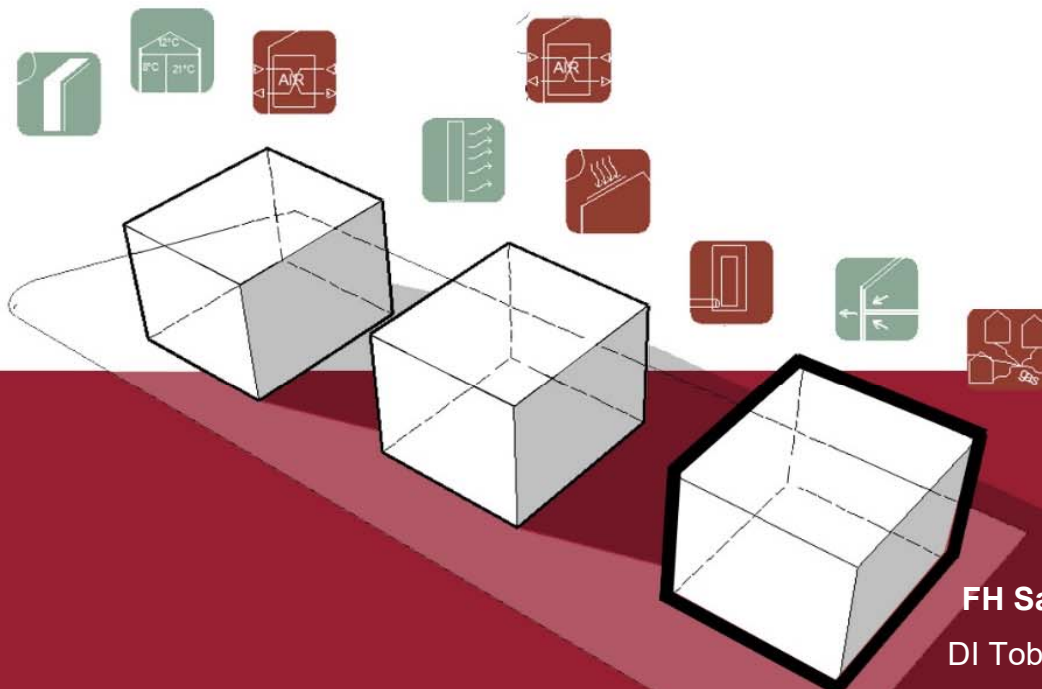


Vorstudie „Bernhofergründe Kuchl“ Bauteilaktivierung im geförderten Wohnbau

Fachhochschule Salzburg GmbH

Smart Building & Smart City
Energieeffiziente Gebäudetechnik und nachhaltiges Bauen



FH Salzburg :

DI Tobias Weiß

Dr. DI Markus Gratzl

FH-Prof. DI DI Dr. Thomas Reiter

EQUA Solutions AG:

DI (FH) Daniel Ruepp

Dr. Sven Moosberger

Das vorliegende Projekt wurde mit Mitteln der Wohnbauforschung des Landes Salzburg gefördert.



Die Projektleitung der Fachhochschule Salzburg bedankt sich bei den Projektpartnern „die-Salzburg“ vertreten durch Baumeisterin DI (FH) Carmen Werner-Schubert, der EQUA Solutions AG, TB Ing. Heiling, TB Herbst GmbH, Studio b&f Planungs OG, Zivilingenieur-Arge DI Lukas & DI Graml, IB Wimmer&Partner ZT-GmbH, BAU-Innung Salzburg sowie proHolz Salzburg für die ausgezeichnete Kooperation.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
1.1. Ausgangslage	2
1.2. Aufgabenstellung	2
1.3. Problemstellung	4
1.4. Zielsetzung	5
2. Simulationsbericht Bauteilaktivierung - Holz Hybridbau	7
2.1. Angewendete Methode	7
2.2. Aufbau Grundmodelle	7
2.3. Vorgehensweise	9
2.4. Phase I – Modell und Analyse der Gebäudehülle	9
2.5. Phase II - Haustechnikmodell	13
3. Ergebnisse und Empfehlungen	16
3.1. Heizlast- und Kühllastberechnung	16
3.2. Jahressimulation idealisiert	18
3.3. Vergleich von Radiatoren und Bauteilaktivierung im Winter	19
3.4. Vergleich der Sommerstrategien	20
3.5. Empfehlungen aus den bisherigen Komfortuntersuchungen	21
3.6. Empfehlungen für weitere Untersuchungen des Hybridbaus	22
4. Ausblick	24
Abbildungsverzeichnis	1
Tabellenverzeichnis	1
Literaturverzeichnis	2

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die gemeinnützige Wohn- und Siedlungsgenossenschaft „die salzburg“ reg. Gen.m.b.H. plant in Kuchl in Salzburg ein gefördertes soziales Wohnbauprojekt mit Bauteilaktivierung¹ in einem Holz-Hybridbau umzusetzen. Um zusätzliche Planungssicherheit zu erhalten, wird das Projekt im Rahmen eines Forschungsauftrags mit dynamischer Gebäudesimulation begleitet. Diese Planungsbegleitung erfolgt im Rahmen der Wohnbauforschung Salzburg durch die Fachhochschule Salzburg GmbH und EQUA Solutions AG als Subauftragnehmer. Dieser Bericht fasst den ersten Teil der Untersuchungen und erste Empfehlungen für die Wohnbauforschung Salzburg zusammen.



Abbildung 1: Perspektive - Bernhofer Gründe in Kuchl (Quelle: Studio b&f Planungs OG)

1.2. Aufgabenstellung

Der Bauherr errichtet drei identische Wohngebäude mit je 10 Wohneinheiten (ca. 900 m² BGF) hintereinander angeordnet auf dem gleichen Grundstück in unterschiedlichen Konstruktionsarten (Holz-, Massiv- und Hybridbau). Die Gebäude in Holz- und Massivbau werden mit der Wärmeversorgung Fernwärme bzw. dem Wärmeabgabesystem und Radiatoren/ Fußbodenheizung ausgestattet. Der Hybridbau wird mit thermisch aktivierten Bauteilen zur Wärme- und Kälteabgabe und einer Grundwasserwärmepumpe kombiniert mit Solarthermie versorgt. Die thermisch aktivierten Stahlbetondecken im Holz-Hybridbau nutzen die Möglichkeit die relativ geringe Heizlast mit sehr niedrigen Betriebstemperaturen abdecken zu können. Im Folgenden wird als thermisch aktivierter Körper eine Boden-/Deckenkonstruktionen mit im unteren Bereich der Decke einbetonierten, wasserführenden Rohrleitungen betrachtet und im folgend mit dem Begriff Bauteilaktivierung bezeichnet. Thermisch aktivierte Bauteile

Die Schwerpunkte der Untersuchungen mittels dynamischer Gebäudesimulation werden laufend an den Planungsstand angepasst, in den ersten Projektgesprächen ergaben sich folgende erste Fragestellungen:

- Ist die Hülle des Hybridbaus thermisch ausreichend für den Einsatz von Bauteilaktivierung bei Verzicht auf eine kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL) mit Wärmerückgewinnung (WRG)?
- Abschätzung des Komforts im Winter und Sommer, zu erwartender Heizwärmebedarf.
- Identifizierung möglicher problematischer Sachverhalte
- Vergleich des Sommerkomforts zwischen Massivbau ohne Kühlung und Hybridbau mit Free-Cooling durch das Grundwasser.
- Funktioniert das Haustechniksystem in Bezug auf die Energieflüsse?
- Welche Effizienzverbesserung der Wärmepumpe ist für die Warmwasserbereitung zu erwarten durch die „Vorerwärmung“ der Wärmequelle im Sommer?

Nicht im Untersuchungsrahmen ist enthalten

- ein genauer Vergleich aller verschiedenen Bauweisen
- Untersuchungen zur Lüftungsstrategie
- Variantenstudien der Haustechnik

1.3. Problemstellung

Die Energiestandards haben sich im mehrgeschoßigen Wohnbau in Salzburg in den letzten Jahren stark verbessert und werden sich auch, im Hinblick auf die 2020 Ziele (Europäische Union, 2012) weiter verbessern. Das große zukünftige Potential besteht nun darin, die relativ geringe Heizlast dieser Gebäude über thermisch aktivierte Bauteile mit äußerst niedrigen Betriebstemperaturen in Kombination mit einem effizienten Betrieb von Wärmepumpen abzudecken. Mehrgeschoßige Wohnbauten bieten hier Energiespeicher in Form von Betonkern und Bauteilen wie Geschossdecken, Fundamenten und Wänden. Durch die thermische Aktivierung dieser Bauteile kann sowohl im Winter als auch im Sommer eine gleichmäßige, behagliche innere operative Raumtemperatur geschaffen werden. Über die aktivierte Fläche nimmt das Bauteil die Wärme auf oder gibt sie ab, je nach Heiz- oder Kühlfall. Aufgrund der vergleichsweise großen Übertragungsfläche können die Systemtemperaturdifferenzen nied-

rig bleiben. Das heißt, das Medium muss im Heizfall nicht so stark erwärmt werden wie beispielsweise das Wasser der Zentralheizung, deren Heizkörper eine wesentlich kleinere Übertragungsfläche bieten. Aufgrund dieser geringeren Vorlauftemperaturen können zum Heizen Wärmepumpen sehr effizient und ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden. (Handler, 2014) Speziell die in den letzten Jahren in Salzburg gestiegenen sommerlichen und winterlichen Temperaturspitzen lassen sich mit dem Zusammenspiel dieser Technologien glätten, was besonders vor dem Hintergrund des permanent steigenden Energiebedarfs wichtig ist. Die Bauteilaktivierung bietet im Vergleich zu allen anderen Heizsystemen das niedrigste Temperaturniveau, durch größere aktivierte Heizflächenanteile im Raum (Wimmer, 2004). Dabei ergeben sich speziell für Wärmepumpentechnologien erhebliche energetische Einsparpotenziale.

