NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DER KLIMAPUFFERWIRKUNG EINES ZWISCHENRAUMS IM URBANEN BESTAND

Tobias Pörschke[1], Elisabeth Endres [1,2], Tobias Wagner[2], Johanna Graf[2]
[1] *Technische Universität Braunschweig, 38106 Braunschweig,*
E-Mail: t.poerschke@tu-bs.de, e.endres@tu-bs.de
2 Ingenieurbüro Hausladen GmbH, 85551 Kirchheim bei München,
E-Mail: tobias.wagner@ibhausladen.de, johanna.graf@ibhausladen.de

Kurzfassung/Abstract

Der Beitrag analysiert die Klimapufferwirkung einer vorgeschalteten Pufferzone zu 19 [m²] vor der südwestorientierten Fassade einer Bestandswohnung zu 73 [m²] im urbanen Kontext. Grundlage bildet ein mehrzoniges, hygrothermisch gekoppeltes Simulationsmodell in WUFI®-Plus mit expliziter Berücksichtigung von Strahlung, Feuchte, Luftwechsel und nutzungsabhängigen Lasten. Als Randbedingungen dienen standortspezifische Meteonorm-Daten inklusive urbanem Wärmeinseleffekt der Stadt München. Die Ergebnisse zeigen, dass die Pufferzone den Jahresheizwärmebedarf gegenüber einer konventionellen Fassadensanierung um rund zehn Prozent reduziert und zugleich sommerliche Übertemperaturen mindert. Die Studie zeigt auf, dass adaptive Zwischenräume als robuste, energieeffiziente und resiliente Maßnahme im urbanen Bestand angesehen werden können.

Motivation und Zielsetzung

Im Rahmen der energetischen Vorstudie zur Sanierung eines Wohngebäudes aus den 1970er Jahren zeigte die quasi-statische Bewertung nach DIN 18599, dass eine unbeheizte Pufferzone bilanziell keinen energetischen Vorteil gegenüber einer konventionellen Fassadendämmung aufweist (vgl. Abbildung 1) (dena, 2023). Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu bauphysikalischen Erwartungen gegenüber vorgelagerten Wintergärten und Zwischenräumen. Ursache ist die eingeschränkte Abbildbarkeit zeitabhängiger Effekte wie solare Gewinne, Luftwechsel, Speicherwirkungen und Nutzerinteraktion innerhalb des normativen Rechenverfahrens (Kühn et al., 2024). Hinzu kommt, dass die Dämmung der opaken Außenwände auf der Südwestseite im Vergleich zur Straßenseite aufgrund zahlreicher Versprünge, Balkonanschlüsse und konstruktiver Details mit einem deutlich erhöhten planerischen und handwerklichen Aufwand verbunden wäre. Der damit verbundene energetische Mehrwert ist jedoch gering, da der bestehende Wandaufbau mit einem U-Wert von etwa 0,66 [W/m²K] sowohl oberhalb des bauzeittypischen Wärmeschutzstandards des Errichtungsjahres 1972 liegt als auch die heutigen Anforderungen an den Mindestwärmeschutz gemäß DIN 4108-2 erfüllt. Zudem ist der Flächenanteil der betrachteten Wand im Verhältnis zum Fensterflächenanteil vergleichsweise gering, sodass sie im Gesamtenergiehaushalt keinen dominanten Verlustpfad darstellt.

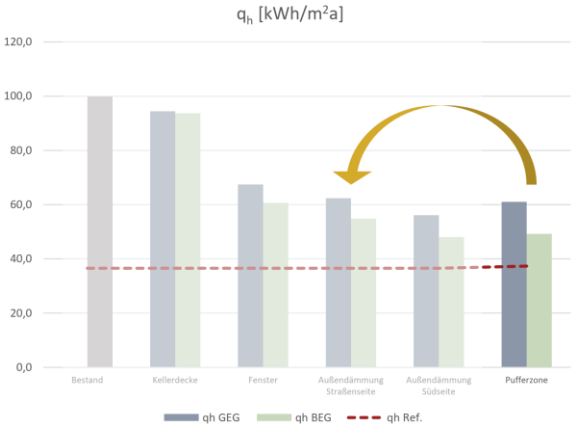

Abbildung 1: Vergleich des Jahresheizwärmebedarfs verschiedener Varianten mittels DIN V 18599

