.

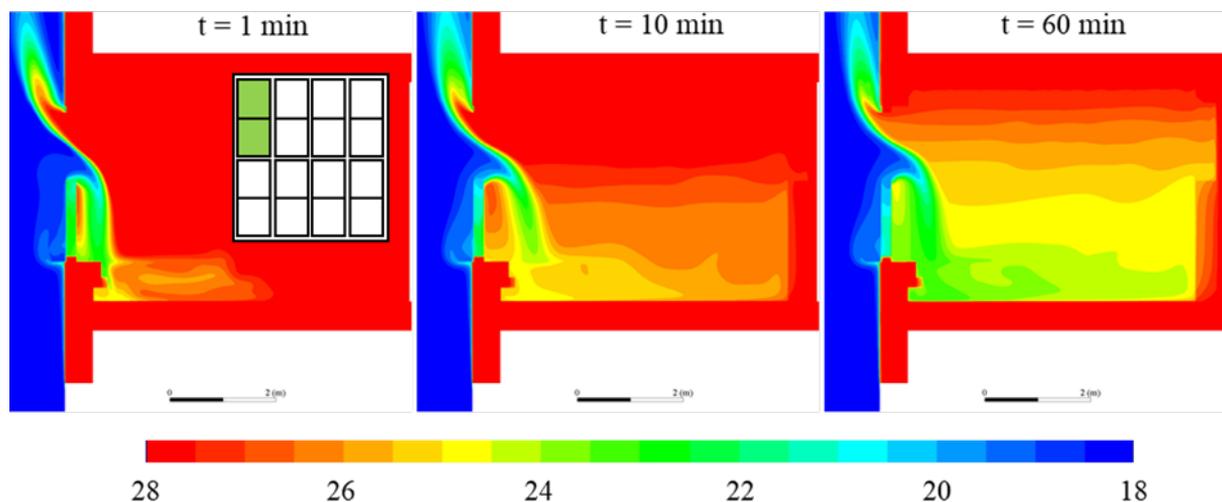


Abbildung 31: Contour-Plot der Lufttemperaturen im Testraum 1/10/60 min nach Simulationsstart (entspricht der Fensteröffnung) für ein geöffnetes Teilfenster

Um einen möglichst großen Temperaturbereich abzudecken, wurden die Simulationen je Fensteröffnungsszenario mit den drei Temperaturpaaren (Raumluft/Außenluft) 23/28, 18/28 und 16/34 °C initialisiert. Der simulierte Raumlftwechsel über die Simulationszeit von ca. je 10 Stunden ist in Abbildung 32 der Temperaturdifferenz zwischen dem Außen- und Innenraum-Luftvolumen gegenübergestellt. Zwischen den realisierten Raumlftwechseln der einzelnen Lüftungsszenarien bestehen erhebliche Unterschiede, der Luftwechsel steigt jedoch nicht linear mit der freien Querschnittsfläche an. Für alle Szenarien wird eine sehr gute Übereinstimmung mit der Näherungsformel nach VDI 2078 festgestellt.

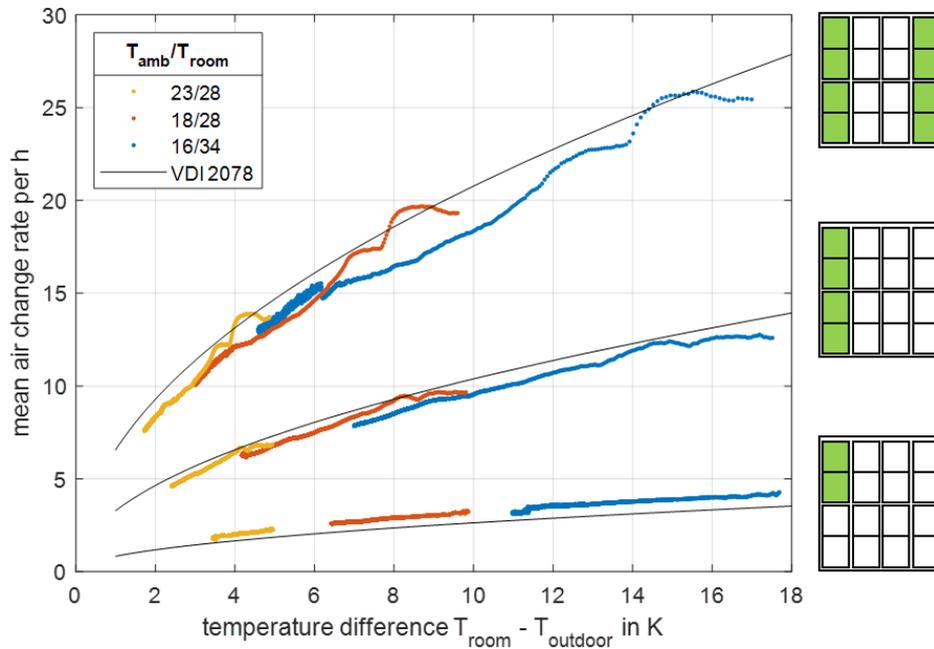


Abbildung 32: Simulierter Raumlftwechsel je Fensteröffnungsszenario über die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraumlft und Vergleich mit der Näherungsformel nach VDI2078

5.2.3. Dynamische Gebäudesimulation über erweiterte Kühllastperiode

Neben der Aufbereitung von realen Messdatensätzen wurden synthetische Datensätze aus Simulationsergebnissen generiert. Im Zuge thermisch dynamischer Gebäudesimulationen mit IDA ICE konnten naturgemäß wesentlich mehr und v.a. in wesentlich kürzerer Zeit Datensätze erstellt werden, die für ein und dasselbe Kalenderjahr auf unterschiedlichen Randbedingungen (Szenarien) basierten. Im Vergleich zur seriellen „real time“-Abfolge von Szenarien über die Projektlaufzeit waren für ein und denselben Klimadatensatz unterschiedliche Regelungen der Nachtlüftung sowie der Verschattung parallel möglich. Der Simulationszeitraum erstreckte sich dabei grundsätzlich jeweils vom 1. April bis 31. Oktober (erweiterte Kühllastperiode).

Abbildung 33 zeigt das Simulationsmodell. In der Auswertung wurde nur der zentrale Einzelraum (Testraum) betrachtet. Die jeweiligen angrenzenden Zonen werden dabei in der Simulation weder nachts gelüftet, noch verschattet und nicht mit inneren Lasten aus Personen- und Geräteabwärme beaufschlagt. Diese 28 umliegenden Zonen im Gebäude dienen mit ihren entsprechenden thermischen Trägheiten bzw. Massen als Pufferzonen, die im Gegensatz zu adiabaten Zonengrenzen das thermische Verhalten des Testraumes entsprechend mitprägen. Daraus resultieren wiederum entsprechende Wärmeströme in und aus der zentral betrachteten Zone (Testraum).

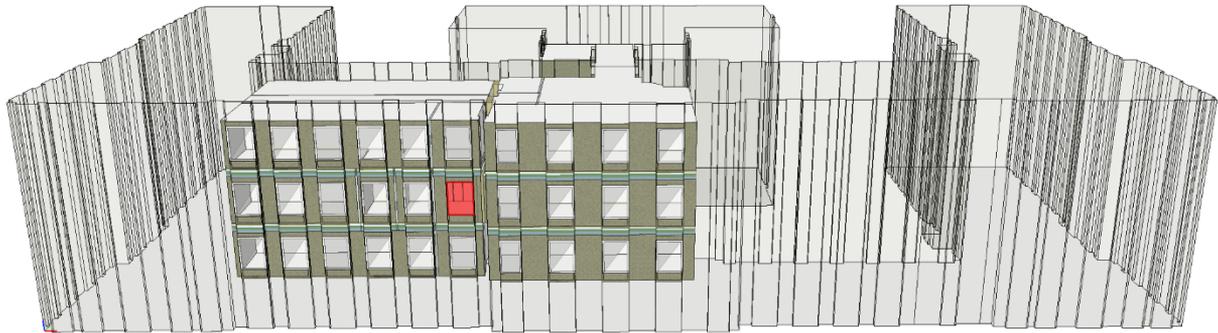


Abbildung 33: IDA ICE Modell mit Testraum mit rot markiertem Fenster

Nachfolgend werden die untersuchten Varianten beschrieben und deren Ergebnisse untereinander verglichen. Die Simulationen wurden dabei vorerst jeweils mit den Klimadatensätzen der Jahre 2020 und 2021 durchgeführt. Die Randbedingungen wie Raum- und Fenstergeometrie, Solltemperatur während der Heizperiode, Infiltrationsluftwechsel, Aufbauten opaker sowie transparenter Bauteile etc. wurden in den Varianten nicht verändert. Tabelle 4 zeigt die variierten Parameter Lüftung und Verschattung bzw. regelungstechnische Unterschiede, woraus sieben Grundvarianten hervorgingen.

Tabelle 4: untersuchte Simulationsvarianten als Grundlage für die modellbasierte Regelung (MPC)

Variante	Fensterflügel tagsüber		Fensterflügel nachts		Beschattung	Nachtlüftung
	innen	außen	innen	außen	Regelung	Regelung
1a	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen	keine	keine Lüftung
1b	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen	08:00 - 20:00	keine Lüftung
2a	geschlossen	geschlossen	offen	offen	keine	20:00 - 08:00 durchgängig
2b	geschlossen	geschlossen	offen	offen	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 durchgängig
3a	geschlossen	geschlossen	auf-zu-auf...	auf-zu-auf...	keine	20:00 - 08:00 „stündlich“
3b	geschlossen	geschlossen	auf-zu-auf...	auf-zu-auf...	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 „stündlich“
4a	geschlossen	geschlossen	offen (siehe Regelung)	offen (siehe Regelung)	keine	20:00 - 08:00 „stündlich“ Freigabe, wenn: • $T_i > 23,0\text{ °C}$ • $T_a < T_i$ Schließung, wenn $T_i < 19\text{ °C}$
4b	geschlossen	geschlossen	offen (siehe Regelung)	offen (siehe Regelung)	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 „stündlich“ Freigabe, wenn: • $T_i > 23,0\text{ °C}$ • $T_a < T_i$ Schließung, wenn $T_i < 19\text{ °C}$
5a	geschlossen	geschlossen	offen (siehe Regelung)	offen (siehe Regelung)	keine	20:00 - 08:00 „stündlich“ und Freigabe, wenn: • $T_a < T_i$
5b	geschlossen	geschlossen	offen (siehe Regelung)	offen (siehe Regelung)	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 „stündlich“ und Freigabe, wenn: • $T_a < T_i$
6a	geschlossen	offen	geschlossen	geschlossen	08:00 - 20:00	keine Lüftung
6b	geschlossen	offen	offen	offen	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 durchgängig
6c	geschlossen	offen	auf-zu-auf...	auf-zu-auf...	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 „stündlich“
7	geschlossen	geschlossen	offen	offen	08:00 - 20:00	20:00 - 08:00 durchgängig wie 2b jedoch 50 % Öffnung

Im Zuge der Simulationsarbeiten und der Gegenüberstellung der Jahre 2020 und 2021 wurde durch die Konsortialführung entschieden, den Fokus auf das Jahr 2021 zu legen, da sich dieses als das durchschnittlich wärmere herausstellte. Der Vergleich der Übertemperaturstunden der Außentemperatur ($T_{\text{air,out}} \geq 26,05 \text{ °C}$) beider Jahre ergibt 313 (2020) zu 371 Stunden (2021) pro Jahr.

Hauptaugenmerk in diesem Task verlangte mit Abstand das Kastenfenster, welches in IDA ICE als gering belüftete Doppelfassade modelliert wurde. Wie in den Varianten 6a bis 6c in obiger Tabelle ersichtlich, wurde des weiteren die äußere Flügelebene tagsüber in einigen Szenarien real geöffnet, in der Simulation die äußere Scheibe der Doppelfassade zweckmäßig virtuell entfernt, wobei untertags die Rollos aktiv waren.

Die nachfolgenden Diagramme stellen ausgewählte Simulationsergebnisse auf Basis realer Klimadatensätze anhand des modellierten Testraumes im Altbau der UWK dar. Ausgewählte Ergebnisdatensätze dienen in weiterer Folge dem Training der MPC in Abschnitt 5.3.

Variante 1a und 1b

Mittels Vergleiches der Varianten 1a und 1b soll am Beginn der Unterschied des solaren Eintrages durch das Fenster mit und ohne Verschattung im Scheibenzwischenraum (SZR) tagsüber an einem repräsentativen Sommertag im Juli 2021 herausgearbeitet werden. Die Fenster blieben dabei stets geschlossen. Die rote Kurve in Abbildung 34 stellt dabei den Verlauf des Wärmestrahlungseintrags in Watt durch das tagsüber unverschattete Fenster in den Testraum dar, die blaue jene für das mit im SZR befindlichen Rollos. Die maximale solare Eintragungsleistung über das verschattete Fenster beträgt am ausgewählten Tag (29. Juli) weniger als 1/5 des unverschatteten Fensters (ca. 300 W zu ca. 1.650 W). Um 8 Uhr wird die Verschattung aktiviert (beide Rollos, blaue Kurve) und ab diesem Zeitpunkt so die eingetragene Energiemenge minimiert, die sich mittels Integrals über die Zeitspanne ergibt.

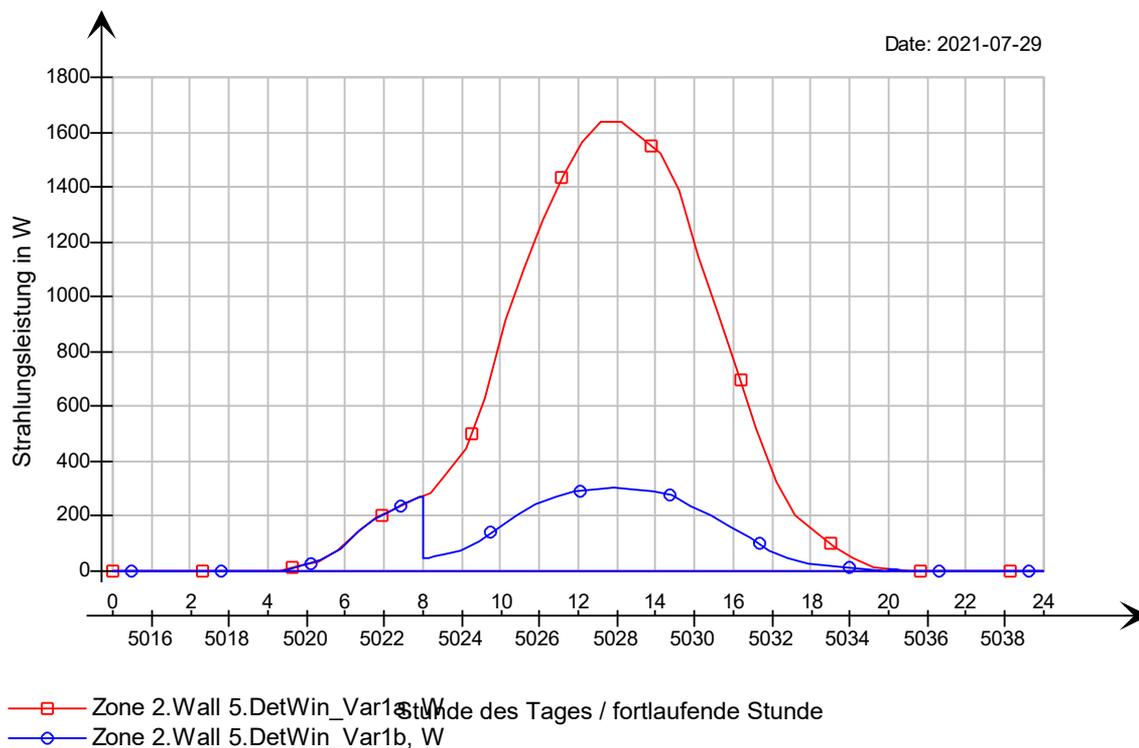


Abbildung 34: Verlauf der Solarstrahlungsleistung durch Fenster mit aktiver Verschattungseinrichtung (blau) und ohne (rot) für den 29.07.2021

Im Folgenden berücksichtigen die weiteren „b“-Varianten stets diese Verschattungswirkung (vgl. Tabelle 4), woraus sich grundsätzliche Ergebnisunterschiede im Variantenvergleich ergeben.

Variante 2a und 2b

In diesem Vergleich der Varianten 2a und 2b wird der Testraum zusätzlich mit einer dauerhaften nächtlichen Lüftung zwischen 20:00 – 8:00 Uhr beaufschlagt, ohne Rücksicht auf Soll- oder Grenztemperaturen für den Testraum. In Abbildung 35 ist anhand eines repräsentativen Wochenverlaufs für Ende Juli mit fünf Sommertagen ($T_{\text{air,out,max}} \geq 25 \text{ °C}$) gut abzulesen, dass die Tagesmaxima der Lufttemperaturen im Testraum ca. 2 K niedriger zu liegen kommen, wenn untertags verschattet wird. Die nächtlichen Tagesminima fallen hingegen zusammen und erreichen niedrigere Werte, wenn auch die Außentemperatur nachts entsprechend niedriger ist. Ohne unteren Sollwert fallen hier die Raumlufttemperaturen auch bis 18 °C ab.

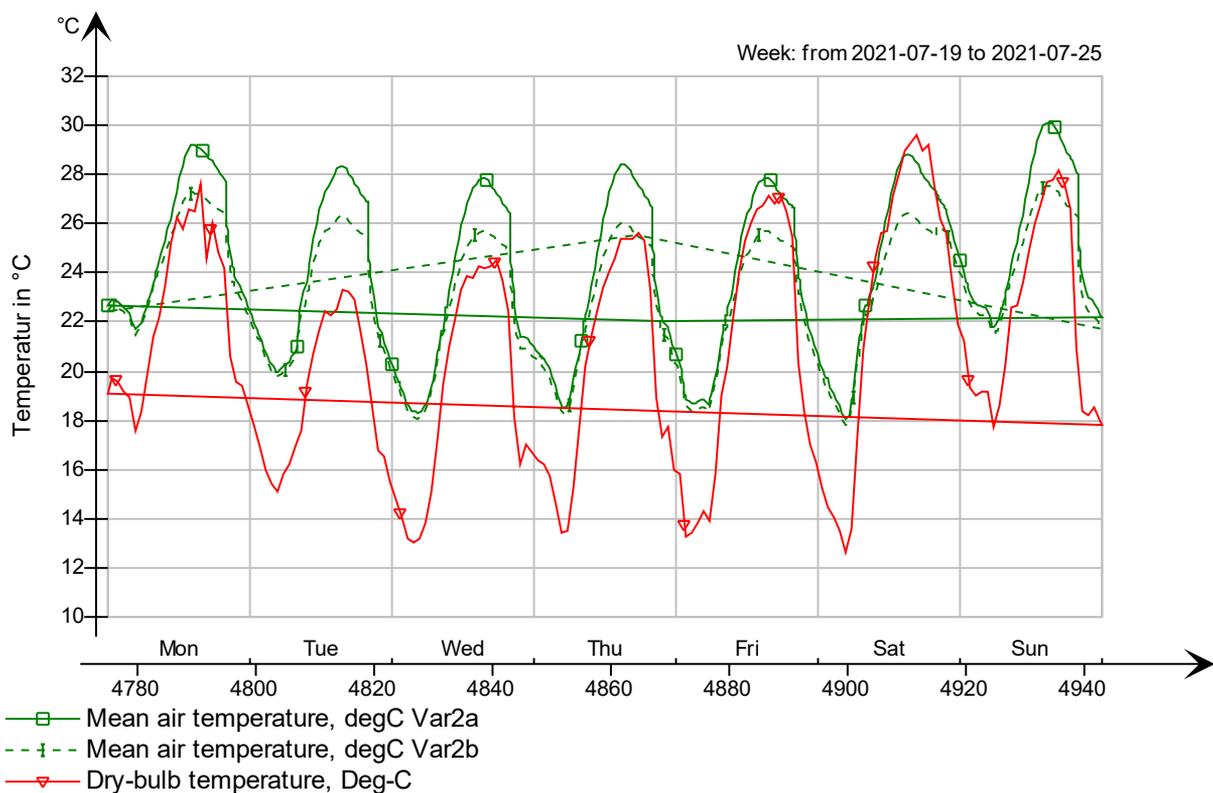


Abbildung 35: Temperaturverläufe im Testraum während einer Juliwoche bei dauerhafter Nachlüftung mit Verschattung (grün strichliert) und ohne (grün durchgezogen), rot: Außentemperatur

Variante 2a und 5a

In diesem Vergleich wird das Potential der Nachlüftung zweier Varianten jeweils ohne Verschattung tagsüber untersucht. Der Unterschied zwischen den Varianten 5a zu 2a besteht darin, dass in Variante 5a eine Öffnung des Fensters nur dann erlaubt wird, wenn die vorgesehene stündliche Prüfung ergibt, dass die Außentemperatur unter der inneren Raumtemperatur liegt ($T_a < T_i$, vgl. Tabelle 4). Für dieselbe repräsentative Sommerwoche wie oben ergeben sich keine Lufttemperaturunterschiede im Wochenverlauf, da T_a zwischen 20:00 und 8:00 Uhr zu jeder vollen Stunde stets kleiner ist als T_i , siehe Abbildung 36. Die grünen Kurven sind deckungsgleich. Ohne unteren Sollwert fallen auch hier die Raumlufttemperaturen bis ca. 18 °C ab.

Auch bei der exemplarischen Betrachtung einer Woche im April sind keine Unterschiede feststellbar, da der 1. April das Ende der thermischen Einschwingphase in IDA ICE inkl. der Beheizung des Testraumes, gleichzeitig jedoch den Start des so geplanten Nachtlüftungsszenarios markiert. Nachts liegen in diesem Monat die Außentemperaturen T_a stets unterhalb von T_i , weshalb die Regelung die Nachtlüftung wie geplant zu jeder Stunde wie geplant freigibt bzw. ab 20:00 Uhr die Fenster offen lässt. Eine untere Raumluftgrenztemperatur als minimal zulässige ist erst in den Varianten 4a und 4b implementiert.

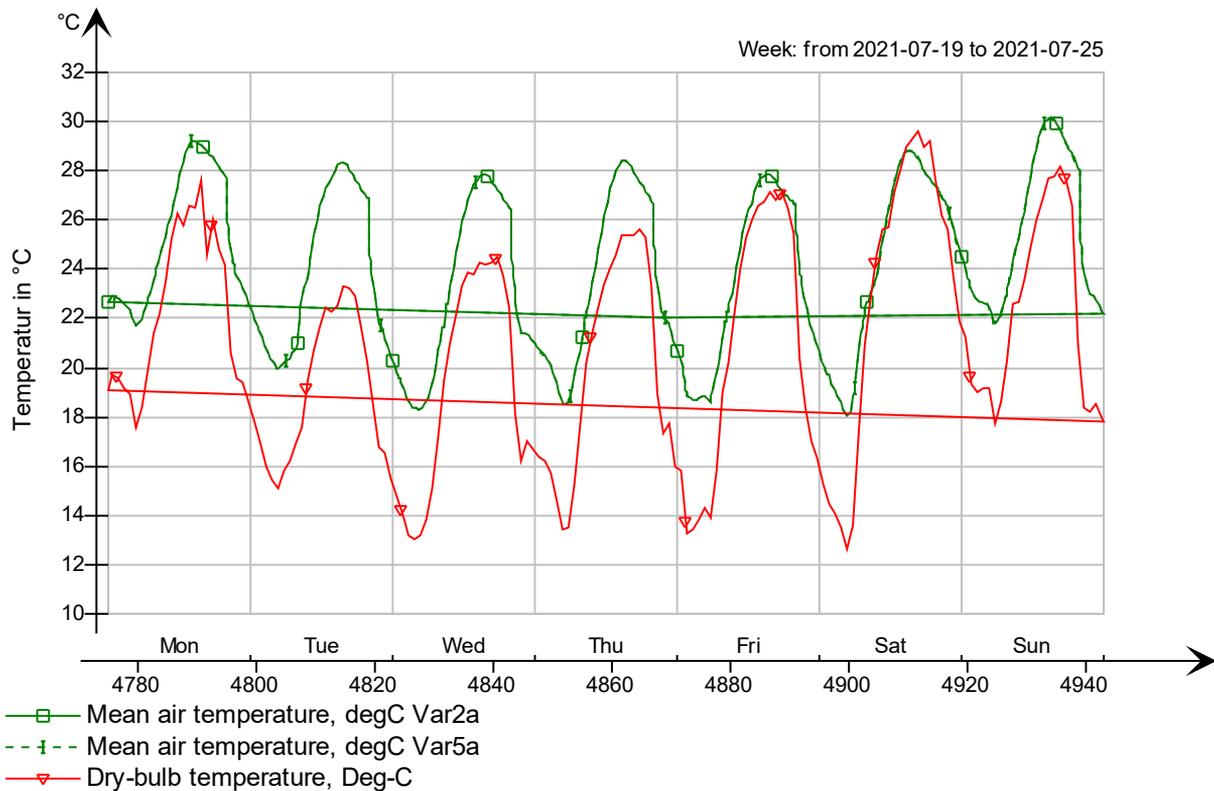


Abbildung 36: Temperaturverläufe im Testraum während einer Juliwoche ohne Verschattung bei durchgängiger Nachtlüftung (grün durchgezogen) und bei „stündlicher“ Freigabeprüfung (grün strichliert), rot: Außentemperatur

Variante 2b und 5b

Tagsüber ist hier in beiden „b“-Varianten die Verschattung aktiv, nachts bleibt im Freigabezeitraum in beiden Fällen das Fenster analog zum Vergleich 2a/5a aufgrund desselben Temperaturabgleichs durchgehend geöffnet. Die Ergebnisse aus diesem Vergleich resultieren in ca. 2 K geringeren Temperaturmaxima in beiden Varianten für dieselbe betrachtete Juliwoche gegenüber 2a/5a.

Variante 4a, 4b, 5a und 5b

Aus Komfortgründen in der Praxis ergibt sich aus den bisherigen Varianten eine untere Solltemperatur morgens, z.B. zu Arbeitsbeginn um 8:00 Uhr, die je nach Arbeitsumgebung, persönlichem Aktivitätsniveau und Freiheitsgraden in eventuellen Bekleidungs Vorschriften in den Varianten 4a und 4b auf 19 °C gesetzt wird. Wissend, dass eine sich einstellende Raumlufttemperatur nach einer Nachtlüftungsperiode von 19 °C für einige Personengruppen bei sitzender Bürotätigkeit unbehaglich kühl sein kann, wird in den Sommermonaten der Testraum vormittags grundsätzlich wieder erwärmt. Aus den Varianten 2a, 2b, 5a und 5b sind Tagesschwankungen der Raumlufttemperatur von einigen Kelvin bis knapp 10 K ersichtlich, wenn die Tag-Nacht-Spreizung der Außentemperatur entsprechend groß ist.

An dieser nicht analytisch lösbaren Fragestellung, an welchem Zeitpunkt nachts welcher Grenzwert zu gerade noch behaglichen Raum- bzw. operativen Temperaturen zu einem späteren Zeitpunkt (hier z.B. Arbeitsbeginn) führt, wird klar, dass dies in der Praxis einer Regelung auf Basis eines mehr als einfachen Soll-Ist-Vergleiches bedarf. Vordergründig unbeachtet des Zeitpunktes der tiefsten Raumtemperatur morgens werden für die Regelung in den Varianten 4a und 4b als eine Möglichkeit $T_{i,min} \geq 19 \text{ °C}$ zwischen 20:00 und 8:00 Uhr gesetzt. Des Weiteren werden die Flügel erst ab Raumtemperaturen von $T_i \geq 23 \text{ °C}$ und wenn $T_a < T_i$ gilt zur Öffnung freigegeben.

Im Vergleich zu den obigen Simulationsvarianten versucht die Nachtlüftungsregelung ab 20:00 Uhr die tagsüber tw. überwärmten Räume mittels geöffneter Flügel zu kühlen und während des Freigabezeitfensters bis 8:00 Uhr Raumlufttemperaturen zwischen 19 und 23 °C zu erreichen bzw. zu halten. Dies geschieht durch stündliche Überprüfung der Innen- bzw. Außenlufttemperatur was zur Folge hat, dass die Kastenfensterflügel aufgrund der kühlen Nachttemperaturen in dieser Juniwoche grundsätzlich mehrmals pro Nacht öffnen und schließen. In der Nacht von Samstag auf Sonntag bleibt das Fenster bereits mehrere Stunden ab 20:00 Uhr durchgehend geöffnet, schließt und öffnet sich noch je einmal frühmorgens, was ursächlich an der beinahe erreichten Tropennacht mit entsprechend hohen Temperaturen $> 19 \text{ °C}$ liegt. Die nachfolgende Abbildung 37 verdeutlicht diese Ergebnisse am Beispiel einer kontinuierlich wärmer werdenden Woche (betreffend den Tagesmittelwert der Außentemperatur) sowohl an der verschatteten (grüne Kurve) als auch an der unverschatteten Variante (blaue Kurve). Die Tagesmaxima der verschatteten Variante liegen um ca. 2 K deutlich niedriger.

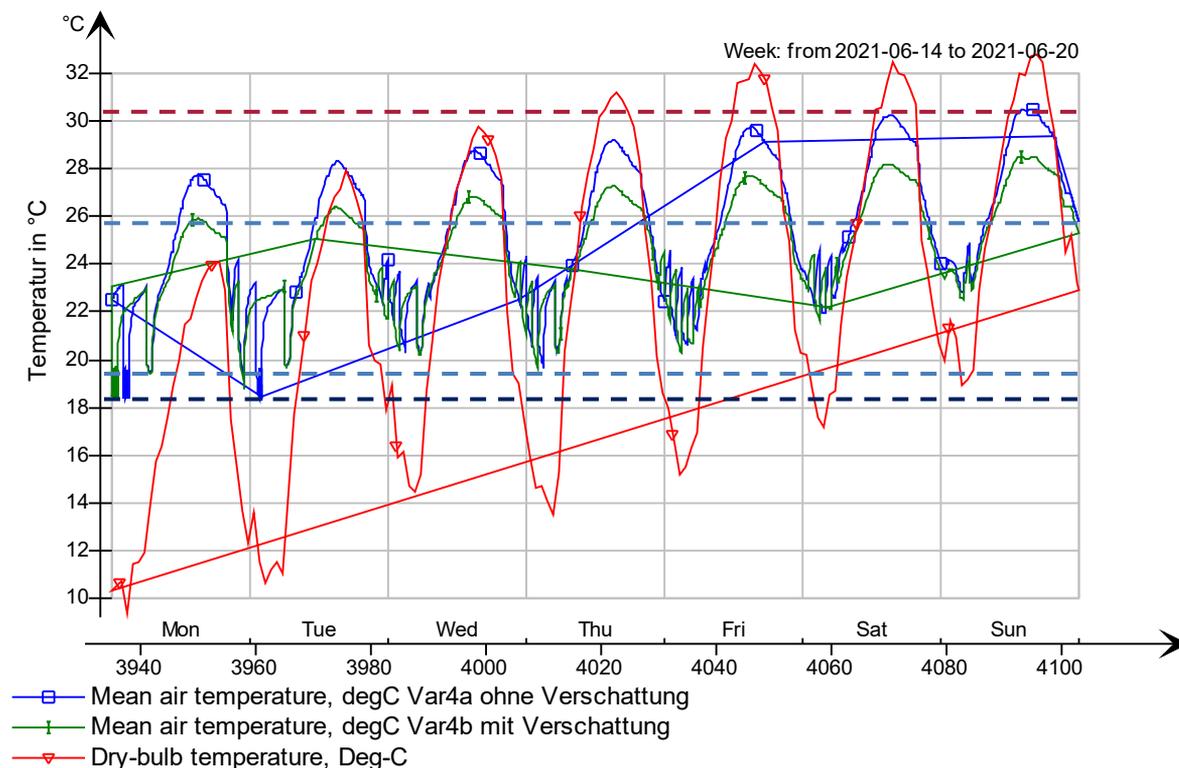


Abbildung 37: Temperaturverläufe im Testraum während einer Juniwoche mit adaptierter Nachtlüftungsregelung mit Verschattung tagsüber (grün) und ohne Verschattung (blau), rot: Außentemperatur

Neben einer kontinuierlich wärmer werdenden Juniwoche ist in Abbildung 38 eine Augustwoche von Variante 4a und 4b dargestellt, die geringere Tag-Nacht-Schwankungen der Außentemperatur und

insgesamt wärmere Nächte im Vergleich aufweist. Dies resultiert einerseits in höheren Innenraumtemperaturen und andererseits in höheren Unterschieden der Tagesmaxima zwischen verschatteter und unverschatteter Variante. Am Ende dieser Augustwoche werden Maxima von knapp 30 bzw. ca. 33 °C erreicht.

