



FH Salzburg
Design and
Green Engineering



KÜHLUNG IM WOHNBAU VARIANTENSTUDIE

ENDBERICHT

ZENTRUM ALPINES BAUEN



Alpines Bauen

Forschungs- und Transferzentrum

www.alpinesbauen.at

Autor*innen: Daniel Heidenthaler
Markus Leeb
Patricia Reindl

Auftraggeber: Land Salzburg Referat 4/04: Energiewirtschaft und -beratung

Kuchl, am 20.02.2025



FH Salzburg



LAND
SALZBURG

Zusammenfassung

Die Fachhochschule Salzburg führte im Auftrag des Landes Salzburg eine Variantenstudie zum Thema Kühlenergiebedarf im Wohnbau durch, um die Einflüsse verschiedener Parameter zu untersuchen. Dabei wurden unterschiedliche Kältebereitstellungs- und -abgabesysteme sowie passive Maßnahmen mittels dynamischer Gebäudesimulation variiert. Die Klimadaten stammten vom Standort Salzburg Flughafen, und die Simulationen wurden mit dem Programm IDA ICE durchgeführt. Neben Datensätzen zum typischen Klima wurden auch zwei Klimaszenarien in die Varianten miteinbezogen, um die Auswirkungen der Klimaerwärmung und somit der steigenden Relevanz der Gebäudekühlung nicht außer Acht zu lassen.

Das Ziel der Untersuchungen stellte eine belastbare, datenbasierte Grundlage für die zukünftige Implementierung und Formulierung von Anforderungen an die Kühlung von Wohngebäuden in Salzburg dar. Zudem sollte diese Variantenstudie einen Überblick und Vergleich verschiedener Kühlstrategien und deren Energieeffizienz darstellen.

Die Ergebnisse basieren auf Simulationen für den Gebäudetyp Mehrfamilienhaus (lt. OIB RL 6 - Kostenoptimalität) und können je nach Gebäudetyp und anderen Faktoren abweichen. Die generellen Einflüsse der variierten Parameter konnten jedoch gut dargestellt werden und sind für eine große Bandbreite von Gebäuden gültig.

Die Untersuchung zeigt, dass die beiden betrachteten Bauweisen sehr unterschiedlich auf die tageszeitlichen Temperaturschwankungen und die Einhaltung der Soll-Temperatur im Gebäude reagieren. Die Simulationsergebnisse zeigen auch, dass die Wahl der Soll-Innentemperatur erheblichen Einfluss auf den Kühlenergiebedarf hat. Niedrigere Soll-Temperaturen führen zu einem signifikant höheren Energiebedarf. Passive Maßnahmen wie Nachtlüftung und außenliegende Verschattung reduzieren den Kühlenergiebedarf erheblich, besonders bei schwerer Bauweise wird das Einsparungspotential der Kühlenergie deutlich. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn beide passiven Maßnahmen kombiniert werden, was den Kühlbedarf beim typischen Klima teilweise komplett eliminiert. In den beiden untersuchten zukünftigen Klimaszenarien ist trotz passiver Maßnahmen ein Kühlbedarf vorhanden.

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass prognostizierte Klimaszenarien mit höheren Temperaturen und mehr Hitzetagen den Kühlbedarf weiter steigern werden. Daher ist es entscheidend, diese Entwicklungen in aktuellen Planungen zu berücksichtigen und passive und aktive Maßnahmen in zukünftigen Kühlstrategien zu integrieren, um den Energiebedarf zu minimieren und sommerliche Überwärmung effektiv zu verhindern.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation und Ausgangslage	1
2. Projektbeschreibung, -ziel und Abgrenzung	4
3. Integration in die automatische Prüfung von Energieausweisen	5
4. Relevante Begriffe und Normung	6
5. Simulationsmodell	10
5.1. Bauweise und Bauteilaufbauten.....	10
5.2. Soll-Temperatur Innenraum	11
5.3. Klimaszenarien - RCPs	12
5.4. Passive Kühlung.....	13
5.5. Randbedingungen der Simulationen	14
6. Varianten Kühlung	17
7. Ergebnisse	20
7.1. Ergebnisse simulierter Kühlbedarf (KB_{sim}).....	20
7.1.1. Passive Maßnahmen	20
7.1.2. Soll-Innentemperatur	26
7.1.3. Klimaszenarien	28
7.2. Ergebnisse Kühlenergiebedarf (KEB)	31
7.2.1. Passive Maßnahmen	31
7.2.2. Soll-Innentemperatur	34
7.2.3. Klimaszenarien	37
7.3. Wärmeentzugsleistungen der Kühlsysteme.....	40
8. Conclusio und Ausblick	42
9. Abkürzungsverzeichnis	45
10. Abbildungsverzeichnis	46
11. Tabellenverzeichnis	47
12. Quellen	47

1. Motivation und Ausgangslage

Aufgrund des Klimawandels ist mit stärkeren Extremwetterereignissen und längeren Hitzeperioden zu rechnen (Deutscher Wetterdienst, 2023). Besonders in urbanen Regionen werden zukünftig, durch den hohen Verdichtungs- und Versiegelungsgrad, vermehrt Hitzeinseln entstehen, wodurch auch die Abkühlung während der Nacht reduziert wird. Kühlsysteme erlangen dadurch auch im Wohnbau immer größere Relevanz. (Deutscher Wetterdienst, 2024)

Die Europäische Union hat aufgrund der gravierenden Veränderungen einige Maßnahmen gegen den Klimawandel getroffen. Das Ziel ist eine klimaneutrale EU bis zum Jahr 2050. Klimaneutralität wird dabei so definiert, dass nur so viele Treibhausgase in die Atmosphäre freigesetzt werden, wie die Natur wieder absorbieren kann. Dieses, von den EU-Mitgliedstaaten gesetzte Ziel, ist mit der Verordnung über das Europäische Klimagesetz zu einer rechtlichen Verpflichtung geworden. (Europäischer Rat, 2024)

Auch in Salzburg sind die gravierenden klimatischen Veränderungen erkennbar. Deshalb wurde die Klima- und Energiestrategie Salzburg 2050 erarbeitet, welche die mittel- und langfristigen Ziele für 2020, 2030, 2040 und schließlich bis 2050 die vollständige Klimaneutralität und Energieautonomie umsetzbar machen sollte. (Land Salzburg, 2024)

Laut dem Klimarückblick Salzburg 2023 (Orlik et al., 2024) war das Jahr 2023 in der Landeshauptstadt das wärmste und im gesamten Bundesland das zweitwärmste Jahr der Messgeschichte. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf des Jahresmittelwerts der Lufttemperatur seit dem Jahr 1880. Dargestellt sind Abweichungen von den jeweiligen Mittelwerten des Bezugszeitraumes 1961–1990.

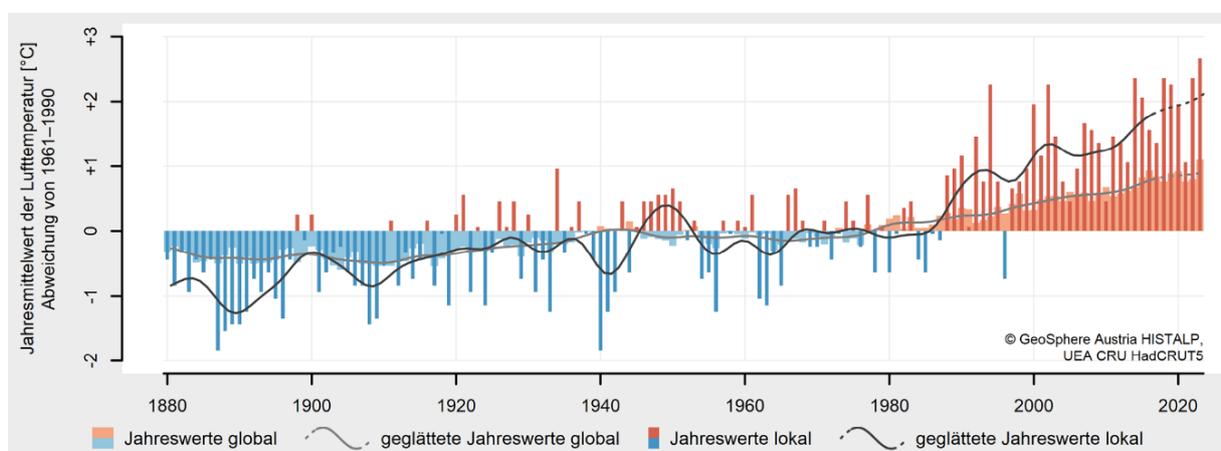


Abbildung 1: Langfristige Entwicklung der Jahreswerte der Lufttemperatur global und in Salzburg von 1880 bis 2023. (Orlik et al., 2024)

Die Grafik zeigt einen klaren Temperaturanstieg. Dieser Trend führt zur stetig wachsenden Relevanz der Gebäudekühlung und gleichzeitig leicht sinkenden Relevanz der Gebäudeheizung. Abbildung 2 unterstreicht nochmals diese Entwicklung anhand der Anzahl an jährlichen Hitzetagen und der Heizgradtagzahl. Dabei sind lt. Orlik et al. (2024) folgende Definitionen angegeben:

- Hitzetage: Teilmenge der Sommertage, an denen das Maximum der Lufttemperatur 30 °C erreicht oder überschreitet.
- Heizgradtagzahl: Jährliche Summe der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen der Normraumlufthtemperatur von 20 °C und der mittleren Lufttemperatur, an Tagen mit einer mittleren Lufttemperatur von weniger als 12 °C.

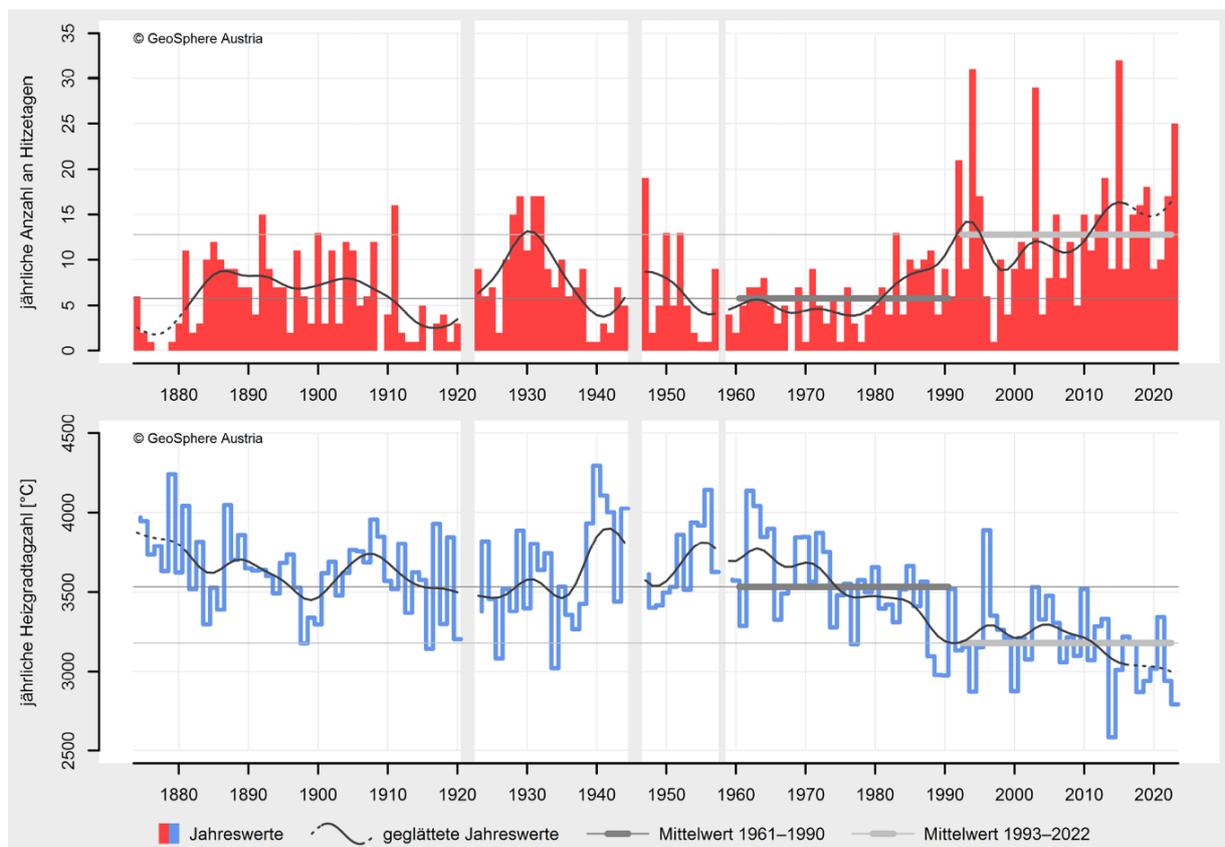


Abbildung 2: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Hitzetagen (oben) und Heizgradtagzahl (unten) in der Stadt Salzburg von 1874 bis 2023. (Orlik et al., 2024)

Wie bereits erwähnt, bewirken diese klimatischen Veränderungen, dass der Heizbedarf zukünftig weiter sinken, der Kühlbedarf hingegen steigen wird. Somit nimmt die Relevanz verschiedener Kühlmöglichkeiten auch im Wohnbau zu. Diesem Umstand soll vorrangig mit einer klimagerechten Architektur und passiven Maßnahmen begegnet werden. Nachdem die passiven Möglichkeiten zur Reduzierung des Kühlenergiebedarfs ausgeschöpft werden, soll die verbleibende Kühllast mit möglichst energieeffizienten Kühlstrategien gedeckt werden.

Auch im Energieausweis von Wohngebäuden könnte die Kühlung, aufgrund der erläuterten steigenden Relevanz, in Zukunft ein entscheidendes Kriterium betreffend der Energieeffizienz von Gebäuden darstellen.

2. Projektbeschreibung, -ziel und Abgrenzung

Für die Bestimmung von Anforderungen an die Kühlung im Wohnbau wurde seitens der FHS eine Variantenstudie zum Kühlbedarf bzw. Kühlenergiebedarf mittels dynamischer Gebäudesimulation durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Bereitstellungs- und Abgabesysteme sowie mögliche passive Maßnahmen variiert.