In Büro, Gewerbe und Gemeindebauten hat sich die Bauteilaktivierung bereits etabliert. In Salzburg konnte zum Beispiel mit dem Gemeindezentrum in Hallwang, den Landesberufsschulen in Bruck an der Glocknerstraße und Kleßheim sowie einigen Gewerbebauten eine praktische und umsetzungsorientierte österreichweite Vorreiterstellung errungen werden. Auch im Bereich des Wohnbaus sind bei Einfamilienhäusern erste Fortschritte zu verzeichnen und es wurden bereits einige Gebäude mit dieser Art der Heizung ausgestattet. Die Adaption des Systems auf den Bereich des großvolumigen mehrgeschossigen Wohnbaus fehlt jedoch bis dato und ist eines der Zukunftsthemen der Bauwirtschaft. Das gegenständliche branchengetragene Forschungsvorhaben, das die wichtigen Partner entlang der Bauwertschöpfungskette in Salzburg integriert, setzt hier an. Im mehrgeschoßigen Wohnungsbau bestehen im Gegensatz zu Büro-/ Verwaltungsbauten andere Anforderungseigenschaften in Bezug auf Heizen und Kühlen, welche in den Planungsprozess integriert werden müssen. (Fensterflächenanteile, interne Lasten, Nutzerverhalten, Speichermasse, Raumtemperatur, Anforderungen etc.) (Hausladen, 2010)

Um die Speichermasse des Gebäudes zur Verbesserung der Energieeffizienz nutzen zu können, ist ein optimiertes Zusammenspiel von der Wärmepumpe über die Regelung bis zur Behaglichkeit der Wohnräume selbst erforderlich. Die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Hochbau und Gebäudetechnik stellt eine der wesentlichen Herausforderungen im Zuge der Planung dieser Gebäude dar (Büttner, 2014). Bisher existieren dazu jedoch kaum Erfahrungen im mehrgeschoßigen Wohnbau.

1.4. Zielsetzung

Ziel des Projekts ist es daher eine Grundlage für die Planung solcher Gebäude sowie eine Simulationsgrundlage für ein späteres Monitoring des Demoprojekts bereitzustellen. Es wird

analysiert, welche Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz dieser Gebäude bestehen und welche Randbedingungen den größten Einfluss auf die erreichbare Energieeinsparung, den optimalen Betrieb der Bauteilaktivierung und den Nutzerkomfort haben. Um die Randbedingungen im Zuge des konkreten Umsetzungsprojekts *Bernhofergründe in Kuchl* detailliert berücksichtigen zu können, werden abgestimmte simulationsbasierte Fragestellungen betrachtet.

Um die Speichermasse des Gebäudes zur Verbesserung der Energieeffizienz nutzen zu können, ist ein optimiertes Zusammenspiel von der Gebäudetechnik über die Regelung bis zur Behaglichkeit der Wohnräume selbst erforderlich. Die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Hochbau und Gebäudetechnik stellt eine der wesentlichen Herausforderungen im Zuge der Planung dieser Gebäude dar. Bislang existieren dazu jedoch kaum Erfahrungen im mehrgeschoßigen Wohnbau.

Gelingt die erfolgreiche Umsetzung, wird einerseits eine vorwettbewerbliche Planungsgrundlage für die Nutzung von Bauteilaktivierung im mehrgeschoßigen Wohnbau geschaffen und andererseits ein Demonstrationsprojekt mit Vorbildcharakter geschaffen, das in der praktischen Umsetzung aufzeigt, dass Bauteilaktivierung im Wohnbau möglich ist und nicht nur einen Beitrag zu einem zukünftig CO₂-optimierten Gebäudeportfolio sondern auch zur Erhöhung des NutzerInnenkomforts und einer nachhaltig energieeffizienten Nutzung beitragen. Das Projekt liefert für das Land Salzburg die Grundlagen, inwieweit die Bauteilaktivierung in der Kombination mit Wärmepumpentechnologie im mehrgeschossigen Wohnbau zukünftig eingesetzt werden kann.



Abbildung 3: Demonstrationsgebäude –Holz Hybridbau, Bernhofer Gründe in Kuchl (Quelle: Studio b&f Planungs OG)

2. Simulationsbericht Bauteilaktivierung - Holz Hybridbau

2.1. Angewendete Methode

Für den Bau der Wohnanlage Bernhofergründe in Kuchl soll ein System zur Bauteilaktivierung im geförderten Wohnbau umgesetzt werden. Im Rahmen der Entwurfsplanung soll das Projekt bereits mit dynamischer Gebäudesimulation begleitet werden.

Mit dem Modell sollen als erste Grundlage für eine spätere Optimierung der Ausführungsplanung zwei wesentliche Ergebnisse generiert werden:

- Eine Bewertung des thermischen Verhaltens zweier nahezu baugleicher Wohnanlagen, einmal mit und einmal ohne Bauteilaktivierung unter Berücksichtigung aller nach heutigem Planstand bekannten Randbedingungen.
- Bewertung des thermischen Verhaltens beider Baukörper bei sich ändernden Randbedingungen wie Energieversorgungssysteme, aktivierbare Speichermassen und Qualität der Gebäudehülle.

Für die Simulation kommt die Software IDA ICE (Indoor Climate and Energy) in der Version 4.7 zur Anwendung. IDA ICE ist ein Programm zur detaillierten dynamischen Simulation von Gebäuden. Es berechnet den korrekten zeitlichen Verlauf von Energieflüssen (dem Raum zu- und abgeführte Wärmeleistung, Primärenergieverbräuche usw.) und von Komfortvariablen (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchte, CO₂-Konzentration) in den vom Anwender definierten Zonen. Dabei stehen die Zonen im Kontakt zu ihrer Umgebung und zu den an sie angrenzenden Räumen sowie den in ihnen sich befindenden Personen, Geräten und Gegenständen. Somit berechnet IDA ICE die dynamische Wechselwirkung zwischen Gebäude, Klima, Haustechnik und Benutzer.

2.2. Aufbau Grundmodelle

Für die unter „Fragestellung“ erstgenannte Leistung werden in IDA ICE zwei unabhängige thermische Modelle erstellt. Beide Baukörper werden multizonal modelliert, wobei jede Wohneinheit, das Stiegenhaus und die Tiefgarage jeweils eine Zone darstellen.

Für beide Modelle werden in einem ersten Schritt idente Randbedingungen angesetzt, um die wichtigsten Einflussfaktoren für die Umsetzung einer Bauteilaktivierung zu isolieren und die Unterschiede im thermischen Komfort sowie im Energiebedarf zu quantifizieren. In einem

zweiten Schritt werden die einzelnen Modelle an ihre tatsächlichen Randbedingungen angepasst, um eine Aussage über die Auswirkungen der verschiedenen Bauweisen zu treffen. Diese Leistungen umfassen noch keine Varianten zu Versorgungssystemen, Gebäudehüllqualität, aktivierbare Speichermassen oder anderen Randbedingungen.

Aufbau Varianten

Für die Untersuchung verschiedener Randbedingungen werden in Absprache mit der Bauherrschaft und dem Planungsteam folgende Varianten für den Baukörper mit Bauteilaktivierung abgebildet:

- Änderung der aktivierbaren Speichermassen der Innenbauteile
- Anpassung der Gebäudehüllqualität
- Aufbau des Wärmeversorgungssystems wie vorgesehen

Durchführung der Simulationsvarianten und Ergebnisdarstellung

Die Eingabedaten zum Simulationsmodell werden in den Sitzungsterminen, telefonisch und/oder per Email mit der Bauherrschaft und dem Planungsteam besprochen. Daraufhin werden folgende Berechnungen durchgeführt und deren Ergebnisse im Planungsteam kommuniziert sowie in einem Bericht bei Abschluss des Projekts dargestellt:

- Bewertung des Innenraumklimas durch Auswertung der Temperaturverläufe, Raumluftfeuchten und CO₂-Konzentrationen im Winter und Sommer
- Bewertung der Unterschiede im Energiebedarf des Gebäudes durch Einsatz einer Bauteilaktivierung mittels Kommunikation der monatlich erforderlichen Energiemengen für die Sicherstellung des thermischen Komforts
- Bewertung der Unterschiede durch Anpassung der Gebäudehüllqualität und der internen Speichermassen mittels Dokumentation der Änderungen in Komfort und Energiebedarf
- Bewertung des Nutzens regenerativer, am Standort verfügbarer Versorgungssysteme durch Darstellung der Änderung des Endenergiebedarfs
- Simulation der geplanten Ausführungsvariante mit dem geplanten Versorgungssystem

2.3. Vorgehensweise

In der ersten Phase der Untersuchungen wurde ein etwas vereinfachter Vergleich zwischen Massivbau und Hybridbau durchgeführt in Bezug auf die zu erwartenden Temperaturen und die Übertemperaturgradstunden im Sommer. Zudem wurde geprüft, ob die Gebäudehülle des Hybridbaus thermisch gut genug ist, um mit der Bauteilaktivierung die Komfortanforderungen im Winter zu erfüllen (oder ob z.B. eine Lüftungsanlage oder sonstige Maßnahmen notwendig sind). Außerdem wurde ein Vergleich des Sommerkomforts mit verschiedenen passiven Sommermaßnahmen erstellt.