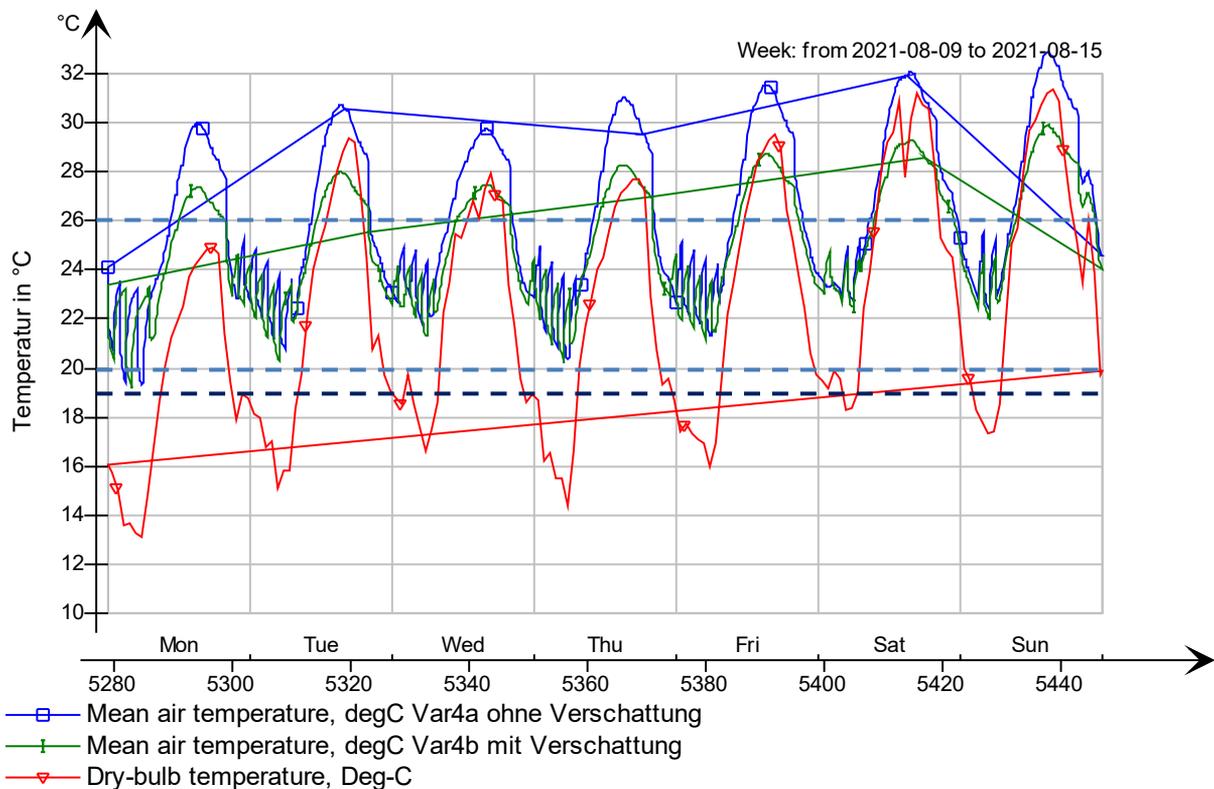


Abbildung 38: Temperaturverläufe im Testraum während einer Augustwoche mit adaptierter Nachtlüftungsregelung mit Verschattung (grün) und ohne (blau), rot: Außentemperatur

Zur Erzielung niedrigerer Tagesmaxima der Raumlufttemperatur in der selben Augustwoche wird Variante 5b in den Vergleich miteinbezogen, deren Regelung den unteren Grenzwert von 19 °C als auch den oberen von 23 °C aus 4a bzw. 4b nicht implementiert hat (vgl. Tabelle 4). In Abbildung 39 werden dadurch sowohl täglich niedrigere Maxima als auch ein um ca. 0,5 K tieferes absolutes Tagesmaximum am Ende dieser Woche im direkten Vergleich mit 4b deutlich (vgl. Abbildung 38). Weiters bleiben die Flügel, erkennbar am selben qualitativen Verlauf zw. Außen- und Innenlufttemperatur, nachts durchgehend geöffnet. Die Raumtemperaturen in der Früh liegen im Gegenzug teilweise unter 20 °C und damit für den Testraum etwas zu kühl.

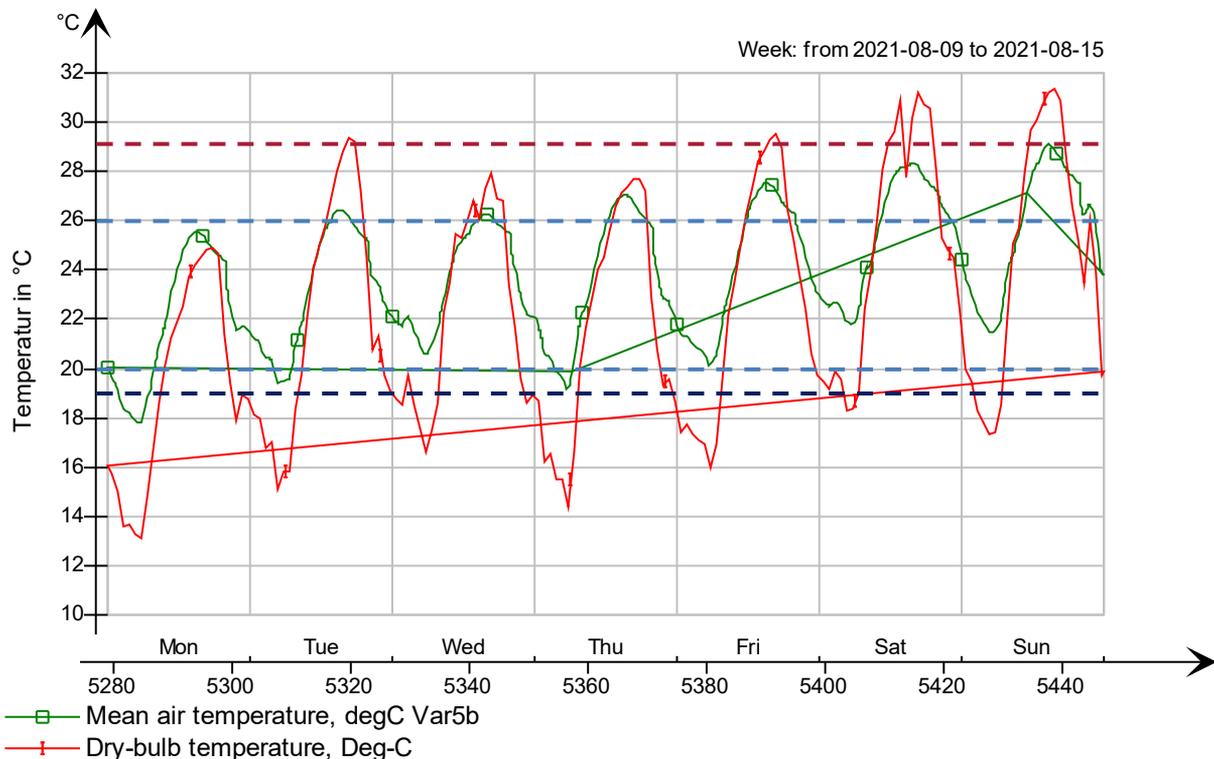


Abbildung 39: Temperaturverlauf im Testraum in Variante 5b (grün) während derselben Augustwoche, rot: Außentemperatur

Variante 2b und 6b

Aus dem bekannten Wissen der Bauphysik, dass eine außenliegende vertikale Verschattungseinrichtung höhere Abschattungskoeffizienten bzw. Gesamtenergiedurchlassgrade g_{tot} im Vergleich zu zwischen- oder innenliegenden bewirken, werden die Varianten 6a, 6b und 6c mit rund um die Uhr offenen Außenflügeln aufgenommen.

Variante 6b weist demnach unter Tags folgendes Verschattungskonzept auf (von außen nach innen):

- vollständig geöffnete Außenflügel
- aktives Rollo (Soltis92-Gewebe)
- 2-3 mm bestehendes Einfachglas (Float), unbeschichtet

Im Vergleich zum geschlossenen Kastenfenster ergeben sich dadurch folgende Randbedingungen hinsichtlich der drei Komponenten der Wärmeübertragung (Leitung, Konvektion, Strahlung):

- Die Außenlufttemperatur liegt unmittelbar am Rollo an, damit ergibt sich ein anderes Delta T zwischen Rollo und Testraum-Lufttemperatur → Wärmedurchgangskoeffizient verändert.
- Der Scheibenzwischenraum bzw. jener Luftpolster zwischen Rollo und Innenscheibe wird effizienter mit Außenluft belüftet → Konvektion erhöht.
- Die Reflexion der Wärmestrahlung am Rollo nach Außen sowie die sekundäre Wärmeabstrahlung des Kastenfensters nach Außen wird nicht durch eine Floatglasscheibe behindert → Strahlungsleistung nach außen erhöht.

Je nach Tageszeit bzw. Datum in der erweiterten Kühlperiode fallen der Temperaturgradient zwischen Außen und Innen sowie das Solarstrahlungsangebot unterschiedlich aus. Die nachfolgende Abbildung 40 verdeutlicht den Unterschied hinsichtlich des Tagesganges der Raumlufttemperatur zwischen geschlossenen (2b) und offenen Außenflügeln (6b) des Kastenfensters bei sonst gleichen Randbedingungen am Beispiel der bislang herangezogenen Juliwoche. Nachts wird in beiden Fällen dauerhaft (ohne Regelung) gelüftet und untertags verschattet (vgl. auch Tabelle 4).

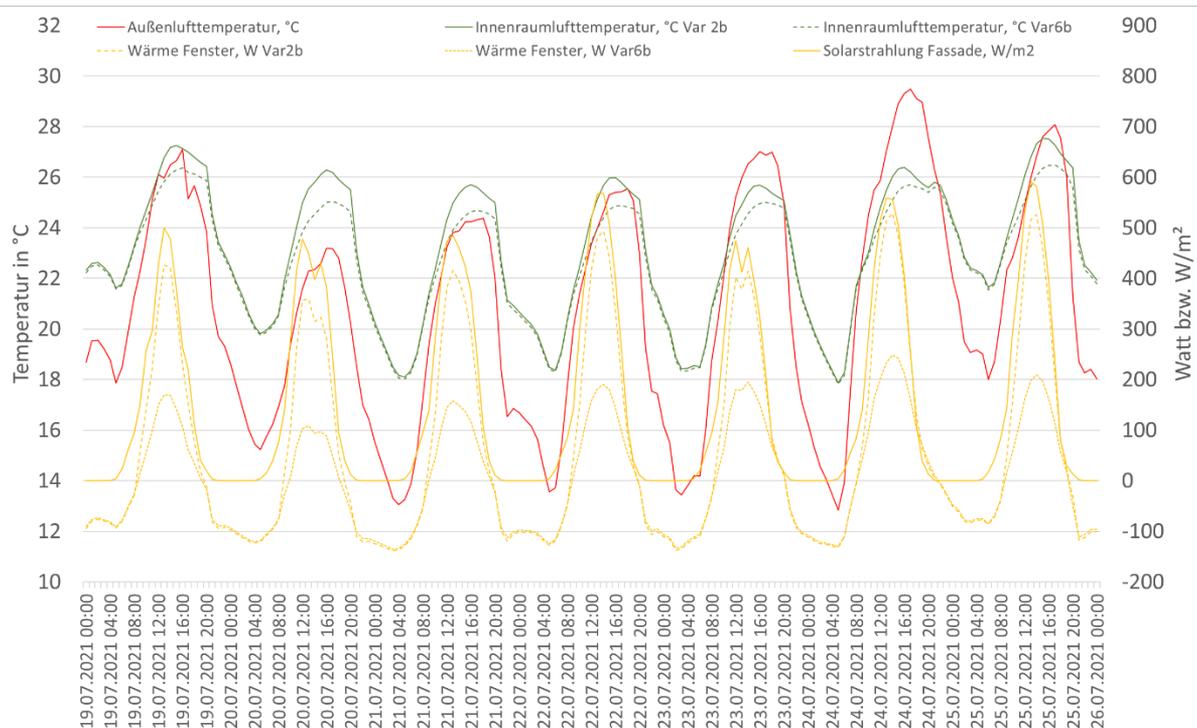


Abbildung 40: Innenraumlufthtemperaturvergleich bei geschlossener (2b) vs. offener äußerer Flügelebene (6b) bei Verschattung tagsüber im Scheibenzwischenraum während ausgewählter Juliwoche

Der gelb durchgezogene Graph repräsentiert die Solarstrahlung auf die betreffende Südfassade vor dem Testraum, die beiden gelb strichlierten jene Wärmeleistung durch das gesamte Kastenfenster. Negative Werte nachts verdeutlichen dabei die entsprechende Wärmeabfuhr nach außen. Variante 2b mit geschlossenen Außenflügeln unter Tags erreicht Tagesmaxima von 360 bis 516482 W, Variante 6b mit offenen Außenflügeln 109 bis 242 W und damit ca. ein Drittel bis max. die Hälfte der Wärmeleistung. Hinsichtlich der darauf basierenden Raumtemperaturen ergeben sich Unterschiede von max. 1,1 K (20.07.), wobei sich jeweils bis 12:00 Uhr Unterschiede von mind. 0,5 K eingestellt haben.

Variantenvergleich 1a, 2b, 4b und 6b:

Dieser direkte Vergleich von vier Varianten dient der Veranschaulichung der Möglichkeiten am Testraumkastenfenster, Raumtemperaturen unter Tags in der ausgewählten Juliwoche zwischen 20 und 26 °C zu erreichen. 1a verdeutlicht vorweg, dass ohne jegliche Verschattung und ohne Nachtlüftung dieses Ziel bei weitem nicht erreicht werden kann (blaue Linie in Abbildung 41).

In den Varianten 2b, 4b und 6b ist jeweils die idente Verschattungseinrichtung durchgehend aktiv, nur die Nachtlüftungsregelungen unterscheiden sich entsprechend Tabelle 4. Die Varianten 2b und 6b mit durchgehender Nachtlüftung weisen dabei die niedrigsten Tagestemperaturen auf, 6b mit im

relevanten Zeitraum zusätzlich geöffneten Außenflügel nochmals geringfügig niedrigere Temperaturniveaus. Diese Niveaus bedeuten am Ende der Nachtlüftungszyklen um 8:00 Uhr Raumlufttemperaturen zwischen 20,1 und 23,2 °C in der betrachteten Woche. Dem gegenüber steht Variante 4b mit einer Nachtlüftungsregelung, welche das Fenster bei mehr als 23 °C Raumtemperatur öffnet und bei Erreichen von 19 °C wieder schließt. Die Soll-Ist-Wert-Überprüfung findet zu jeder Stunde statt. Wie aus nachfolgender Abbildung ersichtlich ist, pendelt die Temperatur zwischen diesen beiden Grenzwerten nachts und erreicht um 8:00 Uhr jeweils > 21 °C.

Für die Entladung der Speichermassen nachts bieten die Varianten 2b und 6b das größte Potential, wobei die morgendlichen Temperaturen im Innenraum an manchen Tagen kühler als 20 ° ausfallen.

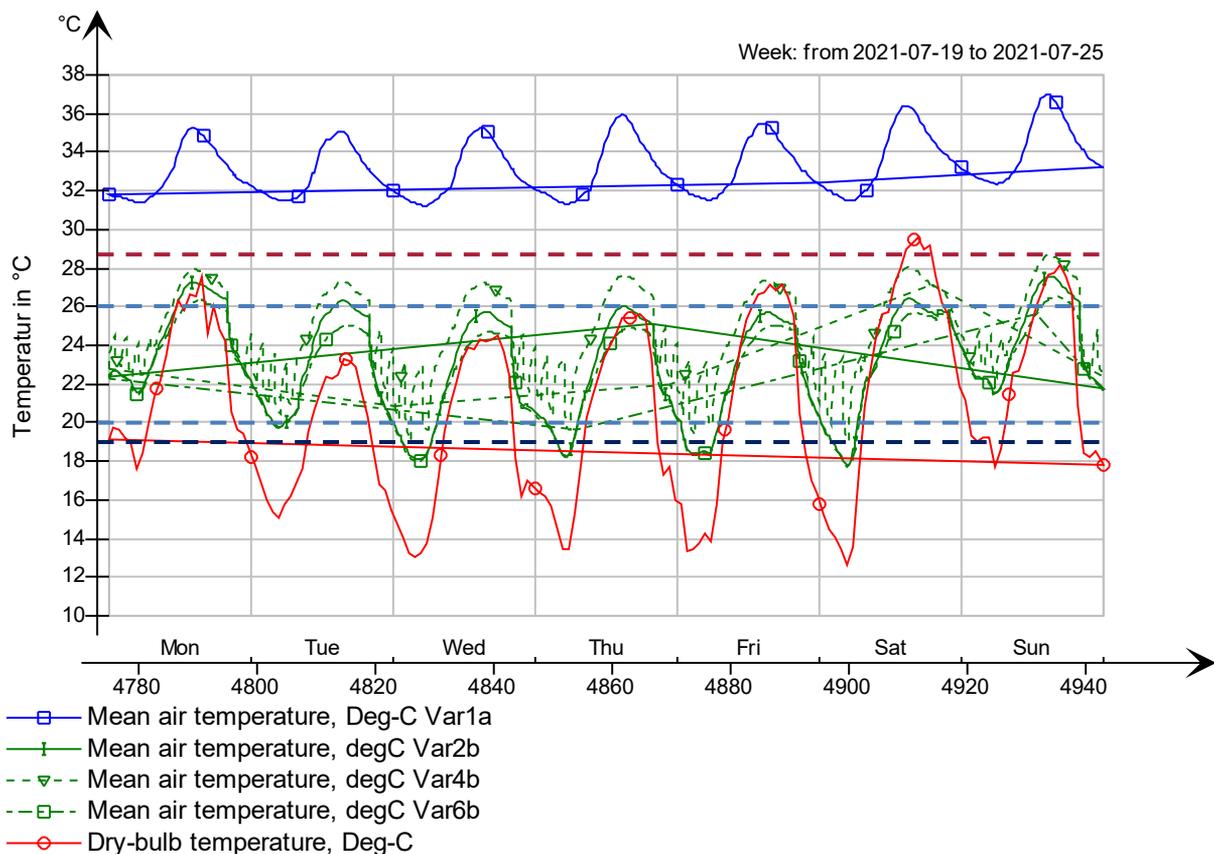


Abbildung 41: Vergleich der Raumlufttemperaturverläufe (grüne Kurven) in den verwendeten Nachtlüftungsregelungen der Varianten 1a, 2b, 4b und 6b, rot: Außentemperatur

Variante 2b und 7

Dieser Variantenvergleich behandelt den Unterschied in der Raumlufttemperaturentwicklung bei 50 bzw. 100 % Fensteröffnung in der ausgewählten Juliwoche. In den Varianten 2 bis 6 samt Sub-Varianten sind gänzlich öffnende Fenster während der Lüftungszyklen implementiert, in Variante 7 öffnet es sich hingegen nur zu 50 %. Das Temperaturniveau liegt bei 50 % Öffnung tagsüber um knapp 1 K über der vollständig geöffneten Variante 2b, resultierend aus um 1 bis 2 Kelvin höheren Temperaturen nachts im Raum, unabhängig davon, ob es 14 oder 18 °C Außenlufttemperatur als Minima gibt, siehe Abbildung 42.

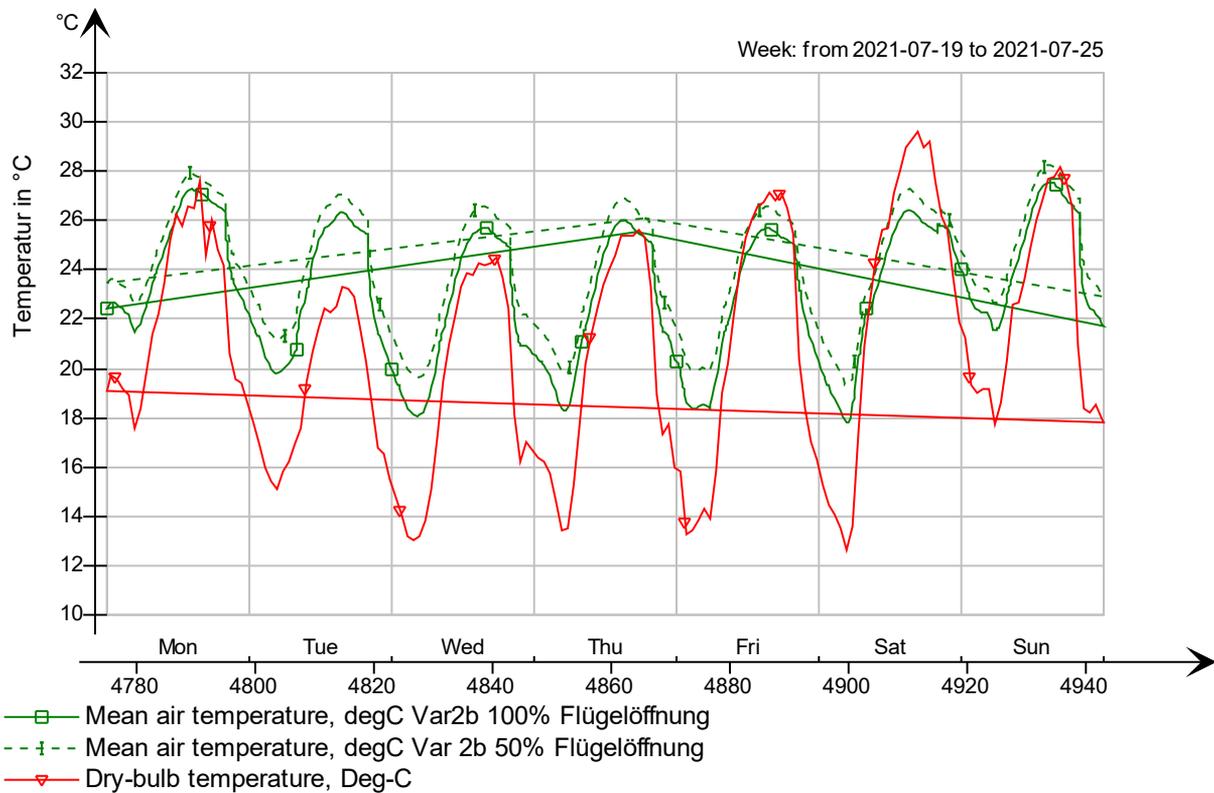


Abbildung 42: Vergleich Fensteröffnung 100 % (2b) und 50 % (7), grüne Kurven, rot: Außentemperatur

Betrachtung statischer Grenzen zur Beurteilung des Innenraumkomforts anhand der operativen Raumtemperatur der Varianten 2b, 4b, 5b und 6b

In diesem Vergleich werden die operativen Raumtemperaturen von vier Varianten miteinander verglichen. Zur Beurteilung der Sommertauglichkeit wurde dafür die Übertemperaturhäufigkeit über 26 °C operative Temperatur während der Belegungszeit (08:00 – 17:00, 7 Tage pro Woche da i.A. auch an Wochenenden mit Anwesenheiten zu rechnen ist) herangezogen.

Die Variante 4b weist dabei mit ca. 600 h innerhalb der erweiterten Kühlperiode (April bis Oktober) gegenüber den Varianten 2b und 5b mit jeweils ca. 250 h und der Variante 6b mit ca. 150 h die höchste Übertemperaturhäufigkeit auf. Das größte Potential zur Einhaltung der Temperaturgrenze liefert die Variante 6b: Hier werden die äußeren Kastenfensterflügel bei aktiver Verschattung tagsüber offengehalten. Während der Nachtstunden von 20:00 – 8:00 wird dauerhaft über den gesamten Fensterquerschnitt gelüftet.

Im direkten Vergleich mit Variante 2b ergibt sich für diese, ebenfalls mit dauerhafter Lüftung während der Nachtstunden, ein um ca. 70 % häufigeres Überschreiten von 26 °C.

Die Variante 5b mit Lüftung während der Nachtstunden mit der Bedingung, dass die Innenraumtemperatur höher als die Außenlufttemperatur sein muss, liegt auf demselben Niveau wie Variante 2b. In den warmen Sommermonaten ist diese Bedingung durchgehend erfüllt, was zum selben Kühlpotential für den Raum in beiden Varianten führt.

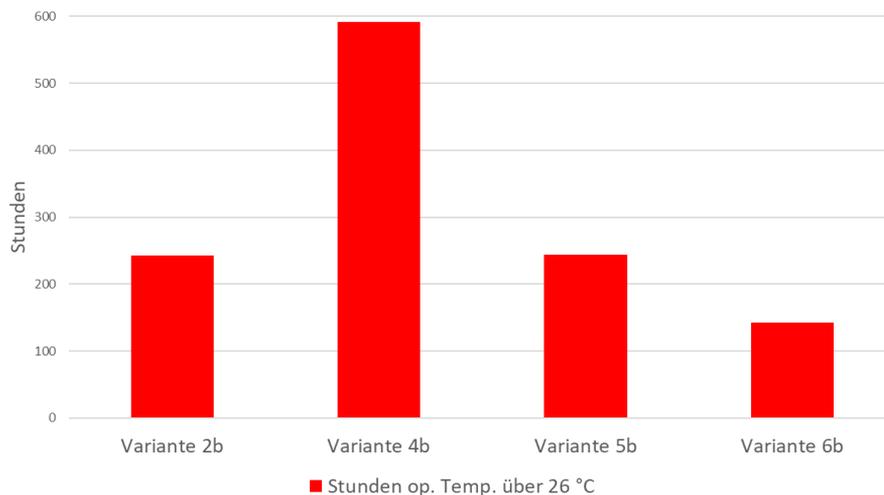


Abbildung 43: Übertemperaturstunden (operative Temperatur) von vier ausgewählten Varianten

Adaptives Komfortmodell gemäß EN 16798-1

Die Betrachtung des Innenraumkomforts erfolgt hier gemäß EN 16798-1 und damit abseits starrer Temperaturgrenzen unter der Voraussetzung nicht-mechanischer Kühlung. Dabei definiert das Komfortmodell einen Toleranzbereich der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperaturentwicklung der vorangehenden Tage. Dieser Toleranzbereich gliedert sich in vier Behaglichkeitskategorien I bis IV (High bis Low; siehe auch Legende in Abbildung 46). Dabei zugrunde gelegt ist eine Person mit Aktivitätslevel 1,0 und Bekleidungsfaktor (clothing factor) $clo = 0,85$. Dies entspricht dem Aktivitätslevel einer sitzenden Person bei leichter Tätigkeit, bekleidet mit langer Hose und langem Oberteil.