Hintergrund der Arbeit ist, mittels einer stundenaufgelösten, hygrothermisch gekoppelten Simulation zu untersuchen, ob und unter welchen Randbedingungen eine unbeheizte Pufferzone mit hoher energetischer Qualität der Verglasung bei einem U-Wert von höchstens 1,3 [W/m²K] energetische und komfortrelevante Vorteile gegenüber einer rein bauteilorientierten Sanierung entfaltet. Auf der Südseite beschränkt sich die Variante mittels Pufferzone bewusst auf den Austausch energetisch schwacher Bestandsfenster, während auf eine aufwendige Dämmung der opaken Wandflächen verzichtet wird. Neben der energetischen Wirkung wird der zusätzliche Nebeneffekt einer erweiterten, witterungsgeschützten und öffenbaren Aufenthaltsfläche erzielt, der den funktionalen und nutzerbezogenen Mehrwert der Maßnahme ergänzt.

Methodik & Randbedingungen

Für die Simulation wird das hygrothermische Gebäudesimulationsprogramm WUFI®-Plus eingesetzt. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber der quasi-statischen Berechnung besteht darin, dass der instationäre Wärme- und Feuchtetransport explizit abgebildet wird. Temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeiten sowie windabhängige

Wärmeübergangskoeffizienten führen zu zeitlich variierenden effektiven Wärmeströmen durch die Bauteile. Zusätzlich beeinflussen die explizite Bilanzierung der kurzwelligen solaren Einstrahlung sowie der langwellige Strahlungsaustausch mit dem Himmel insbesondere in den Nachtstunden den momentanen Wärmeübergang durch die Konstruktionen. Das resultierende zeitabhängige Übertragungsverhalten geht damit deutlich über die Annahme eines konstanten U-Werts hinaus. Zur Skalierung des Modells und zur Vermeidung von Sondereffekten infolge von Erdreich oder Dachanschlüssen wird eine Wohnung im Zwischengeschoss mit adiabaten Übergängen zu den angrenzenden Wohnungen betrachtet. Das Simulationsmodell ist in vier berechnete Zonen sowie in eine zusätzliche Nachbarzone gegliedert. Für die Wohnzonen 1 und 2 wird ein Außenluftwechsel von $n_A = 0{,}7$ [h^{-1}] angesetzt, während für die unbeheizte Pufferzone ein erhöhter Luftwechsel von $n_A = 2{,}0$ [h^{-1}] zur Abbildung des Luftbilanzausgleichs verwendet wird. Die Durchgangszone 3 steht im interzonalen Luftaustausch mit $n_{IZ} = 0{,}7$ h^{-1} und ist zusätzlich an die Nachbarzone mit einem Luftwechsel von $n_{NZ} = 0{,}7$ [h^{-1}] gekoppelt.