Die zweite Phase beinhaltet die Modellierung der Haustechnik und die Abstimmung der Regelungstechnik. In diesem Abschnitt steht die Untersuchung der Energieflüsse im Vordergrund, zusätzlich können die Temperaturen, welche sich für die einzelnen Abnehmer (Warmwasser, Heizung und Kühlung) einstellen, aufgezeichnet, analysiert und optimiert werden

2.4. Phase I – Modell und Analyse der Gebäudehülle

Die erste Phase besteht aus mehreren Teilschritten:

1. Modellierung mit allen bekannten Randbedingungen, Annahmen bei nicht vorliegenden Eingangsdaten
2. Heiz- und Kühllastberechnung des Hybridbaus zur Dimensionierung der Bauteilaktivierung
3. Jahressimulation „idealisiert“, zur Identifizierung kritischer Zonen und Einschätzung des Wärmebedarfs
4. Modellierung der tatsächlichen Wärmeabgabesysteme, Radiatoren im Massivbau bzw. BTA im Hybridbau (*Anm. tatsächlich kommt im Projekt eine Fußbodenheizung zur Ausführung, Fußbodenheizung statt Radiatoren aufgrund der Simulationsergebnisse*)
5. Simulation der Winterperiode zur Studie des Trägheitsverhaltens der BTA
6. Simulation der Sommerperiode und Untersuchung verschiedener Sommerstrategien

Das Modell in der Geschoßplanansicht (links - Erdgeschoß) und in der 3D-Ansicht (rechts) ist in Abbildung 4 gezeigt, Tabelle 1 enthält die Übersicht der Eingabedaten. Die Zeitpläne für die internen Lasten nach SIA 2024 für Mehrwohngebäude sind in Abbildung 5 dargestellt.

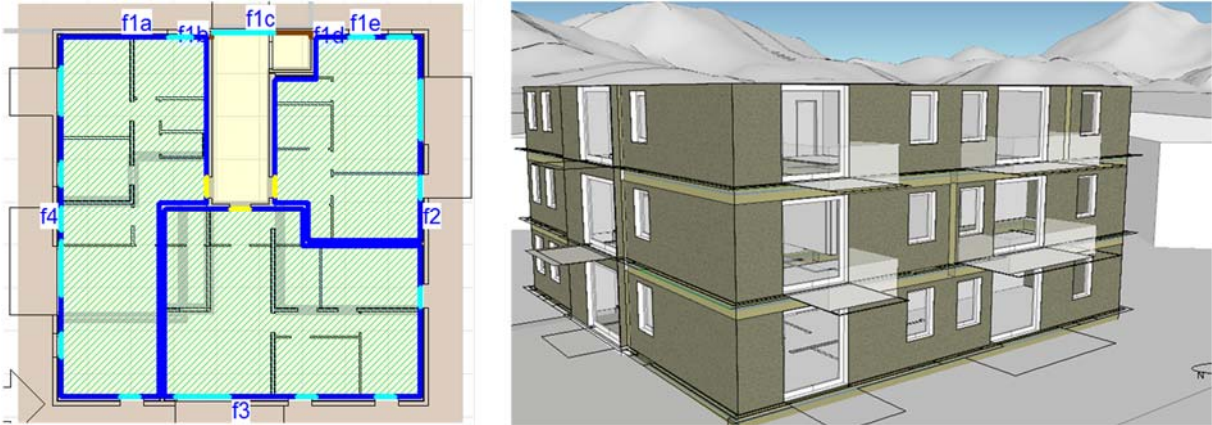


Abbildung 4: Geschoßplan und 3D-Ansicht des Gebäudemodells

Tabelle 1: Übersicht der Eingabedaten (spezifische Werte auf Zonenfläche bezogen \approx Nutzfläche)*

Geometrie	<p>Geometrie nach DWG Plänen, Stand März 2016</p> <p>Wohnungsweise Zonierung + Treppenhaus und Keller (nicht konditioniert)</p> <p>In Summe 12 Zonen pro Gebäude</p>
Klimadaten	Datensätze der ASHRAE für den Standort Salzburg-Flughafen
Verschattung	<p>Umgebende Verschattung aus Google Earth</p> <p>Bauliche Verschattung nach Plänen</p> <p>Keine bewegliche Verschattung</p>
Bauteile	<p>Nach EAW mit U-Werten $\approx 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Außenwand und Dach</p> <p>Decke zu Keller $U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$</p> <p>Verglasung $U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$; g-Wert = 0,5</p> <p>Fenster U-Wert gesamt: 0,80 - 0,86 $\text{W/m}^2\text{K}$</p> <p>Wärmebrückenzuschlag Fenstereinbau: 0,05 W/mK</p>
Interne Wärmequellen	<p>Anzahl der Personen: 0,0286 pro m^2 (35 m^2 Wohnfläche pro Person)</p> <p>Geräteleistung: 0,75 W/m^2</p> <p>Beleuchtung: 1,00 W/m^2</p> <p>Verteilung nach SIA Zeitplänen</p>
Infiltration	0,4 h^{-1} konstant verteilt auf die Zonen (hygienischer Luftwechsel nach EAW)
Warmwasserbedarf	50 Liter pro Person und Tag bei 21 Personen; mit Verteilungsplan für Morgen- und Abendspitzen

* Randbedingungen werden wenn möglich vereinfacht, manchmal zu Vergleichszwecken an Normvorgaben angepasst. Bei der im aktuellen Planungsstand unsicheren Datenlage (vor allem Bewohneranzahl und Profile) wurde derzeit bewusst darauf verzichtet, zusätzliche Unsicherheiten in das Gesamtsystem einzubringen (wie Vermutungen über den Winddruck oder Lüftungsverhalten). Wann immer Eingabedaten einen gleichbleibenden Effekt auf die Aussagekraft der Ergebnisse zu erwarten lassen, werden sie vereinfacht modelliert. Es gilt die Regel: Nur so genau wie notwendig. Eine spätere Detaillierung bei besserer Datenlage kann immer noch erfolgen.

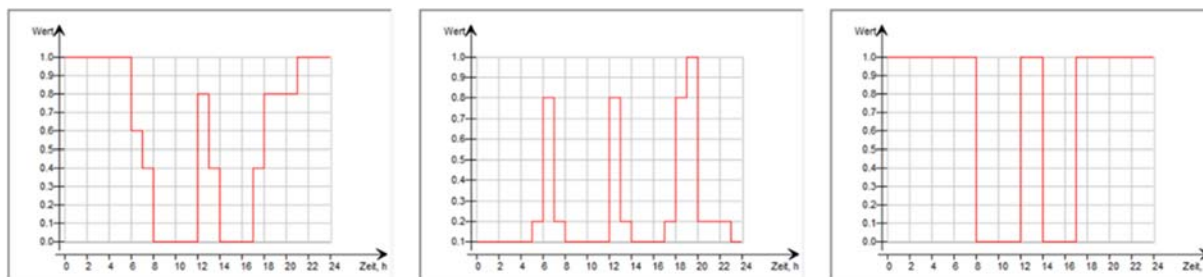


Abbildung 5: Zeitpläne nach SIA 2024 für Personenanwesenheit, Gerätebetrieb und Lichtbedarf (v. l. n. r.)