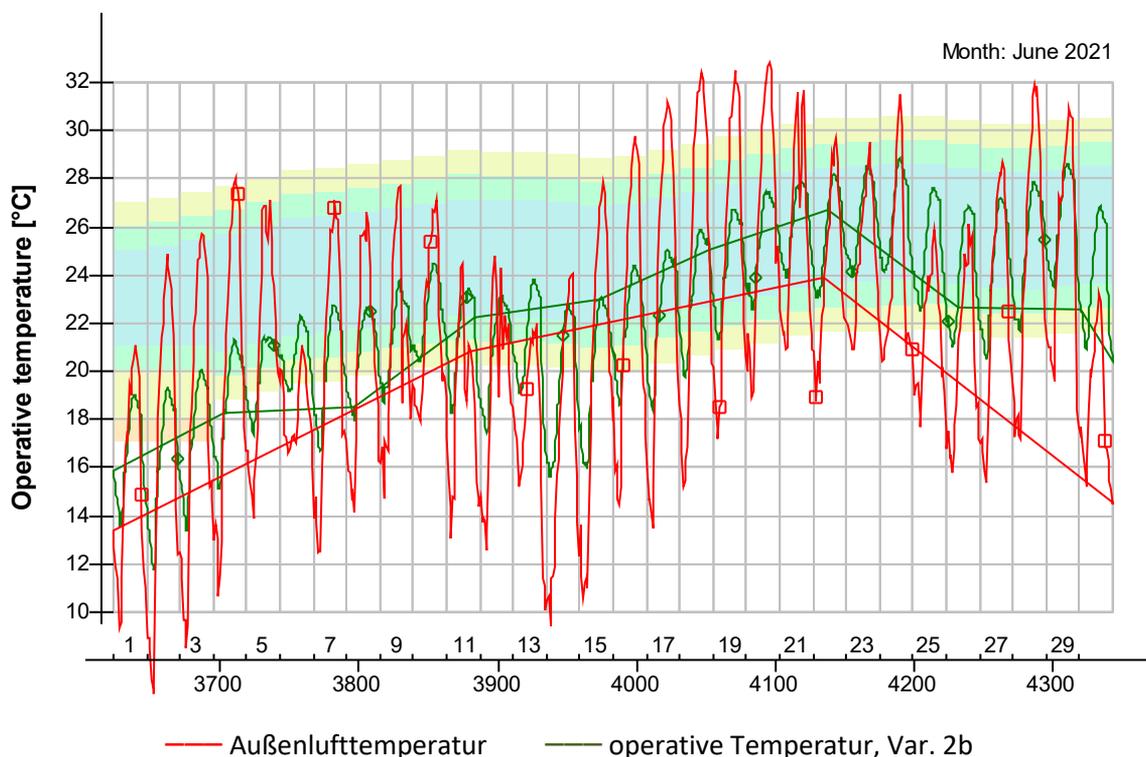


Abbildung 44: Operativer Temperaturverlauf (grüne Linie) in Variante 2b mit hinterlegtem adaptiven Komfortband im Monat Juni, rot: Außentemperatur

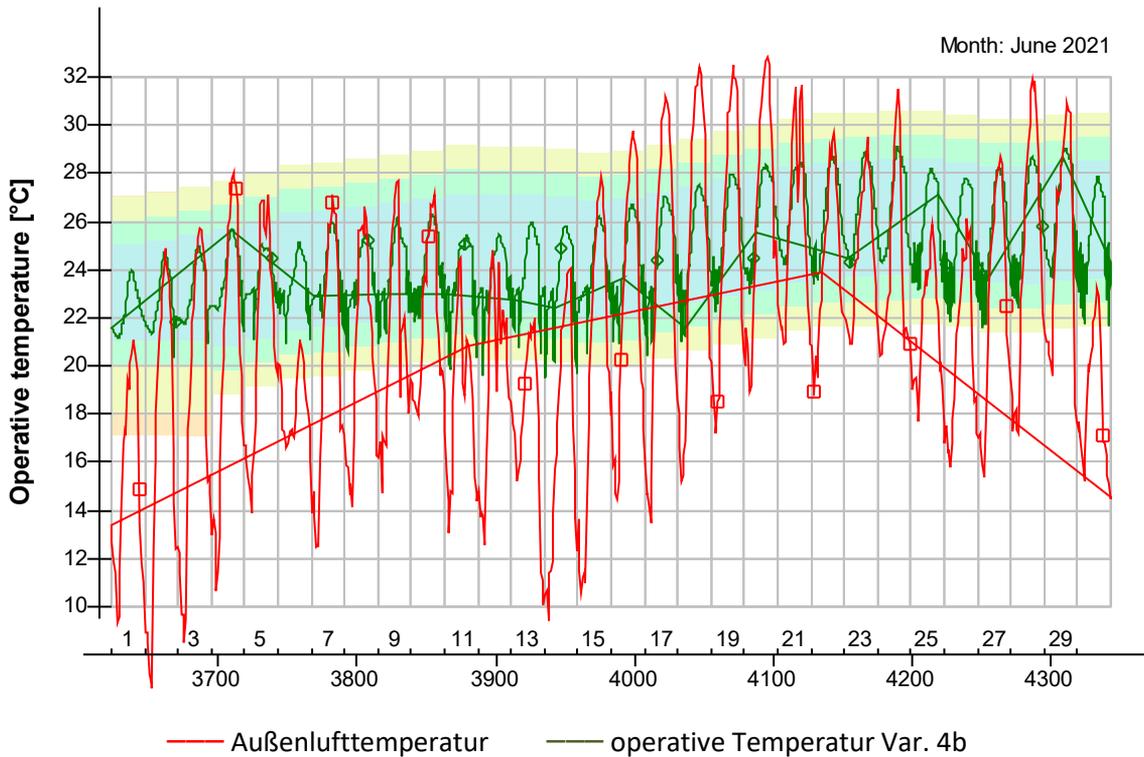


Abbildung 45: Operativer Temperaturverlauf (grüne Linie) in Variante 4b mit hinterlegtem adaptivem Komfortband im Monat Juni, rot: Außentemperatur

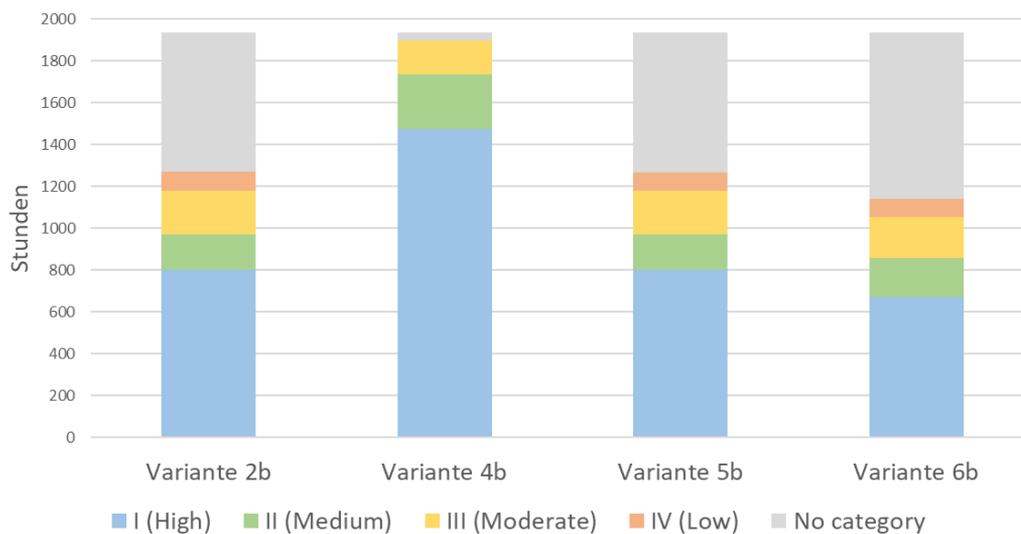


Abbildung 46: Komfortauswertung der Varianten 2b, 4b, 6b während der Nutzungszeit, gemäß EN 16798-1

In Abbildung 46 ist der Vergleich über die vier Verschattungsvarianten 2b, 4b, 5b und 6b gemäß EN 16798-1 hinsichtlich der vier Komfortkategorien dargestellt. Variante 4b weist das größte Komfortpotential auf, die höchste Kategorie I wird in knapp 1.400 von max. möglichen 1935 Stunden erreicht. Diese ergibt sich aus der angenommenen Aufenthaltszeit zwischen 08:00 und 17:00 Uhr sowie 7 Tage die Woche von April bis Oktober. In den anderen drei Varianten fallen ca. 650 bis 800 Stunden in die Kategorie I. In diesen Varianten überwiegt auch der Anteil, welcher keiner Komfortkategorie

zugeordnet werden kann (grau dargestellte Balkenbereiche, ca. 650 bzw. 800 Stunden). Diese Stunden liegen außerhalb der vier Kategorien und werden von Person als nicht mehr komfortabel empfunden.

Die Betrachtung der Sommertauglichkeit auf Basis einer starren Grenztemperatur von 26 °C liefert im Vergleich zum adaptiven Modell nach EN 16798-1 naturgemäß andere Ergebnisse. Wo in Variante 4b (vgl. Abbildung 43) für den Testraum die meisten Stunden über 26 °C gezählt werden, wird auf Basis des adaptiven Modells dieser Variante der höchste Komfort zugeschrieben. In Abhängigkeit höherer Außentemperaturen werden höhere operative Temperaturen für den Raum zulässig, die gleichzeitig auch noch als behaglich empfunden werden, abgestuft in vier Kategorien.

5.2.4. Zusammenfassung Modellierung und Simulation

Im Bereich Modellierung wurden insbesondere das Kastenfenster und die Einflüsse von Wind und sich daraus ergebende zusätzliche Kühlungseffekte durch Quer- und forcierte Kaminlüftung untersucht.

Um die lokalen Strömungs- und Temperaturverhältnisse innerhalb eines Kastenfensters möglichst detailliert zu verstehen, wurden die Effekte der Wärmeübertragung während vorhandener solarer Einstrahlung, aktiver Verschattung und Spaltlüftung im äußeren Teil des Kastenfensters in einer separaten Simulationsumgebung evaluiert. Berechnet wurden jeweils der resultierende Massenstrom sowie die Austrittstemperatur aus dem Spalt.

Analog wurden sowohl von Druckdifferenzen, resultierend aus dem thermischen Auftrieb (in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds und der Höhendifferenz), als auch von der im Wind enthaltenen Druckenergie Raumlufwechsler berechnet, da beide Effekte vergleichbare Größenordnungen von Druckdifferenzen hervorrufen können. Bei optimaler Lage der Lüftungsöffnungen sind somit je Anströmrichtung maximale Differenzdrücke von 4 bis 6 Pascal realisierbar. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass dies sehr stark von der individuellen Situierung und den zumeist volatilen Windverhältnissen abhängig ist.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine dynamische Gebäudesimulation mittels IDA ICE durchgeführt, um das Kühlpotential von verschiedenen Lüftungs- und Verschattungsvarianten zu vergleichen. Ausschließlich auf das nächtliche Kühlpotential bezogen ergeben sich während der Sommerperiode wenig Unterschiede zwischen den einzelnen Regelungsstrategien, da sich die Fensteröffnungszeiten beinahe ausschließlich überschneiden und die nächtlichen Temperaturen grundsätzlich hoch, jedoch meist noch unterhalb der Tropennachtgrenztemperatur von 20 °C liegen. Abseits dieser Randbedingungen (Übergangszeiten, Nächte mit Temperaturen deutlich unter 15 °C) ist jedoch die Regelungsstrategie ausschlaggebend für die Kühlung und die morgendlichen Komfortbedingungen. Uhrzeitbasierte (starre) Regelungen kommen hier unweigerlich an ihre Grenzen. Rein sensorbasierte Regelungen können dagegen das Kühlpotential nicht gänzlich ausschöpfen, woraus unter Tags höhere Raumtemperaturen als grundsätzlich möglich resultieren. Zumindest ist hier die Unterkühlung des Raumes in den Morgenstunden ausschließbar.

Durch den Einsatz von modellprädiktiven Regelungen können jedoch die morgendlichen Komfortbedingungen bei gleichzeitig bestmöglich ausgenutztem Kühlpotential eingehalten werden. Genauso wesentlich wie die Entladung der Speichermassen nachts ist aber die Reduktion des Wärmeenergieeintrages unter Tags. Nur dadurch kann ein schnelles Ansteigen der Innenraumtemperaturen verhindert und das Aufladen der Speichermassen verzögert werden. Durch den Einsatz von Rollos im

Scheibenzwischenraum lagen die Tagesmaxima der Lufttemperaturen bei gleicher Nachtlüftungsstrategie im Testraum ca. 2 K niedriger. Durch das zusätzliche Öffnen der Außenflügel bei geschlossener innerer Flügelebene erfolgt eine weitere Raumlufttemperatursenkung, da der Behang im Scheibenzwischenraum nun die Lage und damit Funktion eines außenliegenden Sonnenschutzes erhält. Am Kastenfenster des Testraumes werden damit ca. ein Drittel bis max. die Hälfte des Strahlungs- und des damit verbundenen Wärmeeintrages vermieden. Hinsichtlich der darauf basierenden Raumtemperaturen ergeben sich zusätzliche Unterschiede von 1,1 K. Bis Mittag hat sich jedenfalls ein Gewinn von mind. 0,5 K im betrachteten Zeitausschnitt eingestellt (siehe Abschnitt 5.2.3 Vergleich 2b/6b).

Letztendlich sind starre Komfortgrenztemperaturen wie z.B. 26 °C zwar normativ einfach zu handhaben, adaptive Komfortmodelle für die NutzerInnen jedoch zielführender. Steigt die mittlere Außentemperatur in einer Hitzewelle entsprechend an, sind auch höhere operative Raumtemperaturen (nach EN 16798-1) noch komfortabel. Gleichzeitig kann damit der Kühlbedarf in nicht-mechanisch gekühlten Gebäuden gesenkt werden.

Die Modell Predictive Control, siehe nachfolgendes Kapitel, soll dabei die Ausschöpfung des Kühlpotentials bei gleichzeitiger Optimierung des Komforts verbessern, v.a. in den Übergangszeiten Frühjahr und Herbst.

5.3. Modellbasierte Regelung

In CoolAIR wurde eine modellprädiktive Regelung (Model Predictive Control – MPC) als Entscheidungsfindungsalgorithmus eingesetzt. Dieser bewährte MPC-Ansatz [56] [57] hat gegenüber rein zeitgesteuerten Verfahren und sensorbasierten Verfahren Vorteile, die die Effizienz der passiven Kühlung weiter steigern und die Häufigkeit der Aktuatorverwendung und damit den Verschleiß verringern.

5.3.1. Modellprädiktives Regelkonzept - MPC

Zeitgesteuerte Verfahren können in Abhängig von der Vorhersagbarkeit der Einflussgrößen effizient sein. Nicht so für ventilative Kühlung, da deren Wirkungsgrad stark vom aktuellen und historischen Außentemperaturverlauf und der daraus resultierenden Aufladung und Abkühlung der thermischen Massen abhängt und zeitlich kaum vorhersehbar ist. Bei sensorbasierten Regelungen sind Nachteile durch nicht vollständig entladene thermische Massen verursacht durch Wiedererwärmungseffekte, die bei dieser Regelstrategie nicht berücksichtigt werden, gegeben [58]. Darüber hinaus kann es bei jeder Neubewertung zu einem oszillierenden Öffnen und Schließen der Fenster kommen was erhöhten Verschleiß, Lärmbelästigung und Irritationen der NutzerInnen bedingt.

Im Mittelpunkt der MPC-Strategie steht die Kombination aus langfristigen Vorhersagen auf Basis der durch das Modell prognostizierten Werte kombiniert mit kurzfristigen Anpassungen der Regelgrößen auf Basis von Sensorwerten während der Laufzeit. Die MPC bildet dazu Vorhersagen über das Systemverhalten bis zum sogenannten Vorhersagehorizont und optimiert über eine Kostenfunktion die Regelwerte über diesen Horizont, um den Zielwert am Vorhersagehorizont optimal zu erreichen. Der Zeitraum bis zum Vorhersagehorizont wird dabei in äquidistante Zeitschritte (in CoolAIR eine Stunde) geteilt. Nach jedem Zeitschritt wird die MPC erneut aufgerufen und es werden die Regelwerte über das verkürzte Zeitintervall wiederholt bis zum Vorhersagehorizont berechnet. Auf diese Weise

werden nach jedem Zeitschlitz die Regelgrößen an allfällige im vergangenen Zeitschlitz aufgetretene Störungen und Abweichungen angepasst und optimiert (Abbildung 47).

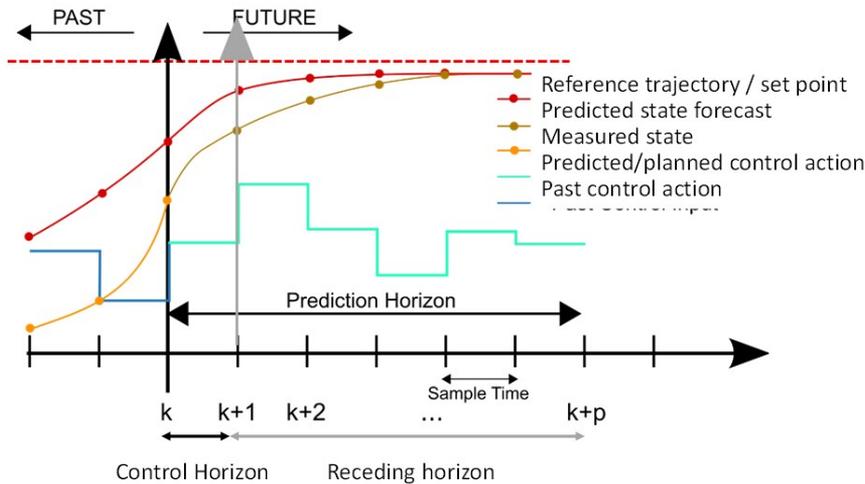


Abbildung 47: MPC-Algorithmus

Im Falle von CoolAIR versucht die MPC, eine minimale Raumtemperatur (T_{min}) zu erreichen, wobei die Komfortgrenzen nur zu Beginn der „Tageszeit“ eingehalten werden müssen. Gleichzeitig darf die MPC auch möglichst wenig Steuerbefehle senden, um einen Verschleiß der Antriebe zu vermeiden. Das zugrundeliegende Systemmodell und die Regelstrategie werden in den nächsten zwei Unterabschnitten beschrieben.

Die Neuheit dieses Ansatzes ist ein raumzentriertes Design, das auf einem KI-basierten Modell für die prädiktive Steuerung basiert. Im Falle von CoolAIR ist es die Aufgabe der MPC, morgens eine definierte minimale Raumtemperatur (T_{min}) zu erreichen. Je niedriger dieser Sollwert gesetzt ist, desto besser werden die Speichermassen entladen. Andererseits darf morgens die Komfortgrenze der NutzerInnen nicht unterschritten werden. Die minimale Raumtemperatur (T_{min}) wurde auf die Komfortgrenze gesetzt.

Mit Fokus auf Bürogebäude unterteilen wir den Tag dafür in eine "Tageszeit", in der NutzerInnen anwesend sind, und eine "Nachtzeit", in der diese i. A. nicht anwesend sind. Dies geschieht zum einen, um die Komplexität einer Präsenzdetektion zu vermeiden und zum anderen, um die Privatsphäre der NutzerInnen zu schützen.

Die in CoolAIR entwickelte Regelstrategie folgt den folgenden Schritten und ist in Abbildung 48 für einen 4-stündigen Vorhersagehorizont graphisch dargestellt:

1. Erstellung der Vorhersage: Ausgehend von den tatsächlichen Sensorwerten (linke Seite von Abbildung 48) erstellt das RNN (raumspezifisches neuronales Netzwerk) eine Vorhersage für die nächste Stunde. Basierend auf diesen Ergebnissen und den Vorhersagevektoren für die Umgebungsparameter sowie den Aktuatorzuständen wird das RNN iterativ angewendet, bis der Vorhersagehorizont, d.h. das Ende der „Nacht“ erreicht und der endgültige Vorhersagewert der Regelgröße (Variable $C_{p,i+4}$ in Abbildung 48) berechnet ist.
2. Einstellung der Aktuatoren: Die MPC wertet die Prognose der Regelgröße aus und passt den Zustand der Aktuatoren an (Erhöhung der Öffnungszeit von Fenster und Türen), wenn T_{min}

(kleinste zu erreichende Raumlufttemperatur) nicht erreicht wird, und wiederholt Schritt 1 bis der Sollwert oder die maximale Öffnungszeit erreicht ist. Die Priorität in der Wahl der Aktuatorbefehle liegt dabei auf der minimalen Betätigung von Fenstern und Türen, um Verschleiß und Lärmbelastung zu minimieren. In absteigender Reihenfolge werden folgende Zustände mit abnehmender Kühlleistung verwendet: Zustand 1: Fenster und Tür offen, Zustand 2: Fenster offen, Tür geschlossen, Zustand 3: Beide geschlossen. Damit kann die Raumtemperatur gegen Ende feiner justiert werden.

3. Verschiebung des Vorhersagehorizonts: Nach Ausführung von Schritt 1 und 2 wartet die Steuerung einen Zeitschritt (1 Stunde bei CoolAIR) und verkleinert den Vorhersagehorizont ebenfalls um einen Schritt (Das Ende der „Nacht“ bleibt dadurch konstant.) und startet den Vorgang mit Schritt 1 neu bis die Länge des Vorhersagehorizonts null ist und die MPC stoppt. Dieser Zyklus ermöglicht es, auf Abweichungen in der Vorhersage und Störungen zu reagieren und die kleinste Abweichung zwischen der endgültigen Raumtemperatur und T_{\min} zu Beginn der Tageszeit zu erzielen.

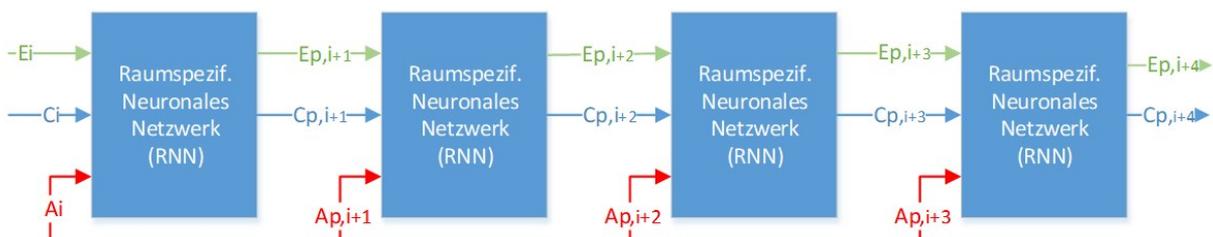


Abbildung 48: Ablaufdiagramm der MPC (Parametersätze für Raum- und Wandtemperatur (C), Außentemperatur (E), Zustand von Fenstern (A))

5.3.2. Raummodelle für Einsatz in eingebetteten Systemen

Kernelement der modellprädiktiven Regelung ist das hinterlegte Modell. Im Projekt wurde dazu auf Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) zurückgegriffen, um einen rein datengetriebenen Ansatz zu wählen, der in weiteren Entwicklungsstufen auch die Möglichkeit einer Selbstanpassung bietet.

KI Vorhersagemodelle

Der MPC-Algorithmus an sich ist relativ einfach und verlässt sich für die Genauigkeit seiner Entscheidungen vollständig auf die zugrundeliegenden Vorhersagemodelle. Die für CoolAIR benötigten-Vorhersagen können dabei in den Bereich der Zeitreihenvorhersage eingeordnet werden.

Es gibt eine Vielzahl von Zeitreihenprognosemethoden, die weit verbreitet sind. Die grundlegenden Modelle sind die autoregressiven (AR) Modelle, integrierenden (I) Modelle und Modelle mit gleitendem Mittelwert (MA), bei denen die Vorhersage linear von früheren Datenpunkten abhängig ist. Kombinationen dieser Grundkonzepte ergeben autoregressive gleitende Mittelwertmodelle (ARMA) und autoregressive integrierende gleitende Mittelwertmodelle (ARIMA). ARIMA und seine saisonale Variante SARIMA und SARIMAX sind die am häufigsten verwendeten Modelle für Zeitreihenvorhersagen. Die ARIMA-Modelle haben jedoch Schwierigkeiten mit mehrdimensionalen, multivariaten Datenreihen, bei denen mehr als eine Ausgabe vorhergesagt werden muss. Analog sind komplexe Verhaltensmuster nur schwer vorhersagbar.

Künstliche neuronale Netze (KNN), meist im Kontext oft auch einfach als neuronale Netze (NN) bezeichnet, sind bioinspirierte Softwarealgorithmen, die sich an den biologischen neuronalen Netzen orientieren und wesentlich besser komplexer Muster wie Wetter und Temperaturen erkennen.

Ähnlich den biologischen Vorbildern basiert ein KNN auf einer Sammlung miteinander verbundener Knoten, die Neuronen genannt werden. Jede Verbindung, die als Kante bezeichnet wird, kann abhängig von der Aktivierungsfunktion des Knotens ein Signal an andere Neuronen weiterleiten. Dieses Signal entspricht einem Wert, der durch eine nichtlineare Funktion aus der Summe ihrer Eingänge berechnet wird. Kanten gewichten die weitergeleiteten Signale und sind ein wesentlicher Teil des Lernprozesses, da sie die Stärke des Signals an einer Verbindung entweder erhöhen oder verringern. Typischerweise werden Neuronen in Schichten zusammengefasst und die Signale wandern von der ersten Schicht (der Eingabeschicht) zur letzten Schicht (der Ausgabeschicht), die letztendlich die Vorhersage liefert.

Das in der Zeitreihenprognose am häufigsten verwendete neuronale Netzwerk ist das LSTM-Netz (Long-Short Term Memory), das aufgrund der internen Struktur der Neuronen in der Lage ist, Wissen über die in der Vergangenheit beobachteten Verhaltensmuster zu speichern.

Datensätze

Aufgrund seiner Beschaffenheit ist jedes neuronale Netz sehr spezifisch, hängt jedoch von den Daten ab, mit denen es trainiert wird.

Im Projekt CoolAIR haben wir verschiedene Datensätze für die Übergangszeiten und den Sommer gewählt. Die Heizperiode wurde bewusst ausgelassen, da in dieser für die Büroräumlichkeiten i.A. nur kurzzeitiger Kühlbedarf zur Steigerung des Komforts besteht. Jeder Datensatz deckt daher den Zeitraum zwischen dem 1. April und dem 31. Oktober der Jahre 2020 und 2021 ab, wobei in Abstimmung zur MPC eine stündliche Granularität gegeben ist, da kleinere Zeiträume aufgrund der thermischen Trägheiten und dadurch bedingten geringen Änderungen der Sensorwerte keine wesentlichen Verbesserungen gebracht haben.

Jeder Datensatz hat die gleiche Struktur und besteht aus folgenden Datenpunkten:

- T_{air} - mittlere Lufttemperatur im Raum
- T_{out} - Außentemperatur
- T_c – Deckentemperatur
- T_f – Bodentemperatur
- T_{sur} – Oberflächentemperatur an der Wand
- T_{w2} - Wandtemperatur (2 cm innerhalb der Wand)
- T_{w5} - Wandtemperatur (5cm innerhalb der Wand)
- Fenster - Zustand des Fensters (0-geschlossen, 1-offen)

Aufgrund des rekurrenten Charakters der MPC-Vorhersage, bei der die Ausgabe des Vorhersagemodells als Eingabe für den nächsten Zeitschritt verwendet wird, wurde die Stunde des Tages ebenso zum Datensatz hinzugefügt. Dies stellt einen Mechanismus zur Abschwächung der Fehlerfortpflanzung dar, da die Stunde des Tages ein bekannter Wert und kein vorhergesagter Wert ist.

In einer ersten Datenanalyse hat sich herausgestellt, dass die Oberflächen- (T_{sur}) und Deckentemperaturen (T_c) sich sowohl zeitlich als auch in ihrem Wert sehr ähnlich wie die Lufttemperatur (T_{air})

verhalten. Sie wurden daher für die weitere Analyse nicht verwendet. Ebenso wurde die Bodentemperatur aufgrund des Strahlungseinflusses und der schwierigen praktischen Umsetzung nicht weiter betrachtet.

Training des neuronalen Netzwerkes

Die Effizienz eines neuronalen Netzwerkes hängt wesentlich von dessen Training ab. Abgesehen von einigen allgemeinen Regeln ist dieser Prozess eine Kombination aus Intuition (des Trainers/Data Scientists) und Wiederholung des Trainingsprozesses mit verschiedenen Parametersätzen, um die Leistung des Modells schrittweise zu verbessern.

Ziel ist es, auf der Grundlage der Eingaben ein Muster zu erkennen, das die Voraussage bestimmt. Dabei geht es nicht darum die Trainingsdaten zu imitieren, sondern die Muster in unabhängigen (Test-) Daten zu erkennen.

Selbst wenn ein Modell nach dem Training eine hohe Genauigkeit aufweist, kommt es häufig vor, dass in der Anwendung eine schlechte Vorhersage getroffen wird. Bei Zeitreihen ist dann typischerweise ein Hinterherhinken oder ein Zeitversatz (Lagging) zu beobachten, da die wahrscheinlichste Voraussage bzw. sicherste Wahl für das neuronale Netz die Vorhersage des letzten bekannten Wertes ist. Ursachen dafür sind fehlende klare Muster im Datensatz oder eine zu geringe Anzahl an Trainingsdaten in Kombination mit kleinen Änderungen zwischen den einzelnen Werten. Wenn das neuronale Netz jedoch tendenziell den letzten tatsächlichen Wert wiederholt, wird es für den Einsatz in der MPC unbrauchbar, da die Ausgaben des Modells als Eingaben für die Vorhersage der nächsten Stunde verwendet. Es stellt sich eine stark verflachte Vorhersagekurve ein, die nicht die Dynamik des tatsächlichen Prozesses widerspiegelt.

Eine Änderung der Struktur des neuronalen Netzes, eine Anpassung der Hyperparameter³, eine Änderung der Ein- und Ausgänge oder eine Vergrößerung des Trainingsdatensatzes sind die wichtigsten Optionen, um die Modellgenauigkeit zu steigern und insbesondere das Problem des Lagging zu lösen.

Modellstruktur

Die allgemeine Struktur des verwendeten neuronalen Netzwerkes besteht aus drei LSTM-Schichten mit jeweils 64, 32 und 16 Neuronen sowie einer dichten Ausgangsschicht, die die Vorhersage der drei relevanten Temperaturwerte (T_{air} , T_{out} , T_{wall}) liefert. Die Eingangsschicht hat fünf Eingangsvariablen (T_{air} , T_{out} , T_{wall} , Fenster, Stunde) für eine definierte Anzahl an Stunden in die Vergangenheit. Abbildung 49 veranschaulicht diesen Aufbau.

³ Hyperparameter steuern den Trainingsalgorithmus eines neuronalen Netzwerkes und können nicht aus den Daten abgeleitet werden. Im Gegensatz zu Modellparametern ist ein Hyperparameter eine vorab festzulegende Konfiguration des Trainingsalgorithmus.

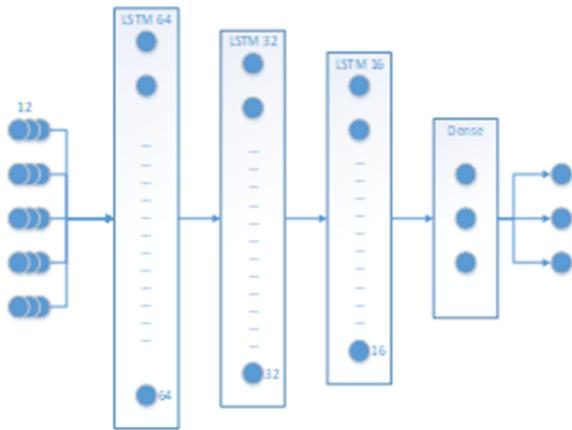


Abbildung 49: LSTM-Aufbau (Long-Short Term Memory)

Zusätzlich zur Struktur benötigt das neuronale Netz eine Reihe von Hyperparametern, die festlegen, wie es Muster während des Trainingsprozesses erlernen soll. Für das Training in CoolAIR wurden dabei folgende Hyperparameter gewählt:

- Anzahl der Epochen (200) definiert die Anzahl der Trainingszyklen
- Batchgröße (12) legt fest, wie viele Daten auf einmal in das Netz eingespeist werden
- Lernrate (0,0001) legt fest, wie schnell der Gradient angepasst wird, um das Ergebnis zu verbessern
- Dropout
- Dropout-Rate (0,001) legt fest, wie viel des Netzes nach jedem Zyklus entfernt werden soll
- Aktivierungsfunktion (tanh) definiert die Funktion für die Weiterleitung des Signals an die Neuronen
- Verlustfunktion (mittlerer quadratischer Fehler) definiert die Bewertungsfunktion für die Leistung des Netzes

Die genaue Konfiguration der Hyperparameter ist das Ergebnis der Forschungsarbeit und mehrerer Trainingsläufe mit schrittweiser Anpassung der Parameter, um die höchste Genauigkeit des Modells zu erreichen.

Die Modellentwicklung kann dabei in drei Schritte unterteilt werden: Training, Validierung und Test des Modells. Zu diesem Zweck wird der Datensatz in einen Trainings- und einen Testdatensatz aufgeteilt, wobei die Testdaten zur Bewertung des endgültigen Modells verwendet werden. Üblich sind hier Aufteilungen in 70-80 % Trainingsdaten und 30-20 % Test- oder Validierungsdaten. Die Trainingsdaten werden zur Abstimmung der Gewichte des Modells und die Validierungsdaten zur Überprüfung der Genauigkeit des Modells während des Trainingsprozesses verwendet. Bei der Aufteilung ist darauf zu achten, dass ein repräsentativer Validierungsdatensatz gewählt wird. Ein probates Mittel dies zu verifizieren ist, dass es bei einer Verbesserung der Verlustfunktion bei den Trainingsdaten auch zu einer Verbesserung bei den Validierungsdaten kommen muss.

Das entwickelte Modell sagt die Raum-, Wand- und Außentemperatur (Ausgänge) für die nächste Stunde auf der Grundlage der Messungen der letzten 11 Stunden sowie der aktuellen Werte (12. Stunde) voraus. Dieser Parameter wurde experimentell gefunden. Kürzere Batchgrößen haben das thermische Verhalten nicht ausreichend abgebildet. Längere Batchgrößen haben bei erhöhtem Aufwand keine weiteren Gewinne gebracht. Intuitiv kann man hier rückschließen, dass die in den Speichermassen verbleibende Wärme am Ende der vorangegangenen Nacht und der

Temperaturverlauf des Tages das Verhalten wesentlich bestimmt. Es ist jedoch anzumerken, dass neuronale Netze rein datengetrieben sind und keinerlei physikalischen Gesetze oder Modelle hinterlegt haben. Bei einer Batchsize von 12 gelang es dem Modell, ein konsistentes Muster zu erkennen, ohne dass es zu Lagging oder anderen Störungen kam.

Modellbewertung

Das erste Modell wurde mittels einzigen Datensatz mit 17048 Messungen der fünf Eingänge trainiert, die die Zeiträume von April bis Oktober der Jahre 2020 und 2021 repräsentieren, wobei zur Generierung der Daten eine sensorbasierte Steuerung verwendet wurde. Alle Daten sind von 0 bis 1 normalisiert. Die Daten wurden in 12.786 Trainings- und 4.262 Testdatensätze aufgeteilt. Die Aufteilung zwischen Training und Validierung betrug damit 80:20. Der durchschnittliche mittlere quadratische Fehler des Validierungsdatensatzes betrug 3 %.