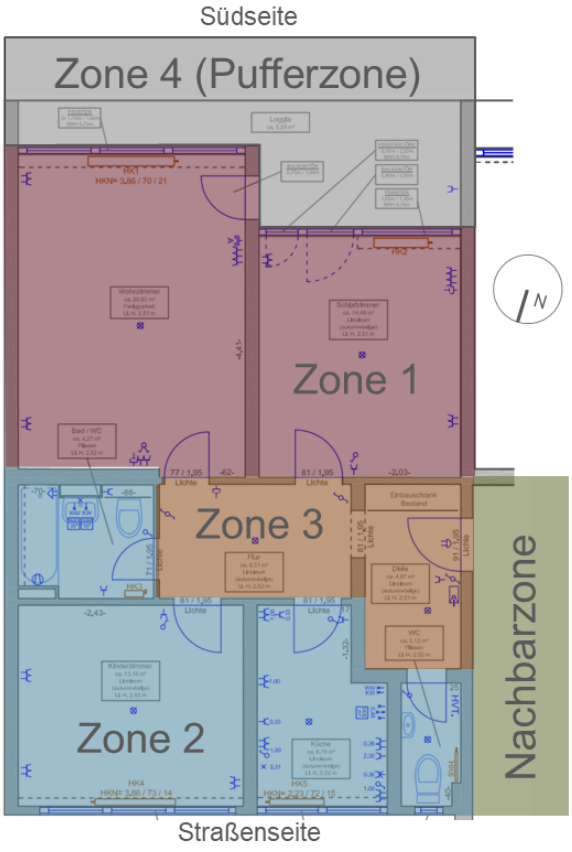

Abbildung 2: Zonierung des Simulationsmodells

Die Nachbarzone wird über sinusförmige Randbedingungen beschrieben, mit einem Temperaturmaximum Anfang Juli und einem Maximum der relativen Luftfeuchte Anfang November. Die Mittelwerte betragen 19 [°C] für die Lufttemperatur und 60 [%] für die relative Feuchte, bei Amplituden von 6 [K] beziehungsweise 15 [%]. Die CO_2-Konzentration der Außenluft wird mit ca. 425 [ppm] angesetzt (NOAA, 2025). Für die CO_2-Konzentration wird Kategorie III gemäß DIN EN 16798-1 zugrunde gelegt. Der effektive Luftwechsel für die sommerliche Nachtlüftung in den Wohnbereichen wurde in Anlehnung an die Annahmen der DIN 4108-2 auf $n_{Sn} = 2{,}0$ [h^{-1}] begrenzt. Für die Pufferzone in Zone 4 liegt der effektive Luftwechsel für die sommerliche Nachtlüftung je nach Variante bei $n_{Sn} = 2 - 20$ [h^{-1}] (Hutter et al., 2023). Tabelle 1 fasst die für die Simulation angesetzten Randbedingungen der Gebäudehülle, Nutzung und Lüftung für die Varianten systematisch zusammen.

Tabelle 1: Randbedingungen der Varianten

Kategorie	Parameter	Ansatz / Wert
Gebäudehülle	Außenwand Bestand	U = 0,66 [W/m²K]
	Außenwand saniert	U = 0,20-0,24 [W/m²K]
	Fenster Bestand	Zweischeibenverglasung, Uw = 2,7 [W/m²K], g = 0,60 [-], Laibung 0,1 [m]
	Fenster saniert	Zwei-/Dreifachverglasung, Uw = 0,95-1,3 [W/m²K], g = 0,50-0,60 [-], Laibung 0,1-0,24 [m]
	Vorhang-fassade Pufferzone	Zwei-/Dreifachverglasung, Uw = 0,95-1,3 [W/m²K], g = 0,5-0,60 [-], Laibung 0,1 [m]
Verschattung	Geometrische Verschattung	Fensterlaibungen, Stürze, Balkone, Vordächer, Brüstungen
	Rahmenreduktionsfaktor	0,7 [-]
	Abminderungsfaktor Fc-Wert	0,5-0,8 [-]
Nutzung	Nutzerprofil	Zweipersonenhaushalt
	Interne Lasten	Wärme, Feuchte, CO_2 nach DIN 18599-10, ASHRAE 55/62, IEA Annex 41
	Metabolische Rate	0,7 bis 1,2 [met]
	Bekleidungsgrad	0,7 [clo]
	Luftgeschwindigkeit	0,1 [m/s]
Lüftung	Luftwechsel Wohnzone	n = 0,7 [h^{-1}]
	Luftwechsel Pufferzone	n = 2,0 [h^{-1}]
	Interzonaler Luftwechsel	n = 0,7 [h^{-1}]
	CO_2-Grenzwert	Kategorie III nach DIN EN 16798-1
Entwärmung	Wohnzonen	Fensterlüftung, 0,7-facher Luftwechsel
		2-facher Luftwechsel bei $T_{Raum} > 24$ [°C] & $T_{Raum} \geq T_{Außen} + 3$ [K]

	Pufferzone	Fensterlüftung, 2-facher Luftwechsel
		2-20-facher Luftwechsel bei T_{Raum} > 24 [°C] & $T_{Raum} \geq T_{Außen}$ + 3 [K]
		Permanente Öffnung 15.05-15.09 mit n_{Sn} = 10-20 [h^{-1}]

Auswertung

Es wurden auf Basis von sechs geometrischen Modellvarianten der Pufferzone (vgl. Abbildung 3) insgesamt über 100 Simulationsläufe durchgeführt. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der räumlichen Ausbildung der vorgelagerten Zone, insbesondere durch veränderte Luftwechselraten, Brüstungshöhen, Überstände, Laibungstiefen der Verglasung sowie durch unterschiedliche Verglasungstypen einschließlich einer Bestandsvariante mit Einfachverglasung. Hintergrund dieser Parametervariationen ist, die Sensitivität des thermischen Verhaltens in der Pufferzone systematisch zu untersuchen. Ein weiterer Aspekt lag in der modellinternen Kalibrierung und Plausibilisierung des Mehrzonenmodells. Hierzu wurden identische Randbedingungen und Bauteilkennwerte aus zuvor durchgeführten quasi-statischen Berechnungen in das dynamische Simulationsmodell überführt. Durch den Abgleich der resultierenden Heizwärmebedarfe sowohl für den Bestandszustand als auch für ausgewählte Sanierungsvarianten konnte überprüft werden, inwieweit die Simulation bei vergleichbaren Eingangsdaten zu konsistenten Ergebnissen führt. Die „Annäherung an die quasi-statische Berechnung“ beschreibt somit keine inhaltliche Gleichsetzung, sondern eine methodische Referenzprüfung zur Sicherstellung der Modellplausibilität und der korrekten Evaluation der thermischen Zonen- und Austauschprozesse.