Bei der Heiz- und Kühllastberechnung werden die Maximalwerte der Wärme- und Kälteabgabe zur Dimensionierung der Wärmeabgabesysteme bestimmt. Diese Lastberechnungen wurden mit folgenden Randbedingungen simuliert:

- Heizlastberechnung
 - Synthetisches Klima für den 15. Januar mit einer Außentemperaturschwingung um die Normtemperatur von -13 °C (Amplitude = 1 °K zur Annäherung an Randbedingungen der Norm-Heizlastberechnung), ohne interne Wärmequellen, ohne solare Einstrahlung
 - Sollwert Heizen = 20 °C , zur Dimensionierung der Radiatoren und Bauteilheizung
- Kühllastberechnung
 - Design-Daten der ASHRAE für Salzburg Flughafen (IWEC2-Datensatz Nr. 111500, Jahr 2013), mit internen Wärmequellen
 - Sollwert Kühlen = 26 °C , zur Dimensionierung der Bauteilkühlung

Anschließend an die Heiz- und Kühllastberechnung erfolgte eine idealisierte Ganzjahressimulation mit dem Klimadatensatz für Salzburg Flughafen der ASHRAE Klimadatenbank. Die Wärmeabgabesysteme in den Zonen wurden dabei idealisiert betrachtet. Die Aussagekraft dieser Simulationsergebnisse ist beschränkt auf Einzelaussagen zur Gebäudehülle und es kann ein annähernder HWB-Vergleichswert zu einfacheren Bewertungsprogrammen ermittelt werden. Außerdem können damit Szenarien für den Sommerkomfort untersucht werden. Nach der idealisierten Betrachtung wurden im Hybridbau die Decken der Wohnungen (22 cm Stahlbeton) mit Bauteilaktivierung mit einer Einbautiefe von 8 cm von der Deckenoberfläche ausgestattet. Im Modell des Massivbaus wurden die idealen Abgabeelemente mit wassergeführten Radiatoren ersetzt. Die Dimensionierung erfolgte mit den aus der Heiz- und Kühllastberechnung ermittelten Lastdaten für jede Zone. Anschließend wurde erneut eine Jahressimulation durchgeführt und das Verhalten der beiden Abgabesysteme untersucht. Dabei wurde der Fokus vor allem auf den Winter gelegt (schnell reagierendes vs. träges System),

sowie auf den Sommerfall für die BTA (können damit Temperaturen unter 27°C ohne weitere Sommerstrategien eingehalten werden?)

2.5. Phase II - Haustechnikmodell

Zur besseren Übersichtlichkeit wird die Beschreibung des Haustechnikmodells in zwei Teilabschnitte gegliedert. Auf der einen Seite steht die Abnehmerseite, für welche bestimmte Temperaturniveaus und Massenströme definiert sind (Heiz- und Kühllast durch die Zonen gemäß der Bestimmung in Phase I und mit hinterlegter Heizkurve, Warmwasser durch Personen*spez. Verbrauch gemäß Erfahrungswerten der Bauherrschaft und Temperaturniveau gemäß Normvorgabe). Auf der anderen Seite steht die Erzeugerseite zur Deckung dieses Bedarfs mit Solarthermie und Wärmepumpe, die bestimmte limitierende Parameter aufweisen (Fläche, Effizienz, Leistungsgrenzen, maximal mögliche Temperaturdifferenzen u.Ä.). Durch die Simulation kann das optimale Zusammenspiel von Erzeuger- und Abnehmerseite mit bester Ausnutzung des Speichers gefunden werden.

Der derzeitige Planungsstand erlaubt es nicht, sämtliche Komponenten so zu dimensionieren, wie sie tatsächlich im Bauvorhaben umgesetzt werden. Daher werden für viele Parameter derzeit Annahmen getätigt, welche bei besserem Planungsstand immer näher an die Realität angepasst werden. Dazu gehören vor allem die eingesetzten Pumpen oder die genaue Parametrisierung des Wärmetauschers für die Grundwasserkühlung. Für die Wärmepumpe und den Solarthermie Kollektor sind Vorschläge für die Dimensionierung vorhanden, welche unten (Erzeugerseite) näher beschrieben sind. Für alle nicht genannten Eingangsgrößen sind Standardwerte des Simulationsprogramms angesetzt.

Abbildung 6 zeigt das Modell der warmen Abnehmerseite (vom Speicher an die Zonen bzw. Warmwasserverbrauch) sowie den Kühlkreislauf. Der Wärmespeicher umfasst 6,7 m³ Volumen bei einer Höhe von ca. 4 Meter und wird angelehnt an die schematische Darstellung der Haustechnikplanung mit 30 Schichten simuliert. Die Dämmung des Speichers ist mit 20 cm Mineralwolle berücksichtigt, als Umgebungstemperatur des Speichers für die Berechnung der Wärmeverluste wird entsprechend der Aufstellung jene des Kellers angesetzt. Die gewünschte Temperatur der Warmwasserbereitung liegt bei 55 °C, die angenommene Temperatur des Kaltwassers beträgt 5 °C. Der Massenstrom zu jedem Zeitpunkt ist durch die Anzahl der Personen und den Verteilungszeitplan vorgegeben (siehe Abbildung 7). Die Temperaturniveaus der Bauteilheizung und -kühlung werden mit 40 °C für den Winterfall und 18 °C für den Sommerfall definiert. Sichertgestellt werden diese Temperaturen über eine Rücklaufbeimischung, die bei zu hohen Vorlauftemperaturen der Heizung bzw. bei zu geringen Temperaturen der Kühlung entsprechend Rücklauf beimischt, um die Solltemperaturen möglichst

zu erreichen. Die Quelltemperatur des Grundwassers wird derzeit mit konstanten 10 °C angesetzt. Der Massenstrom und das Temperaturniveau nach dem Wärmetauscher werden als Eingangsbedingungen für den Verdampfer der Wärmepumpe angesetzt. Das bedeutet, dass bei Betrieb der Bauteilkühlung im Sommer die Wärmequelle der Wärmepumpe vorgewärmt wird. Der Effekt einer kurzfristigen Effizienzsteigerung der Wärmepumpe bei gleichzeitigem Betrieb mit der Kühlung ist daher berücksichtigt.

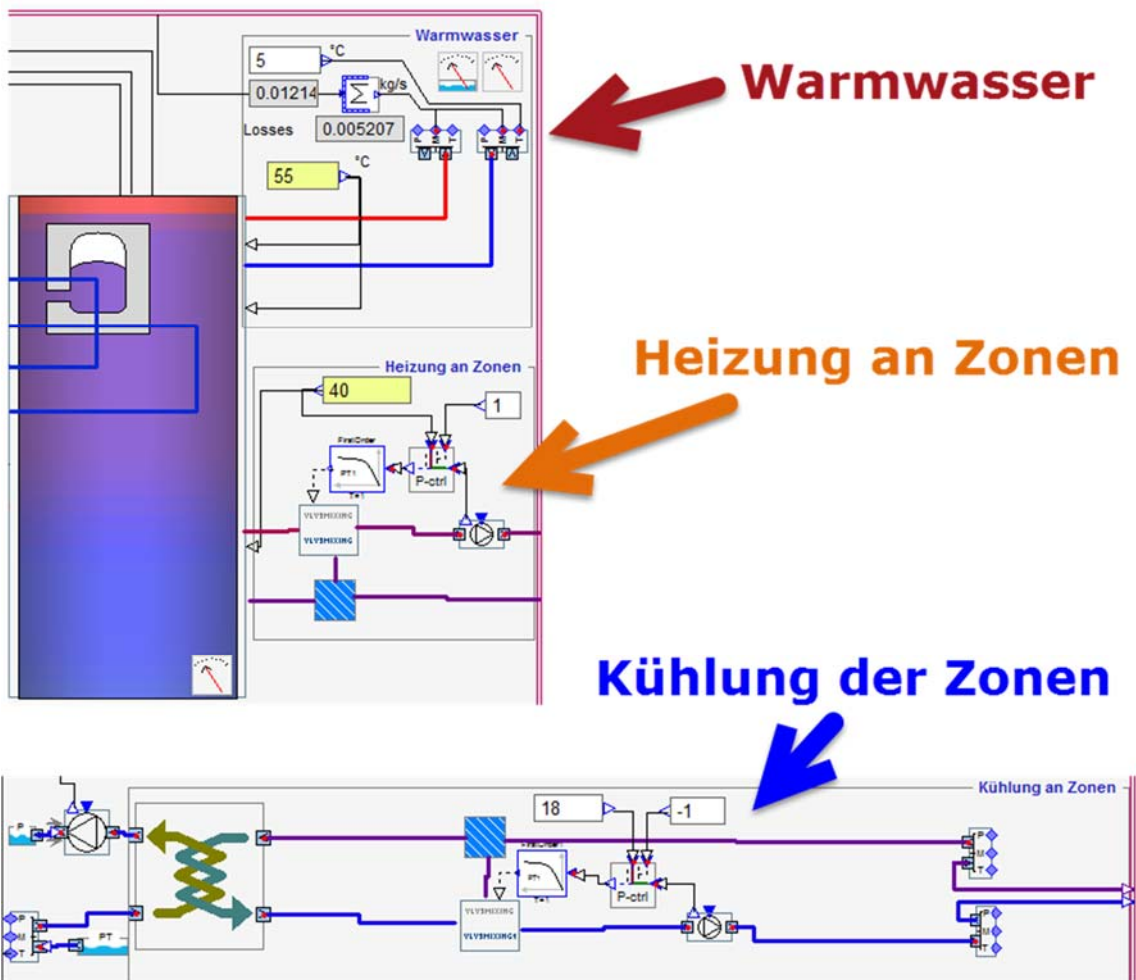


Abbildung 6: Modell der Abnehmerseite



Abbildung 7: Randbedingungen für Warmwasserbedarf und Verteilungsplan Warmwasser (rechts)

Abbildung 8 zeigt das Modell der Erzeugerseite mit der Solarthermie und dazugehörigen Komponenten sowie der Regelungstechnik. Im unteren Bereich sind die Wärmepumpe sowie das Modell für die Photovoltaik-Anlage dargestellt. Anlagenkomponenten wurden nach Abstimmung mit der Haustechnikplanung dimensioniert. Die Wärmepumpe hat eine gesamte Wärmeleistung von 46 kW mit einem COP von 6,41 bei Auslegungsbedingungen. Die Größe der Solarkollektoren beträgt 50 m² mit einem Anstellwinkel von 45° und südseitiger Ausrichtung (Azimut = 180°). Die solarthermische Anlage speist die Wärme abhängig von der Differenz zwischen Vorlauf- und Speichertemperatur auf Eingangshöhe über ein zweistufiges Wärmetauschersystem im unteren Bereich des Wärmespeichers ein. Diese Abhängigkeiten sind von der Haustechnikplanung vorgegeben und in dem Regelungs makro „SOLCCTRL“ (steht für „Solar Control“) hinterlegt. Die Wärmepumpe wird in Abhängigkeit der vorliegenden Speichertemperatur in den obersten Schichten geregelt und soll diese Schichten möglichst auf dem Sollwert von 55 °C halten (in „WPCNTRL“ abgebildet). Die Größe der Photovoltaik-anlage für die Simulation wird über eine Daumenregel ermittelt. Laut Planungsstand soll die PV-Anlage eine Peakleistung von 3 kW erbringen. Als ungefähre Größenordnung kann angesetzt werden, dass 8 m² Photovoltaik ca. 1 kWp entsprechen. Damit werden, bis genauere Anlagendaten vorliegen, 24 m² südseitig ausgerichtete Photovoltaik bei einem Neigungswinkel von 15° angesetzt.