Danach wurde in einer Hardware-in-the-Loop-Co-Simulation bei identischem Gebäude, Außentemperaturen und initialen Gebäudezuständen, die mit dem ersten Modell ausgestattete MPC, angewendet, um weitere Datensätze und Modelle zu generieren. Dieser Schritt wurde gewählt, da der Datensatz unter Nutzung der sensorbasierten Steuerung zwar eine Vielfalt an Systemzuständen abbildet aber keine spezifischen Daten für das Ausgabeverhalten der MPC mit langen Öffnungs- und Schließzeiten lieferte. In dieser Form wurden iterativ die Modelle verbessert, Datensätze für weiteres Training generiert und durch Simulation verfeinerte Modelle für die MPC erstellt. Um die Leistung des Modells weiters zu verbessern, wurde der Datensatz auf der Grundlage der Simulation von 2020 fünfmal dupliziert, um mehr Trainingsdaten zu erhalten. Anzumerken wäre, dass gemessene Datensätze für einen längeren Zeitraum besser gewesen werden, aber nicht verfügbar waren.

Der resultierende Datensatz, der für das Training des finalen Modells verwendet wurde, bestand aus 25536 Messungen, wobei 20428 Messungen für das Training und 5108 Validierungsdatensätze für den Test verwendet wurden. Der durchschnittliche mittlere quadratische Fehler des Validierungsdatensatzes lag bei 2 %. Tabelle 5 enthält eine genauere Analyse der Fehler. Bemerkenswert ist, dass für fast 40 % der Tage der Vorhersagefehler unter 1 % liegt und dass Fehler über 5 % nur in 1,18 % der Tage auftreten, wobei dann maximale Abweichung von der Zieltemperatur bis zu 31,34 % möglich sind. Dies sind i.A. sehr seltene Wetterereignisse, die aufgrund ihrer Seltenheit ähnlich dem biologischen Lernen nicht entsprechend gewichtet und damit inkludiert sind.

Tabelle 5: Fehlerverteilung des MPC-Modells für Voraussage von T_{air}

Fehler	Anteil
Unter 1 %	38.25 %
1-5 %	60.57 %
5 %-10 %	1.16 %
10 %-20 %	0.00 %
über 20 %	0.02 %
maximale Abweichung	31.34 %
mittlere Abweichung	1.59 %

Abbildung 50 zeigt ein Beispiel für die vorhergesagten Raumtemperaturen und deren Abweichung von den tatsächlichen Werten. Es ist eine klare Mustererkennung zu beobachten.

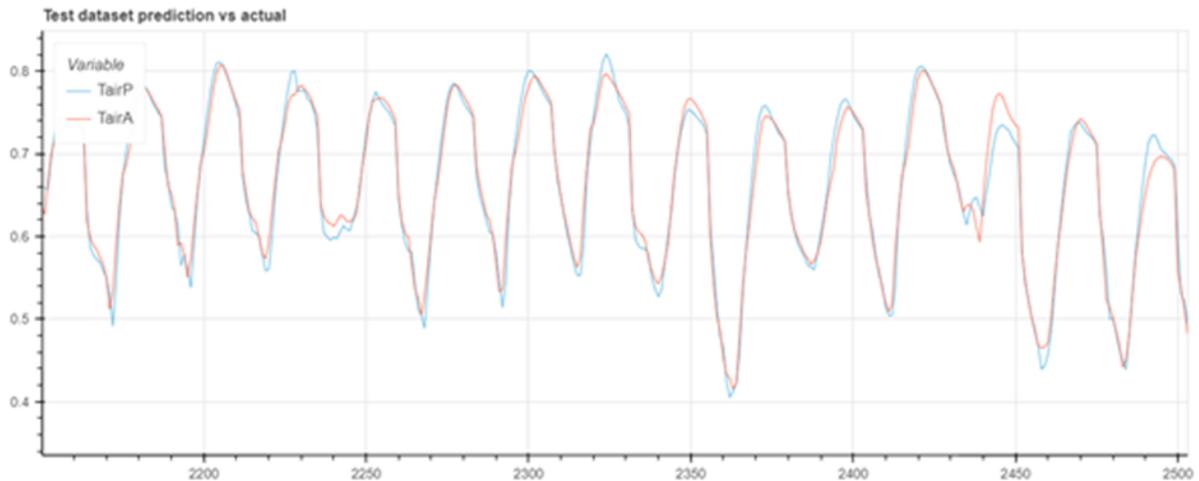


Abbildung 50: Beispiel für die Vorhersage im Vergleich zur tatsächlichen Raumtemperatur

Abbildung 51 zeigt die sortierten tatsächlichen Raumtemperaturen zusammen mit den vorhergesagten Temperaturen, um die durchschnittlichen Abweichungen für den gesamten Testdatensatz zu verdeutlichen.

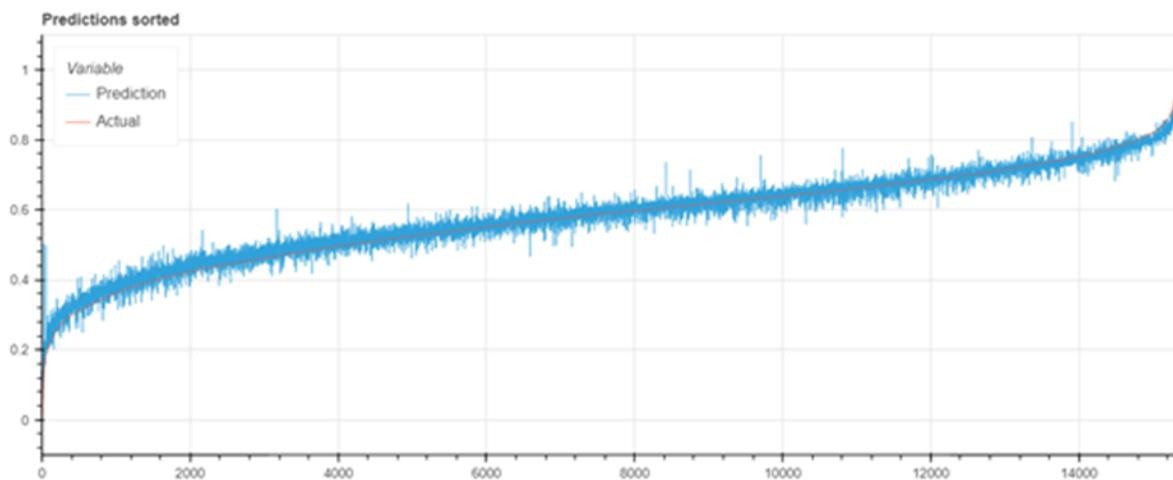


Abbildung 51: Sortierte Vorhersage und tatsächliche Raumtemperatur

5.3.3. Sensorinfrastruktur

Die Effizienz des modellprädiktiven Ansatzes hängt vom Modell aber auch den zur Verfügung stehenden Messwerten, die den Rückkoppelmechanismus der MPC bilden, ab. Zusätzlich ist aus ökonomischer Sicht eine möglichst minimale Sensorinfrastruktur von Vorteil, da die Gesamtkosten des Systems geringer werden.

CFD Studie zu Sensorpositionierung

Neben den bauphysikalischen Überlegungen wurden die im Projekt durchgeführten CFD-Simulationen zur Untersuchung des Luftwechsels (vgl. Abschnitt 5.2.2) im Rahmen eines erweiterten Post-Processing

ausgewertet, um geeignete Sensorpositionen zur Temperaturmessung festzulegen. Die CFD Simulation stellt räumlich hochaufgelöste Temperaturinformationen über das gesamte Raumluf-Volumen zur Verfügung (>10 Millionen Positionen im Raumlufvolumen). Da die dynamischen Simulationen für die Studie herangezogen werden, sind diese Temperaturinformationen auch zeitlich hochaufgelöst verfügbar. Aufgrund der hohen Datenmenge wurden für die Studie 288 ausgewählte Monitoring-Punkte definiert, in denen die Raumluf-temperaturwerte über die gesamte Simulationszeit abgespeichert werden. Diese 288 Punkte verteilen sich gleichmäßig im Raum und beinhalten sowohl die Raumluf als auch die Grenzfläche zu festen Bauteilen, vgl. Abbildung 52 und Abbildung 53. Die Auswertung der Temperaturwerte umfasste insgesamt neun dynamische CFD Simulationen (drei Fensterlüftungs-Szenarien mit 1/2/4 offenen Teilfensterflächen und drei Temperaturniveaus Außen/Raumluf mit 23°C/28°C, 18°C/28°C und 16°C/34°C Initialisierungstemperatur). Berechnet wurde jeweils die Abweichung der Temperatur im Monitoring-Punkt zur mittleren Temperatur über das gesamte Raumlufvolumen. Die drei Monitoring-Punkte mit den geringsten Abweichungen über die gesamte Simulationszeit aller neun Lüftungsszenarien (mittlere Abweichung überwiegend <0,5 °C) sind in Abbildung 52 und Abbildung 53 markiert. Die Auswertung erfolgte separat für Monitoring Punkte im Raumlufvolumen (Rot) und an der Grenzfläche zu festen Bauteilen (Gelb).

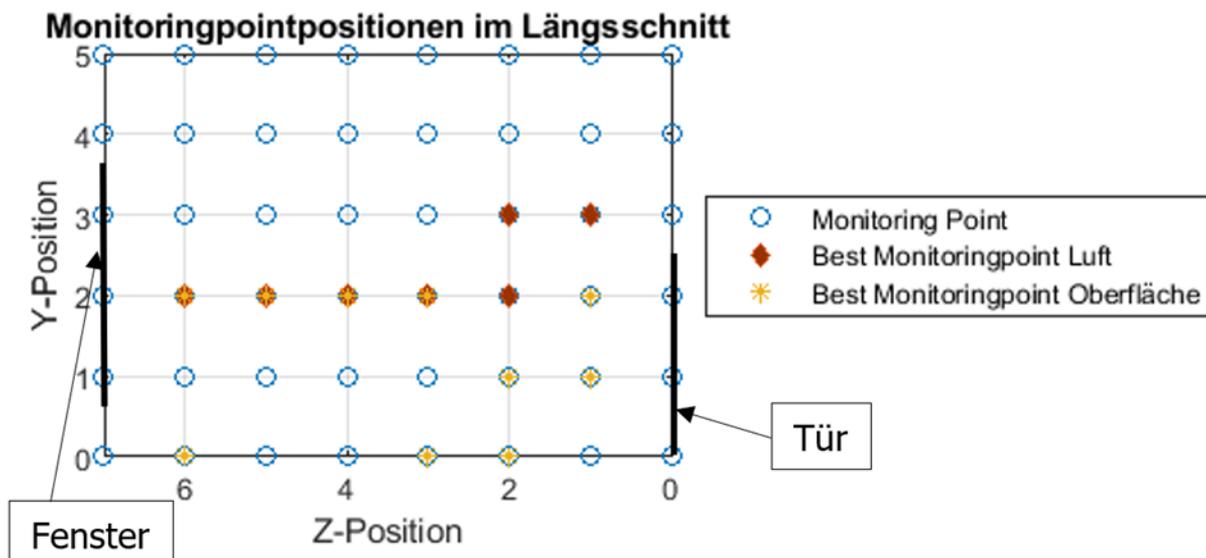


Abbildung 52: Monitoring Punkte im Längsschnitt mit den geringsten Abweichungen zur mittleren Raumluf-temperatur über alle untersuchten Lüftungsszenarien im Testraum laut CFD Simulation.

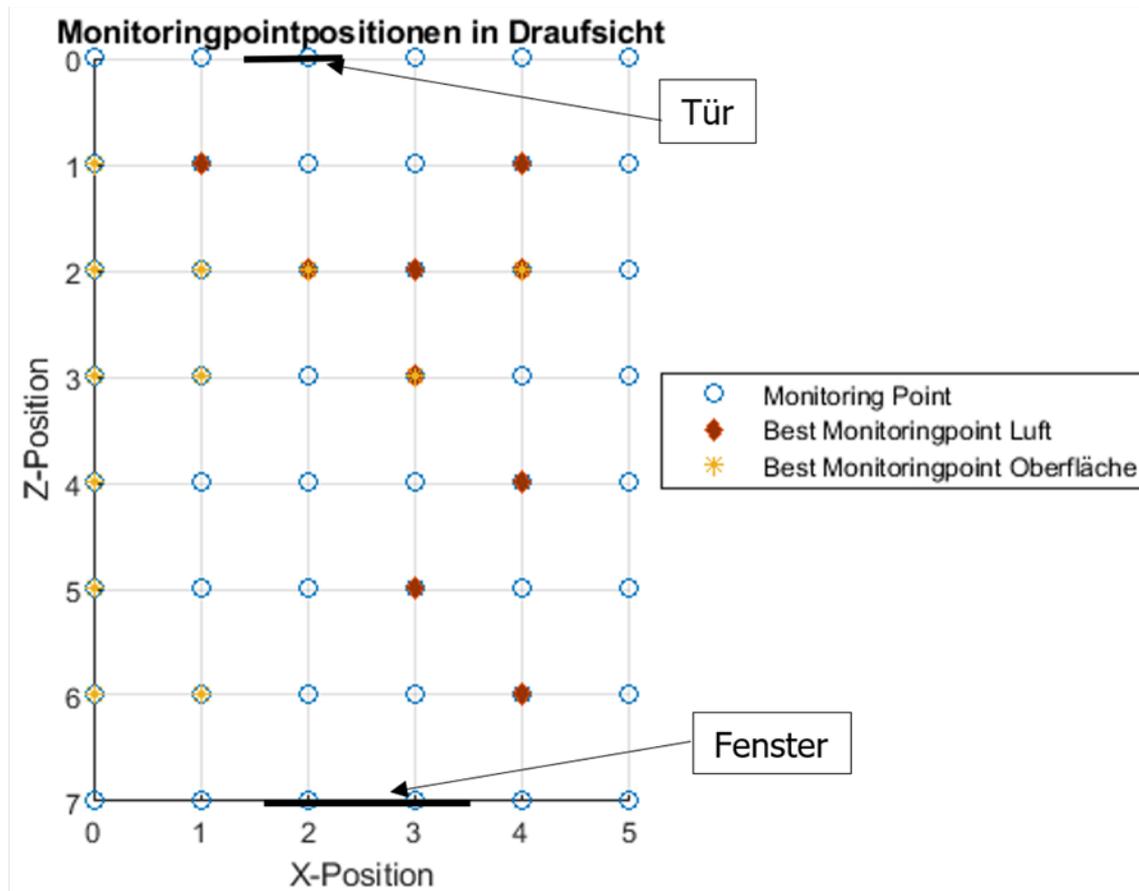


Abbildung 53: Monitoring Punkte in Draufsicht mit den geringsten Abweichungen zur mittleren Raumlufttemperatur über alle untersuchten Lüftungsszenarien im Testraum laut CFD Simulation.

Für die Auswertung von Positionen im Raumluftvolumen entsprechen die Monitoring Punkte in der y -Ebene 2 und 3 entlang der Raumhöhe am ehesten der mittleren Raumlufttemperatur. Diese Zuordnung entspricht einer Raumhöhe zwischen 2 und 3 Meter. Die übliche Installationshöhe der Raumtemperaturfühler von 1,5 m (z.B. nahe Türstöcken) ist damit unterhalb der von der CFD Simulation abgeleiteten optimalen Raumhöhe zur Abbildung der mittleren Lufttemperatur für die untersuchten Szenarien. Die Raumhöhe im Testraum ist bedingt durch den Altbau mit ca. 4,15 m jedoch über dem Durchschnitt. Die Monitoring-Punkte an der Oberfläche von Bauteilen mit geringer thermischer Masse ($X = 0$ Ebene) entsprechen erwartungsgemäß am ehesten der mittleren Raumlufttemperatur. In den Testinstallationen wurden diese Sensoren in der Raumhöhe zwischen 2,0 m und 2,5 m montiert.

Die optimale Sensorposition für die Verwendung des Messwertes durch eine MPC Regelung hängt auch von der Konzeptionierung der Regelstrategie und vor allem vom verwendeten Modellierungsansatz innerhalb der MPC Regelung ab. Wie in den bauphysikalischen Überlegungen ausgeführt, zeigte die praktische Umsetzung im Rahmen von CoolAIR, dass eine Platzierung mit starkem Einfluss der thermischen Massen für den in CoolAIR verwendenden MPC-Regler mit Black-Box⁴ Modell bessere Ergebnisse liefert. Für MPC-Regler mit physikalisch begründeten Grey-Box⁴ Modell kann eine

⁴ Black-Box-Modellen sind rein auf Basis von Daten mittels maschinellem Lernen erstellt. Grey-Box-Modelle bestehen dagegen aus einem analytischen Modell des Systems bei dem nur die Parametrisierung mittels maschinellem Lernen erfolgt. Im Gegensatz zu Black-Box-Modellen bilden Grey-Box-Modelle daher physikalische Zusammenhänge implizit über Formeln ab.

messtechnische Bestimmung der Lufttemperatur ohne Speichermassen-Anteil vorteilhafter sein. Eine repräsentative Temperatur der Speichermasse und deren Einfluss auf das Raumverhalten kann für Grey-Box Modelle aus der Dynamik der Lufttemperaturmessung abgeschätzt werden.

Bauphysikalische Überlegungen

Aus bauphysikalischer Sicht sind alle Sensorpositionen auszuschließen, die direkt durch einstrahlendes Sonnenlicht verfälscht werden. Damit sind insbesondere Positionen am Fenster und im Bodenbereich auszuschließen. Ebenso können Seitenwände je nach Ausrichtung des Raumes erfasst werden.

Aus praktischen Gründen ist ebenso der gesamte Boden und der Luftraum in dem sich Menschen aufhalten auszuschließen. In den Testräumen wurden zwar auch dort Sensoren auf Ständern aufgestellt, die Praxis zeigte aber, dass diese verstellt wurden, da sie mit den Aktivitäten und dem Empfinden der NutzerInnen in Konflikt traten.

Installationstechnisch bieten sich daher Seiten- und Rückwände über Möbelhöhe sowie die Decke an, wobei letztere durch die Überkopfmontage und bei hohen Raumhöhen erschwerte Zugänglichkeit zu vermeiden sind. Zusätzlich haben Simulationen und praktische Erfahrungen gezeigt, dass sich an der Decke warme Luft staut und eine entsprechende Abhängung erfolgen muss.

Für die MPC wichtig ist, dass die gemessenen Temperaturwerte die thermischen Massen, wenn auch indirekt, entsprechend abbilden. Je besser dies gelingt, desto besser die Ergebnisse. Lufttemperaturen sind i.A. nicht geeignet, da der Luftaustausch auch ohne Querlüftung im Vergleich zur Schrittweite der MPC von 1 Stunde sehr rasch erfolgt und es zu einer „sofortigen“ Abkühlung kommt. Detto haben operative Temperaturen hier eine sehr große Volatilität.

Oberflächen und Wandtemperaturen haben hier die besten Ergebnisse geliefert, wobei für das Projekt dann eine Wandtemperatur 2cm unter der Oberfläche als bestgeeignet ausgewählt wurde. Je nach Sensorart unterscheiden sich Oberflächentemperaturen nur marginal von den Lufttemperaturmesswerten und die Wandtemperatursensoren sind durch ein kleines Loch auch leicht einbringbar.

Bezüglich der Anzahl der Sensoren wurde von vornherein ein minimales Set genutzt, da ansonsten die Varianz im Zusammenhang Eingänge zu Ausgängen so groß ist, dass die neuronalen Netzwerke Muster nicht oder nur schlecht erkennen konnten.

5.3.4. Regelqualität

Für die Analyse der Regelqualität der MPC-Leistung muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

1. Für den Fall das aufgrund der Außentemperaturen bzw. dem (hohen) Aufladungszustand der thermischen Massen, die Zieltemperatur nicht erreicht werden kann auch wenn die MPC die Fenster korrekterweise die ganze Nacht öffnet, kann die Regelung nur qualitativ als funktionierend beurteilt werden. Die erreichte Endtemperatur ist nur durch äußere Parameter bestimmt. Dies ist i.A. an warmen Sommertagen der Fall
2. Für Situationen in denen das Fenster geöffnet wird und ein Schließbefehl gesendet wird, gibt die Abweisung der Ist- von der Solltemperatur die Regelqualität an.

Für die Bestimmung der Regelqualität wurden nur jene Fälle ausgewählt, in denen die MPC als in Betrieb angenommen wurde (2. Fall), d.h., wenn das Fenster eine Stunde vor Ende des MPC-Betriebs

geschlossen wurde. Damit können alle warmen Sommertage ausgeschlossen werden, an denen die hohen Außentemperaturen keine (zielwerterreichende) Kühlung des Raumes zulassen würden. Nicht destotrotz besteht in diesen Nächten auch ein Kühlpotential.

Modellvarianten

Je nach Art des verwendeten Datensatzes wurden mehrere zusätzliche Modelle für die Simulation entwickelt. Folgende Referenzmodelle sollen hier repräsentativ behandelt werden⁵:

- Version 17: MPC-Simulation unter Verwendung des Vorhersagemodells auf der Grundlage der CooAir-Testbed-Messungen
- Version 18: Sensor- und zeitbasierter kombinierter Datensatz zusammen mit MPC
- Version 19: Duplizierter Sensorkontrolldatensatz kombiniert mit der MPC
- Version 20: Sensorbasiertes Modell
- Version 21: Zeitbasiertes Modell

Tabelle 6 gibt eine Auswertung der Abweichungen von der Zieltemperatur am Ende des MPC-Betriebs (8 Uhr morgens) für unterschiedliche Modellversionen wieder. In Abbildung 54 sind diese Werte graphisch dargestellt.

Tabelle 6: Abweichung der mittels MPC geregelten Raumtemperatur

Modellbezeichnung	Version 21	Version 20	Version 18 - 2020	Version 18 - 2021	Version 19	Version 17
Eingestellte Temperatur, °C	20	20	16	16	16	16
Anzahl der Vorkommnisse	158	115	38	45	99	47
Mittlere Abweichung, °C	2.84	3.3	2.12	3.04	2.32	1.07
Anzahl ohne April	128	85	16	18	70	24
Mittelwert ohne April, °C	3.2	2.33	1.19	1.76	2.66	0.46

Besonders zu beachten ist, dass in den Monaten April und Oktober größere Abweichungen von Soll- und Ist-Temperatur gehäuft vorkommen. In diesen Monaten ist es vorgekommen, dass aufgrund der niedrigen Nachttemperaturen die Fenster die ganze Nacht geschlossen blieben. Weiters sind durch die Heizperiode die Speichermassen vorkonditioniert. Da in unseren Simulationen besonders im Monat April gehäuft solche Abweichungen aufgetreten sind, gibt Tabelle 6 eine Auswertung der Abweichungen von der Zieltemperatur am Ende des MPC-Betriebs (8 Uhr morgens) für unterschiedliche Modellversionen wieder. In Abbildung 54 sind diese Werte graphisch dargestellt.

Tabelle 6 stellt auch eine Auswertung des mittleren Fehlers ohne Monat April dar. Für die meisten Modelle wurde damit das Ergebnis um mehr als 50 % verbessert.

⁵ Die Nummerierung erfolgt auf Basis der Experimentnummern, denen unterschiedliche Regelstrategien hinterlegt waren.

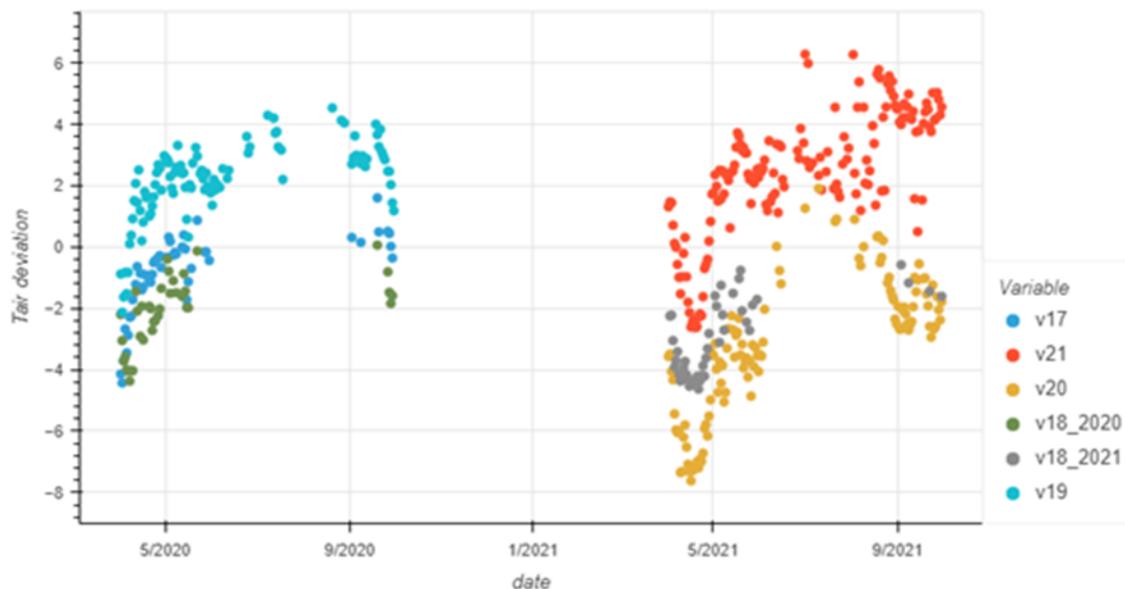


Abbildung 54 Abweichung der Raumtemperatur von der Solltemperatur

Isolierung der Außentemperaturvorhersage

Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Regelgenauigkeit zeigten, dass der größte Einfluss auf die Abweichung der Regelung die Genauigkeit der Vorhersage der Außentemperatur (T_{out}) ist. Dies liegt daran, dass das T_{out} -Muster stark saisonabhängig ist und aufgrund plötzlicher Wetteränderungen einige unvorhersehbare Merkmale aufweist.

Ein Vergleich der Raumtemperaturvorhersagen auf der Grundlage von durch ein neuronales Netzwerk vorhergesagten und der tatsächlichen Außentemperatur bestätigte die höhere Genauigkeit des Systemverhaltens der MPC und den Einfluss der Außentemperaturvorhersagen. Alle Vorhersagen werden für 12 Stunden im voraus gemacht.

Der folgende Vergleich für verschiedene Simulationen zeigt die Vorhersage der Raumtemperatur um 20 Uhr (Beginn des MPC-Betriebs) für 8 Uhr am nächsten Tag (Worst-Case am Ende des MPC-Betriebs). In Anbetracht der Tatsache, dass die MPC ihr Verhalten in jeder folgenden Stunde anpasst und somit die Regelgenauigkeit steigt, werden die Abweichungen um 1,5 Grad C als gutes Ergebnis angesehen. Tabelle 7 und Abbildung 55 fassen die Ergebnisse zusammen. Abbildung 55 zeigt die Abweichungen der morgendlichen Zielraumtemperatur von der Zieltemperatur bei prognostizierter und tatsächlicher Außentemperatur (für Modell v19).

Tabelle 7: Vergleich von Regelfehlern in Abhängigkeit von Bestimmung der Außentemperatur

Modellbezeichnung	Version 21	Version 20	Version 18 - 2020	Version 18 - 2021	Version 19	Version 17
Regelfehler bei vorhergesagter T_{out} (Mittelwert)	4.63	3.28	3.09	3.8	2.76	2.87
Regelfehler bei T_{out} ohne Vorhersagefehler (Mittelwert)	3.39	1.29	1.52	1.64	0.89	1.28

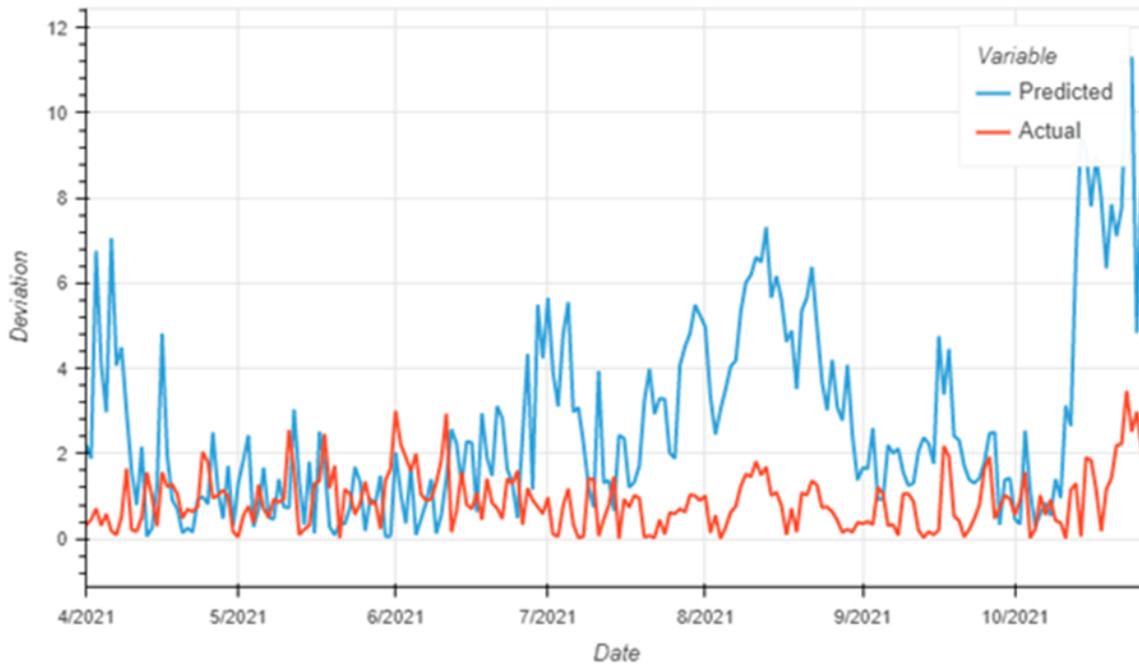


Abbildung 55 Abweichungen der morgendlichen Zielraumtemperatur von der Zieltemperatur bei prognostizierter und tatsächlicher Außentemperatur (für Modell v19)

5.3.5. Zusammenfassung modellbasierte Regelung

Die Anwendung einer Modellprädiktiven Steuerung (MPC) hat sich als gewinnbringend herausgestellt. Es konnten damit die morgendliche Zieltemperatur entsprechend erreicht werden und eine Unterkühlung des Raumes verhindert werden.

Besonders hervorzuheben ist aber die Tatsache, dass die Regelqualität der MPC naturgemäß stark vom Modell abhängt. Messdaten aus dem Betrieb sind hierbei bei stark schwankendem Nutzerverhalten nur bedingt für ein Training von neuronalen Modellen geeignet. Der Ansatz der simulationsbasierten Generierung von Trainingsdaten hat sich als praktikabel und wesentlich zielführender erwiesen. Während die Gebäudeeigenschaften in dem verwendeten datengetriebenen Ansatz gut modelliert werden konnten, stellen Abweichungen in der Modellierung der Außentemperatur signifikante Fehlerquellen dar. Besonders die Saisonalität und lokale Wettereinflüsse stellen hier eine Herausforderung für die KI-Methoden dar. Auf Basis dieser Ergebnisse wäre die Einbindung einer komplexeren Wettervorhersage (Wetterbericht) sinnvoll. Ansätze zur automatisierten Adaption der Modelle durch maschinelles Lernen konnten im Projekt noch nicht verfolgt werden.

Vorteile gegenüber anderen Steuermethoden wie zeitbasierten oder sensorgestützten Methoden sind besonders in den Übergangszeiten gegeben. Dort kann das Kühlpotential bei Einhaltung der Komfortgrenzen besser ausgeschöpft werden. An heißen Sommertagen blieben in den Testräumen die Fenster fast dauerhaft geöffnet (zeitbasiert) und in sehr kalten Nächten sind die Unterschiede zur sensorgesteuerten Regelung eher gering.