Die Leitvariante entspricht geometrisch der linken unteren Darstellung der Teilabbildungen im oberen Teil der Abbildung 3. Der darunterliegende Wohnungsschnitt konkretisiert diese Variante zusätzlich durch die zugehörigen Fassaden-, Verglasungs- und Öffnungsparameter. Diese Konfiguration bildete die Grundlage für die weiterführenden vertieften Analysen in Abbildung 5 bis Abbildung 8. Ein Teilkollektiv von 30 Simulationsläufen ist exemplarisch in dem Ergebnisdiagramm der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt. Das Diagramm stellt den Zusammenhang zwischen Jahresheizwärmebedarf q_h und Übertemperaturgradstunden dar und ermöglicht so eine gleichzeitige Bewertung von Wintereffizienz und Sommerkomfort. Auffällig ist, dass eine zusätzliche Dämmung der Südwestwand im Vergleich zu den entsprechenden Varianten ohne diese Maßnahme keinen signifikant geringeren Jahresheizwärmebedarf bewirkt, während der konstruktive Aufwand durch Versprünge und Detailpunkte hoch wäre.

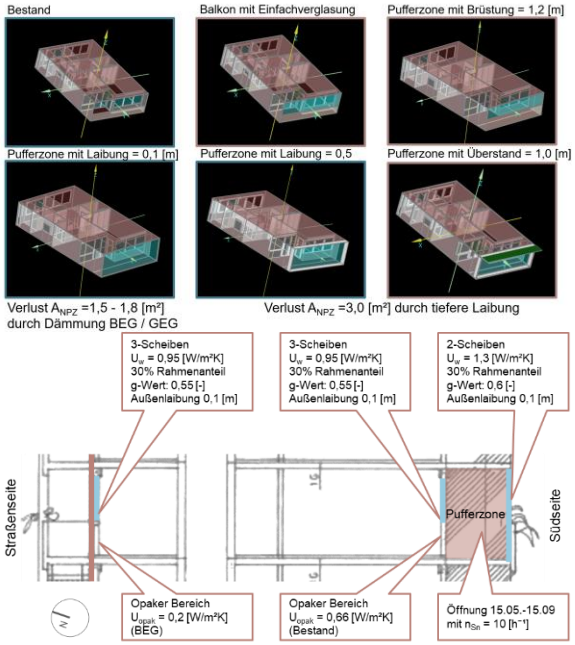

Abbildung 3: Geometrische Modellvariation sowie Fassaden- & Pufferzonenparameter der Leitvariante

Für die Leitvariante wird für die Pufferzone für den Zeitraum 15.05 bis 15.09 ein mittlerer Öffnungsbetrieb mit einem zehnfachen Luftwechsel unterstellt, wodurch Übertemperaturgradstunden von 831 [Kh/a] erreicht werden. Dies entspricht rund 70 [%] des Grenzwerts (Escombe et al., 2007; Wang et al. 2009). Eine Erhöhung auf einen zwanzigfachen Luftwechsel reduziert die Übertemperaturgradstunden auf 543 [Kh/a], und ein nutzerseitiger innenliegender Sonnenschutz mit F_C = 0,8 [-] senkt die sommerliche Belastung zusätzlich in der Modellierung. Der angesetzte Luftwechsel von 20 [h^{-1}] stellt keine Randbedingung der Leitvariante dar, sondern wurde ausschließlich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse zur Bewertung der sommerlichen Entwärmungswirkung untersucht. Die Abbildung über konstante Luftwechselraten dient dabei als vereinfachter Bilanzansatz; reale, temperatur- und windinduzierte Strömungsdynamiken werden im Ausblick als Gegenstand weiterführender Mehrzonen- beziehungsweise Durchströmungsmodelle adressiert.