Die Klimadaten wurden vom Standort Salzburg Flughafen verwendet. Kühlbedarf sowie Kühlenergiebedarf dieser Varianten wurden verglichen und analysiert. Die Simulationen wurden mit dem Programm IDA ICE durchgeführt.

Projektziel:

Die Ergebnisse liefern dem AG eine belastbare, datenbasierte Grundlage für die zukünftige Implementierung und Formulierung von Anforderungen an die Kühlung von Wohngebäuden inklusive einer Abschätzung für die zukünftige Entwicklung des Kühlbedarfs auf Basis von Klimaszenarien. Die Studie gibt auch einen Überblick und Vergleich zu verschiedenen Kühlstrategien und deren Energieeffizienz.

Abgrenzung:

Es ist zu erwähnen, dass neben der operativen Temperatur keine weiteren Behaglichkeitskriterien betrachtet wurden. Auch bauphysikalisch relevante Themen wie z.B. Kondensat/Taupunktunterschreitung wurden in diesem Projekt nicht genauer betrachtet, da diese Untersuchungen den Projektrahmen überschritten hätten. Diese Themenbereiche sind jedoch bei jeglicher Umsetzung von Kühlstrategien zu beachten und zu prüfen, um Behaglichkeits- und Feuchtigkeitsprobleme zu verhindern.

Die Simulationen wurden anhand des Gebäudetyps Mehrfamilienhaus (lt. OIB RL 6 - Kostenoptimalität), durchgeführt. Die Ergebnisse können je nach Gebäudetyp, Kompaktheit, solarer Architektur, Bauweise, Standort und Nutzerverhalten stark abweichen. Jedoch erlauben die Ergebnisse dieses Projekts einen Vergleich der ausgewählten Kühlstrategien und stellen den Einfluss der einzelnen variierten Parameter dar.

3. Integration in die automatische Prüfung von Energieausweisen

Ein Teilziel des Projekts ist es, die Integration von Anforderungen an die Kühlung von Wohngebäuden in die Prüfroutine der Energieausweisdatenbank zu unterstützen. Folgender Ablauf wird seitens der FHS vorgeschlagen.

Ablauf automatische/manuelle Prüfung

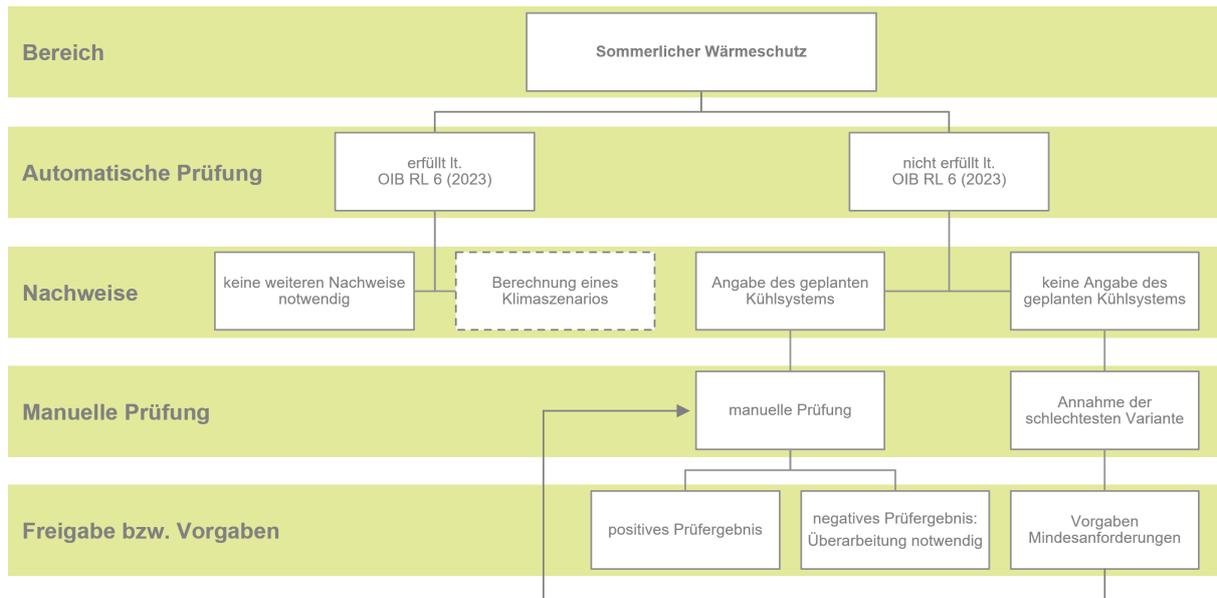


Abbildung 3: Vorschlag für die Prüfroutine des sommerlichen Wärmeschutzes (eigene Darstellung)

Die vorgeschlagene Vorgehensweise sieht als ersten Schritt die Prüfung auf Erfüllung der OIB RL 6 vor. Werden die darin enthaltenen Vorgaben erfüllt, sind keine weiteren Nachweise notwendig. Es könnte jedoch angedacht werden, dass eine weitere Berechnung zum Thema Zukunftsfähigkeit (anhand von Klimaszenarios) durchgeführt werden soll. Das Ergebnis könnte dabei nicht als Bewertungsgröße angesehen, sondern nur als Hinweis ausgegeben werden, um die Bewusstseinsbildung zum Thema Klimaerwärmung und Auswirkung auf die Anforderungen an Wohngebäude zu unterstützen.

Falls die Vorgaben lt. OIB RL 6 zum Thema sommerlicher Wärmeschutz nicht erfüllt werden, könnte die Angabe des geplanten Kühlsystems und Argumentation der Funktionsfähigkeit mit anschließender manueller Prüfung zu einer Freigabe führen. Falls keine Angabe des geplanten Kühlsystems erfolgt, wird vom schlechtesten Fall ausgegangen und das ineffizienteste System angenommen. Infolgedessen können Vorgaben für Mindestanforderungen definiert werden, die dann bei der manuellen Prüfung eine Freigabe oder Ablehnung verursachen.

4. Relevante Begriffe und Normung

Im Folgenden werden die, für dieses Projekt und den betrachteten Themenbereich, relevanten Begriffe aus den aktuellen Normen und Richtlinien erläutert sowie zu den Vorgaben dieser Dokumente kurz Stellung genommen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Begriffsdefinitionen wörtlich aus den Normen bzw. Richtlinien übernommen wurden und hier oft für den Heizfall beschrieben wurden, jedoch im umgekehrten Sinne für den Kühlfall ebenso relevant sind.

ÖNORM B 8110-3:2020-06

- **Immissionsfläche:** *„fiktive Fläche, die zur Quantifizierung der durch Sonnenenergiezufuhr hervorgerufenen Wärmequellen dient*
Anmerkung 1 zum Begriff: Die Immissionsfläche wird aus der Fläche der transparenten Teile der Außenbauteile, multipliziert mit deren Gesamtenergiedurchlassgrad und dem Abminderungsfaktor einer Abschattungseinrichtung, ermittelt. Die Berücksichtigung der Orientierung transparenter Flächen in der Außenhülle des Raumes erfolgt über einen Orientierungs- und Neigungsfaktor.“
- **Operative Temperatur:** *„gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung“*

ÖNORM B 8110-6-1:2024-03

- **Kühlbedarf:** *„rechnerisch ermittelte Wärmemenge (Nutzenergie), die zur Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Innentemperatur benötigt wird“*
- **Wärmegewinn:** *„Wärmemenge, die innerhalb der konditionierten Zone entsteht oder in diese eintritt und von den Wärmequellen des Heizsystems unabhängig ist“*
- **Wirksame Wärmespeicherfähigkeit:** *„Teilbetrag der Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes, der einen Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat“*

ÖNORM H 5058-1:2019-01

- **Kühlenergiebedarf:** *„Endenergiebedarf des Kühlsystems“*
- **Kühllast:** *„der mit der Zeit veränderliche Wärmestrom, der aus dem Raum abgeführt werden muss, um eine vorgegebene Raumlufttemperatur halten zu können“*
- **Kühltechnikenergiebedarf:** *„Energiebedarf, der erforderlich ist, um die kühltechnischen Systeme zur Deckung des Kühlbedarfs zu betreiben“*
- **Passive Kühlung:** *„Kühlung, die auf dem System der Nachtauskühlung beruht*
Anmerkung 1 zum Begriff: Die passive Kühlung ist eine Art der Kältebereitstellung, die ohne aktive Kältemaschine auskommt. Als Energieträger für das Kühlwasser können beispielsweise

Grundwasser, Fluss- und Seewasser, Erdspeicher, Erdwärmesonden oder die Außenluft (v.a. Nachtluft) dienen.“

- **Splitgerät:** „Gerät, das auf zwei voneinander getrennte Einheiten aufgeteilt ist
Anmerkung 1 zum Begriff: In einem Außengerät befinden sich ein Kondensator und ein Expansionsventil, im Innengerät (als Truhen-, Schrank- oder Deckengerät ausgeführt) Verdampfer, Luftfilter und Ventilator. Außen- und Innengeräte sind durch gut gedämmte Kältemittelleitungen miteinander verbunden. Single-Splitgeräte verfügen über ein Außengerät und ein Innengerät. Bei Multi-Splitgeräten kann ein Außengerät mit mehreren Innengeräten verbunden sein.“
- **Statisches Kühlsystem:** „Anlage, die nicht Bestandteil der RLT-Anlage ist (z.B. Bauteilaktivierung, Kühldecke)
Anmerkung 1 zum Begriff: Derartige Anlagen sind zusätzlich oder anstelle einer zentralen Kühlung über der RLT-Anlage installiert.“

OIB Richtlinie 6 2023:

- **Sommerlicher Wärmeschutz**
„Beim Neubau und bei größerer Renovierung von Wohngebäuden ist Punkt 4.9.1 einzuhalten. (...)

4.9.1 Der sommerliche Wärmeschutz von Aufenthaltsräumen in einem Wohngebäude (WG) ist eingehalten, wenn

 - a) die operative Temperatur im Aufenthaltsraum bei einem sich täglich periodisch wiederholenden Außenklima mit dem standortabhängigen Tagesmittelwert $T_{\text{NAT},13}$ die Temperatur von $1/3 * T_{\text{NAT},13} + 21,8 \text{ °C}$ nicht überschreitet, wobei in der Zeit zwischen 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr angenommen werden darf, dass die offenbaren Fenster solange geöffnet bleiben, als die Außentemperatur geringer ist als die innere operative Temperatur. Öffenbare Fenster sind in der Zeit zwischen 22:00 Uhr und 6:00 Uhr als geschlossen anzunehmen. Die übrigen Randbedingungen sind entsprechend dem Stand der Technik anzunehmen; oder
 - b) wenn alle Lichteintrittsflächen im Aufenthaltsraum mit außenliegenden Abschattungseinrichtungen mit $g_{\text{tot}} \leq 0,15$ ausgestattet werden. Nordorientierte (mit einer maximalen Abweichung von $\pm 22,5^\circ$) Lichteintrittsflächen dürfen dabei unberücksichtigt bleiben.

Darüber hinaus sind Fassaden und Dächer mit jeweils überwiegenden Glasflächen auch bei Nicht-Aufenthaltsräumen mit außenliegenden Abschattungseinrichtungen mit $g_{\text{tot}} \leq 0,15$ auszustatten, es sei denn der sommerliche Wärmeschutz wird für derartige Räume auf andere Art und Weise erbracht.“

Laut der OIB-Richtlinie 6 wird der sommerliche Wärmeschutz also als erfüllt betrachtet, wenn der standortabhängige Grenzwert der operativen Raumtemperatur gemäß der Berechnung nach ÖNORM B 8110-3 eingehalten wird oder wenn für die kritische Nutzungseinheit kein außeninduzierter Kühlbedarf nach ÖNORM B 8110-6 besteht. Beide Nachweisverfahren erfordern jedoch eine kritische Bewertung.

Die Vermeidung eines außeninduzierten Kühlbedarfs kann durch hochwertige Verschattungsvorrichtungen erreicht werden, jedoch garantiert der Nachweis nicht die tatsächliche Nutzung dieses Sonnenschutzes. Passive Kühlmaßnahmen wie die Nachtlüftung werden in dieser vereinfachten Berechnung ebenfalls nicht berücksichtigt.

Speicherwirksame Massen können nur dann effektiv zur Kühlung beitragen, wenn ein ausreichend kühler Luftstrom in ausreichendem Maße die tagsüber eingebrachte Wärmeenergie abführt. Das vorherrschende Mikroklima spielt hierbei eine entscheidende Rolle (z.B. die Problematik von Urban Heat Islands). In der Norm werden die temperaturinduzierten Luftvolumenströme über offene Fenster jedoch nur pauschal anhand der Einbausituationen mit vereinfachten Lösungsansätzen berechnet.

Im normativen Nachweisverfahren (ÖNORM B 8110-3) werden Fensteröffnungsszenarien angenommen, die theoretisch möglich sind (Fenster ist nachts offenbar), in der Praxis jedoch aufgrund von Witterungs- und Einbruchschutz sowie Lärm eventuell nur eingeschränkt umgesetzt werden können.

Darüber hinaus basieren die normativen Nachweise auf historischen Klimadaten. Angesichts der prognostizierten klimatischen Veränderungen in Richtung Temperaturanstieg kann ein klimaresilientes Gebäude nur mit vorausschauenden und nicht mit vergangenen Klimadaten zukunftsfähig geplant werden.

Wohngebäude werden zunehmend nachträglich mit Klimageräten ausgestattet. Hierfür gibt es vielfältige Gründe. Obwohl es eine große Bandbreite an geeigneten technischen Lösungen für eine nachträgliche Installation von Kühltechnologien gibt, werden im Zuge dieser nachträglichen Ausstattungen oftmals sehr ineffiziente Anlagen, teilweise auch in Eigenregie, eingebaut. Diese Anlagen, häufig Klima-Splitgeräte, verstärken durch ihre Abwärme das mikroklimatische Problem für die Anrainer zusätzlich zum hohen Energieverbrauch.

In den folgenden Untersuchungen werden die Ergebnisse in Kühlbedarf (KB) und Kühlenergiebedarf (KEB) angegeben. Hier ist zu beachten, dass der KB die Nutzenergie darstellt und der KEB die Endenergie.