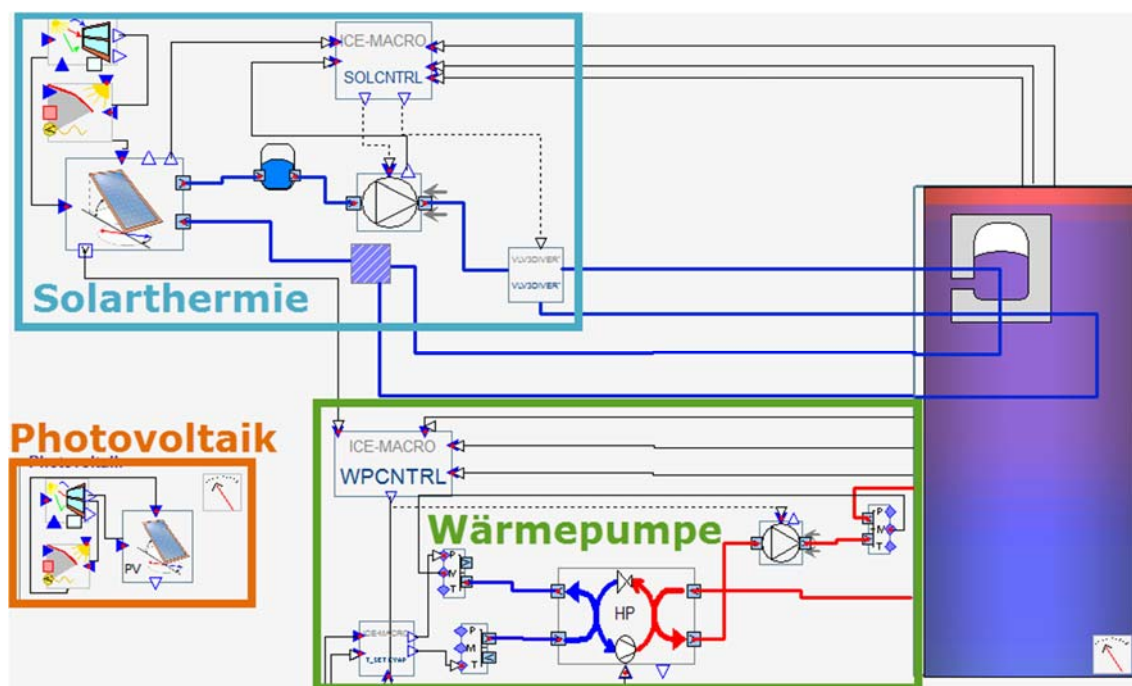


Abbildung 8: Modell der Erzeugerseite bis Speicher

3. Ergebnisse und Empfehlungen

Im aktuellen Projektstadium liegen noch keine Ergebnisse der Endenergiebedarfswerte oder zu anderen Details zur Haustechnik vor, sodass noch keine Ergebnisse auf dieser Ebene diskutiert werden können. Es sind in diesem Kapitel daher ausschließlich Ergebnisse der Komfortanalysen sowie daraus abgeleitete Empfehlungen enthalten. Zudem werden abschließend Vorschläge für weitere mögliche Untersuchungen unterbreitet.

3.1. Heizlast- und Kühllastberechnung

Abbildung 9 zeigt die visuelle Darstellung der sich ergebenden Heiz- und Kühllasten für den Massivbau, Abbildung 10 zeigt dieselbe Darstellung für den Hybridbau. Im Winter sind die kritischen Zonen die große Erdgeschoßwohnung und die Wohnungen im 2. Obergeschoß, im Sommer die südwestseitig gelegene Eckwohnung im OG1.

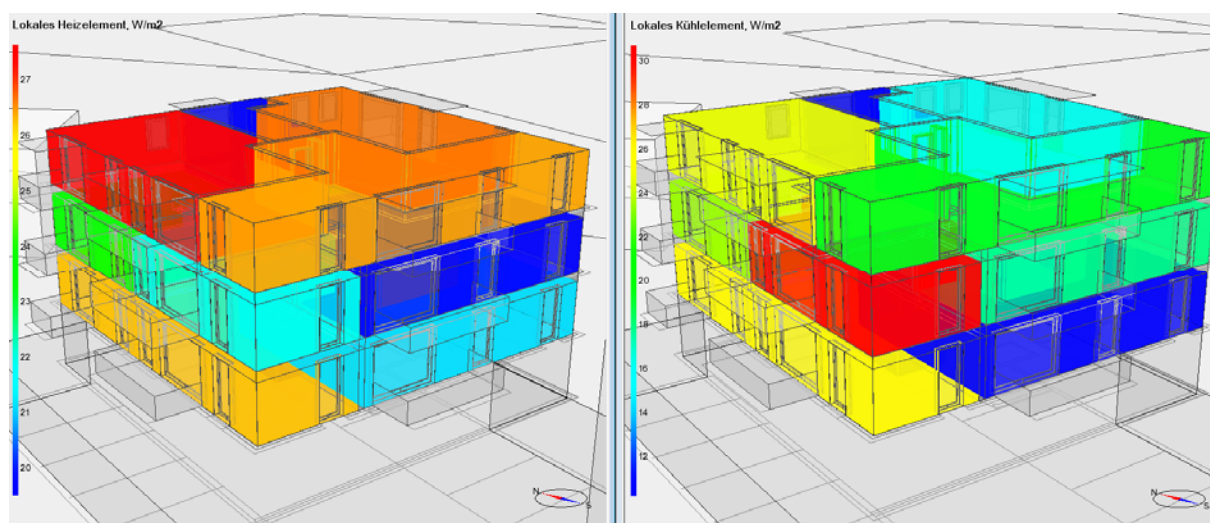


Abbildung 9: Visualisierung der Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung für den Massivbau

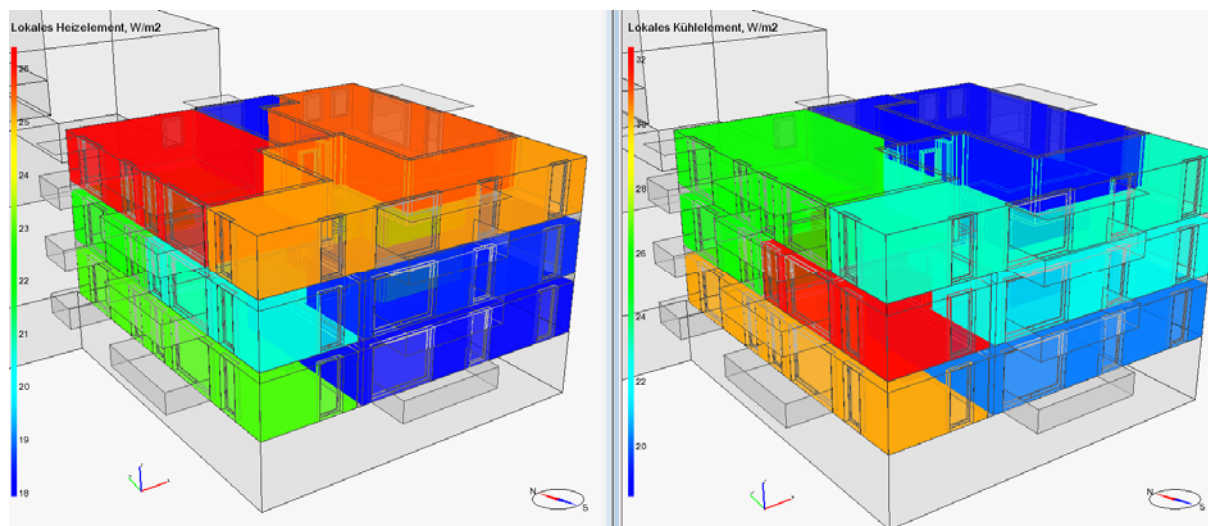


Abbildung 10: Visualisierung der Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung für den Hybridbau