5.4. Praktische Umsetzung und Evaluierung

5.4.1. Testsetup Hofburg Wien

Die Umsetzung im Labormaßstab erforderte die Anwendung der MPC in gänzlich neuen Räumlichkeiten mit entsprechend vorhandenen thermischen Massen (vorzugsweise Bestandsgebäude mit Kastenfenster). Die Burghauptmannschaft Österreich (BHÖ) mit Büros in der Hofburg Wien stellte dem Projekt einen passenden Testraum bis zum Ende der Projektlaufzeit und auch darüber hinaus zur Verfügung. Nachfolgende Abbildung stellt die Lage des Testraumes im Nordwest-orientierten Grundriss dar.

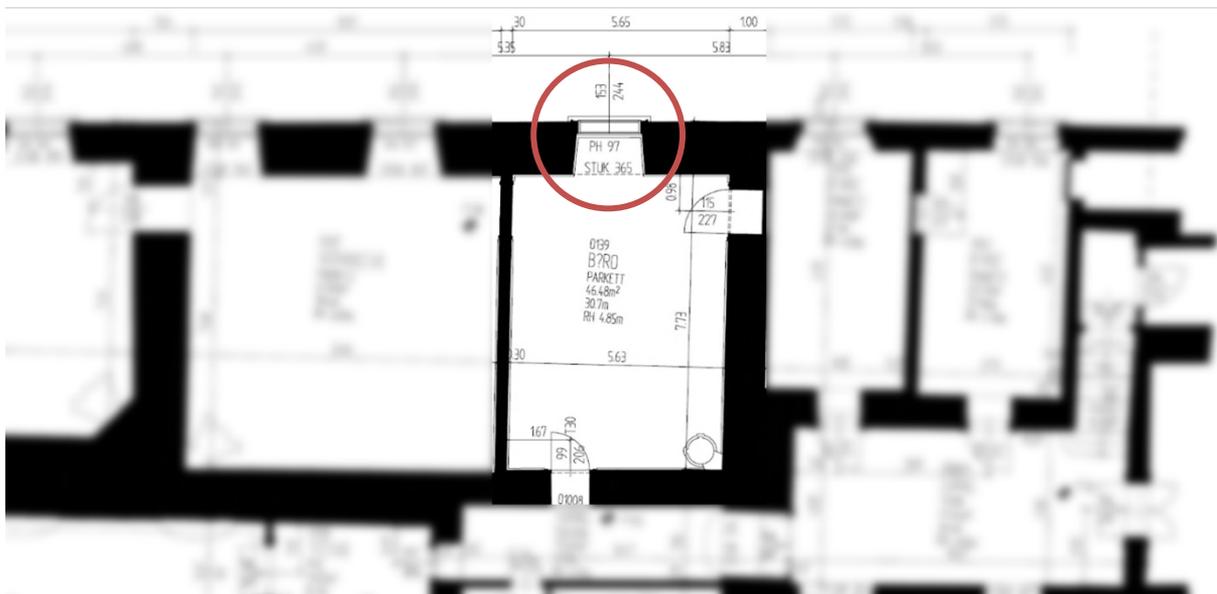


Abbildung 56: Grundriss des Testraumes in der Hofburg Wien mit markiertem Kastenfenster Nordwest-orientiert (Planquelle: BHÖ, adaptiert)

Der Testraum befindet sich im 2. OG, weist ein vierflügeliges Kastenfenster sowie eine Zugangstür auf. Die nachstehende Abbildung zeigt die Lage dieses Fensters innerhalb der Fassade sowie dessen Zustand vor Einbau der tageslichtoptimierten Verschattung sowie Antriebstechnik für die zu öffnenden Flügel.



Abbildung 57: Fassadenansicht vom Inneren Burghof und Kastenfenster vor dessen Adaptierung

In der Neuen Burg bestand eine Herausforderung darin, dass die äußeren Kastenfensterflügel nach innen aufschlagen (Wiener Kastenfenstertyp). Es musste daher ein Umsetzungskonzept samt Antriebsmechanismus entwickelt werden, der das Öffnen bzw. Schließen der inneren und äußeren Fensterflügel in einer vorgegebenen Reihenfolge ermöglicht (Schließfolgeregelung). Zusätzlich erschwerte das sehr beschränkte Platzangebot im Kastenfenster selbst diese Einbauten. Im Gegensatz zum Testraum in Krems war es aufgrund der nach innen aufschlagenden Außenflügel und der Mechanik für die Fensterantriebe erforderlich, die Beschattungen an die Außenseite der Innenflügel zu montieren. Dadurch war gewährleistet, dass nachts unabhängig der Behangposition der volle Lüftungsquerschnitt zur Verfügung steht. Alternativ wäre ein am Sturz montierter Behang im Scheibenzwischenraum unmittelbar vor dem Nachtlüftungszeitraum jedenfalls nach oben zu fahren. Das beengte Platzangebot ließ dies im Hinblick auf eine alleinige Öffnung der Außenflügel unter Tags zur Wärmeabfuhr aus dem Scheibenzwischenraum nicht zu.

Die tageslichtoptimierte Beschattung wurde durch die horizontale Zweiteilung der Lichteintrittsöffnung in einen Oberlichtbereich und einen Sichtbereich (untere Fensterflügel) realisiert. Der Oberlichtbereich wird mit einem am oberen Kastenprofil befestigten Rollo beschattet, während die Beschattung des Sichtbereiches auch vertikal geteilt werden musste, um die Fensteröffnung zu bewerkstelligen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die drei möglichen Beschattungszustände unter Verwendung dreier Rollos im Scheibenzwischenraum.



Abbildung 58: Wiener Kastenfenster im Testraum der Hofburg Wien zum Montagezeitpunkt der Rollos mit drei Beschattungszuständen

Die finale Umsetzung am Kastenfenster weist weder von außen noch von innen betrachtet erkennbare Eingriffe in den Bestand auf, wenn die Flügel geschlossen sind. Die nachstehende Abbildung 59 verdeutlicht dies anhand einer Innenaufnahme. Sichtbar im geöffneten Zustand ist je eine zarte Zug-Druck-Stange an der unteren Nebenschließkante, die die mechanische Verbindung beider Flügel bewerkstelligt. An der oberen Nebenschließkante befindet sich je Flügel die Welle des Rollos.

An der Fassade ist zum Zwecke des Projekts analog zum Setting in Krems ein Wind-/Regensensor sowie eine eigene Wetterstation primär zur Erfassung der Außenlufttemperatur sichtbar.



Abbildung 59: Kastenfenster im Testraum der Burghauptmannschaft Österreich in der Hofburg Wien, Zustand offen (links) und geschlossen mit tageslichtoptimierter Verschattung (rechts)

Das Mess-, Steuerungs- und Regelungskonzept samt Monitoring folgt grundsätzlich jenem in Krems, wobei die Anzahl der Messpositionen und -größen auf ein sinnvolles Mindestmaß reduziert ist. Die Messdaten laufen auch hier zentral im MPC-Controller zusammen und werden in eine Datenbank gespiegelt, gleichzeitig sind diese live auf einer Website mit grafischer Darstellung einsehbar (vgl. Abbildung 67).

5.4.2. Experimentelle Validierung

Tageslichtoptimierte Verschattung

Das Konzept der tagelichtoptimierten Verschattung wurde im einfacher zugänglichen Testraum in Krems mit einer Tageslichtmessung überprüft. Mehrere im Abstand von 1 m (beginnend ab Fensterbank) positionierte Luxmeter maßen bei unterschiedlichen Behangpositionen synchron die Beleuchtungsstärke. Die vorab getätigte Tageslichtsimulation zeigte, dass sich durch Teilverschattung des Fensters die Tageslichtversorgung um das Vierfache gegenüber einer vollflächigen Beschattung verbessern lässt. Die Simulation zeigte ebenso, dass Behänge mit geringem Perforationsgrad auch bei vollflächig aktivem Sonnenschutz infolge hoher Außenleuchtstärken noch ausreichend Tageslicht in den Raum transmittieren lassen, um ihn ausreichend zu belichten (Lichteintrag entspricht dem Lichteinfall bei bedecktem Himmel).

Die Messungen vom Mai 2021 decken sich gut mit den Simulationsergebnissen. Die Optimierung bewirkt vor allem, dass der fensterferne Bereich wesentlich besser mit Tageslicht versorgt wird, was aus mentaler, psychologischer und physiologischer Sicht von Vorteil ist und zudem die Zuschaltung von Kunstlicht reduziert. Würde bei einem konventionellen Blendschutz die Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel in 4 m Raumtiefe auf weniger als 500 Lux absinken, so fällt sie durch die Tageslichtoptimierung auf nur knapp unter 1000 Lux ab. Serotonin wird ab ca. 1000 Lux gebildet, wirkt stressabbauend und aktivierend. Die nachfolgende Abbildung 60 zeigt die vier untersuchten Blend- bzw. Sonnenschutzszenarien im Testraum in Krems rechts unten: Blendschutz vollflächig und 100 % Verschattung (bei direkter Sonne).



Abbildung 60: Raumsituation während der Beleuchtungsstärkemessungen von vier Blend- bzw. Verschattungsszenarien um die Mittagszeit am 10. Mai 2021; links oben: unverschattet, freier Lichteinfall; links unten: Blendschutz durch Rollo im Oberlicht, 50 % Verschattung (bei grellem Himmel); rechts oben: Blendschutz durch Rollo im unteren Fensterbereich, 50 % Verschattung (grelle Umgebung/Reflexionen minimiert), gleichzeitig Tageslichteintrag in die Raumtiefe; rechts unten: Blendschutz vollflächig und 100 % Verschattung (bei direkter Sonne)

Mittels Simulation ermittelte Tageslichtquotienten (TQ) weisen dabei eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Werten auf. Hierzu gilt es zu beachten, dass in der Simulation für den Außenraum stets eine konstante Lichtsituation als Randbedingung vorherrscht, während diese bei Messungen dynamisch ist. Abbildung 61 stellt für vier Messpositionen beginnend in einem Abstand von 1 m vom Fensterbrett bis in 4 m Raumtiefe die Tageslichtquotienten gegenüber.

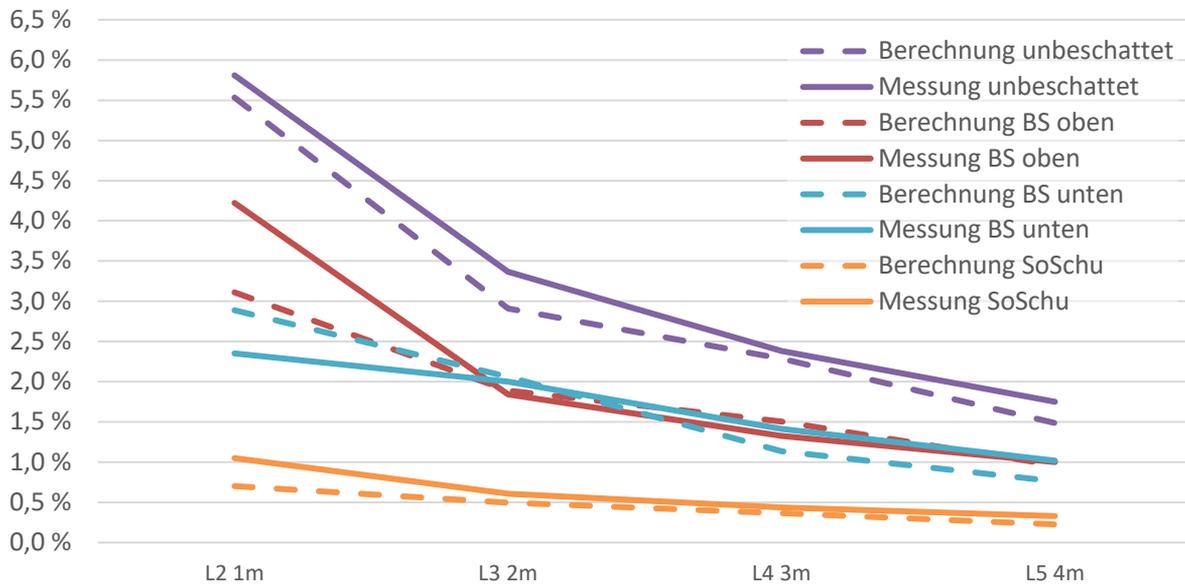


Abbildung 61: Vergleich der Tageslichtquotienten (TG) aus Simulation und Messung an vier Messpositionen in Abständen von je einem Meter

Untersucht wurden auch die Beleuchtungsstärken an der Beschattung (maßgeblich für die Beurteilung des Blendschutzes). Basierend auf der Leuchtdichte von PC-Bildschirmen mit ca. 200 cd/m² sollte das Kontrastverhältnis zur jener der Fensterfläche nicht höher als Faktor 10 (also 2.000 cd/m²) sein. Die Wirkung des Blendschutzes wurde sowohl bei diffuser als auch bei direkter Einstrahlung gemessen. In beiden Fällen wurde das nach der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt (AUVA) zulässige Kontrastverhältnis nicht überschritten.

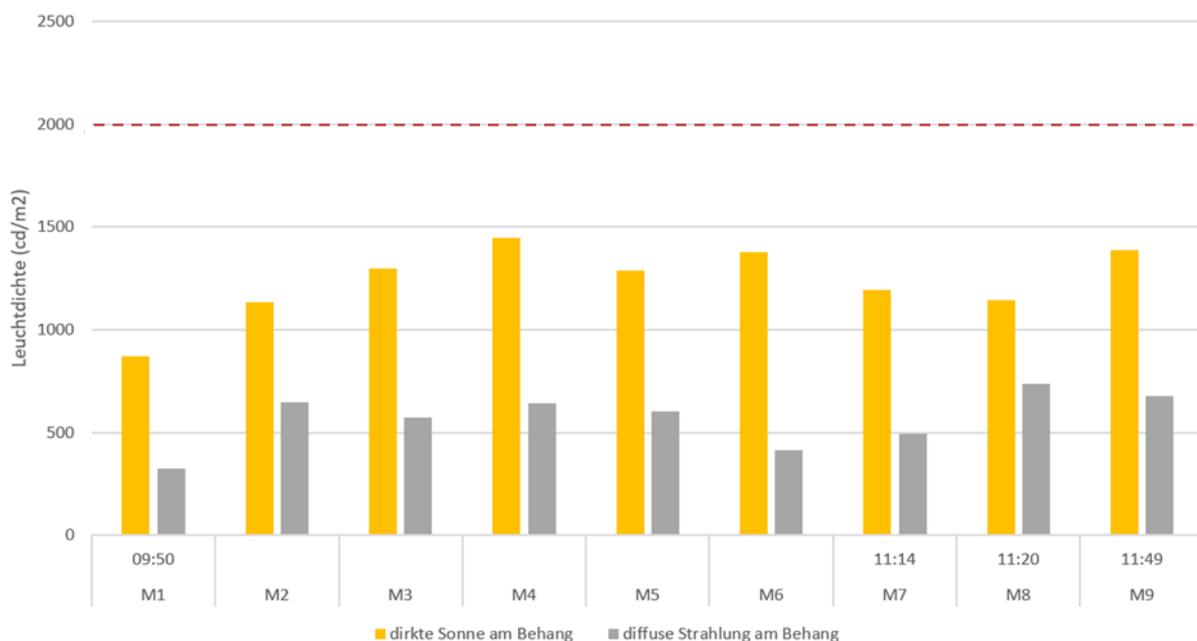


Abbildung 62: Leuchtdichte am Behang (Rollo) zu neun unterschiedlichen Messzeitpunkten

Für die Steuerung des Sonnen- bzw. Blendschutzes kann nachstehendes entwickeltes Flusschema zu Grunde gelegt werden, um optimale Ergebnisse hinsichtlich Minimierung des Wärmeeintrags bei gleichzeitiger Maximierung des Tageslichtangebots zu erzielen. Aus den Projekterfahrungen und Rückmeldungen seitens der NutzerInnen ist eindeutig ableitbar, dass NutzerInneneingriffe jederzeit

möglich sein müssen, um die Zufriedenheit mit dem Sonnenschutzautomatismus nicht zu beeinträchtigen. Dabei ist das Intervall für die Rückstellung in die Optimalposition nach manuellen Eingriffen entscheidend, um die NutzerInnen einerseits für Sonnenschutzmaßnahmen zu sensibilisieren, andererseits gleichzeitig nicht zu verärgern.

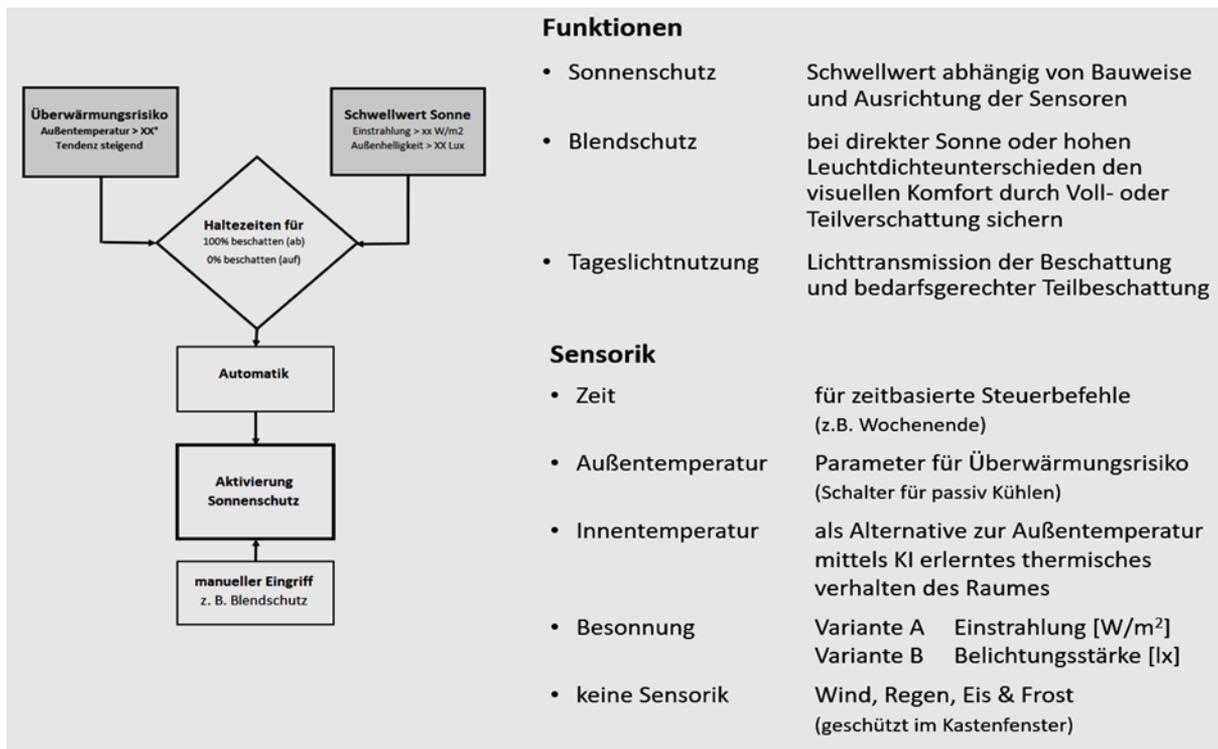


Abbildung 63: Flusschema zur Steuerung des Sonnen- bzw. Blendschutzes mit erforderlichen Komponenten

Modellprädiktive Steuerung (MPC)

Der für das Training des Vorhersagemodells verwendete Datensatz enthielt 13452 Messungen mit stündlichen Intervallen, die sich über etwa 1,5 Jahre erstreckten und folgende Werte enthielten:

- T_{bui} : Oberflächentemperatur der Wand
- T_{air} : Raumlufttemperatur
- T_{out} : Außentemperatur
- Fenster: Zustand des Fensters (offen/geschlossen)

Die Stunde des Tages wurde dem Datensatz hinzugefügt und alle Daten wurden für die Modellbildung auf das Intervall 0 bis 1 normiert. Zusätzlich ist anzumerken, dass Der Testraum war während des gesamten Messzeitraums in Betrieb und Heizungseinflüsse sowie menschliche Aktivitäten bzw. Eingriffe nicht separat messtechnisch erfasst wurden.

Es wurde ein LSTM-Modell mit der gleichen Struktur entwickelt, die auch in den Simulationsläufen verwendet wurde. Tabelle 8 gibt die Ergebnisse der Modellvalidierung an. Der durchschnittliche Fehler bei Einspielen des Validierungsdatensatzes lag bei 2 % und darunter. Bemerkenswert ist der kleinste Fehler und maximale Abweichung der Wandtemperatur, die die besten Vorhersageergebnisse geliefert hat und auch bauphysikalisch am besten für die Vorhersage geeignet ist.

Tabelle 8: Modellvalidierung des neuronalen Netzwerkes für Luft-, Wand- und Außentemperaturen

Fehlerquote des LSTM-Modells	Lufttemperatur	Wandtemperatur	Außentemperatur
Maximale Abweichung	39.38%	12.7%	30.76%
Durchschnittliche Abweichung	2.03%	1.3%	1.83%

Abbildung 64 zeigt ein Beispiel für die vorhergesagten Raumtemperaturen und deren Abweichung von den tatsächlichen Werten. Es ist klar zu erkennen, dass das neuronale Netzwerk den tatsächlichen Verlauf der Raumtemperatur vorhersagen kann. Auf Grund der konservativen Einstellung der Voraussage ist ein Lagging (Hinterherhinken) der vorausgesagten Temperatur $T_{air,p}$ sowie eine tendenziell zu geringe Voraussage der Temperaturmaxima zu erkennen. Die Dynamik der Abweichungen wird bis auf wenige Ausnahmen korrekt vorausgesagt.

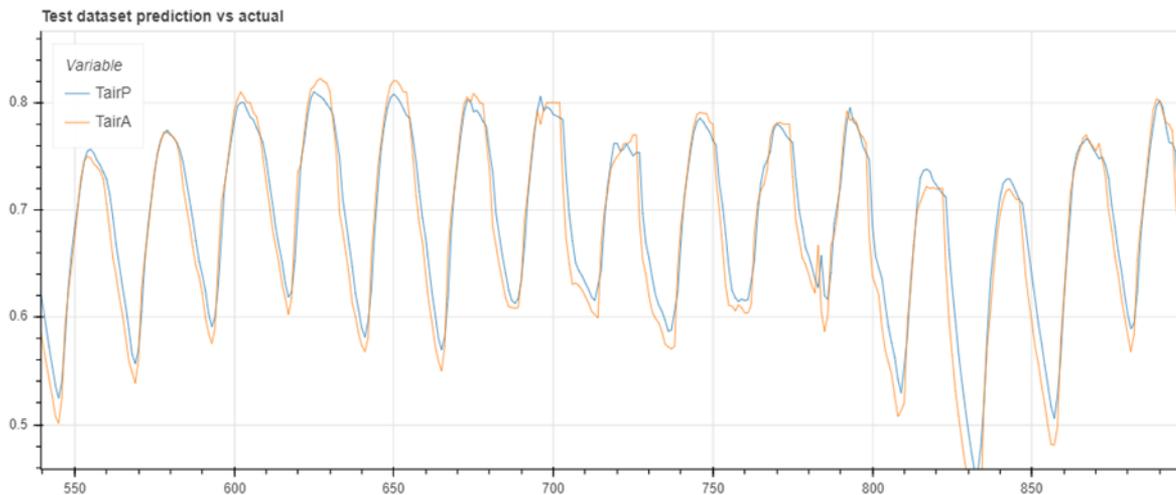


Abbildung 64: Beispiel für die Vorhersage im Vergleich zur tatsächlichen Raumtemperatur

Abbildung 65 zeigt die sortierten tatsächlichen Raumtemperaturen zusammen mit den vorhergesagten Temperaturen, um die durchschnittlichen Abweichungen für den gesamten Testdatensatz zu verdeutlichen. Es ist dabei zu sehen, dass die mittleren Temperaturwerte die größten Abweichungen haben.

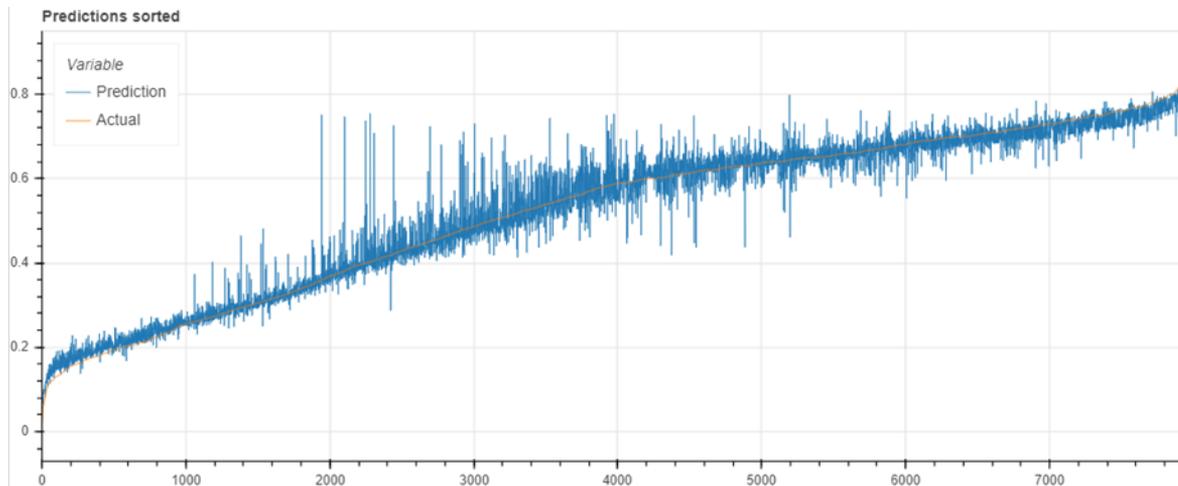


Abbildung 65: Sortierte vorhersage und tatsächliche Raumtemperatur

Der vollständige Datensatz, der für das Training des ursprünglichen ersten Modells verwendet wurde, enthielt sowohl Sommer- als auch Winterperioden. Da im Winter das Fenster dauerhaft geschlossen war und die Raumtemperaturen jahreszeitabhängig niedriger waren (keine sommerliche Aufladung) führt dies dazu, dass die Vorhersagen der Raumtemperatur bei geschlossenen Fenstern niedriger als die realen Temperaturen lagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Modell mehr „Winterverhalten“ gelernt hat und bei geschlossenem Fenster niedrigere Raumtemperaturen erwartet/voraussagt. Es wurde daher ein neues Modell entwickelt, bei dem nur warme Zeiträume herangezogen wurden, in denen das Fenster häufig geöffnet war. Die allgemeine Befürchtung war zwar, dass es nicht genügend Trainingsdaten geben würde, damit das Modell konvergieren könnte. Das Modell erkannte jedoch langfristige Muster (z.B. morgendliche Wiedererwärmungskurven) und zeigte die richtigen Auswirkungen des Schließens der Fenster. Tabelle 9 zeigt die Fehlerquoten der beiden Modelle. Interessant war festzustellen, dass die Fehlerquoten ein ähnliches Niveau haben. Erwartungsgemäß hat das Sommermodell leicht schlechtere Werte, da wesentliche weniger Trainingsdaten zu Grunde lagen. Die große Abweichung in der Außentemperatur zeigt die in Abschnitt 5.3.4 beschriebene Defizite des zu einfachen auf einen einzelnen Sensor basierten Modells für die Außentemperatur während der Sommermonate.

Tabelle 9: Vergleich der Fehlerquoten bei Nutzung von ganzjährigen Trainingsdaten gegenüber Trainingsdaten, die nur warme Zeiträume beinhalten.

Durchschnittliche Fehlerquoten	Lufttemperatur	Wandtemperatur	Außentemperatur
Vollständiges Modell	2.03 %	1.3 %	1.83 %
Sommer-Modell	2.32 %	1.41 %	3.24 %

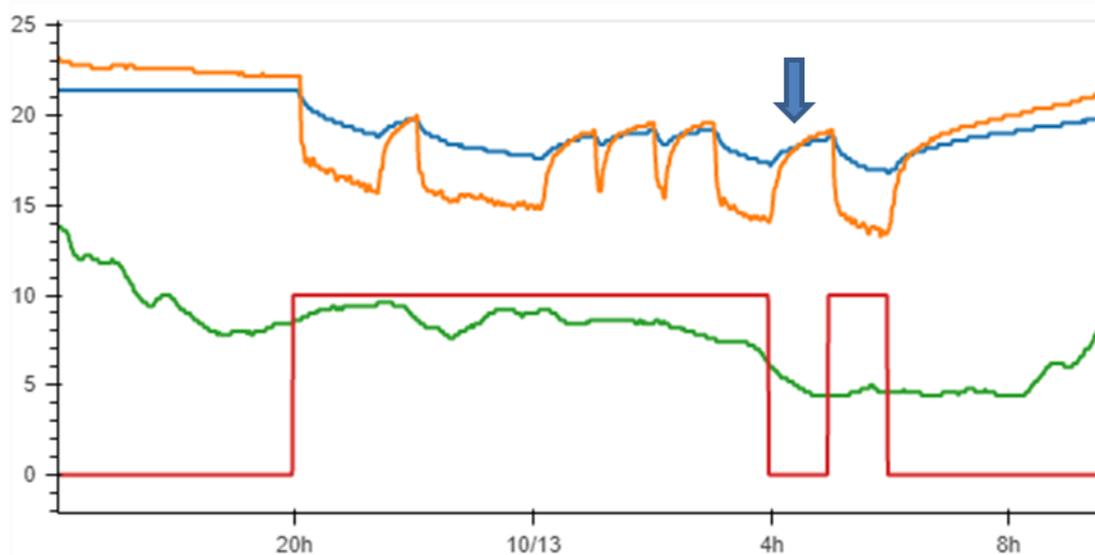


Abbildung 66: Anomalie des MPC-Verhaltens aufgrund des starken Anstiegs der Raumtemperatur

Die MPC-Tests wurden im September und Oktober 2021 durchgeführt. Während dieser Tests wurde ein nächtliches Schwingen des Fensters, d.h. ein abwechselndes Öffnen und Schließen, das durch die MPC vermieden werden sollte, beobachtet. Abbildung 66 zeigt diese Anomalie zwischen 4 und 6 Uhr morgens. Das Modell sagte in diesen Fällen zwar einen Anstieg der Raumtemperatur im Falle des Schließens des Fensters voraus (blaue Linie), konnte jedoch nicht passend vorhersagen, wie stark der Anstieg und in diesem Fall auch die absolute Temperatur (orange Linie) sein würde. Da der Trainingsdatensatz nicht genügend Beobachtungen enthielt, hat das Modell die Wärmespeicher nicht richtig erfasst. Entsprechend durch Simulationsdaten erweiterte Trainingsdaten haben das Ergebnis des maschinellen Lernens verbessert und führten zum richtigen Systemverhalten

Zusammenfassend zeigen die Versuche, dass die MPC-Steuerungsstrategie in den Status- und Temperaturwerten der letzten 12 Stunden entsprechende Muster erkennt, um passende Temperaturvorhersagen zu treffen. Das LSTM-basierte Modell zeigte dabei eine ausreichende Genauigkeit.

Wesentliche limitierende Faktoren für die datengetriebene Modellbildung sind eine ausreichend hohe Anzahl an eindeutigen Mustern. Bei ausschließlicher Verwendung der Daten aus dem Langzeitmonitoring fiel dabei folgender Punkt negativ ins Gewicht: Da im Testraum über 1,5 Jahre verschiedenste Kontroll- und Teststrategien angewandt wurden, wiesen die resultierenden Messungen auch eine hohe Anzahl an Verhaltensmustern auf, die das Training erschwerten. Die Anwendung auf Basis einer begrenzten Anzahl von Messungen führte daher zu Abweichungen bei den Vorhersagen.

Als Abhilfemaßnahme kann die Substitution der Oberflächentemperatur durch die Innenwandtemperatur die Leistung verbessern, da die Innenwandtemperatur ein konsistenteres Verhalten aufweist. Eine weitere Option ist die Verwendung von Bootstrapping zur Erstellung von Datensätzen, die für bestimmte Jahreszeiten geeignet sind. Dies würde jedoch die Anpassungsfähigkeit des Modells an verschiedene Anwendungen beeinträchtigen.