Folgende Begriffsbestimmungen sind dazu in der OIB-Richtlinie 6 (2023) zu finden:

- **„Kühlbedarf (KB)**

*Der Kühlbedarf ist jene Wärmemenge, welche aus den Räumen abgeführt werden muss, um unter der Solltemperatur zu bleiben. Er errechnet sich aus den nicht nutzba-
ren inneren und solaren Gewinnen.“*

- **„Kühlenergiebedarf (KEB)**

*Beim Kühlenergiebedarf werden zusätzlich zum Kühlbedarf die Verluste des Kühlsys-
tems und der Kältebereitstellung berücksichtigt.“*

5. Simulationsmodell

Für das Gebäudemodell wird das Referenzgebäude „Mehrfamilienhaus“ in gekuppelter Bauweise laut OIB-Richtlinie 6 - Kostenoptimalität herangezogen. Es ist zu erwähnen, dass diese Annahme für das Modellgebäude großen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Bei abweichenden Gebäudeeigenschaften (Gebäudetyp, -größe, Baustandard, Fensterflächenanteil etc.) ist mit unterschiedlichen Ergebnissen zu rechnen.

5.1. Bauweise und Bauteilaufbauten

Es wurden zwei verschiedene Bauweisen angenommen, um eine gewisse Bandbreite für den Kühlbedarf verschiedener Gebäude darstellen zu können:

- Leichte Bauweise:
 - Außenwände: Holzriegel
 - Decken: Holztram
- Schwere Bauweise:
 - Außenwände: Hochlochziegel
 - Decken: Stahlbeton

Die Bauteilaufbauten dieser beiden Bauweisen wurden anhand von Materialkennwerten aus der ÖNORM 8110-7 festgelegt. In folgender Tabelle sind die gewählten Bauteile der thermischen Gebäudehülle dargestellt:

Tabelle 1: Gewählte Bauteilaufbauten der thermischen Gebäudehülle für die Simulationsmodelle, Materialkennwerte aus ÖNORM 8110-7

Bauteil	U-Wert [W/m ² K]	Bauteilstärke [cm]	Material	Schichtstärke [cm]
Bodenplatte	0,16	54,00	Holzparkett (Eiche)	2,00
			Zementestrich	6,00
			Trittschalldämmung (EPS-T)	2,00
			Schüttung (EPS-Granulat gebunden)	4,00
			Stahlbeton	20,00
			XPS (XPS-G 30)	20,00
Außenwand Ziegel	0,16	39,80	Normalputzmörtel GP	1,50
			Hochlochziegel 17 cm bis 38 cm + Dünnbettmörtel oder mit PUR geklebt	20,00
			EPS-F (grau/schwarz)	17,30 *
			Edelputzmörtel CR	1,00

Außenwand Holzriegel	0,16	29,45	Gipskartonplatte	1,25
			Gipskartonplatte	1,25
			Nutzholz bzw. Mineral- wolle (SW)	18,00
			OSB-Platte	2,50
			EPS-F (grau/schwarz)	5,45 *
			Edelputzmörtel CR	1,00
Oberste Geschoßdecke Stahlbeton	0,14	48,55	XPS-G	29,55 *
			Stahlbeton	18,00
			Normalputzmörtel	1,00
Oberste Geschoßdecke Holztram	0,14	34,08	XPS-G	10,08 *
			OSB-Platte	2,50
			Nutzholz bzw. Mineral- wolle (SW)	18,00
			OSB-Platte	2,50
			Normalputzmörtel GP	1,00

*Die angegebenen Schichtstärken der Dämmung wurden so gewählt, dass der festgelegte U-Wert eingehalten wurde. Am Markt sind diese Schichtstärken der Dämmstoffe teilweise nicht erhältlich, sodass die nächstgrößere Schichtstärke gewählt werden müsste.

Folgende Festlegungen zu den Bauteilen und deren Anteile wurden für die Modellgebäude getroffen:

- Flächenverhältnis Außenwände zu Innenwände 1:1
- Innenwände
 - 50 % tragend
 - 50 % nicht tragend
- Gekuppelte Innenwand wurde als tragende Wand angenommen
- Fenster: Annahmen wurden aufgrund Erkenntnisse aus bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten getroffen (Reindl et al., 2022)
 - U_w -Wert: 0,8 W/m²K
 - Anteil in Fassadenfläche (gekuppelte Zwischenwand nicht beachtet): 24 %

5.2. Soll-Temperatur Innenraum

Im Zuge der Berechnung des Kühlbedarfs ist eine Soll-Innentemperatur von 26 °C laut Norm (ÖNORM B 8110-6-1, 2024) festgelegt. Um die Auswirkungen der Soll-Innentemperaturen auf den Kühlbedarf bzw. Kühlenergiebedarf der verschiedenen Systemkombinationen zu untersuchen, wurden Varianten mit unterschiedlichen Solltemperaturen simuliert. Somit sollen Einflussgrößen abgeschätzt und eventuell weiterer Forschungsbedarf identifiziert werden. Gemeinsam mit dem AG wurden die Soll-Innentemperaturen mit 22 °C, 24 °C und 26 °C für den Kühlfall festgelegt. Dadurch lässt sich auch der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energiebedarf für die Gebäudekühlung darstellen.

5.3. Klimaszenarien - RCPs

Aufgrund der steigenden mittleren Außentemperaturen ist in Zukunft mit höheren Energieverbräuchen für die Gebäudekühlung zu rechnen. Um die Auswirkung solcher Zukunftsszenarien nicht außer Acht zu lassen, wurden, zusätzlich zu Daten des typischen Klimas, zwei Zukunftsszenarien simuliert.

Als Datensatz für das typische Klima wurden IWEC2-Daten (ASHRAE, 2012) verwendet. IWEC2-Datensätze wurden anhand von Wetterbeobachtungen, die im Durchschnitt mindestens viermal täglich über einen Zeitraum von 12 bis 25 Jahren aufgezeichnet wurden, erstellt. Die erfassten Parameter enthalten unter anderem Informationen zu Windgeschwindigkeit, Temperatur, Luftdruck und Niederschlag. Diese Daten sind besonders nützlich für Simulationen im Bereich der Gebäudeenergie. (ASHRAE, 2012)

Im Bericht „Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg bis 2100“ (Chimani et al., 2016) wurden Klimaszenarien für Österreich erstellt und ausgewertet. Die Grundlage für diese Analysen bildeten hochwertige Beobachtungsdatensätze. In diesem Bericht wurde das RCP 8.5 Szenario als „business as usual“ und das RCP 4.5 Szenario als „Klimaschutz-Szenario“ bezeichnet. Das RCP 8.5 Szenario geht davon aus, dass die Treibhausgasemissionen ungebremst anhalten, während das RCP 4.5 damit rechnet, dass „sich die Emissionen bis 2080 bei etwa der Hälfte des heutigen Niveaus einpendeln“ (Chimani et al., 2016)

Die folgenden 3 Klimaszenarien wurden somit in den Simulationen betrachtet:

- Klimadaten IWEC2: Typisches Jahr (1999-2011)
- Klimadaten Zukunft: Salzburg RCP 4.5 2050 (Klimaschutz-Szenario)
- Klimadaten Zukunft: Salzburg RCP 8.5 2050 („business-as-usual“-Szenario)

Folgende Abbildung zeigt den für die beiden Zukunftsszenarien angenommenen Anstieg der Lufttemperaturen:

		1971-2000		2021-2050			
		Jahreswerte		RCP4.5 (Klimaschutz-Szenario)		RCP8.5 (business-as-usual)	
bis		4,8		+1,9		+2,1	
Mittel		4,6		+1,3		+1,4	
von		4,4		+0,9		+1,0	
		Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
bis		-2,9	12,8	+1,8	+2,3	+2,2	+2,5
Mittel		-3,3	12,5	+1,5	+1,4	+1,5	+1,6
von		-3,7	12,2	+0,8	+1,1	+0,8	+1,1

Winter: Dezember - Jänner - Februar / **Sommer:** Juni - Juli - August

Abbildung 4: Beobachtete Werte und simulierte Änderungen der mittleren Lufttemperatur in °C (Chimani et al., 2016)

5.4. Passive Kühlung

Die gewählten Simulationsvarianten enthalten unter anderem sogenannte passive bzw. freie Kühlsysteme. Diese können, durch die Nutzung des Temperaturniveaus des Erdreichs oder des Grundwassers und lediglich dem Energieeinsatz für die Pumpentechnik, ein Gebäude sehr effizient kühlen. Diese Strategien werden häufig in Kombination mit Flächenkühlungen (z.B. Bauteilaktivierung) eingesetzt, da diese größere Kühlflächen aufweisen und folglich auch ein Temperaturniveau der Wärmesenke nahe der Raumtemperatur genutzt werden kann.

Erdreich

Für die Varianten mit passiver Kühlung über Sole/Wasser-Wärmepumpen wurden Messwerte (RGK e.U., 2024) einer realen Wärmepumpe in Österreich (Virgen) für die Temperaturschwankungen im Erdreich verwendet.

Die gemessenen Werte sind in Abbildung 5 dargestellt:

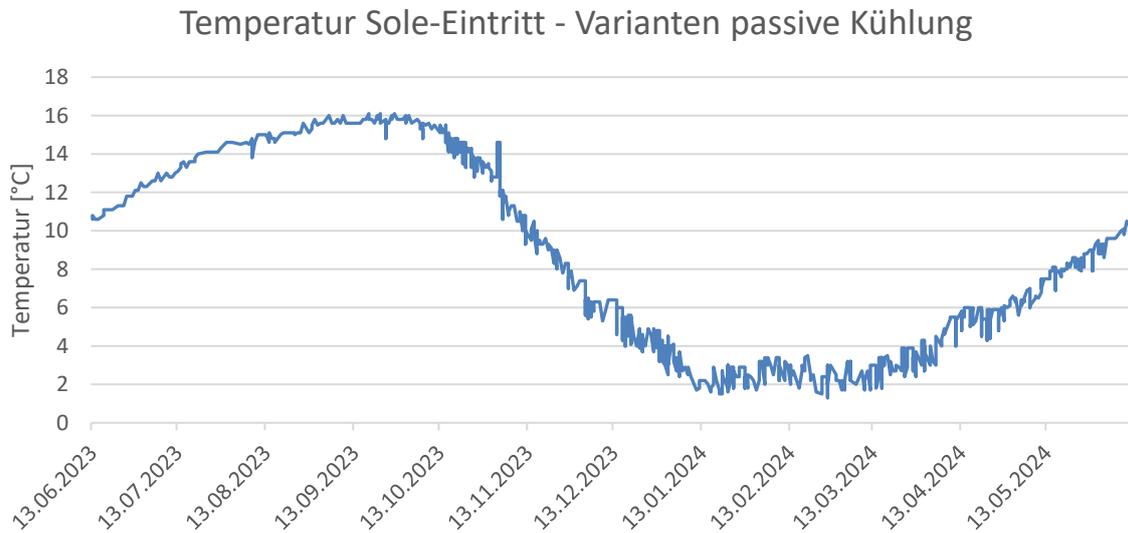


Abbildung 5: Messwerte Temperaturverlauf Erdreich (RGK e.U., 2024)

Dieser Temperaturverlauf wurde in die Simulationsmodelle für die Varianten mit passiver Kühlung durch Sole/Wasser-Wärmepumpen integriert, um möglichst realistische Voraussetzungen zu schaffen. Hier ist zu beachten, dass vorliegende Messung einen ausgeglichenen Betrieb über das gesamte Jahr darstellt – je nach Auslegung des Systems kann ein unausgeglichener Betrieb in der Realität zu einem permanenten Temperaturanstieg (Kühlung überwiegt) oder Temperaturabfall (Heizung überwiegt) des Erdreichs führen.

Grundwasser

Für die Varianten mit passiver Kühlung über das Grundwasser wurde eine konstante Temperatur von 12,6°C angenommen (Jahresmittelwert Grundwasserkörper 100006 gemäß BML, 2023)

5.5. Randbedingungen der Simulationen

Für die Simulationen der verschiedenen Kühlsysteme mussten einige Randbedingungen festgelegt werden. Es ist zu beachten, dass kleine Änderungen dieser Festlegungen einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben können.

Folgende Randbedingungen wurden für die Durchführung der Gebäudesimulationen bestimmt:

- Innere Lasten:
 - Personen
 - 28,3 m²/Person (nach EN16798-1)
 - Zeitlicher Verlauf (nach EN 16798-1)
 - W pro Person - Werte aus IDA ICE
 - Geräte
 - 3 W/m² (nach EN 16798-1)
 - Zeitlicher Verlauf (nach EN 16798-1)
- Grenztemperaturen:
 - Übergangszeiten: Heizen ab 20°C hinterlegt, um starkes Auskühlen zu verhindern
 - Sommer: Heizen ab 17°C hinterlegt, um Heizen im Sommer größtenteils zu vermeiden
- Standort: Salzburg Flughafen
(Breitengrad 47.8 °N; Längengrad 13.0 °E; Seehöhe 435 m)
- Simulationszeitraum: 5 Monate
 - Start: 01. Mai
 - Ende: 01. Oktober
- Kühlung:
 - Kältespeicher
 - Kein Pufferspeicher
 - Regelung
 - Nach Lufttemperatur
 - Klimadaten
 - Klimadaten eines typischen Jahres (IWEC2 typisches Jahr, 1999-2011)
 - Salzburg RCP 4.5 2050 (Klimaschutz-Szenario)
 - Salzburg RCP 8.5 2050 ("business-as-usual"-Szenario)
 - Solltemperatur im Gebäude
 - 22°C
 - 24°C
 - 26°C
 - Bauweisen
 - Leicht
 - Schwer
 - Gebäude
 - 3 Stockwerke
 - Länge: 14,84 m
 - Breite: 10,00 m
 - Bauweise: gekuppelt
 - U-Werte:

- Außenwand: 0,16 W/m²K
- Dach: 0,14 W/m²K
- Erdanliegender Boden: 0,16 W/m²K
- Fenster: 0,8 W/m²K

6. Varianten Kühlung

Durch die Kombination der gewählten passiven Maßnahmen, der Bereitstellungssysteme und der Abgabesysteme ergeben sich 540 Simulationsvarianten.