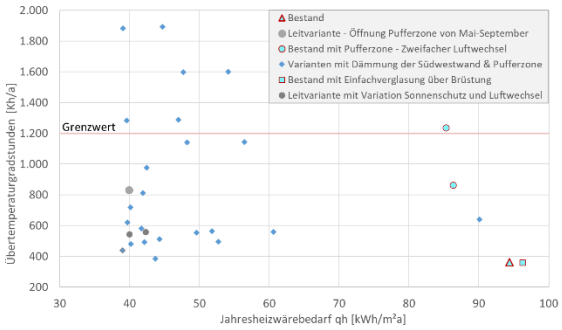

Abbildung 4: Variantenvergleich Jahresheizwärmebedarf vs. Übertemperaturgradstunden

Eine Variante mit Einfachverglasung oberhalb der Brüstung erzeugt eine Verschlechterung des Jahresheizwärmebedarfs um etwa 2,0 [kWh/m²a], wodurch die Notwendigkeit einer ausreichend guten Verglasungsqualität der Pufferzone deutlich wird, um die verminderten solaren Erträge durch reduzierte Transmissionswärmeverluste zu kompensieren.

Für die Leitvariante wurden der adaptive Komfortnachweis nach DIN EN 16798-1 für Gebäude ohne aktive Kühlung sowie eine Temperatur-Feuchte-Auswertung der Pufferzone abgebildet. In Abbildung 5 liegen die operativen Temperaturen aller Wohnzonen überwiegend innerhalb der zulässigen Komfortbereiche. Zeitweise Überschreitungen zeigen sich im Sommer lediglich in der südwestlichen Wohnzone hinter der Pufferzone, wobei die obere Grenze der Komfortkategorie I punktuell überschritten wird. Die übrigen Wohnzonen verbleiben im betrachteten Zeitraum innerhalb der normativen Bandbreiten.

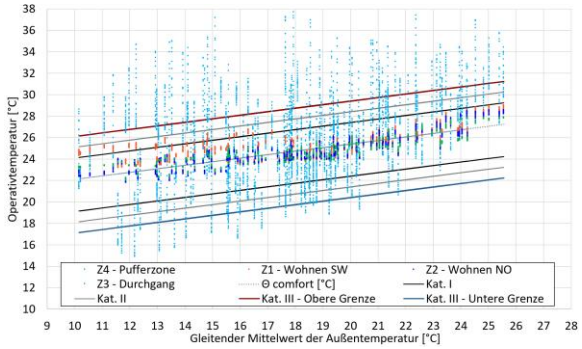

Abbildung 5: Adaptiver Komfort nach DIN EN 16798-1 (Gebäude ohne Kühlung) für die Leitvariante

Die zweite Auswertung in Abbildung 6 verdeutlicht die ausgleichende Wirkung der Pufferzone während der Wintermonate. Während das Außenklima große Streuungen bis in hohe relative Feuchten aufweist, konzentrieren sich die Zustände der Pufferzone deutlich stärker in einem moderaten Bereich. Die minimale Lufttemperatur in der Pufferzone beträgt 3,4 [°C], während die minimale Außenlufttemperatur bei -6,1 [°C] liegt. Damit wird eine deutliche Abmilderung der Kältespitzen erreicht, was auf reduzierte Transmissionsverluste und solare Gewinne innerhalb der Pufferzone zurückgeführt werden kann. Hinsichtlich der Feuchte ist erkennbar, dass relative Feuchten oberhalb von 70 [%] nur vereinzelt auftreten und keine dauerhaft erhöhten Niveaus ausbilden. Unter dieser Randbedingung erscheint es plausibel, dass keimungsrelevante Isoplethen nur selten erreicht werden und eine Triggerung von Keimungsprozessen im Sinne einer kritischen mikrobiellen Aktivierung voraussichtlich ausbleibt (Pagoni et al., 2024; Sedlbauer, 2001; Zürcher et al., 2018).

Über den gesamten Simulationszeitraum von zwei Jahren bleibt die mittlere relative Feuchte in den Schichten der Zwischendecke im Bereich, der aus bauphysikalischer Sicht als unkritisch gilt (Abbildung 7).