Die Leistung der MPC in der Praxis ist anschaulich in der nachfolgenden Abbildung 67 ersichtlich: Am Freitag, den 01.07.2022, wurde die Model Predictive Control erstmals im Jahr 2022 wieder aktiviert. Die Temperaturen im Raum betragen ca. 27 °C. Der Start ist am stufenförmigen Verlauf der lila Kurve

erkennbar, die das gerade aktive Aktuatorszenario⁶ angibt. Szenario 1 bedeutet Nachtlüftung, 2 unverschattet und 3 die aktivierte Verschattung (sekundäre y-Achse). Die Verschattung ist aufgrund der Nordwest-Orientierung des Fensters erst ab 15 Uhr bis zum frühestmöglichen Zeitpunkt der Nachtlüftung um 20 Uhr durch die MPC zweckmäßig aktiv. Die MPC lüftet und kühlt damit den Testraum bis zu jenem Zeitpunkt nachts, sodass morgens um jeweils 8 Uhr die voreingestellte Komfortgrenztemperatur gerade nicht unterschritten wird. Diese Solltemperatur ist dabei variabel konfigurierbar, in konkreten Fall auf 20,0 °C gesetzt.

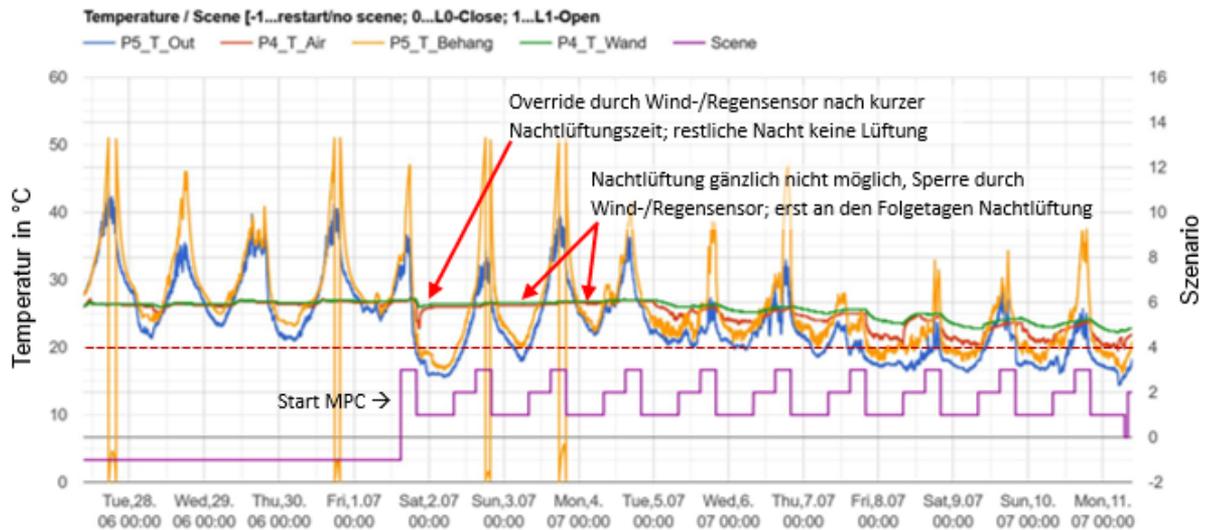


Abbildung 67: Ausschnitt Messergebnisse vor und nach dem Start der MPC im Testraum der Hofburg Wien im Juli 2022; Außenlufttemperatur (blau), Raumlufttemperatur (rot), Kastenfenstertemperatur (gelb), Wandoberflächentemperatur (grün) sowie Szenario (lila Kurve)

5.4.3. Kostenanalyse

In diesem Abschnitt wird eine wirtschaftliche Betrachtung der automatisierten ventilativen Nachtlüftung und einer reinen mechanischen Kühlung durchgeführt. Die Berechnung erfolgt über ein dynamisches Verfahren, indem Preissteigerungen und Rückflüsse über einen vordefinierten Zeitraum Berücksichtigung finden. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat den Zweck, Aussagen über die finanziellen Auswirkungen von Investitionen innerhalb des angenommenen Betrachtungszeitraums zu ermöglichen.

Bei der dynamischen Berechnungsmethode werden Ein- und Auszahlungen unter der Berücksichtigung von Zinswerten über die Nutzungsdauer einer vorher festgelegten Periode berücksichtigt. Hierbei werden die Preissteigerungen und der Zukunftswert des Geldes ebenso mitberücksichtigt, wie auch die Preissteigerungen von Gütern oder Energiekosten.

In CoolAIR wird als dynamische Berechnungsmethode die Annuitätenmethode herangezogen. Die Annuitätenmethode wandelt den Kapitalwert in gleich große jährliche Einzahlungsüberschüsse um. Diese wird als Annuität bezeichnet.

⁶ Es ist anzumerken, dass aus Sicherheitsgründen der Regen- und Windsensor das aktivierte Szenario deaktivieren kann. Steuerungstechnisch hat dieser Schließvorgang eine höhere Priorität. In Abbildung 67 ist dies an einer konstanten Raumtemperatur zu erkennen.

Investitionskosten indirektes Kühlsystem

Nachstehende Tabelle 10 stellt die spezifischen Kosten je kW Kälteleistung dar.

Tabelle 10: Spezifische Kosten für Kältemaschinen mit Rückkühlwerk, ohne Verrohrung (Schramek 2001 und Herstellerangaben)

	0-250 kW	250-500 kW	500-1000 kW	1000-3000 kW	3000-9000 kW
Scroll	480,00 €/kW	/	/	/	/
Hubkolben	300,00 €/kW	280,00 €/kW	240,00 €/kW	220,00 €/kW	160,00€/kW
Schraube ab	265,00 €/kW	250,00 €/kW	210,00 €/kW	175,00 €/kW	160,00 €/kW
Turbo	/	/	/	195,00 €/kW	145,00 €/kW
Absorber	2000,00 €/kW	1500,00 €/kW	1400,00 €/kW	1340,00 €/kW	1400,00 €/kW

Die spezifischen Kosten für Einbauten und Komponenten werden in Tabelle 11 ausgewiesen.

Tabelle 11: Spezifische Kosten für Kühldecken, Bauteilaktivierung und Gebläsekonvektoren in Kassettengeräten (Schramek 2001 und Herstellerangaben)

Kühldecken	ohne Verteilung			125-150 €/m²
Bauteilaktivierung	ohne Verteilung			40-50 €/m ²
Kassettengeräte	komplett mit Verrohrung und Kälteerzeugung, ohne Elektro			1300-1500 €/kW
Splitgeräte:	Decken-	7-14 kW	520 €/kW	Heizen und Kühlen
	Wand- /	2-14 kW	420 €/kW	nur Kühlen
	Wand- / Deckengeräte	8-14 kW	450 €/kW	Heizen und Kühlen
	Fensterklimageräte	2-8 kW	265 €/kW	nur Kühlen

Die angeführten Daten in Tabelle 10 und Tabelle 11 sind Angaben aus dem Jahr 2010. Anhand der Daten der Statistik Austria gab es vom Jahr 2010 bis zum Ende von 2021 eine Preissteigerung kumulierend im Hoch- und Tiefbau von 40 % (siehe Abbildung 68).

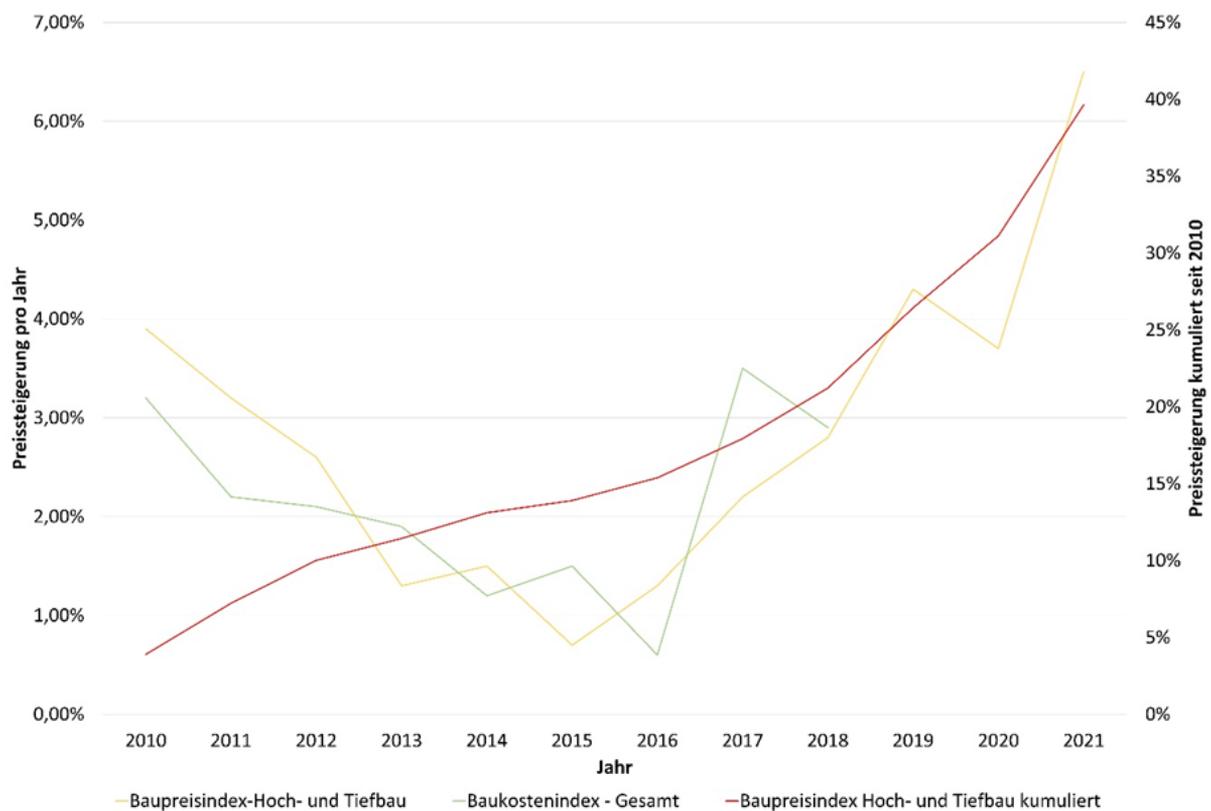


Abbildung 68: Baupreis- und Baukostenindex (Datengrundlage Statistik Austria, März 2022)

Wie in der Tabelle 11 ersichtlich wird ein Kassettengerät (Fan Coil) inklusive Verrohrungsanteil und Kälteerzeugung zwischen 1300 – 1500 €/kW angeführt.

Hochgerechnet mit dem Baukostenindex von 40 % wird für das Kassettengerät 2.100 €/kW veranschlagt. Bei einer Kühllast von 1,57 kW ergeben die installierten Kosten je Kassettengerät 3.297 €. Der Elektrokomponentenanteil inklusive Raumbediengerät wird mit zusätzlichen 200 € pro Einheit veranschlagt.

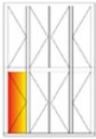
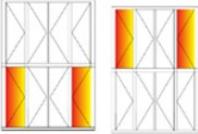
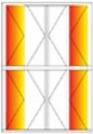
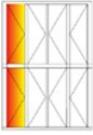
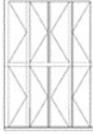
Investitionskosten Fenstersteuerung

Die Kastenfenster der Universität für Weiterbildung Krems müssen für die automatische Nachtlüftung mit Fensterantrieben nachgerüstet werden. Jede Fensteröffnung wird hierbei mit vier Kettenantrieben ausgestattet. Die Kosten hierfür wurden von den Projektpartnern Fürstner RWA Systeme und Technik GmbH sowie Zach Antriebe GmbH ermittelt und bekannt gegeben.

Je Kettenantrieb werden für die Wirtschaftlichkeitsberechnung 139,50 €/Stk. angesetzt. Die Steuereinheit wird inklusive Montage und Verkabelung mit 200 € pro Raum angenommen.

In Abhängigkeit der Varianten der Fensteröffnung werden die Investitionskosten in nachstehender Tabelle 12 dargestellt. Farblich markiert sind automatisiert öffnende Fensterflügelpaare (außen+innen) des achteiligen Kastenfensters. Variante 6 entspricht darin der rein mechanischen Kühlung ohne zusätzliche öffnende Flügel und dient der Mitbetrachtung in Abbildung 69.

Tabelle 12: Investitionskosten für automatisch öffnende Fenster

Variante	Fensteröffnung	Anzahl Kettenantriebe [Stk]	Preis Kettenantriebe [€]	Steuereinheit [€/Var.]	Gesamtpreis [€]
1		4	558	200	758
2+3		8	1.116	200	1.316
4		16	2.232	200	2.432
5		8	1.116	200	1.316
6		-	-	-	0,00

ausschließlich mechanische Kühlung

Betriebskosten beider Konzepte

Die Betriebskosten der mechanischen Kühlung werden im Wesentlichen von der Performance der Anlage bestimmt. Die Bewertung kann über den Coefficient of Performance (COP) oder Energy Efficiency Ratio (EER) erfolgen.

Für die Annahme der Betriebskosten der mechanischen Kühlung wird zur Ermittlung des Energieverbrauches der Kälteerzeugung die Mindesteffizianzforderung an den Raumkühlungs-Jahresnutzungsgrad $\eta_{s,c}$ von Wasser-Wasser-Kältemaschinen mit einer Nennleistung von < 400 kW mit $\eta_{s,c} = 200$ herangezogen, woraus sich ein SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) von 6,5 anhand der Mindesteffizianzforderung der EU-Verordnung EU 2016/2281 ergibt.

Als Strompreis werden die Preise von Nicht-Haushalten Stand März 2022 von der E-Control mit ca. 18 Cent/kWh Netto bei einer Abnahme von 20 MWh/a bis 500 MWh/a angegeben.

Das aktive Kühlsystem ohne zusätzlicher Fensterlüftung muss bei einer gleichbleibenden Rauminnentemperatur von 26 °C eine Kühlenergie von 1031,5 kWh/a aufbringen. Dadurch ergibt sich ein Strombedarf für das aktive Kühlsystem von 158,7 kWh.

Für die Kettenantriebe der Fensterflügel wird eine maximale Leistungsaufnahme pro Motor mit 36 Watt vom Hersteller angegeben. Im Fall der Variante 4 mit 4 x 2 Fensterflügel ergibt sich damit eine maximale Stromaufnahme von 576 Watt.

Die Fensterflügelregelung wird nur mit einer 2-Punkt-Regelung ausgestattet, wodurch die Fenster entweder vollständig geöffnet oder geschlossen werden. Zur Berechnung werden für die Kühlperiode insgesamt 180 Zyklen angenommen, wobei ein Zyklus einmal das Fenster öffnen und einmal schließen bedeutet.

Da der Energieverbrauch der Kettenantriebe aufgrund der äußerst kurzen Laufzeit je Zyklus von weniger als zwei Minuten sehr gering ist, wird er in der Wirtschaftlichkeitsberechnung als Betriebskostenposition nicht weiter berücksichtigt.

Für die dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung wird der reale Kalkulationszinssatz für Büro- und Verwaltungsgebäude von 1,5 % herangezogen.

Für die Fensterkettenantriebe wird weiters ein jährlicher Wartungseinsatz pro Antrieb mit 10 Minuten Arbeitszeit angesetzt. Bei der Maximalvariante von 16 Antrieben wäre somit ein Arbeitseinsatz von 160 Minuten erforderlich. Bei einem Stundensatz eines Facharbeiters von 68 €/h (netto) inklusive anteiligen An- und Abfahrtskosten, ergibt dies bei Variante 4 jährliche Kosten von 181,33 €.

Der Preisänderungssatz der Wartung und Instandhaltung wird dem Baupreisindex von 2 % gleichgesetzt und in der Berechnung mitberücksichtigt.

Berechnung der Wirtschaftlichkeit

In der Abbildung 69 ist der Annuitätenvergleich der jährlichen Auszahlungen der einzelnen Varianten dargestellt. Die jährlichen Zahlungen der Variante 6 (keine automatisierte Fensteröffnung, Vgl. Tabelle 12) sind mit einem rein mechanischen Kühlsystem am höchsten. Hier schlagen sich sowohl die höheren Investitionskosten und vor allem die höheren Betriebskosten zu Buche.

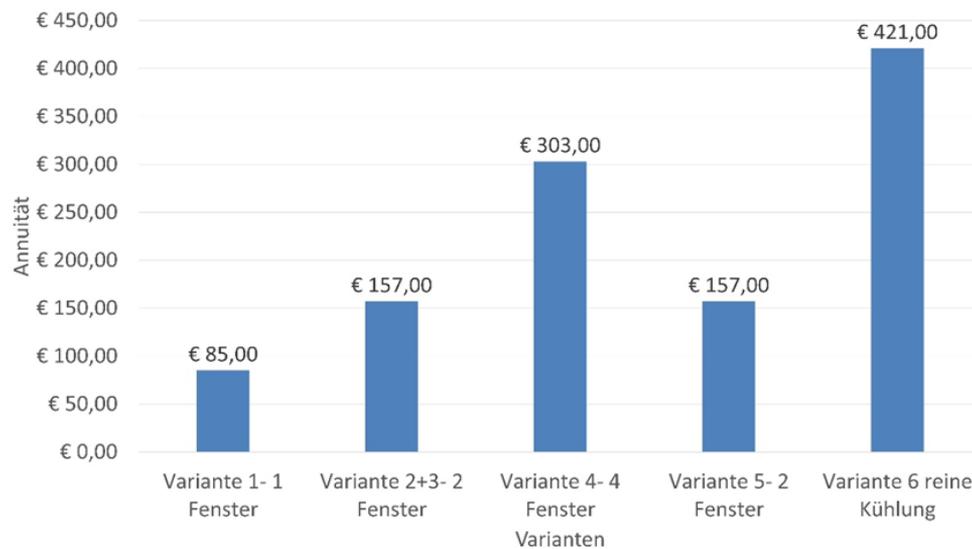


Abbildung 69: Annuitätenvergleich der Varianten

5.4.4. Zusammenfassung Umsetzung und Evaluierung

Die Umsetzung der natürlichen Nachtlüftung samt tageslichtoptimiertem Verschattungssystem in einer gänzlich anderen räumlichen Umgebung erfordert ein entsprechendes Maß an Vorplanung, da im Bestand Randbedingungen auftreten können, die erst im Zuge einer Begehung ersichtlich werden. Ist jedoch die bauliche Situation am betreffenden Kastenfenster einmal erhoben und ein Konzept je Kastenfenstertyp bereits erfolgreich umgesetzt worden, können die Erkenntnisgewinne für neue Umgebungen sehr effizient genutzt werden. Der Transfer des Konzepts von KREMS in die Hofburg Wien gestaltete sich aufgrund der Änderung der Aufgehrichtung der äußeren Flügel jedoch entsprechend aufwendig, die Implementierung der MPC hingegen konnte beinahe reibungslos 1:1 übertragen werden. Nach einer kurzen mehrwöchigen Testphase übernahm die MPC die Nachtlüftung- samt Verschattungsregelung im Testbüro in der Burghauptmannschaft Österreich - BHÖ zur besten Zufriedenheit des dortigen Realnutzers.

Die Validierungsmessungen hinsichtlich des Tageslichtquotienten und der Beleuchtungsstärke unter Einsatz des gewählten Verschattungssystems bestätigten die Ergebnisse der parallelen Simulationen. Der gewählte zweiteilige Behang erlaubt unterschiedliche NutzerInnenbedürfnisse hinsichtlich des Blendschutzes und der Tageslichtversorgung abzudecken. Weiters positiv hervorzuheben ist die Möglichkeit der Durchsicht bzw. die Gewährleistung des Außenraumbezugs bei vollständiger Verschattung des Fensters, wenn Direktsolarstrahlung auf das Fenster trifft.

Wirtschaftlich betrachtet weist dieses System deutliche Vorteile gegenüber einer mechanischen Kühlung auf: einerseits durch geringere Investitionskosten, andererseits durch vernachlässigbare Energiekosten im laufenden Betrieb.

5.5. Begleitung Denkmalschutz und Wissenstransfer

5.5.1. Dissemination und Einbindung von Stakeholdern

Das Projekt wurde im Rahmen von 3 Workshops von 40 Stakeholdern aus den aus den Gebieten der Fensterhersteller, Motorenhersteller, Automatisierungstechnik, HKLS-Planung und -bau, Gebäudebetrieb und Denkmalschutz begleitet. Im Jahr 2018 wurden diesen Stakeholdern im Zuge eines Workshops auf der einen Seite die Grundlagen, Inhalte und Zielsetzungen des Projekts vorgestellt sowie praktische Erfahrungen mit ventilativer Kühlung erläutert. Um den Wissenstransfer beidseitig sicherzustellen, diente der Workshop auf der anderen Seite als Design-Thinking Plattform und zum Fachaustausch. Die Ergebnisse wurden in die Projektplanung und das Design aufgenommen.

Im Zuge der e-nova am 21.11.2019 wurde ein weiterer Workshop durchgeführt. Dort wurden die ausgearbeiteten Konzepte vorgestellt und zur Diskussion gestellt, woraus wertvolles Feedback resultierte, das zur weiteren Schärfung der Projektergebnisse diente. Insgesamt haben 35 TeilnehmerInnen am Workshop teilgenommen.

Aufgrund der Einschränkungen durch die COVID-19 Pandemie konnte der letzte Workshop nur online abgehalten werden. 30 Teilnehmer haben daran teilgenommen und wurden über die Ergebnisse des Projektes in verschiedenen Vorträgen aller Projektpartner informiert. Zusätzlich wurde eine Keynote von Peter Holzer zum Thema ventilative Kühlung und die neuen Herausforderungen durch den Klimawandel gehalten. Abgeschlossen wurde der Workshop durch eine Podiumsdiskussion mit reger Beteiligung des Publikums.

Zusätzliche wurde das Projekt und dessen Ergebnisse im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen und Vorträgen einem breiteren Publikum vorgestellt und das Wissen damit an weitere relevante Stakeholder weitergegeben. Eine Liste der Publikationen findet sich in Abschnitt 0 und 0.

5.5.2. Kontrolle der Denkmalschutzaspekte

Beide Testräumlichkeiten waren in denkmalgeschützten Gebäuden untergebracht. An der Universität für Weiterbildung Krets im historischen Gebäude der ehemaligen Tabakfabrik wurde bewusst nur eine temporäre Installation gewählt, deren Fokus auf der vollständigen Rückbaubarkeit lag.

Zu der Frage, welche Art von Adaptierungen (Beschattung, Beschlags- bzw. Automatisierungstechnik) am Fenster seitens des Denkmalschutzes zulässig sind, wurde anhand von Literaturrecherche, Stadtrundgängen (Fact Findings) sowie in Gesprächen mit Projektleitern der Bundesimmobiliengesellschaft (BIG) und dem Bundesdenkmalamt (BDA) Rahmenbedingungen erhoben. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es im Denkmalschutz immer auf den Einzelfall ankommt und es daher keine generellen Vorschriften gibt, welche Veränderungen an Fenstern vorgenommen werden dürfen. Der neue Leitfaden wurde erst mit Projektende veröffentlicht.

Verschattung

Laut BDA dürfen im historischen Bestand bereits bestehende im Kastenraum integrierte Beschattungen auch modernisiert werden. Das BDA behält sich bei jeder Lösung ein Mitspracherecht vor, erfahrungsgemäß besonders für Farben und Oberflächenqualitäten. Das begründet sich damit, dass in der Richtlinie des BDA „Energieeffizienz im Baudenkmal“ (März 2011), das Thema der transparenten

Bauteile und ihrer Abschlüsse (Beschattungen) nicht behandelt wird. Ein neuer Leitfaden des Bundesdenkmalamts, der auch das Fenster und den Sonnenschutz behandelt wird, war zum Zeitpunkt der Gespräche erst in Arbeit.

Im Projekt CoolAIR wurde erstmals untersucht, wie man Sonnenschutz und Tageslichtversorgung in Kastenfenstern von denkmalgeschützten Gebäuden für die Ansprüche von zeitgemäßen Arbeitsplätzen modernisieren kann. Die entsprechenden Konzepte wurden in CoolAIR entwickelt, installiert und getestet. Von Seiten des BDA zeigte man Interesse an den Lösungen und es gibt auch keine grundsätzlichen Einwände. Der 2021 erschiene Werkstattbericht Nr. 186 – Sonnenschutz und Stadtbild (Auftraggeber Stadt Wien – Architektur und Stadtgestaltung, Autorin Arch. DI Ursula Schneider) bestätigt den Forschungsansatz von CoolAIR, dass das Potential der passiven Kühlung im Denkmalschutz bestmöglich ausgeschöpft werden sollte, bevor es zum Einbau von Klimageräten kommt.

Insbesondere bei ausschließlich nach innen öffnenden Kastenfenster ist der Erhalt der Lüftungsfunktion eine wesentliche Anforderung, die auch aus Denkmalschutzaspekten wesentlich ist. Dieses Problem wurde im Projekt CoolAIR erkannt und auch konzeptmäßig durch an die Flügelrahmen montierte Behänge und Antriebe gelöst. Bei nur kippbaren Oberlichtern kann dies in der Praxis aber zu Problemen mit dem Freiraumprofil führen und eine Adaption notwendig machen.

Der neue Leitfaden „Energieeffizienz im Baudenkmal“ des Bundesdenkmalamtes wurde am 01.12.2021 veröffentlicht. Im Kapitel 4.5 werden Fenster behandelt und unter 4.7 wird auf den Sonnenschutz eingegangen. Generelle Regelung gibt es nicht, da immer die historische Bedeutung eines Objektes maßgeblich für diverse Maßnahmen ist. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die im Projekt CoolAIR realisierten Beschattungslösungen mit den BDA-Anforderungen vereinbar sind, jedoch wie bisher im Einzelfall zu beurteilen sind.

Zusammenfassend lässt sich in Bezug auf historische Gebäude sagen, dass das Thema stets präsent ist, aber generelle Vorgaben nicht möglich sind. Wie man jedoch Sonnenschutz und Tageslichtversorgung, insbesondere für Arbeitsplätze optimal löst, wurde bisher nur im Projekt CoolAIR umfassend untersucht und auch Lösungen gefunden, die durchaus Potential haben, vom BDA gebilligt zu werden, da vor allem Beschattungsvorrichtung im Kastenfenster bereits im historischen Gebäudebestand häufig vorkommen und gemäß BDA auch modernisiert werden dürfen. CoolAIR konnte zeigen, dass eine Anpassung historischer Fenster auf die thermischen und visuellen Anforderungen der heutigen Zeit durch Umrüsten von Abschattungsvorrichtungen im Zwischenraum eines Kastenfensters möglich und zudem kostengünstiger als eine nachträgliche Außenbeschattung ist.

Automatisierung der Fensterflügel

Die Umsetzung an der Universität für Weiterbildung Krems stellt die erste Entwicklungsstufe dar und es wurde daher im Sinne einer temporären Installation nur die Rückbaufähigkeit und der Erhalt der Außenansicht gewährleistet. Die Motoren waren im Kastenfensterzwischenraum sichtbar. Wesentliche Erkenntnisse dieser Installation war die Notwendigkeit die i.a. filigranen Fensterflügel zu versteifen bzw. durch den Einsatz von zwei Antrieben pro Flügel den notwendigen gleichmäßigen Anpressdruck zu erreichen. Die Fensterflügel hätten sich sonst verzogen bzw. nicht dicht geschlossen. Da es sich um ein Kastenfenster des Grazer Typs gehandelt hat, war die Mechanik aber leicht umsetzbar, da die Flügel nicht in dieselbe Richtung öffnen. Wirtschaftlich ist der Einsatz von mehreren Antrieben auch problematisch zu sehen.

Bei einem Wiener Kastenfenster, in dem beide Flügel nach innen öffnen, können im Innenraum kaum Komponenten montiert werden. Aufgrund der sehr geringen Platzverhältnisse im Kastenfenster in der Hofburg musste daher ein neuartiges Fenstertriebssystem entwickelt werden, da die Anwendung herkömmlicher Fensterantriebe nicht möglich war. Die geforderten großen Öffnungsweiten der Fenster (nahezu 90°), die Spaltlüftungsmöglichkeit durch die Außenflügel zur thermischen Entlastung des Scheibenzwischenraums, die kollisionsfreie Kombination der zwischen den Flügeln befindlichen automatisierten Beschattung samt Fenstertriebssystem konnten letztendlich realisiert und erfolgreich getestet werden. Die Antriebe und Elektronik konnten hinter zwei Blenden platzsparend untergebracht werden und beeinträchtigt das Lichtraumprofil nicht. Es erfolgt auch keine optisch merkbare Verkleinerung des Innenraumes. Darüber hinaus ist das entwickelte Fenstertriebssystem von außen nicht und von innen im geschlossenen Zustand nur bei genauer Betrachtung sichtbar, somit für den Einsatz in denkmalgeschützten Gebäuden hervorragend geeignet.

5.5.3. Normungsaktivitäten

Komitee K175 Wärmeschutz im Hochbau

In der ÖNORM B 8110 Teil 3 und Teil 6 (Wärmeschutz im Hochbau) und damit auch in der OIB-Richtlinie 6 (Energieeinsparung und Wärmeschutz) war vor Beginn des Projektes CoolAIR das Themen Sonnenschutz bzw. der Gesamtenergieeintrag g_{tot} nicht am Stand der Technik. Das zugrunde liegende Modell wurde bereits 1989 entwickelt und war für moderne Verglasungen und Beschattungen nicht ausreichend geeignet.

Die Berechnung des Gesamtenergieeintrages nach ÖN bzw. der Formel $g_{\text{tot}} = F_c \times g$ ^[7] unterstellt, dass der g -Wert nach ÖN EN 410 ein inhärenter Wert ist. Auch die vereinfachte Methode zur Berechnung des g_{tot} gemäß ÖNORM EN ISO 52022-1 geht von dieser Falschannahme aus. Stellt man die Berechnungsergebnisse der vereinfachten Methode dem detaillierten Berechnungsverfahren nach ÖNORM EN ISO 52022-3 gegenüber, sind die Abweichungen gravierend.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die vereinfachte Methode zur g_{tot} -Berechnung nachweislich unkorrekte Ergebnisse liefert, die detaillierte Berechnungsmethode jedoch teuer und aufwendig ist und bei jeder Planungsänderung zusätzlichen Aufwand verursacht.