Unter passiven Maßnahmen sind hier jene Möglichkeiten gemeint, die ohne aktivem Kühlsystem bzw. Energieaufwand eingesetzt werden können, um sommerliche Überwärmung zu vermeiden. Die im Folgenden genannte Nachtlüftung wurde aufgrund der oben erwähnten Umsetzbarkeit (z.B.: Einbruch- und Witterungsschutz) nicht über die gesamte Nacht angenommen, sondern auf jene Zeiten reduziert, die bei arbeitstätigen Nutzer*innen als umsetzbar betrachtet werden (vor und nach einer durchschnittlichen Nachtruhe) und die Vorgaben lt. OIB RL 6 (2023) erfüllen (Fenster sind in der Zeit von 22:00 Uhr und 06:00 Uhr als geschlossen anzunehmen). Deshalb wurden für die passive Maßnahme „Nachtlüftung“ einige Festlegungen getroffen.

Fenster nur geöffnet, wenn folgende Voraussetzungen gegeben sind:

- Außentemperatur ist geringer als die Raumlufttemperatur
- Raumlufttemperatur fällt durch Fensterlüftung nicht unter 18°C
- Nach Zeitplan: geöffnet zwischen 06:00-07:30 und 20:30-22:00 Uhr (wenn die ersten beiden Voraussetzungen gegeben sind)
- „Nachtlüftung“ in Kombination mit 0,2 1/h Standardluftwechsel (bei den Varianten mit Fensterlüftung zu den vorgegebenen Zeiten wurde zusätzlich ein Luftwechsel von 0,2 1/h angenommen; Varianten ohne die passive Maßnahme „Nachtlüftung“ wurden mit einem hygienischen Mindestluftwechsel von 0,38 1/h angenommen)

Der Zeitplan für die außenliegende Verschattung ($g_{\text{tot}} \leq 0,15$) wurde ebenso so angelegt, dass dieser für arbeitstätige Nutzer*innen umsetzbar wäre (Betätigung der Verschattungseinrichtung vor und nach einem durchschnittlichen Arbeitstag). Somit wurde angenommen, dass die außenliegende Verschattung tagsüber von 07:30-19:00 Uhr geschlossen ist.

Als passive Kühlung werden Systeme verstanden, die die Temperaturniveaus von Grundwasser oder Erdreich für die Kühlung nutzen und somit keine eigene Kältebereitstellung benötigen. Passive Kühlung bzw. Free Cooling ist für Flächenkühlsysteme (z.B. bei Nutzung der ohnehin vorhandenen Flächenheizungen) aufgrund des möglichen Temperaturniveaus und der Größe der Kühlfläche gut nutzbar. Da für Radiatoren und Fan-Coils meist ein niedrigeres Temperaturniveau benötigt wird, als durch die beiden genannten Quellen bereitgestellt werden kann, werden diese Systemkombinationen nicht betrachtet. Die benötigte Technik für diese Varianten sind: Pumpen, Wärmtauscher (zwischen Erdreich/Grundwasser und Kältemittelkreis sowie zwischen Kältemittelkreis und Heizungskreis) und Mischventil (Kühlwasser muss oberhalb der Taupunkttemperatur gehalten werden). Es ist zu beachten, dass dieser

Teil der Simulationen (Pumpen, Rohrleitungslängen etc.) vereinfacht berücksichtigt wurde, indem die Defaultwerte des Simulationsprogramms (IDA ICE) genutzt wurden.

Auch für die Auslegung der fünf verschiedenen Kälteabgabesysteme wurden Festlegungen getroffen. Bei den beiden Flächenkühlungen (Bauteilaktivierung und Kühlung über die Fußbodenheizung) erfolgte dies auf Basis von Simulationen für den Kühlfall, wobei festgelegt wurde, dass die minimale Vorlauftemperatur nie 18 °C unterschreitet. Die Splitgeräte und Fancoils wurden ebenso für den Kühlfall ausgelegt, wobei bei Letzterem zusätzlich festgelegt wurde, dass die minimale Vorlauftemperatur nie 14 °C unterschreitet. Nur für die Varianten, bei denen die Kühlung über die Radiatoren erfolgt, wurde die Größe der Radiatorenflächen für den Heizfall ausgelegt, da in der Praxis der Einsatz von Radiatoren primär für Heizzwecke gewählt wird. Die Leistung der angenommenen Radiatoren entspricht in etwa jener eines Wärmepumpenheizkörpers (z.B. E2-Wärmepumpenheizkörper, Vogel&Noot). Die Systemtemperaturen für den Kühlfall wurden mit 17/19°C (VL/RL) definiert. Mit folgender Gleichung wurde die Kühlleistung der Radiatoren berechnet:

$$\text{Kühlleistung} = \text{Heizleistung} \times \frac{\frac{\text{Vorlauftemperatur}_{\text{Kühlen}} + \text{Rücklauftemperatur}_{\text{Kühlen}}}{2} - \text{Solltemperatur}_{\text{Kühlen}}}{\frac{\text{Vorlauftemperatur}_{\text{Heizen}} + \text{Rücklauftemperatur}_{\text{Heizen}}}{2} - \text{Solltemperatur}_{\text{Heizen}}}$$

Folgende Systemkomponenten wurden somit als Basis für die Variantenstudie gewählt:

- **Passive Maßnahmen:**

- „Nachtlüftung“
- Außenliegende Verschattungseinrichtungen
- „Nachtlüftung“ + außenliegende Verschattungseinrichtungen
- Keine passiven Maßnahmen (nur hygienischer Mindestluftwechsel 0,38 1/h dauerhaft)

- **Bereitstellungssysteme:**

- Luft/Wasser-Wärmepumpe
- Passives Kühlsystem - Free Cooling über Grundwasser-Wärmepumpe
- Passives Kühlsystem - Free Cooling über Erd-Wärmepumpe
- Nur-Luft-Anlage - dezentral (Splitgerät mit integrierter Wärmepumpe)

- **Abgabesysteme:**

- Flächenkühlung - Bauteilaktivierung Decke (TABS)
- Flächenkühlung - Über Fußbodenheizung
- Radiator
- Fan-Coil (Kühlung über ein Lüftungsgerät, das an die zentrale Wärmepumpe im Gebäude angeschlossen ist)
- Splitgerät (Gerät mit Außen- und Inneneinheit und integrierter Wärmepumpe)

Die Varianten Sole/Wasser bzw. Wasser/Wasser Wärmepumpen wurden in diesem Projekt nur als “passive/freie Kühlung” beachtet, da die hierbei vorherrschenden Systemtemperaturen ausreichen und keine zusätzliche Energie zum Absenken der Vorlauftemperatur notwendig ist. In der Praxis werden diese Systeme im Wohnbau also meistens für die Heizperioden ausgelegt und in der Kühlperiode nur zur passiven Kühlung genutzt. Da die verschiedenen Varianten in diesem Projekt praxistaugliche und sinnvolle Systeme darstellen sollen, wurde diese Einschränkung, in Abstimmung mit dem Auftraggeber, beschlossen. Mit dem AG gemeinsam exkludierte Varianten/Kombinationen, da sie als nicht relevant angesehen wurden:

- Sole/Wasser-Wärmepumpe für eine aktive Kühlung
- Wasser/Wasser-Wärmepumpe für eine aktive Kühlung
- Passive Kühlung/Free-Cooling in Kombination mit Fan-Coil
- Passive Kühlung/Free-Cooling in Kombination mit Radiatoren
- Leichte Bauweise in Kombination mit TABS

7. Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele der Simulationsergebnisse dargestellt. Einige der Abbildungen sind dabei in zwei Bereiche geteilt. Der obere Bereich ist mit der rechten vertikalen Achse zu betrachten und bildet die operative Temperatur im Gebäude in Form eines Boxplots ab. Zusätzlich zur operativen Temperatur gibt ein roter Strich die Soll-Lufttemperatur an. Die Soll-Lufttemperatur stellt die Regelgröße für die Simulation dar. Die Boxen der verschiedenen Varianten stellen die mittleren 50 % der Ergebnisse dar und die oberen und unteren Whisker begrenzen die mittleren 90 % der Ergebnisse. Die Striche in den Boxen zeigen die Mediane der Ergebnisse. Die Ausreißer (Outlier) wurden in diesen Abbildungen aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Der untere Bereich der Abbildungen stellt jeweils die simulierten Kühlbedarfe bzw. Kühlenergiebedarfe (in kWh/m²_{BGF}*a) der Varianten in Form von Balkendiagrammen dar und ist mit der linken vertikalen Achse zu betrachten.

7.1. Ergebnisse simulierter Kühlbedarf (KB_{sim})

Der Kühlbedarf ist die Wärmemenge, die dem Raum entzogen werden muss, um eine gewisse Soll-Temperatur einzuhalten. Die folgenden Ergebnisse zeigen die simulierte Nutzenergie der ausgewählten Kühlstrategien.

7.1.1. Passive Maßnahmen

In Abbildung 6 ist der Einfluss der passiven Maßnahmen (Nachtlüftung und Verschattung) auf den Kühlbedarf bei typischem Klima zu sehen. Dabei wurde die Soll-Lufttemperatur, wie in der Norm vorgegeben, mit 26 °C festgelegt.

Im unteren Bereich der Abbildung ist zu erkennen, dass der Kühlbedarf bei den Varianten ohne passive Maßnahmen um ein Vielfaches erhöht ist. Dabei liegt beispielsweise der Kühlbedarf mit einem Splitgerät bei der leichten Bauweise bei 16,89 kWh/m²a und bei der schweren Bauweise bei 16,66 kWh/m². Die Simulation der passiven Kühlung über das Grundwasser und TABS (Bauteilaktivierung) ergibt bei schwerer Bauweise einen Kühlbedarf von 15,85 kWh/m²a. Bereits eine der beiden passiven Maßnahmen gegen sommerliche Überwärmung kann sich sehr effizient auf den Kühlbedarf im Gebäude auswirken. Dabei sinkt zum Beispiel der simulierte Kühlbedarf bei der Variante TABS (schwere Bauweise) mit passiver Kühlung durch Grundwasser mit außenliegender Verschattung, ohne Nachtlüftung auf 1,60 kWh/m²a, ohne Verschattung jedoch mit Nachtlüftung auf lediglich 0,46 kWh/m²a. Die besten Ergebnisse erzielen jene Varianten, welche die Verschattung als auch die Fensterlüftung zu den festgelegten Zeiten und Voraussetzungen nutzen. Hier ist unter den angenommenen Rahmenbedingungen kein Kühlbedarf vorhanden.

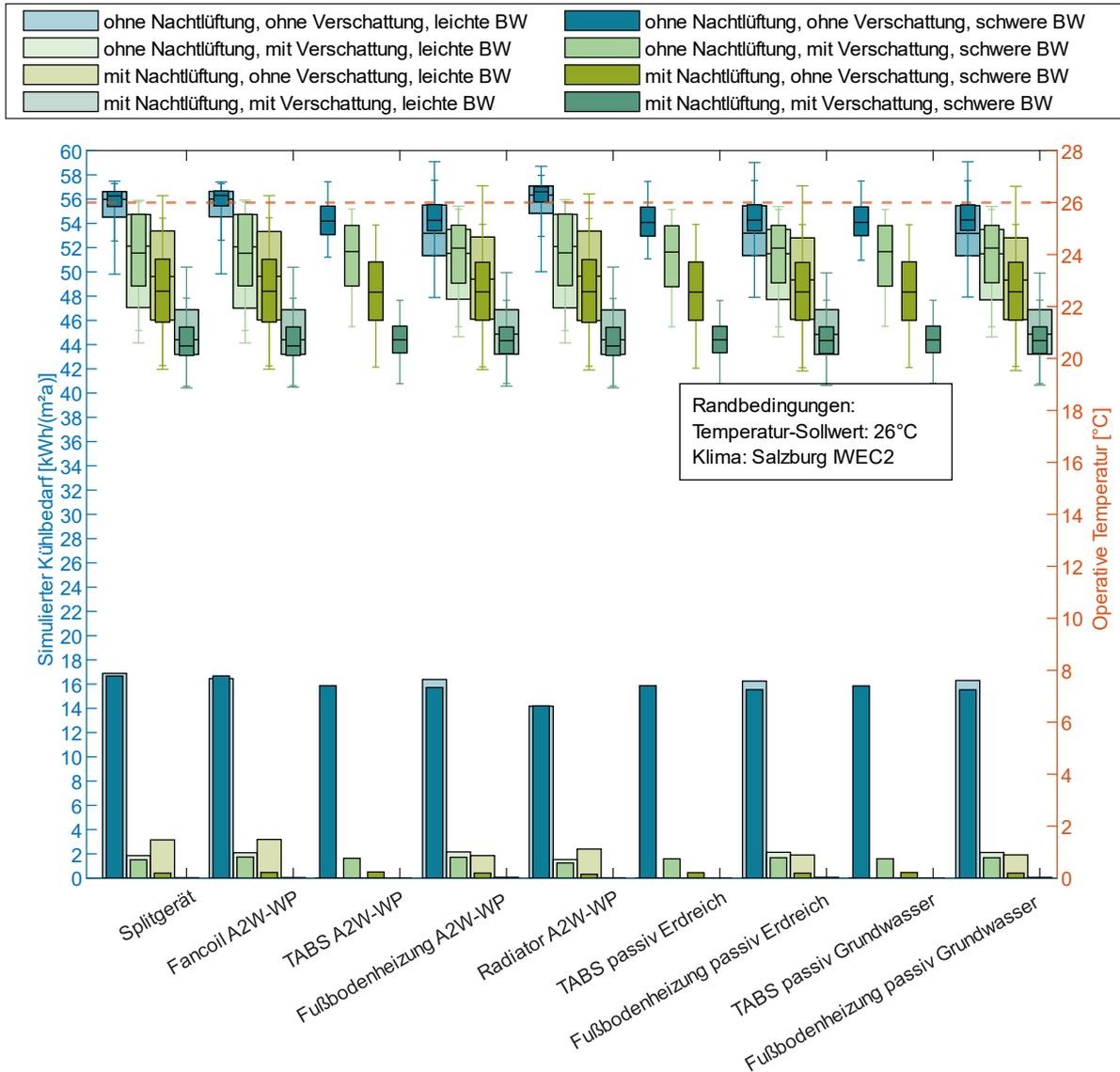


Abbildung 6: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWE C2)

Im oberen Bereich der Grafik ist die operative Temperatur im Gebäude der jeweiligen Varianten zu sehen. Es gilt zu beachten, dass die Regelgröße des Kühlsystems jedoch die Lufttemperatur ist und nicht die operative Temperatur. Der Sollwert für die Lufttemperatur ist durch die rote horizontale Linie dargestellt. Der Vergleich der operativen Temperatur zeigt, dass die passiven Maßnahmen enormen Einfluss haben, wobei die Temperatur in Gebäuden mit leichter Bauweise eine größere Schwankung erfährt als bei schwerer Bauweise. Dies lässt sich auf die größere speicherfähige Masse der Bauteile zurückführen. Das Niveau der operativen Temperatur im Gebäude ist (Sollwert der Lufttemperatur = 26 °C) vor allem bei jenen Varianten erhöht, welche keine passiven Maßnahmen beinhalten und somit stärker von der momentanen solaren Einstrahlung beeinflusst werden.