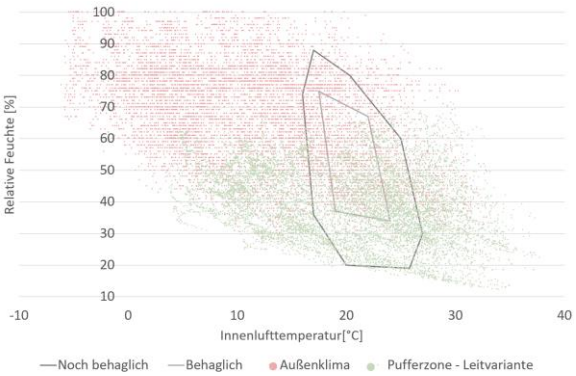

Abbildung 6: Behaglichkeitsdiagramm der Leitvariante für das Klima der Pufferzone gegenüber dem Außenklima

Der XPS-Kern verhält sich erwartbar nahezu konstant um 50 [%] und zeigt damit keine nennenswerte Feuchteaufnahme. Auch der Beton liegt sehr stabil um etwa 48 bis 51 [%] mit einer leichten, rein saisonalen Modulation ohne Drift. Damit ergibt sich kein Hinweis auf einen Feuchteaufbau oder eine fortschreitende Durchfeuchtung des Bauteils. Auffällig ist lediglich die größere Dynamik der oberen Schicht des Zementfließestrichs. Diese Schwankungen sind in solchen Aufbauten plausibel, weil die obere Estrichzone stärker an das jeweilige Randklima gekoppelt ist und sorptiv reagiert, während die darunterliegende Dampfsperre den diffusionsgetriebenen Feuchtenachschub stark begrenzt. In der obersten Estrichschicht treten randklimabedingt kurzzeitige Feuchtespitzen bis knapp 80 [%] auf.

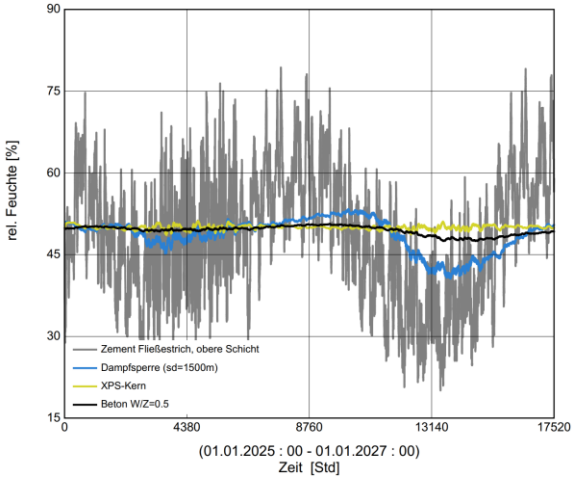

Abbildung 7: Mittlere relative Feuchte einzelner Schichten der Zwischendecke in der Pufferzone sowie stündliche relative Feuchte der obersten Estrichschicht (Leitvariante).

Ein dauerhafter Feuchteaufbau ist nicht erkennbar, da die übrigen Schichten (Dampfsperre, XPS-Kern, Beton) über den gesamten Zeitraum stabil bleiben und keine Drift zeigen. Damit ist weder interstitielle Kondensation noch eine länger anhaltende hohe Bauteilfeuchte zu erwarten. Aufgrund des mineralischen

beziehungsweise polymerbasierten Materialaufbaus und der fehlenden Verweilzeiten im hochfeuchten Bereich wird das hygrische Schadensrisiko als gering bewertet.

Die Abbildung 8 quantifiziert den spezifischen Jahresheizwärmebedarf q_h für den Bestand sowie drei Sanierungsvarianten. Im Bestand befindet sich q_h mit 94,4 [kWh/m²a] deutlich oberhalb der Referenzlinie und markiert den Ausgangszustand mit hohen Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten. Die beidseitige Außendämmung Straßenseite & Südseite (V4) reduziert q_h bereits signifikant auf 44,3 [kWh/m²a]. Die Leitvariante (V5a1) mit lediglich einseitiger Sanierung der opaken Hüllfläche auf der Straßenseite und Pufferzone reduziert ferner den Jahresheizwärmebedarf um ~10% gegenüber V4 auf 39,9 [kWh/m²a]. Eine zusätzliche, aufwändige Sanierung der Außenwand auf der Südwestseite mit Pufferzone (V5a2) ermöglicht eine weitere Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfs um rund zwei Prozent.