Zone	Lokale Heizung, W/h	Lokale Kühlung, W/h	Zeit
TH+Aufzug	0.0	0.0	
EG.Top1	2460	2466	15 Jul 19:17:47
EG.Top2	1989	963.2	15 Sep 15:28:38
EG.Top3	1505	880.0	15 Jul 09:12:57
OG1.Top7	1356	969.8	14 Aug 09:26:37
OG1.Top4	1033	1030	15 Jul 19:17:47
OG1.Top6	1638	1500	15 Okt 14:06:59
OG1.Top5	1276	1798	15 Jul 19:17:47
OG2.Top8	2245	2021	15 Jul 19:17:47
OG2.Top9	2213	1625	15 Sep 15:57:17
OG2.Top10	2121	1301	15 Jul 09:25:53
KG.Keller	0.0	0.0	
Total	17836.0	14554.0	

Zone	Lokale Heizung, W/h	Lokale Kühlung, W/h	Zeit
TH+Aufzug	0.0	0.0	
EG.Top1	2390	2750	15 Jul 19:16:23
EG.Top2	1955	1294	15 Okt 15:42:19
EG.Top3	1464	1107	15 Jul 09:02:37
OG1.Top4	991.3	1152	15 Jul 19:16:23
OG1.Top5	1215	1932	15 Jul 19:16:23
OG1.Top6	1574	1858	15 Okt 14:12:19
OG1.Top7	1300	1179	15 Jul 09:02:37
OG2.Top8	2162	2171	15 Jul 19:16:23
OG2.Top9	2131	1898	15 Okt 15:42:19
OG2.Top10	2053	1575	15 Jul 09:02:37
KG.Keller	0.0	0.0	
Total	17235.3	16916.0	

Abbildung 11: zonenweise Heiz- und Kühllasten für Massivbau (links) und Hybridbau inkl. Zeitpunkte der maximalen Kühllast

3.2. Jahressimulation idealisiert

Abbildung 12 zeigt die tabellarische und grafische Bilanz aus IDA ICE für den beheizten Bereich des Gebäudes (links) sowie die Häufigkeitsverteilung der relativen Luftfeuchte im Keller mit der errechneten Anzahl der Jahresstunden über 90% (rechts).

Die Ergebnisse für „Fenster&Solar“ in der Bilanz (rot markiert) zeigen die Netto-Energiemengen der Fenster (Gewinne – Verluste), die Spalte „Lokales Heizelement“ entspricht dem erforderlichen Heizwärmebedarf der Zonen (idealisiert). Der errechnete Heizwärmebedarf liegt bei rund 25 kWh/(m²_{BGF}*a). Gut erkennbar ist die negative Wärmebilanz der Fenster in der Heizperiode, vor allem für die west- und nordseitig gelegenen Fenster, aber auch (etwas geringer) für die Süd- und Ostseite. Während der Jahressimulation zeigten sich im Keller in den Übergangsmonaten deutliche Feuchtespitzen, die zu mehrfachen Taupunktunterschreitungen in der Simulation geführt haben. Dies lässt darauf schließen, dass es beim momentanen Planungsstand im Keller zur Sommerkondensation kommen wird.

Zonengruppe(n) beheizt

Monat	Hülle & Wärmebrücken	Innenwände und Massen	Fenster & Solar	Mech. Zuluft	Infiltration & Öffnungen	Personen	Geräte	Kunstlicht	Lokales Heizelement
1	-1491.2	-713.0	-710.7	0.0	-2529.1	718.4	204.7	273.0	5138.1
2	-1293.2	-937.1	-29.4	0.0	-3386.6	648.9	184.9	248.6	4066.4
3	-1180.8	-1095.8	627.3	0.0	-2822.3	718.5	204.7	273.0	3192.8
4	-748.2	-1068.3	1697.4	0.0	-1883.3	648.9	184.9	248.6	824.8
5	-645.1	-1080.9	2335.3	0.0	-1752.2	585.3	204.7	273.0	6.3
6	-583.0	-1291.6	3285.3	0.0	-1427.3	493.5	198.1	264.2	0.0
7	-564.4	-893.7	3297.7	0.0	-1748.5	372.9	204.7	273.0	+0.0
8	-527.3	-843.8	1946.8	0.0	-1982.2	331.2	204.7	273.0	0.0
9	-524.3	4.8	1191.6	0.0	-1741.0	552.9	198.1	264.2	+0.0
10	-641.1	-38.3	945.7	0.0	-2025.3	671.9	204.7	273.0	526.2
11	-1121.3	-172.0	-233.2	0.0	-2696.0	696.2	198.1	264.2	2487.9
12	-1455.2	-989.4	-841.2	0.0	-3429.8	721.2	204.7	273.0	5404.1
Gesamt	-10746.3	-8171.4	11937.6	0.0	-28048.8	7173.3	2410.3	3214.0	22406.4
In Heizperiode (2015.0 h)	-6904.7	-3967.1	-1534.8	0.0	-17928.4	4275.2	1220.7	1627.6	22606.8
In Kühlperiode (1814.0 h)	-2260.1	-3261.0	8220.7	0.0	-9833.1	1319.4	669.4	892.7	0.0
Übrige Zeit	-1581.5	-1943.3	-4851.7	0.0	-4307.3	1578.7	520.2	693.7	-0.4

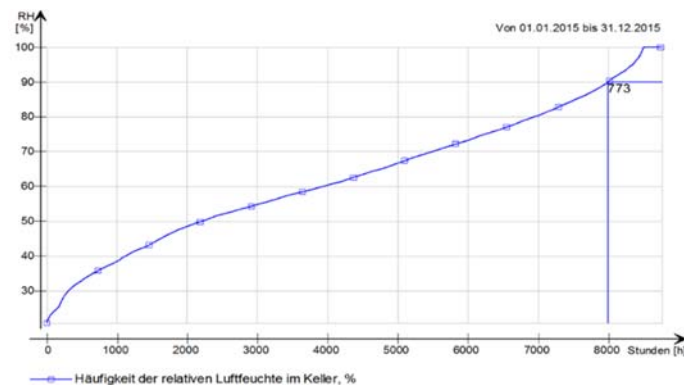
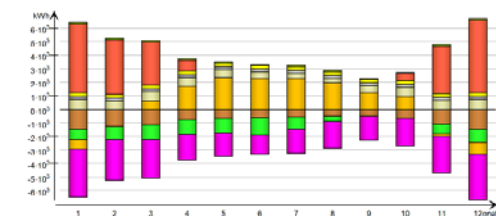


Abbildung 12: Monatliche Energiebilanz des beheizten Gebäudeteils und Häufigkeit der relativen Luftfeuchte über 90% im Keller

Ebenfalls wurde durch die Jahressimulation die Anzahl der Nutzungsstunden mit einer operativen Temperatur über 27 °C analysiert (Abbildung 13). Hier zeigen die Wohnungen in den

oberen beiden Geschößen des Hybridbaus die höchsten Ergebnisse. Die Vergleichsergebnisse des Massivbaus sind hier, bedingt durch die höhere Masse und die andere Verschattungssituation, deutlich besser. Vor allem in der Übergangszeit ist der Massivbau südseitig vom davorstehenden Holzbau verschattet, der Hybridbau dagegen ist von allen relevanten Seiten stärker besonnt. Die kritische Zone im Massivbau ist die kleine südwestseitig gelegene Wohnung im ersten Obergeschoß. Trotz den deutlich besseren Ergebnissen werden zur Sicherstellung des Sommerkomforts im Massivbau Strategien erforderlich sein, bestimmte Wohnungen gegen Überhitzung zu schützen (z.B. bewegliche Verschattung, Nachtlüftung).

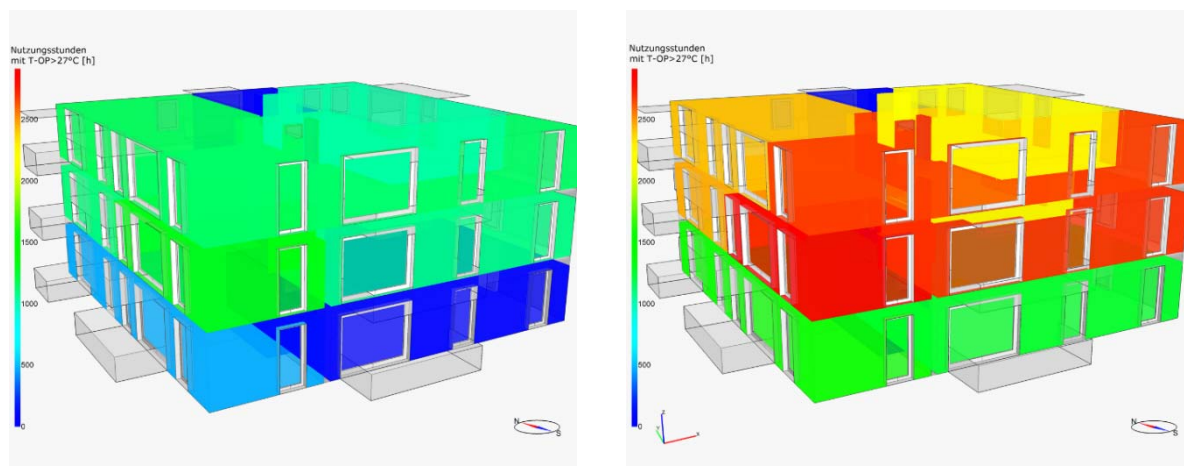


Abbildung 13: Anzahl der Stunden mit einer Temperatur über 27 °C – Massivbau links, Hybridbau rechts