Aufgrund der Vergleichbarkeit wurde für die Auswertungen zusätzlich ein Vergleich der Lufttemperatur herangezogen. Der simulierte Verlauf der Lufttemperatur und der operativen Temperatur ist in den folgenden Abbildungen für einen beispielhaften, heißen Sommermonat dargestellt.

Abbildung 7 zeigt die Verläufe der operativen Temperatur als auch der Lufttemperatur bei einem Sollwert für die Lufttemperatur von 26 °C bei typischem Klima, ohne Nachtlüftung und ohne Verschattung.

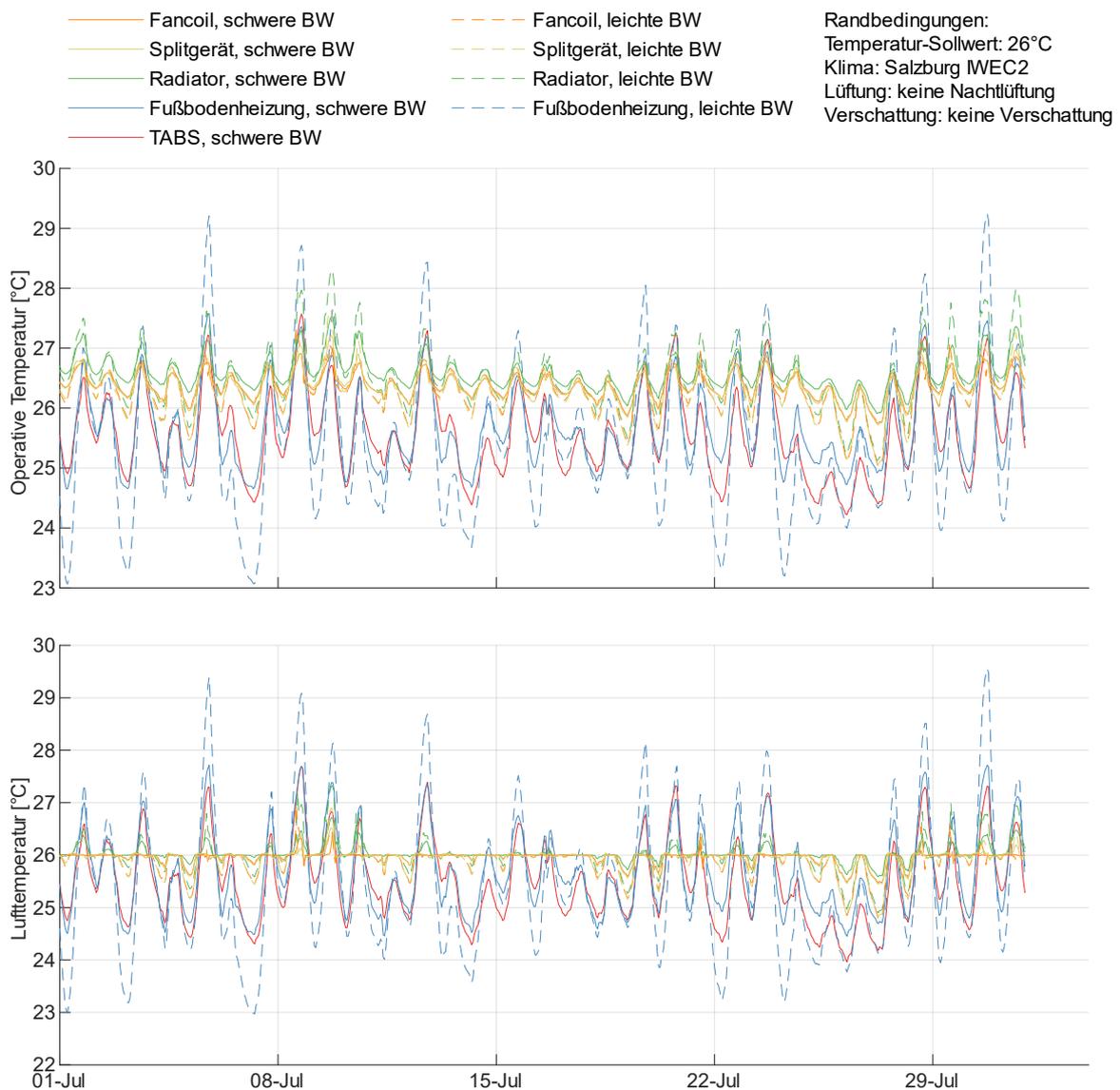


Abbildung 7: Vergleich der operativen Temperatur und der Lufttemperatur bei verschiedenen Kälteabgabesystemen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWECC2), keine passiven Maßnahmen

Es ist zu erkennen, dass die Fußbodenheizung bei leichter Bauweise die größten Temperaturschwankungen mit sich bringt. Kühlsysteme, welche über die Zuluft kühlen (Splitgeräte und Fancoils), können schnell auf Temperaturänderungen der Lufttemperatur (Regelgröße der Simulation) reagieren und folglich die Soll-Temperatur am besten einhalten, aber auch diese Systeme weisen eine deutliche Schwankung der operativen (gefühlten) Temperatur im Raum auf. Die trägeren Kühlsysteme (Flächenkühlung) unterliegen aufgrund der fehlenden Verschattung großen tageszeitlichen Schwankungen. Dies liegt hauptsächlich an den solaren Wärmeeinträgen und der Trägheit des Systems. Auffallend ist auch, dass die Lufttemperatur zwar von luftgeführten Kühlsystemen besser eingehalten werden kann, jedoch die operative Temperatur im Schnitt bei der Flächenkühlung durch TABS oder Fußbodenheizung unter dem Sollwert von 26 °C und auch deutlich unter jener der luftgeführten Kühlsysteme liegt. Bei Letzteren überschreitet die durchschnittliche operative Temperatur 26 °C.

Abbildung 8 zeigt, welchen Unterschied hier die beiden passiven Maßnahmen gegen sommerliche Überwärmung ergeben.

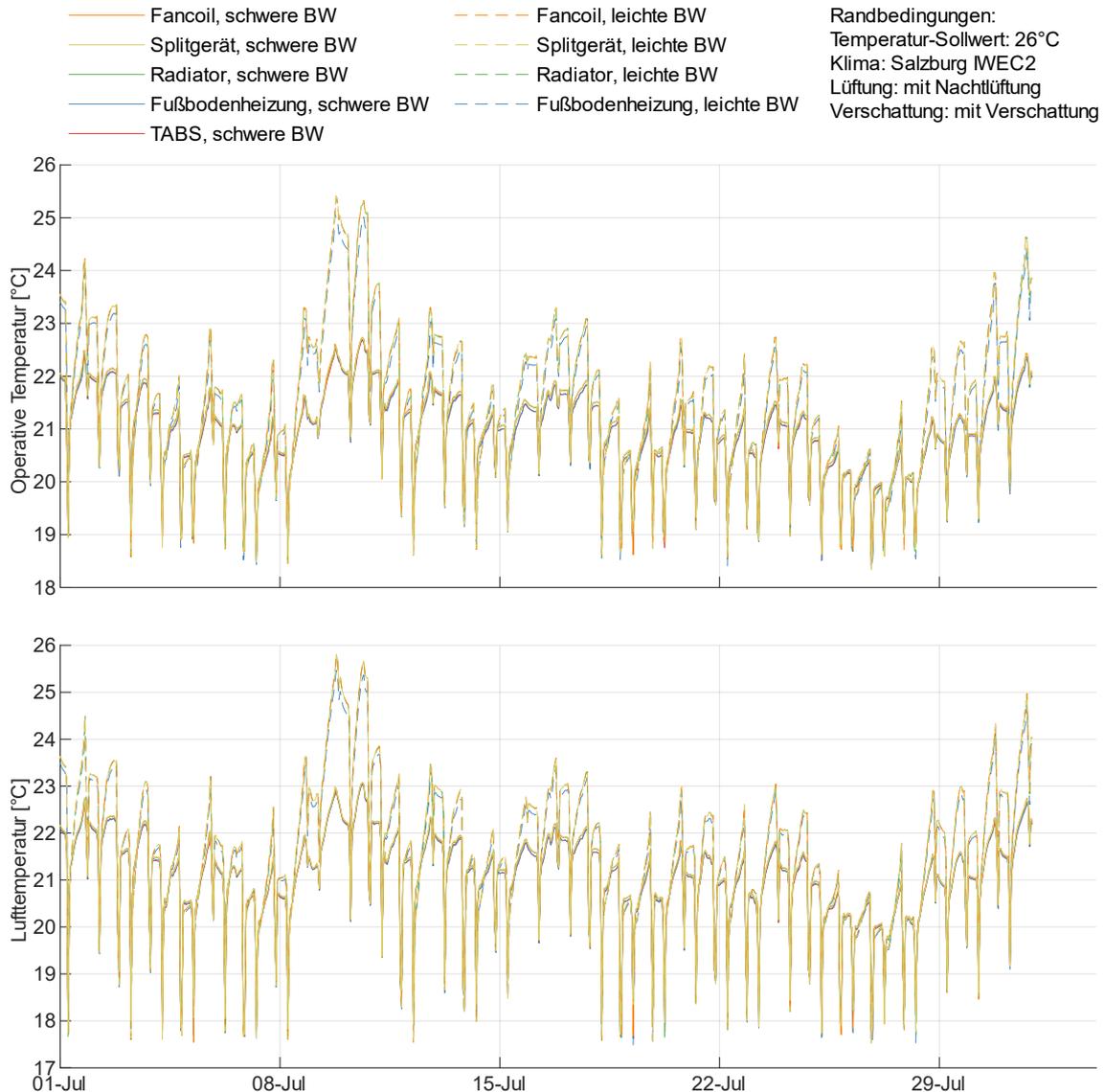


Abbildung 8: Vergleich der operativen Temperatur und der Lufttemperatur bei verschiedenen Kälteabgabesystemen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWE C2), Einsatz beider passiver Maßnahmen

Es ist zu erkennen, dass das Temperaturniveau insgesamt niedriger ausfällt. Die vorgegebene Soll-Temperatur wird nicht überschritten, was auf die Verschattung bei solarer Einstrahlung und auf die effiziente Abkühlung durch Nachtlüftung zurückzuführen ist. Die schwere Bauweise erfährt dabei, aufgrund der größeren speicherwirksamen Masse des Gebäudes, geringere Temperaturschwankungen als die leichte Bauweise.

In Abbildung 9 ist nochmals die Auswirkung der passiven Maßnahmen auf den Kühlbedarf dargestellt, jedoch wurde hier davon ausgegangen, dass das „business-as-usual“-Szenario (RCP 8.5) eintritt und die Soll-Lufttemperatur gleichzeitig mit 24 °C geringer angesetzt ist.

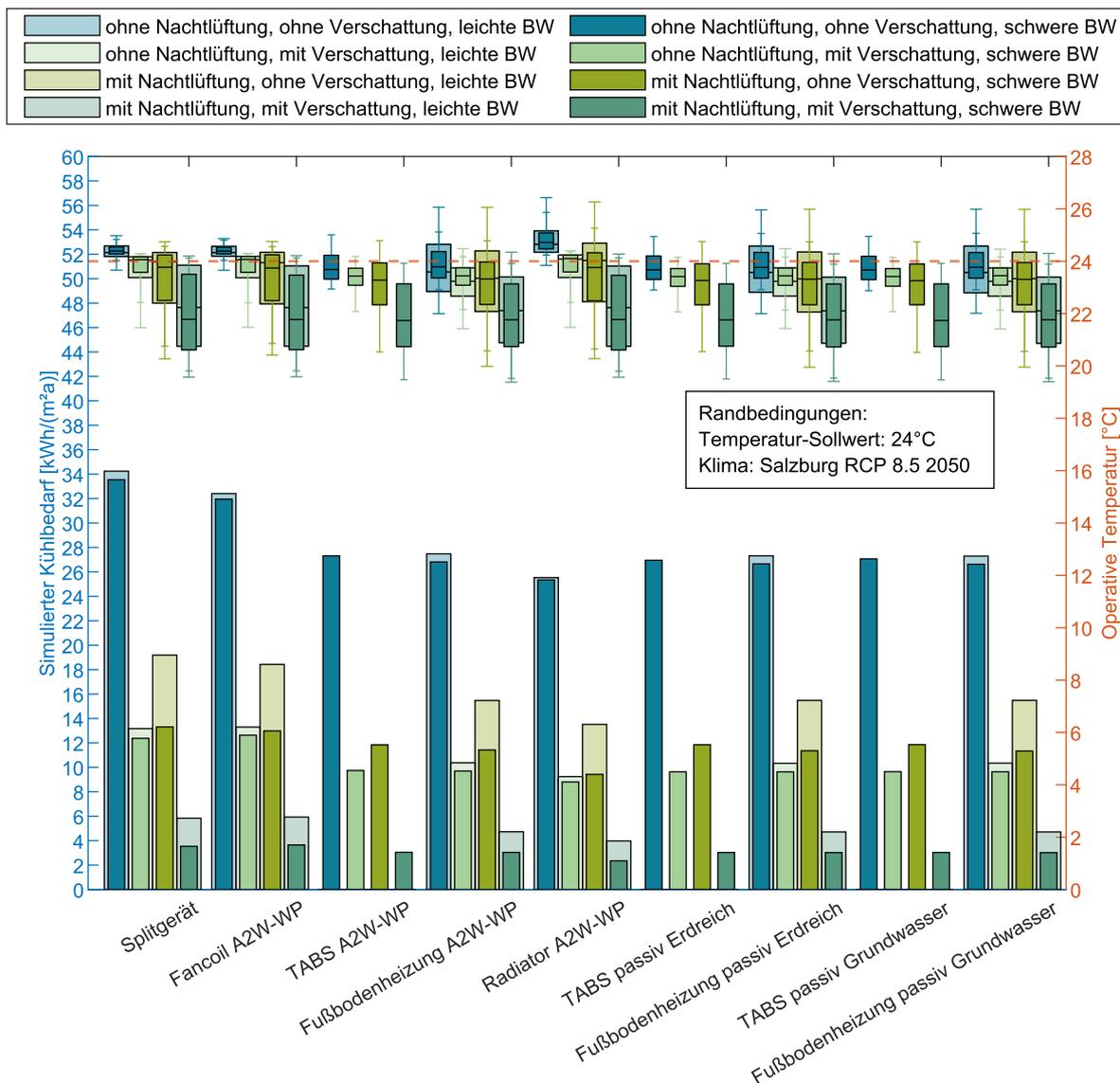


Abbildung 9: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 24 °C, Klimaszenario RCP8.5

Im Vergleich zu Abbildung 6 ist hier ein deutlich höherer Kühlbedarf zu erkennen. Dies liegt daran, dass sich die Umgebungsbedingungen durch höhere mittlere Außentemperaturen und mehr Hitzetage nachteilig auswirken und zusätzlich eine geringere Soll-Lufttemperatur gewählt wurde.