⁷ F_c – Abminderungsfaktor einer Sonnenschutzvorrichtung
 g -Wert – Gesamtenergiedurchlassgrad eines transparenten Bauteils

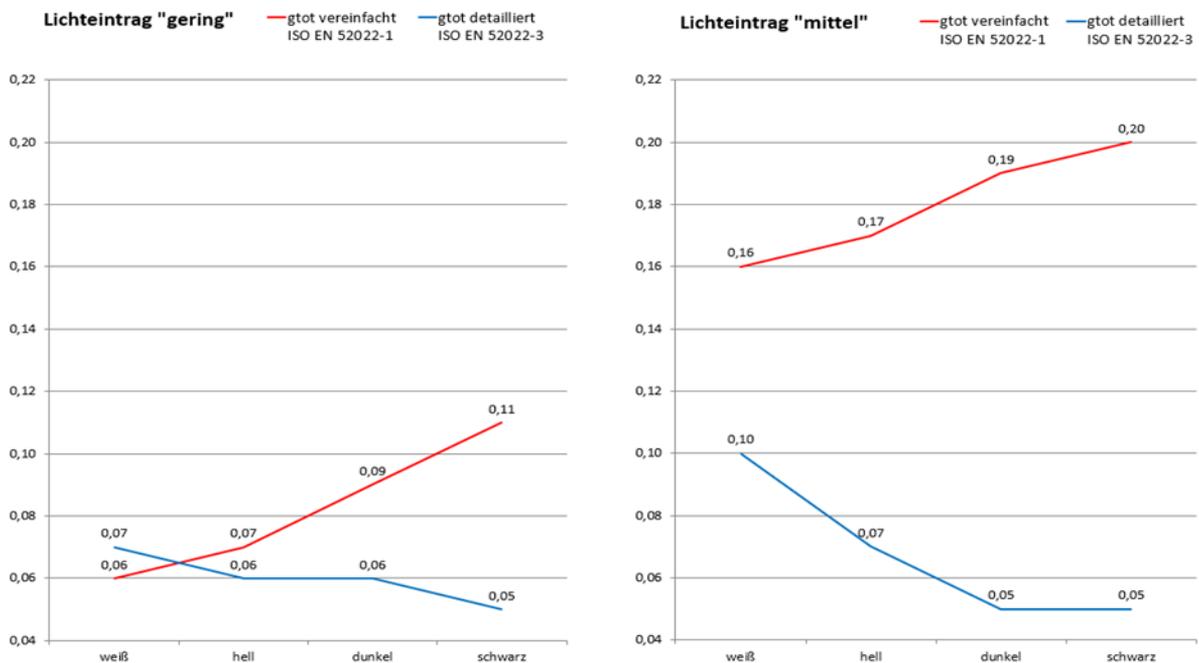


Abbildung 70: Gegenüberstellung von g_{tot} aus vereinfachter und detaillierter Methode

Im Rahmen von CoolAIR wurde untersucht, wie der einzelne Layer des Systems Verglasung und Beschattung interagieren. Die Zielsetzung war, klare und produktneutrale Planungskriterien zu erarbeiten, um mehr Planungssicherheit zu erreichen. Die Analyse der Ergebnisse brachten klare Zusammenhänge zu Tage, die im Komitee 175 präsentiert wurden und auf großes Interesse gestoßen sind. Die Ergebnisse dieses CoolAIR Tasks führten zu einem Normen-Projektantrag; das neu entwickelte vereinfachte Modell trat mit ÖNORM B 8110-6-1 am 15.01.2019 in Kraft.

Diese Methode hat sich in der Praxis bereits bewährt. Tabelle 13 zeigt die Gesamtenergiedurchlassgrade. Anhand einer praxisnahen g_{tot} -Tabelle wird ein Raster vorgegeben, der sowohl quantifizierbare Anforderungen an die Verglasung als auch an die Beschattung eindeutig definiert.

Tabelle 13: Gesamtenergiedurchlassgrade g_{tot} in Kombination mit Verglasungen (aus: ÖNORM B 8110-6-1)

Gesamtenergiedurchlassgrade g_{tot} für äußere Abschlüsse in Kombination mit Verglasungen	Wärmeschutzglas $U \leq 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$				Isolierglas ohne Low-E $U > 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$			
	Sehr hell	Hell	Dunkel	Sehr dunkel	Sehr hell	Hell	Dunkel	Sehr dunkel
Lamellenbehänge fast geschlossen	0,07	0,07	0,07	0,07	0,10	0,10	0,14	0,14
Lamellenbehänge, Lamellenwinkel halboffen (45°)	0,10	0,10	0,09	0,07	0,13	0,13	0,15	0,15
Lamellenbehänge, Lamellen geöffnet (90°)	0,24	0,19	0,15	0,09	0,30	0,25	0,22	0,18
Fassadenmarkisen mit Alubeschichtung außen, Lochanteil $\leq 5\%$	0,10	0,10	0,10	0,10	0,14	0,14	0,14	0,14
Fassadenmarkisen unbeschichtet, Lochanteil $\leq 5\%$	0,17	0,13	0,11	0,10	0,20	0,16	0,14	0,17
Fassadenmarkisen mit u. ohne Alubeschichtung, Lochanteil $< 15\%$	0,25	0,17	0,17	0,17	0,30	0,25	0,25	0,25
Fassadenmarkisen Acryl (dicht gewebt)	0,23	0,15	0,12	0,10	0,29	0,21	0,17	0,14
Rollladen dicht geschlossen	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,12	0,12
Rollladen, Luft/Lichtschlitz offen	0,06	0,06	0,07	0,07	0,10	0,10	0,14	0,14
Rollladen, die unteren 25 % des Fensters ist nicht beschattet	0,20	0,20	0,22	0,22	0,25	0,26	0,27	0,30

Anwendungen von Lamellenwinkel halboffen (45°) und Lamellen geöffnet (90°) kommen nur für Fälle entsprechender Sonnenhöhen (d. h. Eigenverschattung der Lamellen) in Frage.

Komitee K047 Optik und Lichttechnik

Im Zuge der Tageslichtsimulationen (Task 3.3) sowie der Spektral- und Leuchtdichtemessungen (Task 5.2) zur Beurteilung einer tageslichtoptimierten Verschattung hat sich herausgestellt, dass ein Beurteilungsverfahren zur vereinfachten Überprüfung der Tageslichtqualität für Planungsschaffende zweckmäßig erscheint. Zwar gibt es auf europäischer Ebene Normen, welche die Tageslichtversorgung regeln (ÖN EN 15193-1 und ÖN EN 17037), diese werden jedoch in den Landesbauordnungen und Bautechnikgesetzen nicht berücksichtigt, da die OIB-Richtlinie 3 (Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz) keine dem Stand der Technik entsprechenden Regeln für eine ausreichende Belichtung vorgibt.

Die unzulänglichen Planungsgrundlagen, aber auch die vom Projektpartner Geniolux entwickelten methodischen Ansätze führten am 07.09.2019 zur Konstituierung der Arbeitsgruppe „Tageslicht“ innerhalb des ASI-Komitees 047 (Optik und Lichttechnik), in der die maßgeblichen österreichischen Wissenschaftler auf diesem Gebiet aktiv mitwirken (Hammer und Holzer vom Institute of Building Research & Innovation, Pohl und Geisler-Moroder vom Bartenbach Lichtlabor sowie Radinger von der Universität für Weiterbildung Krems).

Wie bereits beim Wärmeschutz bzw. Gesamtenergieeintrag g_{tot} wurde im Rahmen von CoolAIR untersucht, wie sich die Eigen- und Fremdverschattung von Gebäudeteilen sowie der Sonnenschutz auf die Tageslichtversorgung auswirkt. Dabei stellte sich heraus, dass die erwähnten europäischen Normen eine gute Grundlage bilden, jedoch hohen Simulationsaufwand erfordern und einige wichtige Parameter der Fremdverschattung nicht berücksichtigen. Außerdem wurde analysiert, dass die in der OIB-Richtlinie 3 beschriebenen Anforderungen zur Sicherstellung einer ausreichenden Belichtung mit den europäischen Normen nicht im Einklang stehen.

In Ergänzung zum solaren Eintrag (g_{tot}) wurde in CoolAIR ein vereinfachtes Modell für die ausreichende Versorgung mit Tageslicht von Innenräumen entwickelt. Grundlage dafür bildet die ÖN 15193-1, die für die Tageslichtverfügbarkeitsklasse „gering“ einen medianen Tageslichtquotienten von 2 % fordert. Basierend auf dieser Anforderung lässt sich entsprechend der baulichen Gegebenheiten die Gesamtgröße der erforderlichen Lichtöffnungen bereits in der frühen Planungsphase ohne aufwendige Tageslichtsimulation errechnen (Eingabewerte analog Energieausweis).

Die Methode könnte auch für die Überprüfung der ausreichenden Belichtungsflächen in Bestandsgebäuden herangezogen werden, beispielsweise wenn die Belichtung durch Nachverdichtung oder baulichen Veränderungen beeinträchtigt wird. Außerdem ließe sich damit auf einfache Weise der Nachweis für die „Tageslichtqualität“ gemäß Klimaaktiv Kriterienkatalog 2020 erbringen.

Diese im Zuge von CoolAIR entwickelte Methode übernimmt den Ansatz der OIB-RL3 und kann diese Richtlinie in Einklang mit der ÖN 15193-1 bringen. Die Methode wurde am 16.06.2021 dem zuständigen Komitee präsentiert, das (Corona-bedingt) am 30.11.2021 einen entsprechenden Normen-Projektantrag für eine ÖNORM O 1056 veröffentlicht hat. Sobald dem Projektantrag stattgegeben wird, soll die entsprechende Norm in der AG04 „Tageslicht“ unter Mitwirkung aller relevanten Stakeholder erarbeitet werden.

5.5.4. Zusammenfassung der Denkmalschutzaspekte und des Wissenstransfers

Das Forschungsdesign des Projektes hat großen Wert auf die Einbeziehung der Anforderungen von Stakeholdern und der Dissemination des Wissens gelegt. Eine breit aufgestellte Stakeholdergruppe

(Advisory Board) aus Fensterherstellern, Antriebsherstellern, AutomatisierungstechnikerInnen, HKLS-Planungs- und Bauschaffende sowie aus den Gebieten Gebäudebetrieb und Denkmalschutz hat das Projekt begleitet. Zusätzlich wurde das Projekt in Fachzeitschriften, Kongressen und Vorträgen dem Fachpublikum vorgestellt, um eine möglichst breite Dissemination zu erreichen.

Die erarbeiteten Lösungen für tageslichtoptimierte Verschattung und Automatisierung der Fensteröffnung sind mit den Anforderungen des Bundesdenkmalamtes vereinbar, jedoch wie bisher im Einzelfall zu beurteilen. In der Hofburg Wien wurde ein Aufbau implementiert, der nicht nur funktional ist, sondern auch den Anforderungen des Denkmalschutzes entspricht: Der Mechanismus ist minimal invasiv nachrüst- und rückbaubar. Es erfolgt eine nicht sichtbare Verringerung des Lichtraumprofils bei maximal zwei Antrieben für 4 Fensterflügel.

Wesentlich war, die Ergebnisse auch in die Normung einzubringen, damit diese in der Praxis zukünftig zur Verfügung stehen können. Die Ergebnisse dieses Tasks führten zu einem Normen-Projektantrag. Das neu entwickelte vereinfachte Modell trat mit ÖNORM B 8110-6-1 am 15.01.2019 in Kraft und stellt klare und produktneutrale Planungskriterien zur Verfügung. Zusätzlich wurde im Bereich Lichtqualität ein Normenprojektantrag für eine ÖNORM O 1056 gestellt und veröffentlicht.

6 Schlussfolgerungen

Um dem Klimawandel zu begegnen müssen „alle Hebel“ in Bewegung gesetzt werden. Der Gebäudesektor trägt zu einem wesentlichen Teil an den weltweiten CO₂-Emissionen bei und ist gleichzeitig besonders vom Klimawandel betroffen. Urbane Hitzeinseln, Zunahme von inneren Wärmelasten durch EDV-Geräte, elektronische Arbeitshilfen, Beleuchtung u.a. sorgen mitunter für Raumtemperaturen im Sommer von über 30°C und für die Nachfrage nach Raumkühlungslösungen. Um eine aktive Kühlung mit hohem Energiebedarf im Betrieb zu vermeiden, müssen Wege gefunden werden, die Gebäude passiv (also ohne aktive Kühlsysteme) auf einer akzeptablen Raumtemperatur zu halten bzw. abzukühlen.

Im Projekt CoolAIR wurde eine Kombination aus ventilativer Kühlung in Form von Nachtlüftung und tageslichtoptimierter Verschattung untersucht, um Gebäude mit möglichst geringem Energieaufwand zu kühlen und den thermischen Komfort in den Innenräumen zu gewährleisten. Im Projekt konnte eine intelligente Regeleinheit auf Basis der modellprädiktiven Regelung entwickelt werden. Basis für diese Regelstrategie war ein Neuronales Netzwerk (Methode der Künstlichen Intelligenz), das sowohl mithilfe von Simulationsdaten als auch Messdaten aus den Testräumen trainiert und evaluiert wurde.

6.1. Technische Erkenntnisse

Die technischen Erkenntnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Es besteht in Österreich ein nutzbares Kühlpotential, das sich insbesondere in den Übergangsjahreszeiten effizient nutzen lässt, auch wenn sich die Anzahl der durch den Klimawandel nutzbaren Tage reduziert bzw. jahreszeitlich verschiebt.
- Für die Modellprädiktive Steuerung (MPC) konnten Rahmenbedingungen erforscht und die Eignung für einen schaltarmen Betrieb der Fensterflügel zwecks Nachtlüftung zur Speicher-massenentladung nachgewiesen werden. Während in den Sommermonaten aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen die MPC im Vergleich zu zeit-gesteuerten Verfahren einen komplexeren Aufbau hat, kann insbesondere für die Übergangszeit eine effiziente Entladung bei gleichzeitiger Einhaltung der Komfortgrenzen morgens, z.B. zu Arbeitsbeginn, erreicht werden. Das Projekt hat gezeigt, dass Daten aus dem Monitoring für das Training der Modelle Schwachstellen haben und eine simulationsbasierte Datengeneration eine sinnvolle und zu bevorzugende Alternative darstellt. Als Highlight und zukunftsweisende Technik ist hier die "Hardware-in-the-loop" Co-Simulation zu nennen, die es ermöglicht, den MPC-Algorithmus in simulierten Gebäuden zu testen und so virtuelle Feldversuche im Zeit-raffer durchzuführen.
- Das Ziel einer tageslichtoptimierten Beschattung, die sich ursprünglich auf technische Abschattungen bezog, konnte durch das Einbeziehen baulicher Gegebenheiten (Eigen- und Fremd-verschattung) ausgeweitet werden. Es konnte im Projekt zusätzlich zur ursprünglichen Planung eine Methode entwickelt werden, wie die Tageslichtversorgung eines Raumes, basierend auf dem Stand der Technik (EN 15193-1 und EN 17037) ohne Simulationsaufwand berechnet werden kann. Diese Methode soll die Grundlage für eine österreichische Planungsnorm bilden.

Zudem wurde gezeigt, wie sich Blendschutz und gute Tageslichtversorgung in alten Gebäuden mit hohen Räumen und Fenstern vereinbaren lassen.

- Es konnte an der UWK und der Wiener Hofburg demonstriert werden, dass Kastenfenster unterschiedlicher Bauart (Wiener und Grazer Typ) für die ventilative Kühlung automatisiert werden können. Insbesondere wurde in der Wiener Hofburg ein Aufbau präsentiert, der nicht nur funktional ist, sondern auch den Anforderungen des Denkmalschutzes entspricht: Der Mechanismus ist minimal invasiv nachrüst- und rückbaubar. Es erfolgt eine nicht sichtbare Verringerung des Lichtraumprofils durch den Einsatz von zwei Antrieben für vier Fensterflügel.
- Wirtschaftlich gesehen punktet dieses System durch geringere Investitions- und Betriebskosten. Die Energiebedarfe der Kettenantriebe sind derart gering, dass sie in weiterer Folge in den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen de facto vernachlässigbar sind. Gerade bei steigenden Energiepreisen spielt die ventilative Kühlung und die Vermeidung von Wärmeeinträgen durch Verschattung eine wesentliche Rolle, die Energie für aktive Kühlung zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Ob eine aktive Kühlung ganz vermieden werden kann, hängt von den Komfortansprüchen und anderen Anforderungen ab.

Fenster zur natürlichen Lüftung und Kühlung einzusetzen ist nichts Neues. Das Wissen über das Kühlpotential durch gemeinsame Anwendung von Beschattung und Lüftung wurde schon in der Antike angewendet. Heute können die Vorteile der natürlichen Lüftung jedoch automatisiert umgesetzt werden. Die gemeinsame koordinierte Verwendung von Fensterantrieben und Beschattungslösungen benötigt nur einen vernachlässigbaren Energieeinsatz in Form von elektrischer Energie während des Fahrzyklus.

Technisch hochentwickelte Fensterantriebe werden heute für moderne Fenster eingesetzt. Deren Einsatz im historischen Bestand erfordert jedoch, speziell im Hinblick auf filigrane Bauformen historischer Fenster und der beschränkten Platzverhältnisse, spezielle Maßnahmen, besonders wenn es darum geht, auftretende (Wind-)Kräfte auf Flügel in alte Kastenfenster einzuleiten, ohne diese auf Dauer zu beschädigen oder das schützenswerte Aussehen der oftmals historischen Fenster aufrecht zu erhalten.

Der Einsatz von Beschattungen im Fensterzwischenraum war bisher für die Fensterautomatisierung ebenso eine beachtliche Herausforderung. Den Herstellern von Sonnenschutzlösungen soll bewusst gemacht werden, dass es mit der Adaptierung von Standardprodukten vor allem in Hinblick auf eine bessere Tageslichtversorgung und in Kombination mit Fenstersanierungen möglich ist, Lösungen anzubieten, die den thermischen und visuellen Anforderungen der heutigen Zeit entsprechen. Aufgezeigt werden auch die Möglichkeiten der KI im Bereich der Steuerung. Damit sollen Hersteller motiviert werden, den Bedarf, der sich im Bereich der Sanierung (Resilienz gegen Überwärmung) auftut, mit optimierten Produkthanpassungen zu bedienen.

Bei der Umsetzung von Projekten mit natürlicher Lüftung unterscheiden sich grundsätzlich Bestandsobjekte von Neubauten. Zwangsläufig ergibt sich durch die bereits vorhandenen Lüftungsmöglichkeiten in Form von Fenstern, Türen, Dachklappen, Lichtkuppeln eine Ist-Situation, bei der eine Beurteilung über ein zu erwartendes Ergebnis schwierig bzw. schwerer berechenbar ist. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse bzw. der Messergebnisse aus dem Projekt kann eine wesentlich exaktere Einschätzung im Vorfeld über die zu erwartende Effektivität der natürlichen Lüftung getroffen werden.

6.2. Zielgruppen

Zielgruppen für die entwickelten Verschattungs-, Kühlungs- und automatisierten dislozierten Fensterantriebskonzepte sind all jene, die sich mit Low-Tec Konzepten beschäftigen und dabei gleichzeitig einen energieeffizienten und damit ressourcenschonenden Gebäudebetrieb anstreben. Darüber hinaus werden grundsätzlich all jene angesprochen, die sich mit der Planung und Umsetzung von Projekten zur natürlichen Lüftung sowie passiver Gebäudekühlung beschäftigen bzw. betraut sind. Das sind:

- Architektur- und Planungsbüros,
- Fensterbauer speziell aus dem Bereich Kastenfenster,
- die Sonnenschutzindustrie hinsichtlich optimierter Lösungen für alte Bestandsfenster,
- und EnergieberaterInnen, insbesondere was die Bewusstseinsbildung hinsichtlich der Tageslichtnutzung betrifft,
- das Bundesdenkmalamt hinsichtlich der Energieeffizienz von historischen Gebäuden,
- die Landesregierungen hinsichtlich der Vorgaben für die thermische Sanierung des Gebäudebestandes und die Ertüchtigung von Fenstern für die visuellen und thermischen Anforderungen der Innenraum- und Dienstleistungsgesellschaft
- verantwortungsvolle GebäudebesitzerInnen oder -betreiberInnen, die auf eine nachhaltige, natürliche und energieeffiziente Nachtlüftung der Räumlichkeiten Wert legen.

An dieser Stelle darf keinesfalls die Branche der Aus- und Weiterbildung sowie das Normungswesen im Bereich der Architektur und des Bauwesens vergessen werden, die entscheidend zur Wissensverbreitung beitragen bzw. letztendlich erst Wissen zum Standard wird.

Darüber hinaus sind die Verbesserung des Raumklimas, Atemluft, damit verbundenes körperliches Wohlbefinden, Konzentration am Arbeitsplatz etc. wichtige Faktoren, die weitere Fachfirmen adressieren.

6.3. Markt- und Verbreitungspotential

Aus Sicht der haustechnischen Planung sind die Projektergebnisse in unterschiedlichen Anwendungsfällen interessant und auch zukünftig anwendbar. Alternative Kühlsysteme und Temperierungsmöglichkeiten von Neubauten als auch von Bestandsbauten sind gefragt, wenn es um Einsparungen von Energie (CO₂-Fußabdruck), Adaption an den Klimawandel, Klimaschonung sowie Kostenreduktion geht. Die erforschte Low-Tec Lösung hat den grundsätzlichen Charme, sowohl in den Betriebskosten als auch in den Errichtungskosten Einsparungen zu erzielen.

Bei Betrachtung der Herausforderungen hinsichtlich Überwärmung infolge des Klimawandels, vor allem im urbanen Bereich, gibt es zwei notwendige Ansätze, die sich aus CoolAIR ableiten lassen:

1. Die Ausstattung von Fenstern mit einem wirksamen Sonnenschutz. Dabei gilt es, das Erscheinungsbild von Bestandsgebäuden (insbesondere von schützenswerten Gebäuden und Ensembles) zu bewahren, weshalb außenliegende Beschattungen oftmals nur eingeschränkt nachgerüstet werden können. CoolAIR hat gezeigt, dass auch Beschattungen im Kastenfenster v.a. bei offenen Außenflügeln tagsüber ähnlich effektiv sein können wie Außenbeschattungen.

2. Die Verbindung mit einer wirksamen Nachtauskühlung und wenn möglich mit einer thermisch verbesserten raumseitigen Verglasung, um nicht nur den Wärmeeintrag zu vermindern, sondern auch die unter Tags erwärmten Speichermassen wieder zu entladen. Die entwickelte nahezu unsichtbare Methode historische Kastenfenster zu automatisieren, entspricht hier auch höchsten ästhetischen Anforderungen sowie jenen des Denkmalschutzes.

Unmittelbare Zielgruppen sind:

- öffentliche Einrichtungen wie Schulen oder Behörden
- BesitzerInnen und BetreiberInnen von denkmalgeschützten Bauten, in denen Büroräume bzw. Aufenthaltsräume untergebracht sind.

Die automatisierte Fensterlüftung kann jedoch auch in Büroneubauten in Kombination mit konventionellen Kühlsystemen eingesetzt werden, um die aufzuwendende Kühlenergie für Räume zu verringern (hybride Konzepte).

Die Stadt Wien und andere Bundesländer bieten seit einigen Jahren spezielle Förderprogramme für die Nachrüstung von Sonnenschutzmaßnahmen an, da viele Gebäude für deutlich kühlere Klimata geplant und gebaut wurden und tw. keinen wirksamen Sonnenschutz haben. Die neue Methode betreffend den Sonnenschutz in der ÖN B 8110-6-1 war ein maßgebliches Element, diese Förderprogramme zu entwickeln. Ähnliche Förderungen sind auch für den Bereich der ventilativen Kühlung notwendig, um hier einen entscheidenden Impuls für die Verbreitung zu geben.

Dadurch eröffnet sich für Fensterproduzenten und die Sonnenschutz- sowie angeschlossener Industrien wie Antriebshersteller oder RWA-Produzenten ein sehr großer Markt.

Es ist geplant einen Systembausatz zu entwickeln, mit dem nach innen öffnende Kastenfenster mit nur geringem Planungsaufwand, direkt vor Ort, unkompliziert automatisiert werden können. Durch die Erkenntnisgewinne aus CoolAIR wurde die Möglichkeit geschaffen, bessere Lösungen im Hinblick auf die thermischen und visuellen Eigenschaften sowie deren Nutzungsmöglichkeiten für die Kühlung von Bestandsfenstern im Alt- und Bestandsbau zu entwickeln.

In den vergangenen zwei Jahren wurden bei den Projektpartnern mehrere Projekte realisiert. Es konnten bereits einige Umsetzungen mit zu automatisierenden Kastenfenstern oder Rauch- und Wärmeabzugslösungen realisiert werden, um die Effizienz der natürlichen Lüftung und Kühlung zu nutzen. Meist wurden diese mit bestehender, am Markt vorhandener Antriebstechnik realisiert. Ein konkretes Beispiel war ein Unternehmen im Bio-Nahrungsbereich mit vier Produktionsbereichen mit je 500 m², bestückt mit je sechs wärmeabluftintensiven, geruchsemitterenden Maschinen und 20 MitarbeiterInnen im Schichtbetrieb. Durchschnittlich wird nach ca. 30-45 Minuten Lüftungszeit eine von den MitarbeiterInnen bestätigte angenehme Temperatur bzw. Luftqualität erreicht. Nachdem der Stellenwert natürlicher Lüftung in den letzten Jahren berechtigterweise an Akzeptanz gewonnen hat, ist das Potential breit gefächert.

Die Forschungsergebnisse erlauben jedoch speziell im Bereich Bestandsobjekte/Denkmalchutz gezieltere Lösungen und Ergebnisse anzubieten. Die Projektpartner sind hier mit KundInnen und PlanerInnen, die im Bereich Revitalisierung und Sanierung historischer Objekte tätig sind, über die neuentwickelte, nahezu unsichtbare Methode historische Kastenfenster zu automatisieren im steten Austausch. Im Fachkundenkreis finden die entwickelten Lösungen große Anerkennung.

7 Ausblick und Empfehlungen

Essentiell für eine weitere Verbreitung ist, dass die entwickelten Lösungen mit nur geringem Planungsaufwand, direkt vor Ort, unkompliziert implementiert werden können. Dabei sind Fenster und Sonnenschutz möglichst im Verbund abgestimmt zu automatisieren.

Dazu ist es notwendig,

- in der Aus- und Weiterbildung,
- in der Normung,
- in der Umsetzungsplanung und
- in den verfügbaren Produkten

diese Technologien zu verankern.

Als erster Schritt wird das im Projekt generierte Wissen in der forschungsgeleiteten Lehre der universitären Partner eingesetzt, Informationen in die Normung eingebracht und das Wissen in den Projekten der industriellen Projektpartner angewandt.

Zukünftige Entwicklungen sind Systembausätze, mit denen nach innen öffnende Kastenfenster mit nur geringem Vorbereitungsaufwand, direkt vor Ort unkompliziert automatisiert werden können. Letztendlich ist das Kastenfenster nur eines von vielen Fensterarten, die für das Forschungsprojekt ausgewählt wurden, weil ihre Automatisierung und die Integration des Sonnenschutzes besonders schwierig sind. Weiters galt es, primär für den Bestand zukunftsfähige Lösungen zu finden. Für alle anderen Fensteröffnungen gilt genauso, solare Wärmeeinträge zu minimieren, um das zur Verfügung stehende Nachtkühlungspotential für die Kühlung effizient nutzen zu können.

Vor allem der Gebäudebestand hat auf Basis von CoolAIR weitere wertvolle Möglichkeiten, sich dem Klimawandel anpassen zu können.

Bei den elektromotorischen Antrieben sind technische Verbesserungen in Form von reduzierter Stromaufnahme, Erhöhung der Lebensdauer/Arbeitszyklen z. B. durch Verwendung von bürstenlosen Motoren durchaus möglich.

Obwohl Sonnenschutz und Fenster (öffnbare Lüftungselemente) grundsätzlich im selben Gewerk angesiedelt sind, sind diese jedoch bis dato kaum sensorisch oder steuerungstechnisch kombinierbar, da elektronische Rückmeldungen bzw. erforderliche Steuerkontakte nicht vorhanden sind oder rückgemeldet werden. Eine dahingehend stärkere Verknüpfung würde letztendlich in niedrigeren Raumtemperaturen resultieren.

Große Demonstrationsvorhaben würden helfen die Technologie fassbarer und sichtbarer zu machen und das volle Potential in der Praxis zu testen. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist die Anwendbarkeit in einem Einzelraum nachweisbar aber keinesfalls optimal, da die unmittelbar angrenzenden Räume für einen entsprechenden Wärmestrom in den Einzelraum und damit für eine zusätzliche Kühllast sorgen. Hier würde die Ausstattung ganzer Gebäude bzw. zumindest größerer zusammenhängender Gebäudezonen wesentlich bessere Ergebnisse liefern. In den Gesprächen des Konsortiums mit Facility Managern kam öfters zur Diskussion, dass sowohl die Fensterlüftung als auch eine aktive Kühlung gleichzeitig eingebaut werden müssten (hybride Lösung). Dies ist bei starren

Vorgaben an die Raumkühlung nicht auszuschließen. Chancen und Herausforderung bei ventilativ gekühlten Gebäuden liegen daher mitunter in der richtigen Information der NutzerInnen.

Weitreichender werden aber auch andere Faktoren großen Einfluss nehmen:

- Stark steigende Energiepreise werden passive Kühlstrategien bzw. die Kombination mit aktiven Kühlsystemen wirtschaftlich attraktiver machen. Kühllastspitzen in Hitzeperioden können kleiner dimensionierbare aktive Kühlungssysteme abdecken.
- Das Kühlpotential hängt stark vom Außenraum ab. Hitzeinseln, Begrünung sowie die Abfuhr von Wärme aus Quartieren bestimmen wesentlich das Kühlpotential.
- Anreize für Investitionen, Förderungen oder gesetzliche Vorgaben, die GebäudeeigentümerInnen zu Maßnahmen verpflichten
- Einstellung der Gesellschaft zu Komfort, Umwelt- und Klimaschutz

Gebäude können nur durch ein Bündel von Maßnahmen dem Klimawandel angepasst werden. Dieses Forschungsprojekt hat Grundlagen geschaffen, Gebäude passiv und damit energieeffizienter zu kühlen.

8 Danksagung

Unser besonderer Dank gilt der Burghauptmannschaft Wien, die uns den Test in den Räumlichkeiten der Hofburg Wien ermöglicht hat, und der Firma HELLA, die durch die Bereitstellung von Sonnenschutztechnik das Projekt wesentlich unterstützt hat.

Danken möchten wir auch allen anderen Partnern außerhalb des Projektes, die im Rahmen der Transferworkshops und direkten Kontakten uns durch ihr Feedback unterstützt haben praxisrelevante Ergebnisse zu generieren.

Herzlichen Dank!