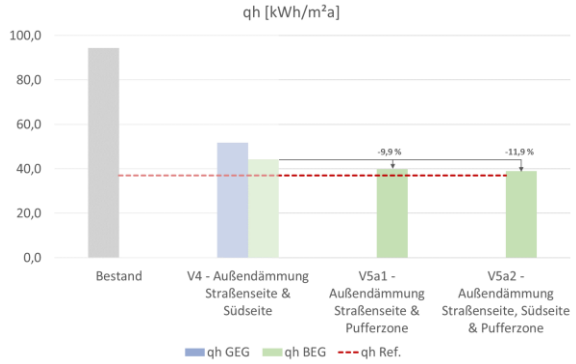

Abbildung 8: Vergleich des Jahresheizwärmebedarfs verschiedener Varianten mittels WUFI®-Plus. Die Leitvariante ≙ V5a1

Zusammenfassung

Neben dem modellierten energetischen Effekt sind insbesondere konstruktive und funktionale Konsequenzen der Pufferzone relevant. Durch den vorgelagerten, thermisch relevanten Zwischenraum sinkt die Dämmkomplexität im Sinne der Detailkritikalität deutlich. Anschlussbereiche, geometrische Wärmebrücken sowie Übergänge an Laibungen und Deckenrändern liegen in einem gegenüber der Außenluft entschärften Randklima. Dadurch erhöht sich das Potential der Robustheit des Gesamtsystems gegenüber Ausführungsstreuungen und lokalen Abweichungen in der Luftdichtheit, während gleichzeitig die hygrothermische Beanspruchung sensibler Details reduziert wird (Toroxel, 2024). Parallel entsteht eine zusätzliche Nutzfläche beziehungsweise eine erweiterte Nutzbarkeit in Form eines weitestgehend witterungsgeschützten Bereichs. Diese Flächenwirkung kann nicht nur einen funktionalen Mehrwert darstellen, sondern bietet die Option, auch energetisch indirekt stabilisierend zu wirken. Im Allgemeinen zeigt die Untersuchung auf, dass die Kombination aus partieller Außendämmung, Erneuerung der Bestandsfenster und Pufferzone eine energetisch wirksame, konstruktiv robuste und nutzungsseitig vorteilhafte Strategie darstellen kann (Siu et al., 2023). Die zusätzliche Reduktion des Jahresheizwärmebedarfs um etwa zehn Prozent gegenüber der opaken Außendämmung wird daher nicht als marginaler Effekt interpretiert, sondern als systemische Folge der klimatischen Entkopplung durch den Zwischenraum. Daraus resultieren für die Betrachtung der Gesamtwohnfläche des Gebäudes potenzielle Einsparungen von etwa 13.766 [kWh/a], was näherungsweise dem Jahresheizwärmebedarf eines durchschnittlichen Einfamilienhauses mit mittlerem energetischen Standard entspricht.

Die vorliegenden Ergebnisse sind jedoch im Kontext der getroffenen Modellannahmen einzuordnen. Die sommerliche natürliche Lüftung der Pufferzone wurde vereinfacht über einen konstanten Luftwechsel abgebildet. Optische und geometrische Änderungen des transparenten Bauteils durch Öffnungszustände sowie strömungsmechanische Effekte wie Kurzschlussströmungen, Richtungswechsel und thermische Schichtung sind damit nicht explizit erfasst. Absolute Temperaturspitzen innerhalb der Pufferzone unterliegen daher einer Unsicherheit. Für die winterliche Bewertung des Effizienzgewinns ist diese Vereinfachung von untergeordneter Bedeutung, da der energetische Nutzen primär aus der Reduktion der Transmissions- und Lüftungsverluste resultiert. Die im Sommer angesetzte Luftwechselrate von 10 [h^{-1}] für die Leitvariante stellt eine modellhafte Annahme dar, ist jedoch unter praxisnahen Randbedingungen plausibel. Abhängig von Öffnungsflächen, Windanregung und thermischem Auftrieb ist davon auszugehen, dass reale Luftwechsel zeitweise auch deutlich darüber liegen können. Die Luftwechselrate von 20 [h^{-1}] wird als oberer Sensitivitätsfall angesetzt, um das Entwärmungspotenzial bei weitgehend vollständig geöffneten Fassadenelementen abzubilden. Im Kontext einseitig angeströmter, kurz ausgebildeter Pufferzonen erfolgt der Luftaustausch primär über windinduzierte Druckschwankungen sowie intermittierende turbulente Austauschprozesse am Öffnungsquerschnitt. Stationäre Durchströmungen sind zwar nur eingeschränkt wirksam, gleichwohl kann über große effektive Öffnungsflächen ein signifikanter Luftvolumenaustausch entstehen. Bei effektiven Öffnungsflächen in der Größenordnung von mehr als 10 [m²] können somit bereits bei sehr geringer Windanregung Volumenströme auftreten, die rechnerisch erhöhte Luftwechselraten ermöglichen. Ergänzend tragen auch thermisch bedingte Dichteströmungen zum Luftaustausch bei, sodass selbst geringe Temperaturunterschiede zusätzliche Volumenströme bewirken können (CIBSE Guide A, 2018; DIN EN 16798-7, 2017). Der Ansatz ist daher als erreichbarer Oberwert zur Einordnung der sommerlichen Leistungsgrenze zu verstehen und nicht als konstant wirksamer Dauerzustand. Im Ausblick bietet die Abbildung der Pufferzone mittels eines Mehrzonen-Durchströmungsmodells eine