Der obere Bereich der Abbildung zeigt, dass die operative (gefühlte) Temperatur jener Varianten mit beiden passiven Maßnahmen das Niveau der Soll-Innentemperatur größtenteils einhalten können und ansonsten, insbesondere bei jenen Varianten ohne Verschattung, mit wiederholtem Überschreiten dieses Temperaturniveaus zu rechnen ist.

7.1.2. Soll-Innentemperatur

Die folgende Abbildung zeigt, dass die Wahl der Zieltemperatur im Raum, bereits bei Änderungen von 2 °C, großen Einfluss auf den Kühlbedarf von Gebäuden hat. Hierbei wurden drei unterschiedliche Soll-Temperaturen simuliert (22 °C, 24 °C und 26 °C).

Somit ist beispielsweise bei der Kühlung durch ein Splitgerät, bei einer Soll-Lufttemperatur von 22 °C, schwerer Bauweise und ohne passive Maßnahmen, ein Kühlbedarf von 27,95 kWh/m²a zu erwarten. Wird die Soll-Temperatur auf 24 °C gehoben, ergibt sich ein Kühlbedarf von 22,10 kWh/m²a und bei 26 °C lediglich 16,66 kWh/m²a.

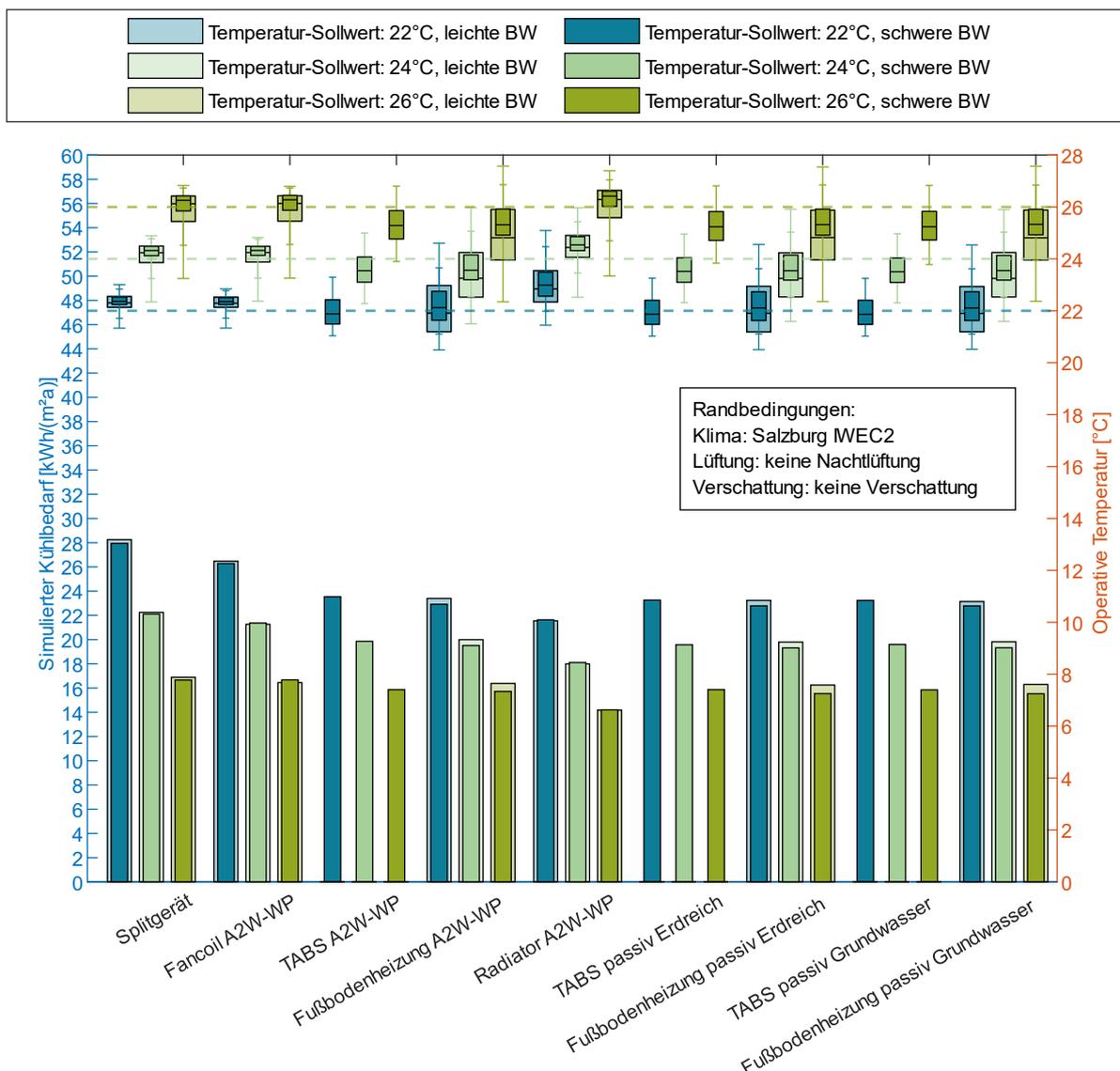


Abbildung 10: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, keine passiven Maßnahmen, typisches Klima (IWEC2)

Im Vergleich dazu wurde bei nachfolgender Abbildung angenommen, dass das „business-as-usual“-Szenario (RCP 8.5) eintritt, die Kühlstrategie jedoch mit den beiden passiven Maßnahmen unterstützt wird. Verglichen werden nochmals die drei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen.

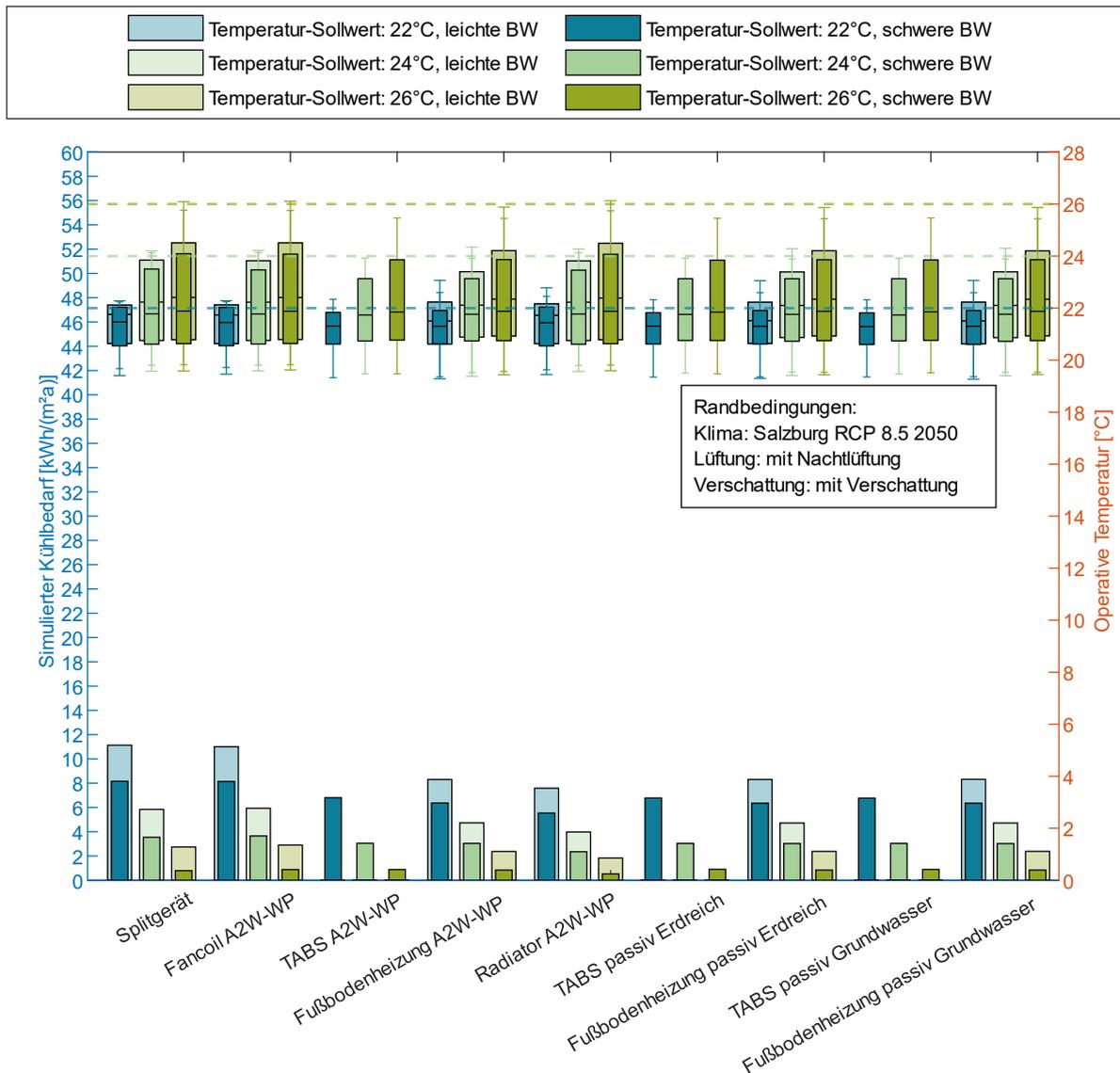


Abbildung 11: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, mit zwei passiven Maßnahmen, Klimaszenario RCP 8.5

Es ist auch hier zu erkennen, dass die Änderung der Soll-Innentemperatur bereits bei 2 °C sehr großen Einfluss auf den Kühlbedarf hat. Auffällig ist, dass sich, im Vergleich zu den Ergebnissen in Abbildung 10 (keine passiven Maßnahmen), die Bauweise bei Berücksichtigung passiver Maßnahmen stärker auswirkt.

Die Simulation ergibt bei der Kühlung durch ein Splitgerät, einer Soll-Lufttemperatur von 22 °C, unter Einsatz beider passiven Maßnahmen und unter Annahme, dass das „business-as-

usual“-Klimaszenario eintritt, einen Kühlbedarf von 8,16 kWh/m²a bei schwerer Bauweise und 11,13 kWh/m²a bei leichter Bauweise. Die leichte Bauweise bewirkt also unter diesen Voraussetzungen einen um ca. 36 % höheren Kühlbedarf als die schwere Bauweise.

Im oberen Bereich der Abbildung ist zu erkennen, dass bei Einsatz der passiven Maßnahmen, die empfundenen Temperaturen im Gebäude die Soll-Lufttemperaturen meist nicht überschreiten und die schwere Bauweise geringfügig bessere Ergebnisse liefern kann als die leichte Bauweise.

Hier wird deutlich, dass die passiven Maßnahmen in Verbindung mit einer größeren speicherfähigen Masse sehr positive Auswirkungen auf den Kühlbedarf haben und somit, als Basis für zukünftige Kühlstrategien, unbedingt beachtet werden sollen.

7.1.3. Klimaszenarien

Neben der Variation der passiven Maßnahmen sowie der Soll-Innentemperaturen wurden auch die Auswirkungen möglicher Klimaszenarien in den Simulationen verglichen.

Folgende Abbildung zeigt, wie sich der Kühlbedarf durch zwei unterschiedliche Entwicklungen des Klimas in Zukunft verändern könnte. RCP 4.5 stellt dabei, wie in Kapitel 5.3 genauer beschrieben, ein Klimaschutz-Szenario dar und RCP 8.5 das „business-as-usual“-Szenario.

Es ist zu erkennen, dass der Kühlbedarf bis 2050, laut den betrachteten Szenarien, erheblich steigen könnte. In den verwendeten Prognosen für das Jahr 2050 ist der Unterschied zwischen den beiden Zukunftsszenarien noch relativ gering. Lt. Chimani et al. (2016) wird sich dieser Unterschied jedoch auf längere Sicht (bspw. bis 2100) deutlich stärker ausprägen. Umso wichtiger ist es, solche Entwicklungen bereits bei aktuellen Planungen einzubeziehen.

Abbildung 13 zeigt ebenso den simulierten Kühlbedarf der verschiedenen Klimaszenarien bei einer Soll-Innentemperatur von 26 °C, jedoch sind hier die beiden passiven Maßnahmen (Fensterlüftung und außenliegende Verschattung) integriert.