9 Verzeichnisse

9.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemkonzept (links) und Prozessgrafik (rechts)	15
Abbildung 2: Verteilung der verwendeten Messstationen in der Meteorolog. Datenbank (rot) und daraus interpolierte, gleichverteilte Standorte für eine flächendeckende Analyse -Schnittpunkte (schwarz strichliert) (adaptiert).....	19
Abbildung 3: Ausrichtung der Vergleichsräume (links) und deren Stunden-Mitteltemperaturen in den vier heißesten Wochen 2018 in grau, synthetisches Temperaturprofil aus der Literatur in rot und in der Potentialanalyse verwendete synthetische Temperaturprofile in blau (rechts)	20
Abbildung 4: Errechnetes tägliches Kühlgradstunden-Potential für fünf ausgewählte Standorte für das Innenraum-Temperaturprofil mit hohem (-) und niedrigem (--) Komfortniveau.	21
Abbildung 5: Contour-Karte Österreichs mit Anzahl an Tagen mit weniger als 20 Kelvinstunden Nachtlüftungspotential bei Akzeptanz eines niedrigen thermischen Innenraumkomforts laut Abbildung 3 errechnet aus den Datensätzen der interpolierten Standorte aus Abbildung 2.	21
Abbildung 6: Übersicht Grundriss 2. OG mit Testraum (rot markiert) und Luftverbindung (blaue Linie) zum Stiegenhaus mit Abluftfenster Höhe 3. OG (Planquelle: FM Plus; adaptiert)	22
Abbildung 7: Gewählter südorientierter Testraum im Altbau (2. OG) mit adaptiertem Kastenfenster	23
Abbildung 8: Kettenantrieb WMX 804 im eingebauten Zustand (links), unteres Rollo mit appliziertem mitfahrendem Oberflächentemperatursensor an Kabelkette (rechts).....	23
Abbildung 9: Adaptiertes Türblatt des Testraumes mit Überströmöffnung von innen (links) und außen (rechts) betrachtet	24
Abbildung 10: Übersicht Nodes und Basisstation	26
Abbildung 11: Platine und Bestückungsplan eines Sensorknotens.....	26
Abbildung 12: Beispiele installierter Sensoren	27
Abbildung 13: Außentemperaturverlauf Auszug Sommerperiode 2020 (Gegenüberstellung Minimalwerte aus Nord- u. Südsensor (blaue Kurve) mit ZAMG Messdaten (rote Kurve))	28
Abbildung 14: Außentemperaturverlauf Auszug Sommerperiode 2021 (Gegenüberstellung Minimalwerte aus Nord- u. Südsensor (blaue Kurve) mit ZAMG Messdaten (rote Kurve))	29
Abbildung 15: Definition der Windrichtung und Windgeschwindigkeit in IDA ICE gemäß SIA 2028....	31
Abbildung 16: Fenstergeometrie mit automatisch öffnenbaren Fensterflügel in grün (links) und Aufbau der Tracergasmessung zur Raumluftwechselbestimmung (rechts) mit einer Tracergaseinbringung (grün) und mehreren verteilten Tracergasmessstellen (rot) im Testraum der Universität für Weiterbildung Krems.....	31
Abbildung 17: Raumluftwechsellmessung mit Tracergasmethode „Concentration decay“ im Testraum der Universität für Weiterbildung Krems bei einseitig geöffnetem Fenster.....	32
Abbildung 18: Raumluftwechsellmessung mit Tracergasmethode „Concentration decay“ im Testraum der Universität für Weiterbildung Krems bei beidseitig geöffnetem Fenster.	32

Abbildung 19: Raumlftwechsellmessung mit Tracergasmethode „Constant emission“ im Testraum der Universitt ffr Weiterbildung Krems bei beidseitig geffnetem Fenster	34
Abbildung 20: Korrelation der Raumlftwechsel zur Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Auflenluft im Testraum der Universitt ffr Weiterbildung Krems bei beidseitig geffnetem Fenster und Vergleich zur Abschtzung nach VDI2078.....	34
Abbildung 21: Aufbau der Tracergasmessung in einem Testraum im Energetikum am Campus der Fachhochschule Burgenland in Pinkafeld.....	35
Abbildung 22: Auflen-, Raumtemperatur und Windgeschwindigkeit sowie mittels dem Tracergas Verfahren „Constant emission“ bestimmter Raumlftwechsel im Testraum in Pinkafeld bei durchgehend geffnetem bzw. gekippten Fenster whrend der lngsten Messkampagne	36
Abbildung 23: Korrelation der messtechnisch erfassten Luftwechselraten zur Temperaturdifferenz zwischen Raum und Auflenluft mit Vergleich zum Nherungsverfahren nach VDI2078 (links) und Korrelation zur am Gebude(flach)dach gemessenen Windgeschwindigkeit bei durchgehend geffnetem Fenster ber einen Zeitraum von ca. 6 Tagen.....	37
Abbildung 24: Korrelation der messtechnisch erfassten Luftwechselraten zur Temperaturdifferenz zwischen Raum und Auflenluft mit Vergleich zum Nherungsverfahren nach VDI2078 (links) und Korrelation zur am Gebude(flach)dach gemessenen Windgeschwindigkeit bei durchgehend gekipptem Fenster ber einen Zeitraum von ca. 3 Tagen.	37
Abbildung 25: Bilanzierung eines Kastenfensters mit Darstellung der beteiligten Wrmestrme	39
Abbildung 26: Angenommene Himmelstemperatur (··) und simulierte (–) Temperaturverlfufe aus dem Kastenfenstermodell und Vergleich zu stndlich gemittelten Messdaten (–)	40
Abbildung 27: Hauptwindrichtung und Randbedingungen ffr das CFD Modell zur Simulation der Gebudeumstrmung und Analyse der resultierenden Fassadendrcke.....	41
Abbildung 28: Druckverhltnisse an der Fassade bei Windprofilen mit 1 m/s (links) und 3 m/s Referenzgeschwindigkeit auf 10 m Hhe (rechts)	41
Abbildung 29: Flchengewichtete Druckverteilung an der Gebudefassade bei unterschiedlichen Windrichtungen und 1 m/s Referenzgeschwindigkeit auf 10 m Hhe	42
Abbildung 30: Simulationsgebiet, Anfangs- und Randbedingungen der dynamischen Simulation zur Bestimmung des thermisch induzierten Luftwechsels im Testraum der UWK.....	43
Abbildung 31: Contour-Plot der Lufttemperaturen im Testraum 1/10/60 min nach Simulationsstart (entspricht der Fensterffnung) ffr ein geffnetes Teilfenster	43
Abbildung 32: Simulierter Raumlftwechsel je Fensterffnungsszenario ber die Temperaturdifferenz zwischen Auflen- und Innenraumlft und Vergleich mit der Nherungsformel nach VDI2078	44
Abbildung 33: IDA ICE Modell mit Testraum mit rot markiertem Fenster.....	45
Abbildung 34: Verlauf der Solarstrahlungsleistung durch Fenster mit aktiver Verschattungseinrichtung (blau) und ohne (rot) ffr den 29.07.2021.....	46
Abbildung 35: Temperaturverlfufe im Testraum whrend einer Juliwoche bei dauerhafter Nachlftung mit Verschattung (grn strichliert) und ohne (grn durchgezogen), rot: Auflen-temperatur.....	47

Abbildung 36: Temperaturverläufe im Testraum während einer Juliwoche ohne Verschattung bei durchgängiger Nachlüftung (grün durchgezogen) und bei „stündlicher“ Freigabeprüfung (grün strichliert), rot: Außentemperatur	48
Abbildung 37: Temperaturverläufe im Testraum während einer Juniwoche mit adaptierter Nachlüftungsregelung mit Verschattung tagsüber (grün) und ohne Verschattung (blau), rot: Außentemperatur.....	49
Abbildung 38: Temperaturverläufe im Testraum während einer Augustwoche mit adaptierter Nachlüftungsregelung mit Verschattung (grün) und ohne (blau), rot: Außentemperatur.....	50
Abbildung 39: Temperaturverlauf im Testraum in Variante 5b (grün) während derselben Augustwoche, rot: Außentemperatur	51
Abbildung 40: Innenraumlufttemperaturvergleich bei geschlossener (2b) vs. offener äußerer Flügelebene (6b) bei Verschattung tagsüber im Scheibenzwischenraum während ausgewählter Juliwoche	52
Abbildung 41: Vergleich der Raumlufttemperaturverläufe (grüne Kurven) in den verwendeten Nachlüftungsregelungen der Varianten 1a, 2b, 4b und 6b, rot: Außentemperatur.....	53
Abbildung 42: Vergleich Fensteröffnung 100 % (2b) und 50 % (7), grüne Kurven, rot: Außentemperatur.....	54
Abbildung 43: Übertemperaturstunden (operative Temperatur) von vier ausgewählten Varianten ..	55
Abbildung 44: Operativer Temperaturverlauf (grüne Linie) in Variante 2b mit hinterlegtem adaptiven Komfortband im Monat Juni, rot: Außentemperatur	55
Abbildung 45: Operativer Temperaturverlauf (grüne Linie) in Variante 4b mit hinterlegtem adaptivem Komfortband im Monat Juni, rot: Außentemperatur	56
Abbildung 46: Komfortauswertung der Varianten 2b, 4b, 6b während der Nutzungszeit, gemäß EN 16798-1.....	56
Abbildung 47: MPC-Algorithmus	59
Abbildung 48: Ablaufdiagramm der MPC (Parametersätze für Raum- und Wandtemperatur (C), Außentemperatur (E), Zustand von Fenstern (A)).....	60
Abbildung 49: LSTM-Aufbau (Long-Short Term Memory)	63
Abbildung 50: Beispiel für die Vorhersage im Vergleich zur tatsächlichen Raumtemperatur.....	65
Abbildung 51: Sortierte Vorhersage und tatsächliche Raumtemperatur	65
Abbildung 52: Monitoring Punkte im Längsschnitt mit den geringsten Abweichungen zur mittleren Raumlufttemperatur über alle untersuchten Lüftungsszenarien im Testraum laut CFD Simulation. ...	66
Abbildung 53: Monitoring Punkte in Draufsicht mit den geringsten Abweichungen zur mittleren Raumlufttemperatur über alle untersuchten Lüftungsszenarien im Testraum laut CFD Simulation. ...	67
Abbildung 54 Abweichung der Raumtemperatur von der Solltemperatur.....	70
Abbildung 55 Abweichungen der morgendlichen Zielraumtemperatur von der Zieltemperatur bei prognostizierter und tatsächlicher Außentemperatur (für Modell v19).....	71
Abbildung 56: Grundriss des Testraumes in der Hofburg Wien mit markiertem Kastenfenster Nordwest-orientiert (Planquelle: BHÖ, adaptiert).....	72
Abbildung 57: Fassadenansicht vom Inneren Burghof und Kastenfenster vor dessen Adaptierung....	73

Abbildung 58: Wiener Kastenfenster im Testraum der Hofburg Wien zum Montagezeitpunkt der Rollos mit drei Beschattungszuständen	74
Abbildung 59: Kastenfenster im Testraum der Burghauptmannschaft Österreich in der Hofburg Wien, Zustand offen (links) und geschlossen mit tageslichtoptimierter Verschattung (rechts).....	75
Abbildung 60: Raumsituation während der Beleuchtungsstärkemessungen von vier Blend- bzw. Verschattungsszenarien um die Mittagszeit am 10. Mai 2021; links oben: unverschattet, freier Lichteinfall; links unten: Blendschutz durch Rollo im Oberlicht, 50 % Verschattung (bei grellem Himmel); rechts oben: Blendschutz durch Rollo im unteren Fensterbereich, 50 % Verschattung (grelle Umgebung/Reflexionen minimiert), gleichzeitig Tageslichteintrag in die Raumtiefe; rechts unten: Blendschutz vollflächig und 100 % Verschattung (bei direkter Sonne)	76
Abbildung 61: Vergleich der Tageslichtquotienten (TG) aus Simulation und Messung an vier Messpositionen in Abständen von je einem Meter	77
Abbildung 62: Leuchtdichte am Behang (Rollo) zu neun unterschiedlichen Messzeitpunkten.....	77
Abbildung 63: Flussschema zur Steuerung des Sonnen- bzw. Blendschutzes mit erforderlichen Komponenten.....	78
Abbildung 64: Beispiel für die Vorhersage im Vergleich zur tatsächlichen Raumtemperatur.....	79
Abbildung 65: Sortierte vorhersage und tatsächliche Raumtemperatur.....	80
Abbildung 66: Anomalie des MPC-Verhaltens aufgrund des starken Anstiegs der Raumtemperatur .	81
Abbildung 67: Ausschnitt Messergebnisse vor und nach dem Start der MPC im Testraum der Hofburg Wien im Juli 2022; Außenlufttemperatur (blau), Raumlufttemperatur (rot), Kastenfenstertemperatur (gelb), Wandoberflächentemperatur (grün) sowie Szenario (lila Kurve)	82
Abbildung 68: Baupreis- und Baukostenindex (Datengrundlage Statistik Austria, März 2022)	84
Abbildung 69: Annuitätenvergleich der Varianten.....	87
Abbildung 70: Gegenüberstellung von g_{tot} aus vereinfachter und detaillierter Methode.....	91

Copyright der Abbildungen:

Abbildungen 1,2 6-16, 33-46, 48-51, 54, 55, 57, 58, 60 und 64-67 sind durch Mitarbeiter der Universität für Weiterbildung Krems erstellt worden.

Abbildungen 3-5, 17-32, 52 und 53 sind durch Mitarbeiter der Forschung Burgenland erstellt worden.

Abbildungen 59, 61-63, 70 sind durch Hannes Gerstmann (Ingeneurbüro Gerstmann) erstellt worden.

Abbildungen 68 und 69 sind durch Paul Erdely (Woschitz Engineering ZT GmbH) erstellt worden.

Abbildung 47 ist von Martin Behrent als Gemeingut unter CC BY-SA 3.0.

Abbildung 56 ist modifiziert mit Erlaubnis der BHÖ eingefügt

9.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sensortypen	27
Tabelle 2: exemplarischer Messdatenauszug (Screenshot Ausschnitt CoolAIR Livedaten-Website) ...	30
Tabelle 3: Umrechnung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung (ZAMG) in Vektorkomponenten für IDA ICE nach SIA Definition	30
Tabelle 4: untersuchte Simulationsvarianten als Grundlage für die modellbasierte Regelung (MPC).	45
Tabelle 5: Fehlerverteilung des MPC-Modells für Voraussage von T_{air}	64
Tabelle 6: Abweichung der mittels MPC geregelten Raumtemperatur	69
Tabelle 7: Vergleich von Regelfehlern in Abhängigkeit von Bestimmung der Außentemperatur	70
Tabelle 8: Modellvalidierung des neuronalen Netzwerkes für Luft-, Wand- und Außentemperaturen	79
Tabelle 9: Vergleich der Fehlerquoten bei Nutzung von ganzjährigen Trainingsdaten gegenüber Trainingsdaten, die nur warme Zeiträume beinhalten.	80
Tabelle 10: Spezifische Kosten für Kältemaschinen mit Rückkühlwerk, ohne Verrohrung (Schramek 2001 und Herstellerangaben)	83
Tabelle 11: Spezifische Kosten für Kühldecken, Bauteilaktivierung und Gebläsekonvektoren in Kassettengeräten (Schramek 2001 und Herstellerangaben)	83
Tabelle 12: Investitionskosten für automatisch öffnende Fenster	85
Tabelle 13: Gesamtenergiedurchlassgrade g_{tot} in Kombination mit Verglasungen (aus: ÖNORM B 8110-6-1)	91

9.3. Verzeichnis der Projektpublikationen

1. Stumpf, W.; Winkler, M.; Trauninger, D.; Treytl, A.; Bratukhin, A. (2018). CoolAIR - Automatisierung von Kastenfenstern zur Raumkühlung. Fachhochschule Burgenland, Tagungsband "e-nova - Gebäude der Zukunft? Vernetzt - digital - ökosozial", Band 22: 59-66, Leykam Buchverlagsgesellschaft, Pinkafeld
2. Winkler, M.; Trauninger, D.; Stumpf, W.; Treytl, A.; Bratukhin, A. (2019). CoolAIR: Kastenfenster 2.0 – Nachrüstung zur Automatisierung von Lüftung und Verschattung. In: IBO, Proceedings of BauZ! Vienna Congress on Sustainable Building: 80-84, IBO Verlag, Wien
3. Trauninger, D.; Stumpf, W.; Winkler, M.; Bratukhin A.; Treytl, A. (2019). Box window 2.0: The intelligent pore in the building envelope for passive cooling. In: Advanced Building Skins GmbH, Proceedings of 14th Conference on Advanced Building Skins: 12-22, Advanced Building Skins GmbH, Bern
4. Trauninger, D. (2019). Energiesparende Alternativen zur Klimaanlage. In: Forschungsbericht der Donau-Universität Krems: 54-55, Universität für Weiterbildung Krems (Donau-Universität Krems), Krems
5. Gerstmann, J. (2019). Sonnenschutz – F_c -Wert versus g_{tot} . In: Tagungsband BauphysikerInnen-Treffen 2019: 18-24, TU Verlag, Wien, 2019
6. Treytl, A.; Trauninger, D.; Stumpf, W.; Winkler, M.; Bratukhin, A. (2020). Kastenfenster 2.0 – Intelligente Fenster zur passiven Kühlung von Gebäuden. In: Neuhold, E., 2. IMMOBILIEN-ZUKUNFTSTAG Lebenswerte Stadtquartiere: 74-87, Edition Donau-Universität Krems, Krems
7. Erdely P. (2019): Technische und ökonomische Bewertung einer automatisierten, natürlichen Nachtlüftung im Vergleich zur konventionellen Kühlung, Masterarbeit an der Fachhochschule Burgenland, Masterstudiengang Nachhaltige Energiesysteme, Pinkafeld
8. Trauninger, D. (2020). Klimafreundlich Kühlen. In uninteressant, Blog der Österreichischen Universitätenkonferenz. <https://uninteressant.at/klimafreundlich-kuehlen/>

9.4. Verzeichnis der Vorträge zur Dissemination des Projektes

1. Vorstellung des Projektes im Rahmen der Langen Nacht der Forschung 2018, 13.04.2018 (Publikumsstation mit Hands-on Experimenten)
2. Kühlpotential durch natürliche Nachtlüftung am Gebäudebestand, Vortrag D. Trauninger und A. Treytl am Forum Building Science der UWK, Krems, 3.5.2018
3. „Coole Lüftung“, Interview D. Trauninger und A. Treytl enthalten in Artikel von E. Hofbauer über CoolAIR, BauTecFokus, Ausgabe Sommer 2018: 90-92.
4. Besichtigung des Testraumes TR1 an der UWK durch die TeilnehmerInnen des Forums Sichere Universitäten, 25.09.2018
5. Vorstellung des Projektes CoolAIR im Fernsehbericht zum Thema “Haus der Zukunft/Strom der Zukunft”, D. Trauninger und A. Treytl, Radio Niederösterreich, 15:40 und Niederösterreich heute, ORF2-N, 19 Uhr, jeweils am 2.11.2018
6. Projektvorstellung CoolAIR und Besichtigung Testraum TR1 im Rahmen des Master-Lehrgangs Sanierung und Revitalisierung, 22.11.2018
7. “CoolAIR - Automatisierung von Kastenfenstern zur Raumkühlung”, Vortrag W. Stumpf auf der Konferenz „e-nova - Gebäude der Zukunft“, 22.11.2018
8. Vernetzungstreffen mit der Firma VELUX Österreich und Velux Group Dänemark zu Regelstrategien, 5. und 6.12.2018
9. „CoolAIR: Kastenfenster 2.0 – Nachrüstung zur Automatisierung von Lüftung und Verschattung“ Vortrag M. Winkler, BauZ!, Wiener Kongress für zukunftsfähiges Bauen, 15.2.2019
10. Vorstellung des Projektes im science.talk spezial: Frauen in der Technik, D. Trauninger, ORF III, 10.04.2019
11. Präsentation des Verschattungsmodells (gtot) und dessen Umsetzung in der ÖN B 8110-6-1 (2019), Vortrag J. Gerstmann, Technische Arbeitskreise des BVST am 10.04.2019
12. Innovation trifft Bestand: Kühlpotential des Kastenfensters 2.0, Vortrag M. Winkler und F. Wenig am Forum Building Science der UWK, Krems, 08.05.2019
13. Beschattung und Sonnenschutz als wichtiger Teil der Gebäudehülle für die Nutzung, Komfort und Energieverbrauch, J. Gerstmann, LV „Hüllkonstruktionen“ TU Graz, Institut für Hoch- und Industriebau, 17.05.2019
14. Interview von A. Treytl zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz durch Bau+Immobilien Report. Enthalten in Artikel im Bau+Immobilien Report 05/2019 mit dem Thema „KI am Bau“, 26.5.2019
15. Präsentation des Verschattungsmodells (gtot) und dessen Umsetzung in ÖN B 8110-6-1 (2019), Vortrag J. Gerstmann, BauphysikerInnen-Treffen 2019, 03.10.2019
16. Vorstellung der Beschattungslösung für das in der Neuen Burg Wien vorhandene Wiener Kastenfenster sowie auch die unter Task 4.3 beschriebene Parametrierung der Steuerung, Vortrag J. Gerstmann im Arbeitskreis des BVST, 07.11.2019
17. Präsentation Projekterkenntnisse aus Sicht der Beschattung und Belichtung, Präsentation J. Gerstmann im Rahmen des Treffens des internationalen Technischen Komitees des europäischen Dachverbandes ES-SO (European Solar Shading Organization, Dachverband von 27 nationalen Verbänden), Brüssel, 14.-15.11.2019
18. Präsentation Projekterkenntnisse aus Sicht der Beschattung und Belichtung, Präsentation J. Gerstmann, Generalversammlung des BVST, 05.12.2019
19. „Passive Raumkühlung – messen, simulieren und regeln“, Vortrag W. Stumpf am Thermografie Forum Eugendorf, Salzburg, 28.09.2019

20. „Box window 2.0: The intelligent pore in the building envelope for passive cooling“, Vortrag D. Trauninger am Advanced Building Skins Kongress, Bern, 12.10.2019
21. “Kastenfenster 2.0 – Intelligente Fenster zur passiven Kühlung von Gebäuden“, Vortrag D. Trauninger und A. Treytl am 2. Immobilien Zukunftstag der UWK, Krems, 17.10.2019
22. Präsentation des Testraumes an der UWK im Rahmen des 2. Immobilien Zukunftstages, 17.10.2019
23. Tageslichtoptimierte Verschattung, Präsentation J. Gerstmann, Business Meeting der ÖVI (Österreichischer Verband der Immobilienwirtschaft), Generalthema “Es muss nicht immer eine Klimaanlage sein – Zur Nachrüstung von Sonnenschutzmaßnahmen“, 21.4.2021
24. Energieeffiziente traditionelle Gebäudemaßnahmen zur Erhöhung der Klimaresilienz, Vortrag von D. Trauninger, J. Gerstmann und C. Schober auf der PRO-Heritage-Fachtagung, BHÖ, Mauerbach, 6.10.2021
25. Tageslichtoptimierte Verschattung, Präsentation J. Gerstmann, Generalversammlung des BVST Österreich, 11.11.2021
26. Model Predictive Control (MPC) als Instrument optimierter Nachtkühlung, Vortrag M. Winkler und A. Treytl am Forum Building Science der UWK, Krems, 6.5.2022

9.5. Literaturverzeichnis

- [1] Artner, L. / Trauninger, D. (2016): Der Energieausweis und die Energieeffizienz von Gebäuden: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Rechtliche Grundlagen - Leitfäden, Muster und Checklisten auf CD-ROM. Forum Verlag, Wien. Loseblattsammlung, Erstpublikation: 2009
- [2] AEE Intec, Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (2005): COOLSAN, Kälte-technische Sanierungskonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude.
- [3] Artner, L. / Trauninger, D. (2016): Der Energieausweis und die Energieeffizienz von Gebäuden: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Rechtliche Grundlagen - Leitfäden, Muster und Checklisten auf CD-ROM. Forum Verlag, Wien. Loseblattsammlung, Erstpublikation: 2009
- [4] Allard/Santamouris/Alvarez (1998): Natural ventilation in buildings. A design handbook.
- [5] Artmann/Manz/Heiselberg (2007): Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. In: Applied Energy, 84(2) S.187-201.
- [6] Bayer/Sturm/Steininger (2014): Energieflüsse in Bürogebäuden – NEWID-IST. Im Auftrag der Stadt Wien, Magistratsabteilung 20 - Energieplanung.
- [7] Bratukhin, A.; Nagy, A.; Mahmood, A. (2015) Distribution of control functionality in energy-aware industrial building environment. In: 2015 Conference on Factory Communication Systems: S.1-8.
- [8] Breesch (2006): Natural Night Ventilation in Office Buildings. Performance Evaluation Based on Simulation, Uncertainty and Sensitive Analysis.
- [9] Bundesdenkmalamt (2011): Richtlinie – Energieeffizienz am Baudenkmal
- [10] Bundes-Energieeffizienzgesetz (2014): Bundesgesetz über die Steigerung der Energieeffizienz bei Unternehmen und dem Bund
- [11] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt (2016). Endbericht ÖSK15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden, Klimaanalyse.
- [12] Carrilho da Graca et al. (2004): Design and testing of a control strategy for a large, naturally ventilated office building. In: Building Services Engineering Research and Technology (25). S.223-239
- [13] CoolVent - The Natural Ventilation Simulation Tool by MIT," 2014. [Online]. Available: <http://coolvent.mit.edu/>
- [14] DIN 2763-1:2008-12 Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau
- [15] DIN18960:2008-02 Nutzungskosten im Hochbau
- [16] DIN EN ISO 14040:2006-10 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- [17] DIN EN ISO 14044:2006-10 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, S. 84.

- [18] Eicker et al. (2016): KonLuft - Energieeffizienz von Gebäuden durch kontrollierte natürliche Lüftung. Projektträger: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Deutschland.
- [19] Eicker/Schulze (2012): Kontrollierte natürliche Lüftung für energieeffiziente Gebäude. In: Pöschk, Jürgen (Hrsg.): Energieeffizienz in Gebäuden – Jahrbuch 2012, WME Verlag, S.235-250.
- [20] EU Gebäuderichtlinie (2010) für energieeffiziente Gebäude.
- [21] FemTech (2010): Chancengleichheit in F&E – Aktuelle Daten auf einen Blick. - http://www.femtech.at/fileadmin/downloads/Wissen/femtech_daten_auf_einen_blick.pdf
- [22] Ferik et al. (2015): Risiko-optimierte Gebäudeentwicklung im Holzbau aufgrund des Klimawandels.
- [23] Flourentzou/Van der Maas/Roulet (1998): Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficient. In: Energy and Buildings (27), S.283-292.
- [24] GEFMA 220-1, Lebenszykluskostenrechnung im FM; Einführung und Grundlagen, 2010.
- [25] Guinée (Hrsg.): Handbook on Life Cycle Assessment. Kluwer Acad. Publ., 2002, p. 692.
- [26] Hasler, E.; Huber, C.; Leindecker, H.; Schrag, T.; Stocker, E. & Wartha C. (2013): Bewertung unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen unter Lebenszyklusaspekten mit einer Fallstudie Bürogebäude, Bauphysik 4/2013, DOI: 10.1002/bapi.201310072
- [27] Heiselberg/Kolokotroni (2017): State-of-the-art review executive summary. IEA – EBC Technology Cooperation Programme – Annex 62 Ventilative Cooling.
- [28] Heiselberg et al. (2015): Control strategies for intelligent glazed façade and their influence on energy and comfort performance of office buildings in Denmark, Applied Energy (145), S.43-51.
- [29] Heiselberg (1999): Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings. Dept. of Building and Technology and Structural Engineering, Aalborg University. (IEA Programme ECBCE Annex 35)
- [30] Heschl Ch., Klanatsky P., Inthavong K. (2014). Turbulence modelling for indoor airflow simulation. Paper for the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, July 7-12, 2014, Hong Kong.
- [31] Heschl Ch., Sanz W., Müller D., Klanatsky P. (2010). Implementierung von v2f-Turbulenzmodellen in einem CFD Code. 4. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen. Pinkafeld Austria.
- [32] IEA-EBC Annex 62 (Österreich): Ventilative Kühlung – Ergebnisse. Online verfügbar unter: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/news/2016/20160204-ergebnisse-iea-ebc-annex-62-ventilative-cooling.php> [zuletzt geprüft am 27.03.2017]

- [33] Inthavong K., Heschl Ch., Tu J.Y. (2011). Evaluation of RANS and LES turbulence models for indoor airflows. *Ventilation: Types, Standards and Problems*, Novascience Publishers, United States, pp. 155-172
- [34] Ipser, C.; Radinger, G.; Winkler, M.; Floegl, H.; Geissler, S. (2014) Reduktion des Kühlenergiebedarfs durch intelligente Stadt- und Gebäudeplanung. In: FH Pinkafeld, Tagungsband e-nova „Nachhaltige Gebäude Versorgung – Nutzung – Integration“, Pinkafeld.
- [35] Ipser et al. (2015): Reduktion des Kühlenergiebedarfs durch optimierte Bebauungsstrukturen und Prozess- und Entwurfsoptimierung in der Gebäudeplanung.
- [36] ISO 15686-5, Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 5: Life-cycle costing, 2008.
- [37] Klanatsky, P.; Lindmeier, I.; Heschl, Ch.; Heck Ulrich (2011): Implementierung und Validierung eines modifizierten v2f-Turbulenzmodells in OpenFOAM. Kongressbeitrag zum 5. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen (FFH 2011), Wien, Austria, 27.-28. April 2011
- [38] Kromb-Kolb/Formayer/Clementsichitsch (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Wien unter besonderer Berücksichtigung von Klimaszenarien. Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur.
- [39] Larsen/Jensen/Daniels (2012): The comfort Houses – Measurements and analysis of the indoor environment and energy consumption in 8 passive houses 2008-2011
- [40] Meteotest (2017): Meteororm - Global Meteorological Database Version 7.2, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, March 2017
- [41] ÖNORM B 8110-3 (2012): Wärmeschutz im Hochbau – Vermeidung sommerlicher Überwärmung
- [42] ÖNORM EN 15978, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. 2012, S. 68.
- [43] Österreichisches Institut für Bautechnik (2015): OIB Richtlinie 6: Energietechnisches Verhalten von Gebäuden
- [44] Pichler, M. F.; Görtler, G. & Schranzhofer, H. (2016): “Test buildings with TABS for MPC-performance evaluation –Comparability and System Identification”, European Control Conference ECC16
- [45] Sauter, Th.; Steiner, H.; Glatzl, Th.; Hortschitz, W.; Heschl, Ch. & Wenig F. (2015): Towards distributed enthalpy measurement in large-scale air conditioning systems, Systems Conference (SysCon), 2015 9th Annual IEEE International, Vancouver, Canada, p. 460 – 465
- [46] Sickinger, R. / Trauninger, D. (2014): Energieeffizienz in Weiterentwicklung, In: Architektur & Bauforum, 04/14.

- [47] Technische Universität Wien (2015): Wissensbilanz -
<https://www.tuwien.ac.at/fileadmin/t/tuwien/docs/leitung/wb15.pdf>
- [48] Trauninger, D. / Winkler, M. (2014): Kühlenergiebedarf im Wandel der Zeit. In: IBO-Magazin 2/14, S.18f
- [49] VDI 2067-1, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen–Grundlagen und Kostenermittlung, Blatt 1, 2010.
- [50] VDI 2078 (2015): Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation), Anhang A3 Näherungsformel für den Luftaustausch über Fenster für VDI 2078, ICS 91.140.30, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- [51] Waltjen et al. (2011): Handbuch Komfort für Passivhaus-Büros. Publikation aus dem Forschungsbericht Energie der Zukunft, Projekt 815 692. IBO-Verlag.
- [52] Wenig, F., Klanatsky P., Heschl, C., Mateis, C., Dejan, N. (2017, accepted): Exponential pattern recognition for deriving air change rates from CO2 data, Symposium on Industrial Electronics, 26th IEEE International, 19-21 June 2017, Edinburgh, Scotland, UK
- [53] Wenig, F., Glatzl, Th., Schoberer, Th., Heschl, Ch. & Sauter, Th. (2016): Novel low-cost thermal air flow sensor and its application in HVAC systems, Indoor Climate of Buildings (ICB) 2016, 9th International Congress, High Tatra, Slovakia
- [54] Winkler, M. (2014) Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Architektur und Haustechnik in Österreich. In: Der österreichische Installateur, 2014/7-8: S. 70.
- [55] Winkler, M. (2016) Gebäudekomplexe - komplexe Gebäude: Die Neue Burg Wien und ihre sommerlichen "Schattenseiten". In: Tagungsband BauZ!2016 - Neues von alten Häusern, 2016: S. 79ff., IBO Verlag, Wien.
- [56] Oldewurtel, F.; Parisio, A.; Jones, C.N.; Morari, M.; Gyalistras, D.; Gwerder, M.; Stauch, V.; Lehmann, B.; Wirth, K. (2010) "Energy efficient building climate control using Stochastic Model Predictive Control and weather predictions". In American Control Conference (ACC), 2010 , vol., no., pp.5100,5105
- [57] Chen Chen; Jianhui Wang; Yeonsook Heo; Kishore, S. (2013) "MPC-Based Appliance Scheduling for Residential Building Energy Management Controller". In proceedings of Smart Grid, IEEE Transactions on , vol.4, no.3, pp.1401,1410, Sept. 2013.doi: 10.1109/TSG.2013.2265239
- [58] Treytl, A.; Trauninger, D.; Stumpf, W.; Winkler, M.; Bratukhin, A. (2020). Kastenfenster 2.0 – Intelligente Fenster zur passiven Kühlung von Gebäuden. In: Neuhold, E., 2. IMMOBILIEN-ZUKUNFTSTAG Lebenswerte Stadtquartiere: 74-87, Edition Donau-Universität Krems, Krems