3.3. Vergleich von Radiatoren und Bauteilaktivierung im Winter

Abbildung 14 zeigt den Vergleich der operativen (gefühlten) Temperatur in einer der kritischen Zonen für die erste Februarwoche. Es ist zu sehen, dass die gefühlte Temperatur im Hybridbau höher ist und geringeren Schwankungen unterliegt, unter anderem durch die größeren Wärmeabgabeflächen aber auch durch die erhöhten Oberflächentemperaturen der Decke. Die gefühlten Temperaturen sind bei Einsatz von Radiatoren tendenziell geringer, da diese in erster Linie die Luft erwärmen, während die Bauteilaktivierung einen viel höheren Anteil an Wärmestrahlung liefert. Durch das trägere System der Bauteilaktivierung kommt es aber auch des Öfteren zum Über- bzw. Unterschreiten der Regelgrenzen, was bei der Festlegung der Raumsolltemperatur berücksichtigt werden sollte. Eine Empfehlung für die Verbesserung des Regelverhaltens wäre, auf die Einzelraumregelung zu verzichten und stattdessen die Optimierung der Heizkurve in Abhängigkeit der Außentemperatur anzustreben.

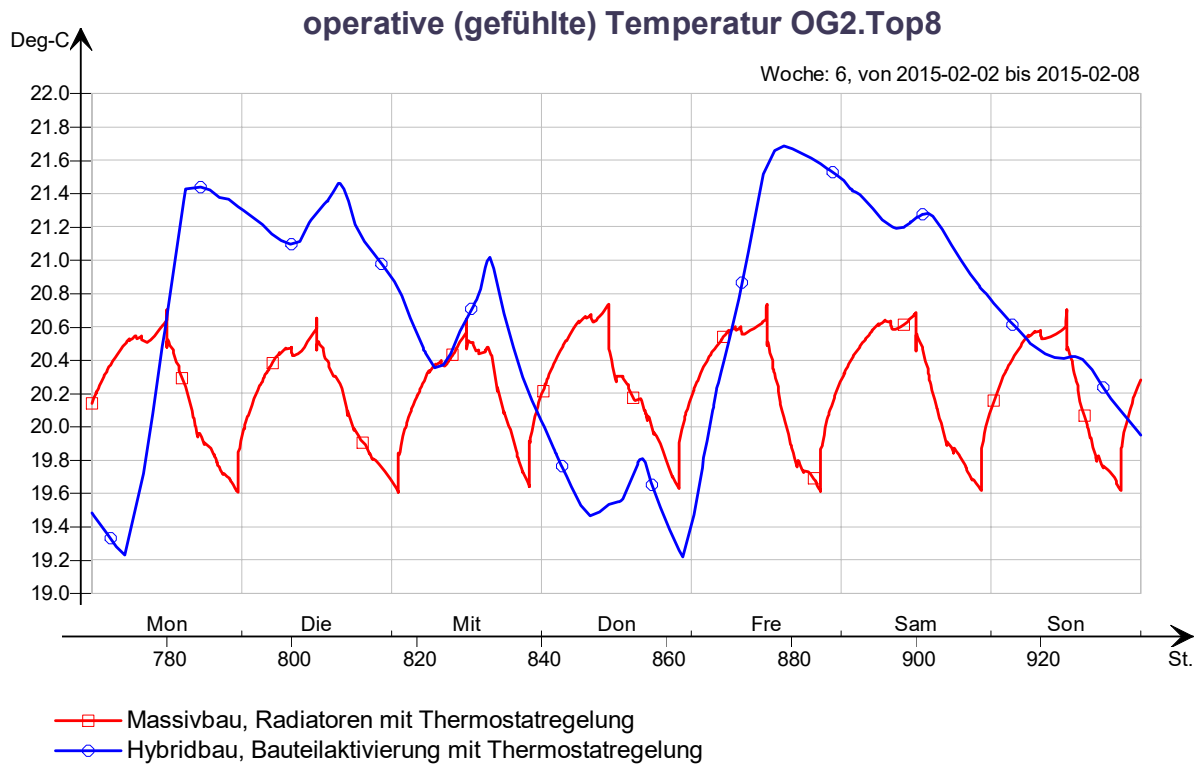


Abbildung 14: Verlauf der operativen Temperatur für Radiatoren und Bauteilaktivierung für eine Februarwoche

3.4. Vergleich der Sommerstrategien

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der operativen Temperatur für die untersuchten Sommerstrategien der ersten Juliwoche der Simulation für den Hybridbau. Die rote Kurve markiert den schlechtesten anzunehmenden Fall in dieser Woche, ohne Verschattung und ohne Fensteröffnung. Der Verlauf in Grün zeigt eine Nachtlüftungsstrategie (ebenfalls keine Verschattung), in der die Fenster abends zwei Stunden und morgens eine Stunde lang geöffnet werden, sofern die Innenraumtemperatur über 26 °C liegt. Diese Auskühlung durch die Fensterlüftung ist im Kurvenverlauf deutlich zu erkennen, reicht aber nicht aus, um die Temperaturen auch tagsüber unter 27 °C zu halten. In blau ist der Verlauf mit der Bauteilkühlung im Hybridbau gezeigt. Mit dieser aktiven Wärmeabfuhr ist es kein Problem, die gewünschte Grenze von 27 °C selten bis gar nicht zu überschreiten. Auch die Ergebnisse des Massivbaus (hier nicht dargestellt) zeigen ähnliche Verläufe (etwas geringere Spitzen), weshalb weitere Untersuchungen zu den Möglichkeiten der Nachtlüftung bzw. zur Notwendigkeit von Sonnenschutzsystemen sinnvoll wären, da im Massivbau nicht die Möglichkeit einer „aktiven“ Kühlung besteht.

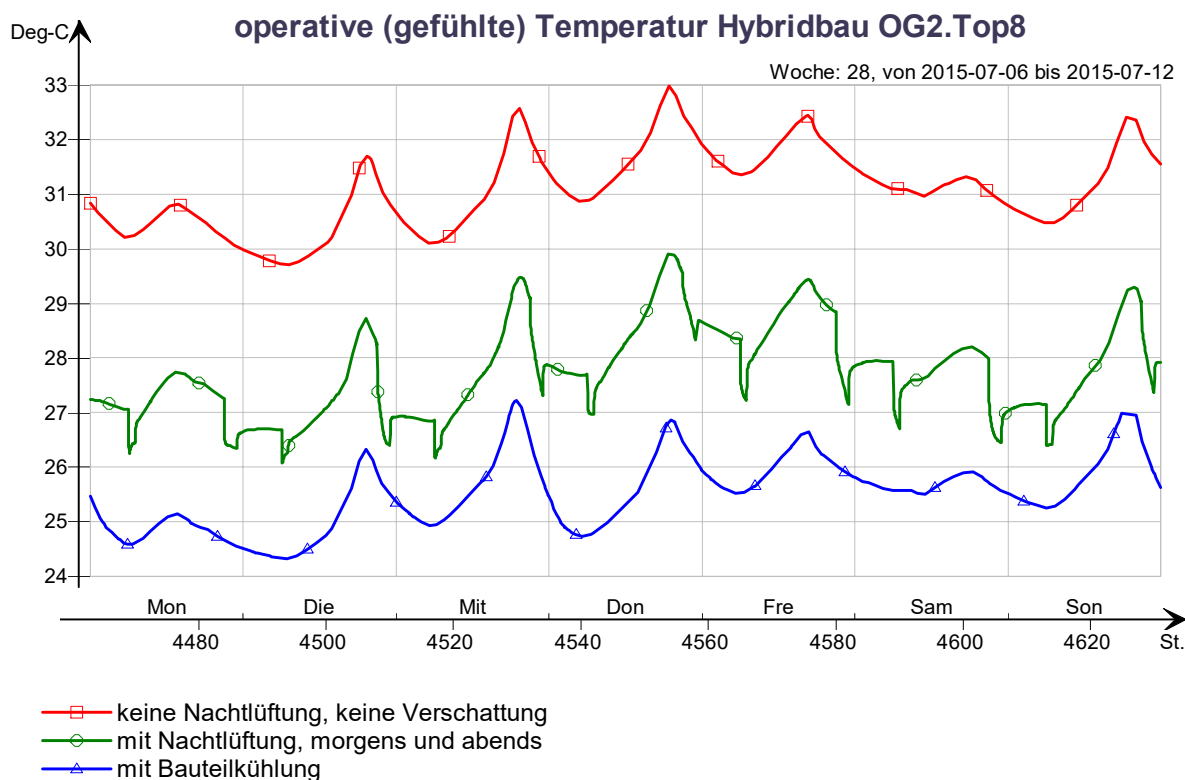


Abbildung 15: Vergleich der operativen Temperatur verschiedener Sommerstrategien

3.5. Empfehlungen aus den bisherigen Komfortuntersuchungen

Die Empfehlungen an die Bauherrschaft und das Planungsteam nach den ersten Komfortanalysen beinhalten folgende Punkte:

- Die großen Fenster im nördlich gelegenen Treppenhaus sollten bei architektonischer Vertretbarkeit etwas reduziert werden, da dies die größte Schwachstelle der Gebäudehülle ist.
- Der thermische Komfort kann im Winter auch bei Soll-Raumtemperaturen von 24 °C mit der Bauteilaktivierung erreicht werden. Eine spätere Abbildung eines vereinfachten Benutzerverhaltens sollte simuliert werden, um den zu erwartenden Temperaturabfall unter den Sollwert bei „falschem“ Lüftungsverhalten (z.B. Fenster über lange Zeit gekippt) abschätzen zu können und entsprechende Empfehlungen an die späteren Bewohner ausgesprochen werden können.
- Es sollten Maßnahmen bezüglich der Sommerkondensation diskutiert werden.
- Sollwert der BTA bei Verwendung von Raumthermostaten auf 21 – 22 °C ansetzen.
- Im Holz- und Massivbau sollten Verschattungssysteme für die kritischen Wohnungen vorgesehen werden.