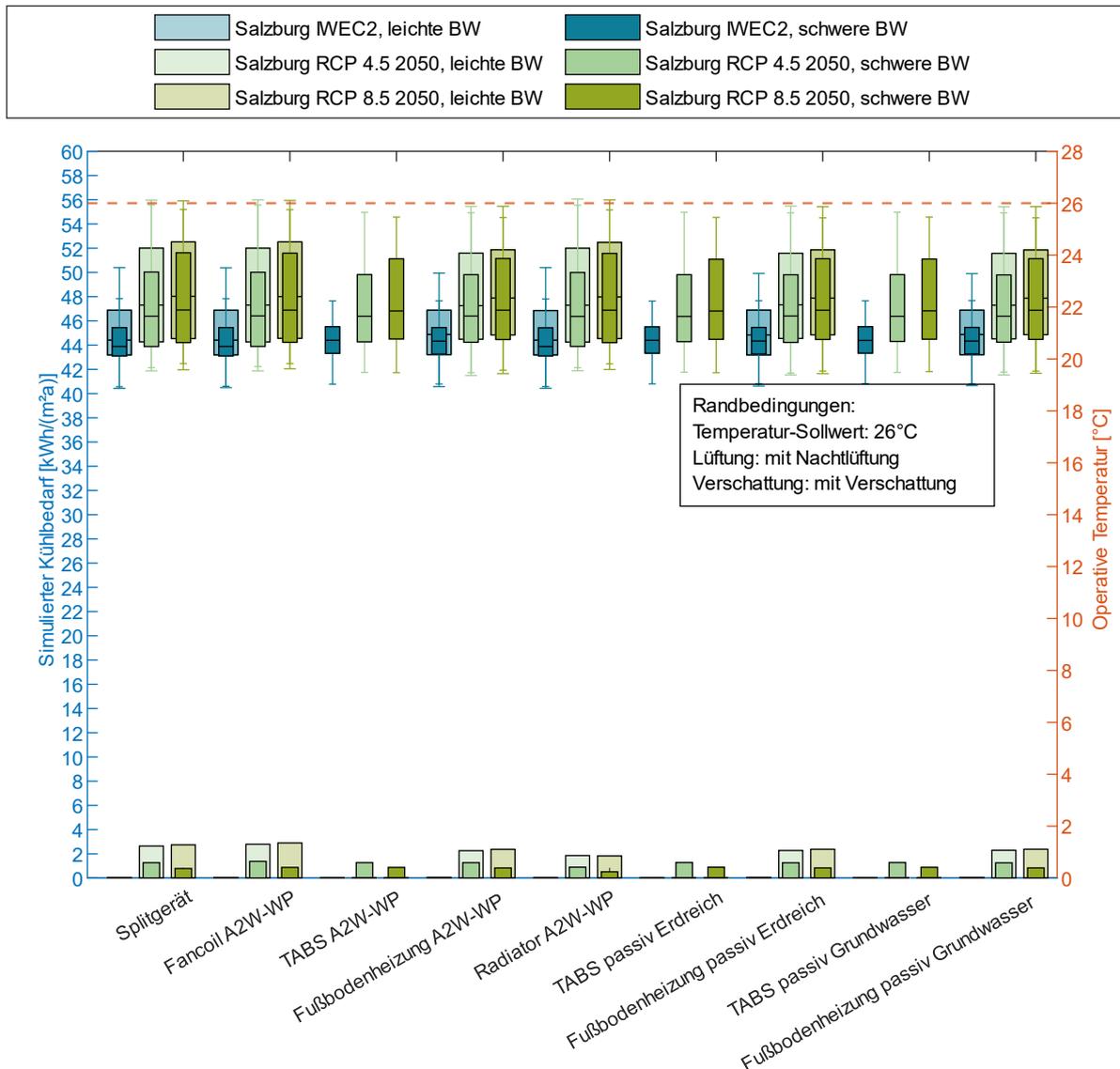


Abbildung 13: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, mit zwei passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C

Es zeigt sich erneut, dass die passiven Maßnahmen einem großen Teil des Kühlbedarfs entgegenwirken können. Zum Beispiel ergibt die Variante, bei der die Kühlung passiv über das Grundwasser und die Fußbodenheizung geschieht, dass praktisch kein Kühlbedarf besteht. Unter Annahme des Klimaszenarios RCP 4.5 wird hingegen bei leichter Bauweise ein Kühlbedarf von 2,30 kWh/m²a und bei schwerer Bauweise 1,26 kWh/m²a erzielt. RCP 8.5 ergibt bei leichter Bauweise 2,38 kWh/m²a und bei schwerer Bauweise 0,84 kWh/m²a. Der letzte Wert

entspricht hier nicht dem erwarteten Ergebnis, da bei den angenommenen ungünstigeren Klimaverhältnissen ein höherer Kühlbedarf plausibel wäre. Es zeigt jedoch, dass die Simulationsergebnisse, besonders im sehr geringen Wertebereich, empfindlicher auf das Verhalten der Speichermassen und der Regelung reagieren. Solche Abweichungen sind nur bei sehr geringen Bedarfswerten (praktisch kein Kühlbedarf vorhanden) auffällig, obwohl sie in der Realität vernachlässigbar kleine Energiemengen betreffen und erlauben somit keine allgemeingültige Aussage. Grundsätzlich lässt sich auch an diesen Ergebnissen erkennen, dass die schwere Bauweise in Kombination mit den passiven Maßnahmen gute Voraussetzungen bieten, um sommerliche Überwärmung zu verhindern.

7.2. Ergebnisse Kühlenergiebedarf (KEB)

Der Kühlenergiebedarf beschreibt den Endenergiebedarf der Gebäudekühlung. Dabei werden zusätzlich zum Kühlbedarf die Verluste des Kühlsystems und der Kältebereitstellung berücksichtigt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen des simulierten Kühlbedarfs unterscheiden sich hier die Varianten mit passiver Kühlung stark von jenen mit aktiven Kühlsystemen. Dies liegt daran, dass bei der passiven Kühlung das Temperaturniveau des Erdreichs bzw. des Grundwassers genutzt wird und lediglich die Energie für Pumpen notwendig ist. Somit wird hier die Effizienz der unterschiedlichen Systeme gut ersichtlich. Im folgenden Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse des Kühlenergiebedarfs der verschiedenen Varianten gezeigt.

7.2.1. Passive Maßnahmen

In Abbildung 14 ist der Kühlenergiebedarf unter Berücksichtigung verschiedener passiver Maßnahmen und Bereitstellungs- sowie Abgabesysteme dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf eine Soll-Lufttemperatur im Gebäude von 26 °C und auf das typische Klima.

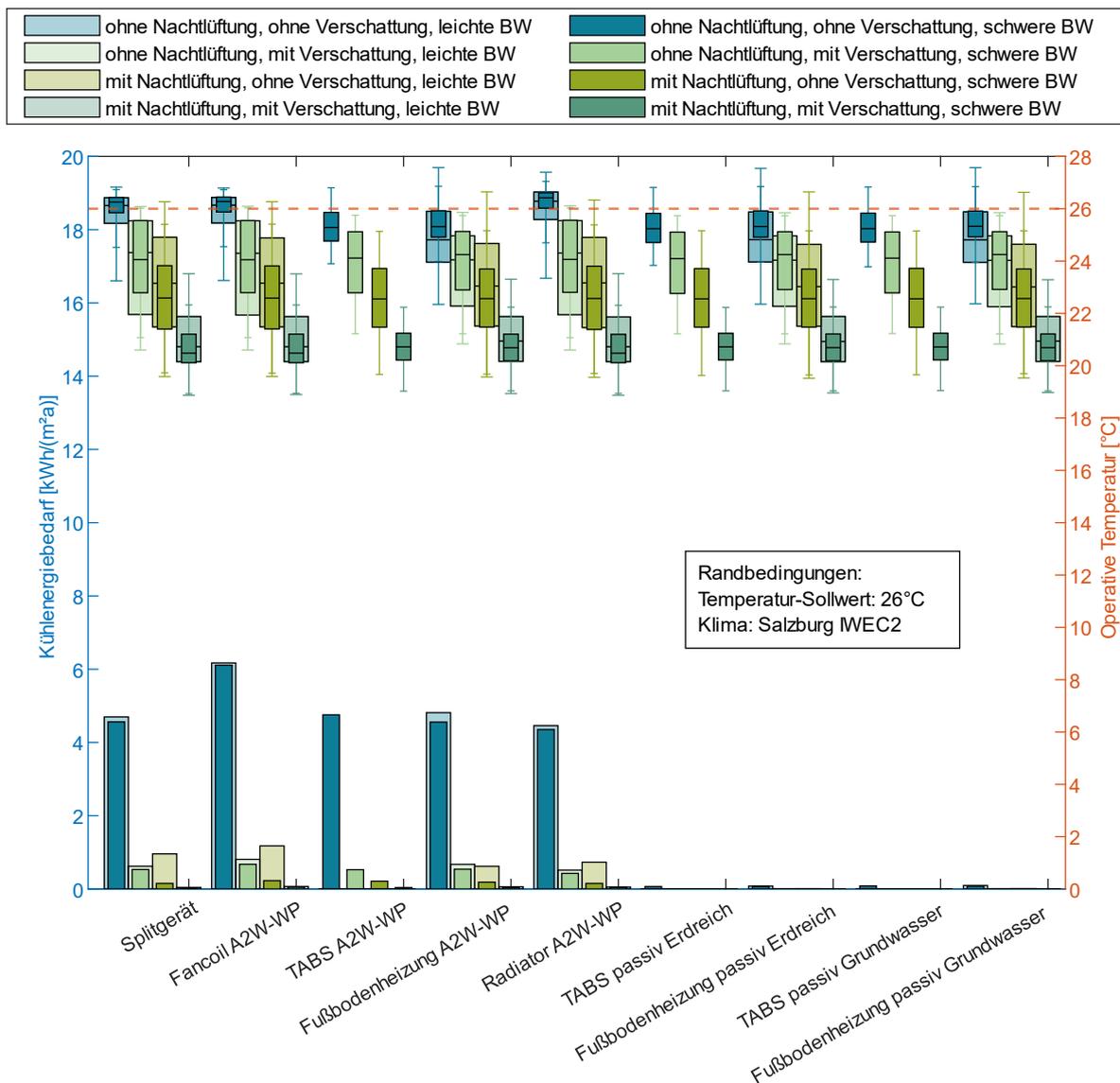


Abbildung 14: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWE C2)

Die Abbildung zeigt, dass die Varianten mit aktiver Kühlung und ohne jegliche passive Maßnahme ein Vielfaches an Energie für die Gebäudekühlung benötigen als jene, die eine bzw. beide Maßnahmen implementieren oder passiv kühlen.

Dabei wurde beispielsweise der Kühlenergiebedarf der Variante Kühlung durch ein Fancoil-System, bei einem Sollwert der Lufttemperatur von 26 °C, unter Berücksichtigung des typischen Klimas und ohne passive Kühlmaßnahmen, bei leichter Bauweise mit 6,17 kWh/m²a und bei schwerer Bauweise mit 6,11 kWh/m²a berechnet. Im Vergleich dazu sinkt durch den Einsatz einer außenliegenden Verschattung der Kühlenergiebedarf bei leichter Bauweise auf 0,81 kWh/m²a und bei schwerer Bauweise auf 0,68 kWh/m²a.

Wenn stattdessen die Nachtlüftung als passive Maßnahme eingesetzt und auf die außenliegende Verschattung verzichtet wird, fällt bei leichter Bauweise und lüftungsbasierten

Kühlstrategien, welche die Raumlufte zum Abtransport der Wärme nutzen, der Kühlenergiebedarf höher aus. Durch die Kombination schwerer Bauweisen mit Nachtlüftung kann der Kühlenergiebedarf hingegen weiter reduziert werden. Hier wird der Vorteil der schweren Baumassee aufgrund der höheren thermischen Speichermassen sichtbar. Die Bauteile können durch die Abkühlung zu den vorgegebenen Zeiten die überschüssige Wärmeenergie abtransportieren und im Verlauf des Tages die solaren und inneren Wärmelasten besser ausgleichen. Der Kühlenergiebedarf der Varianten mit passiver Kühlung ist im Vergleich sehr gering und in dieser Darstellungsweise kaum feststellbar.

In Abbildung 15 werden ebenso die Auswirkungen der passiven Maßnahmen auf den simulierten Kühlenergiebedarf dargestellt. Hier wurde jedoch das Klimaszenario der moderaten Entwicklung (RCP 4.5) angenommen sowie eine Soll-Lufttemperatur von 24°C.

Durch die geringere Soll-Temperatur steigt der Kühlenergiebedarf merklich an. Im oberen Teil der Abbildung ist zu erkennen, dass einige Varianten eine höhere operative Temperatur ergeben, jedoch sind hier vor allem die Varianten ohne passive Maßnahmen bzw. jene ohne außenliegende Verschattung betroffen.

Im Vergleich zu Abbildung 14 liegt beispielsweise der Kühlenergiebedarf der Variante TABS in Verbindung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe, ohne passive Maßnahmen und bei schwerer Bauweise, beim Klimaszenario RCP 4.5, durch die geringere Soll-Temperatur, mit 8,05 kWh/m² um ca. 69 % höher.