konsequente Weiterentwicklung. In einem solchen Ansatz werden wind- und temperaturgetriebene Volumenströme, Öffnungsflächen, Strömungsrichtungen sowie Kurzschlussanteile explizit berechnet. Die daraus resultierenden zeitvariablen Massenströme können anschließend unmittelbar für die thermische Bewertung genutzt werden und ermöglichen eine belastbarere Erfassung der sommerlichen Dynamik (Sezer et al., 2023). Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Untersuchungen auf zukünftige Klimarandbedingungen wünschenswert, um die Robustheit der Strategie auch unter veränderten Außenklimata zu bewerten. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Effizienzsteigerung im Winterbetrieb lag, stellt insbesondere die vertiefte Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes ein zentrales Potenzial für weiterführende Analysen dar.

Literatur

dena. 2023. Leitfaden DIN V 18599

DIN EN 16798-7. 2017. Energieeffizienz von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 7: Berechnungsmethoden für die Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration. Berlin: Beuth Verlag.

CIBSE. 2018. CIBSE Guide A: Environmental Design. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers.

Escombe A.R., Oeser C.C., Gilman R.H., Navincopa M., Ticona E., Pan W., et al. 2007. Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion. PLoS Medicine 4(2), e68.

Hutter C., Eberle A., Wöhrle H., Neubert L., Hausladen G., Endres E., Klinski S. 2023. Kühle Gebäude im Sommer – Anforderungen und Methoden des sommerlichen Wärmeschutzes. Umweltbundesamt, Dessau Roßlau. Climate Change 14/2023.

Kühn L., Zoumba B., Spratte T., Maier L., Müller D. 2024. Level of Detail in Dynamic Simulation Models – a Comparison for Multi-Family Houses. In: Proceedings of BauSIM Conference 2024: 10th Conference of IBPSA-Germany and Austria, Vienna, Austria, 23-26 September 2024, International Building Performance Simulation Association (IBPSA), pp. 215-222.

NOAA Global Monitoring Laboratory. 2025. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.

Pagoni P, Møller E.B., Peuhkuri R.H. 2024. Decisive parameters for moisture safe internal insulation of masonry − Long time monitoring in inhabited dwellings. Energy and Buildings, 312, 114180

Sedlbauer, K. 2001. Vorhersage des Schimmelpilzwachstums auf und in Bauteilen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Sezer N., Yoonus H., Zhan D., Wang L. (Leon), Hassan I.G., Rahman M.A. 2023. Urban microclimate and building energy models: A review of the latest progress in coupling strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 184, 113577.

Siu C.Y., O'Brien W., Touchie M.F., Armstrong M., Laouadi A., Gaur A., Jandaghian A., Macdonald I. 2023. Evaluating thermal resilience of building designs using building performance simulation – A review of existing practices. Building and Environment, 234, 110124.

Toroxel J.L., Monteiro Silva S., Fernandes J. 2024. Contribution of Glazed Balconies as a Passive Heating System in Contemporary Buildings in Northern Portugal. Sustainability, 16(13), 5658

Wang Z., Yi L., Gao F. 2009. Night Ventilation Control Strategies in Office Buildings. Solar Energy 83(10), S. 1902 bis 1913.

Zürcher C., Frank T. 2018. Bauphysik: Bau & Energie, 5. überarbeitete Auflage, vdf Hochschulverlag AG, Zürich, Schweiz