- Die Möglichkeiten der Nachtauskühlung sollten weiter abgeklärt werden. Erfahrungsgemäß besteht hier ein erhebliches Optimierungspotenzial (Beseitigung unangenehmer Nebenerscheinungen, damit die Nachtauskühlung z.B. auch durch eine vorübergehende Unterkühlung voll genutzt werden kann).

3.6. Empfehlungen für weitere Untersuchungen des Hybridbaus

Auf Basis des erstellten Simulationsmodells können nun für die weiteren Planungsphasen verschiedenste Untersuchungen zum Gebäudeverhalten angestellt werden. Die Definition der Fragestellungen obliegt dem Planungsteam, im Folgenden werden lediglich einige Vorschläge angeführt, die zu einem besseren Verständnis der Funktionsweise des Gebäudes führen können.

- Für Hülle / Lastverringern
 - Kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung
 - Optimierung der Fenstergrößen aller Fassaden/Himmelsrichtungen hinsichtlich Energiebilanz und Tageslichtnutzung (siehe weiter unten „MOBO“)
 - Simulation von Lösungsstrategien für die Sommerkondensation im Keller
- Haustechnik
 - Variation der Größe der solarthermischen Anlage
 - Vergleich der GW-W-WP mit einer L-W-WP
- Effizienzverbesserung
 - Erweiterte Untersuchung der Regelungstechnik für die Bauteilaktivierung: „von der Einzelraumregelung zu einer optimierten Heizkurve.“
- Primärenergie + CO₂-Ausstoß der eingesetzten Energiemengen
 - mit und ohne Solarthermie
 - Für Gas bzw. Fernwärme oder andere Energieträger
- Mögliche Eigendeckungsanteile für verschiedene Stromverbraucher
 - Wieviel Strom kann durch die PV direkt gedeckt werden?
 - Was würde die Erweiterung mit einem Stromspeicher bringen?
- Optimierung von mehreren Einflüssen auf ein bestimmtes Optimierungsziel
 - z.B. gleichzeitige Optimierung von Dämmung, Fenstergrößen, Balkontiefen, optimale Größe der Solaranlage + PV hinsichtlich Energiebedarf im Betrieb, Primärenergie, Kosten, o.Ä. mit dem eigens dafür entwickelten Programm „MOBO“.

- Optimierung der Nachtlüftungsstrategien. Welchen Effekt hat die zeitweise Unterkühlung des Gebäudes in Sommernächten? Bringt die Auskühlung des Gebäudes über das unbeheizte Treppenhaus und den kühlen Keller durch automatische Klappenöffnung zusätzliche Vorteile?
- Optimierung der Regelung für die BTA im Winter
 - Untersuchung, ob die Optimierung der Regelung bzw. die Versorgung der Zonen mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen ein besseres Regelverhalten bringt (weniger Über- bzw. Unterschreiten der Regelgrenzen)
- Optimierung der Kombination aus Freecooling + WP im Sommer
 - Kann von den zeitweisen erhöhten COP-Werten der Wärmepumpe im Sommer profitiert werden? Kann die Wärmepumpe so geregelt werden, dass zu den Zeiten, in denen Kühlbedarf anfällt, die erhöhte Quelltemperatur ausgenutzt werden kann?
- Nutzerverhalten / Nutzertoleranz
 - Analyse des Innenraumklimas (Feuchte, Temperaturen, CO₂) bei „realem“ Nutzer- und Lüftungsverhalten über Fensterlüftung verglichen mit dem Einsatz einer kontrollierter Wohnraumlüftung

4. Ausblick

Gelingt die erfolgreiche Umsetzung, wird ein Demonstrationsprojekt mit Vorbildcharakter geschaffen, das in der praktischen Umsetzung aufzeigt, dass Bauteilaktivierung im sozialen Wohnbau möglich ist und nicht nur einen Beitrag zu einem zukünftig CO₂-optimierten Gebäudeportfolio, sondern auch zur Erhöhung des NutzerInnenkomforts und einer nachhaltig energieeffizienten Nutzung beitragen. Durch die umfassende Verbreitung der Evaluierungsergebnisse ist ein Multiplikatoreffekt für weitere Umsetzungen zu erwarten.

Eine weiterführende wissenschaftliche Begleitung bis hin zum Monitoring der drei Gebäude ist, abhängig weiterführender möglicher Förder- / Finanzierungsmöglichkeiten geplant.

weitere zukünftig geplante Arbeitspakete / Forschungsaktivitäten:

- Erstellung eines konstruktiven Pflichtenheftes für die Ausführungsplanung z.B. im Hinblick auf die Verbesserung der Reparatur- und Instandhaltungseigenschaften, der Werthaltigkeit sowie die Verbesserung der Recyclingtauglichkeit der Bauteile.
- Prüfung und Qualitätssicherung der Ausführungsplanung auf Übereinstimmung mit dem Pflichtenheft zur Ausführungsplanung bzw. mit den Anforderungen der Zertifizierung
- Beratende Mitwirkung bei der Ausführungsplanung
- Auswahl und Dokumentation der für die messtechnischen Nachweise notwendigen Referenzräume im Gebäude sowie Nachweis der Repräsentativität
- Begleitendes Monitoring / Monitoringkonzept
- Ökobilanz / Lebenszykluskostenvergleich der drei Baukörper abhängig von Bauweise (Holz-Hybridbau, Holzbau, Massivbau) und gebäudetechnischem Gesamtsystem

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Perspektive - Bernhofer Gründe in Kuchl (Quelle: Studio b&f Planungs OG)	2
Abbildung 2: Punkthäuser, Bernhofer Gründe in Kuchl (eigene Darstellung)	3
Abbildung 3: Demonstrationsgebäude –Holz Hybridbau, Bernhofer Gründe in Kuchl (Quelle: Studio b&f Planungs OG)	6
Abbildung 4: Geschoßplan und 3D-Ansicht des Gebäudemodells	10
Abbildung 5: Zeitpläne nach SIA 2024 für Personenanwesenheit, Gerätebetrieb und Lichtbedarf (v. l. n. r.)	12
Abbildung 6: Modell der Abnehmerseite	14
Abbildung 7: Randbedingungen für Warmwasserbedarf und Verteilungsplan Warmwasser (rechts)	14
Abbildung 8: Modell der Erzeugerseite bis Speicher	15
Abbildung 9: Visualisierung der Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung für den Massivbau	16
Abbildung 10: Visualisierung der Ergebnisse der Heiz- und Kühllastberechnung für den Hybridbau	17
Abbildung 11: zonenweise Heiz- und Kühllasten für Massivbau (links) und Hybridbau inkl. Zeitpunkte der maximalen Kühllast	17
Abbildung 12: Monatliche Energiebilanz des beheizten Gebäudeteils und Häufigkeit der relativen Luftfeuchte über 90% im Keller	18
Abbildung 13: Anzahl der Stunden mit einer Temperatur über 27 °C – Massivbau links, Hybridbau rechts	19
Abbildung 14: Verlauf der operativen Temperatur für Radiatoren und Bauteilaktivierung für eine Februarwoche	20
Abbildung 15: Vergleich der operativen Temperatur verschiedener Sommerstrategien	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Eingabedaten (spezifische Werte auf Zonenfläche bezogen ≈ Nutzfläche)*	11
--	-----------

Literaturverzeichnis

- Büttner, C. (2014). *Bauteilaktivierung als Grundlastheizung in einem Sonnenhauskonzept – Modellversuch und Simulation*. RWTH Aachen: Bau SIM 2014.
- Europäische Union. (2012). *Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden durch die Schaffung eines Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanford.* Brüssel.
- Handler, S. (2014). *Steigerung der Energieeffizienz von kleinvolumigen Wohnbauten*.
- Hausladen, G. (2010). *Potential und Einsatzgrenzen der Bauteilaktivierung im Wohnungsbau*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi, FIA News: 42. Ausgabe.
- Wimmer, A. (2004). *Thermoaktivierte Bauteilsysteme – Ein neuer simulationstechnischer Berechnungsansatz, Dissertation*. Universität Kassel.