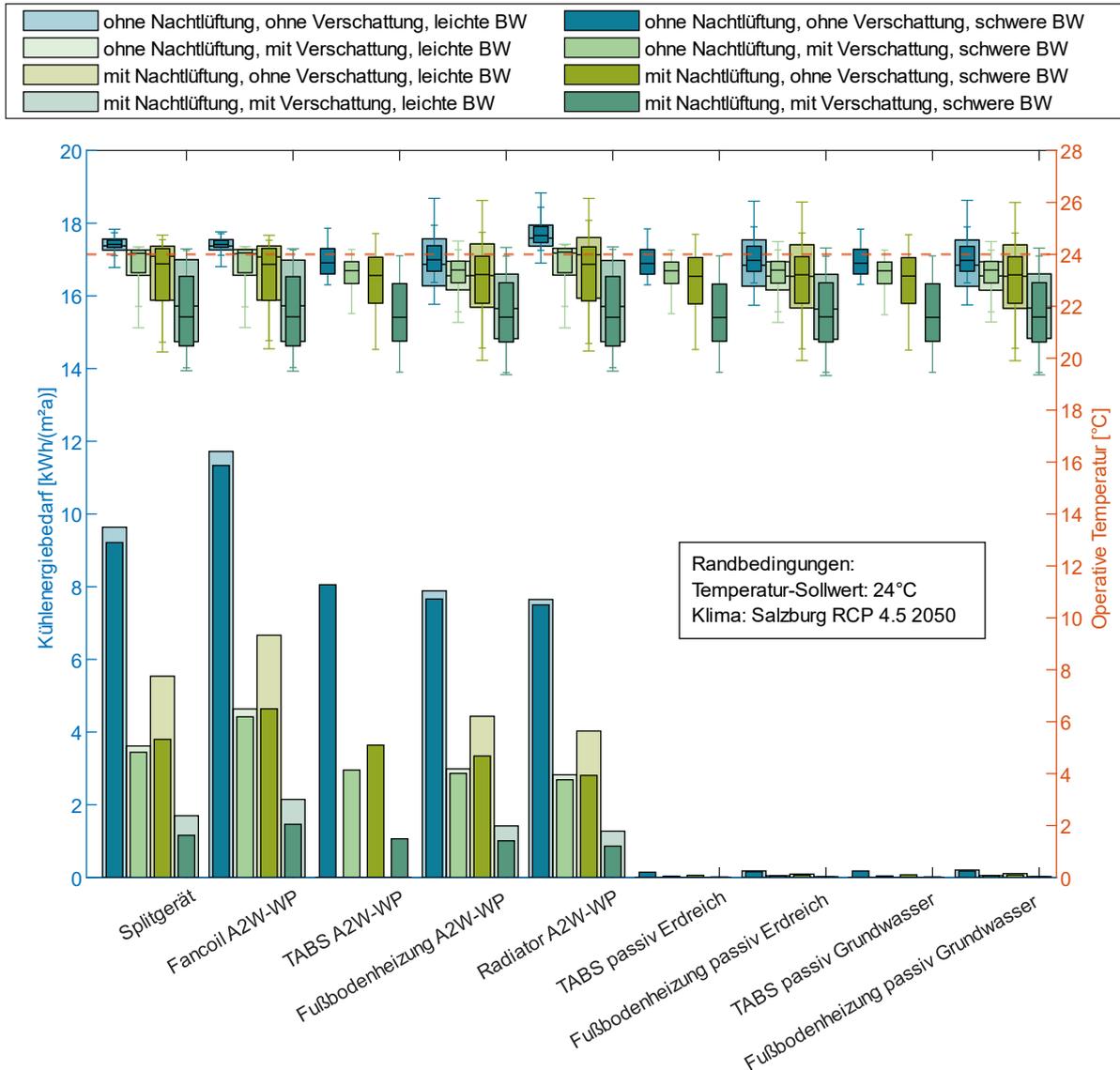


Abbildung 15: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 24 °C, Klimaszenario RCP 4.5

Es ist erneut ersichtlich, dass besonders bei leichter Bauweise die außenliegende Verschattung sehr wichtig ist, um die tageszeitlichen Schwankungen durch solare Einstrahlung zu reduzieren und den Kühlenergiebedarf zu senken.

7.2.2. Soll-Innentemperatur

In Abbildung 16 ist der simulierte Kühlenergiebedarf der Varianten ohne passive Maßnahmen und bei typischem Klima für unterschiedliche Soll-Lufttemperaturen im Gebäude dargestellt. Bereits eine Änderung der Soll-Temperatur um 2 °C erhöht den Kühlenergiebedarf merklich.

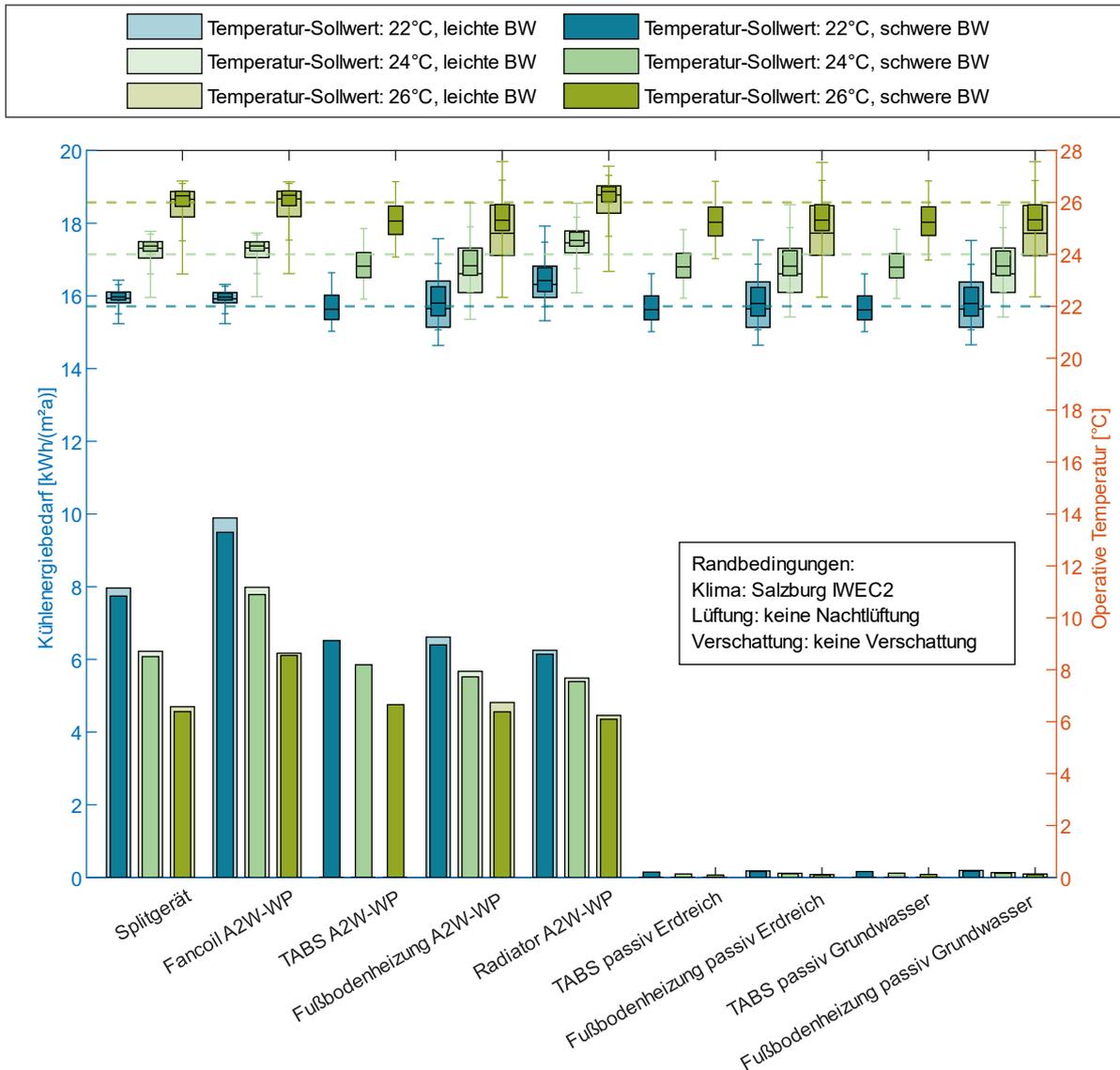


Abbildung 16: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, keine passiven Maßnahmen, typisches Klima (IWE C2)

Es ist zu erkennen, dass sich hier eine Änderung der vorgegebenen Soll-Temperatur sehr viel stärker auf den Kühlenergiebedarf auswirkt als die beiden unterschiedlichen Bauweisen. Dabei steigt beispielsweise der Kühlenergiebedarf der Variante „TABS A2W-WP“, also die Kühlung über die Bauteilaktivierung in Verbindung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (ohne passive Maßnahmen), zwischen 26 °C und 24 °C um ca. 23 % und zwischen 26 °C und 22 °C um insgesamt ca. 37 %.

Der obere Bereich der Abbildung zeigt die operative Temperatur der verschiedenen Varianten bei unterschiedlichen Sollwerten der Lufttemperatur (Regelgröße der Kühlsysteme). Bei einem Sollwert der Lufttemperatur von 22 °C, übersteigt die empfundene Temperatur diesen Wert bei Varianten ohne passive Maßnahmen. Bei vorgegebenen 24 °C sind die Flächenkühlungen

größtenteils fähig, die gewünschte Temperatur zu halten. Wenn die Lufttemperatur bis 26 °C steigen darf, können die Systeme mit Flächenkühlung das gewünschte Temperaturniveau gut einhalten. Jene Kühlsysteme, die die Luft als Wärmeabtransport nutzen, schneiden hier schlechter ab, ergeben jedoch insgesamt eine geringere Temperaturschwankung im Gebäude als die Flächenkühlsysteme, da sie rascher auf Veränderungen reagieren können.

Sobald jedoch die passiven Maßnahmen eingesetzt werden, vergrößert sich der Einfluss der Bauweise, wie in Abbildung 17 zu sehen ist.

Durch die beiden passiven Maßnahmen, Fensterlüftung unter bestimmten Bedingungen und außenliegende Verschattung, lässt sich ein Großteil des Energiebedarfs für die Kühlung einsparen. Besonders in Verbindung mit einer schweren Bauweise besteht hier großes Optimierungspotential.

Bei allen Varianten ist, durch den Einsatz beider passiven Maßnahmen, praktisch kein Kühlenergiebedarf vorhanden.

Im oberen Bereich der Abbildung ist auch die stark verbesserte operative Temperatur im Gebäude dargestellt. Hier ist keine sommerliche Überwärmung zu erwarten.

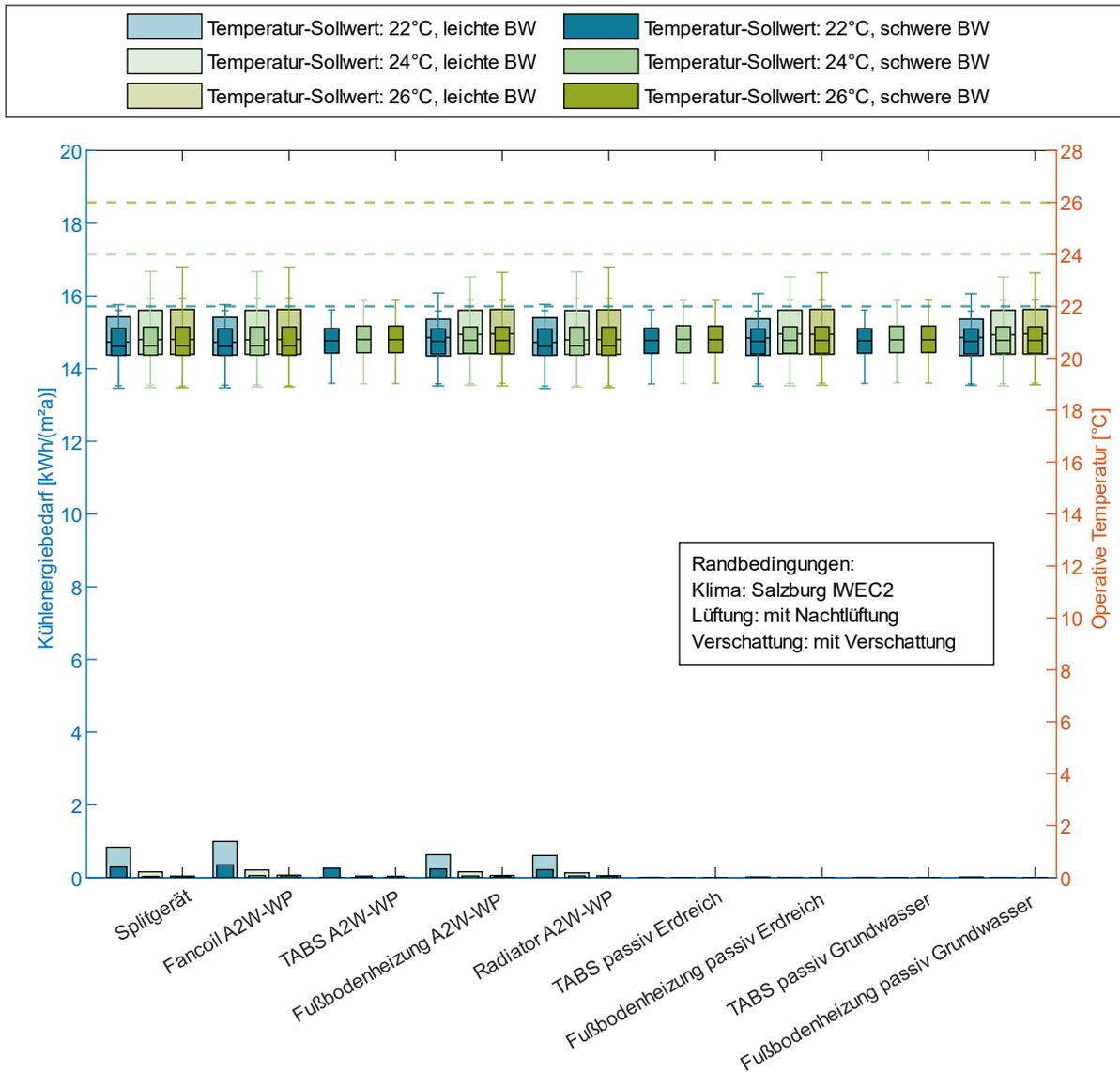


Abbildung 17: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, zwei passive Maßnahmen, typisches Klima (IWE C2)

7.2.3. Klimaszenarien

Auch die 3 verschiedenen Klimaszenarien wurden für die Simulation des Kühlenergiebedarfs variiert. Abbildung 18 zeigt die Simulationsergebnisse des Kühlenergiebedarfs verschiedener Klimaszenarien. Dabei wurde nun davon ausgegangen, dass die Soll-Lufttemperatur mit 22 °C festgelegt ist und keine passiven Maßnahmen angewendet werden.

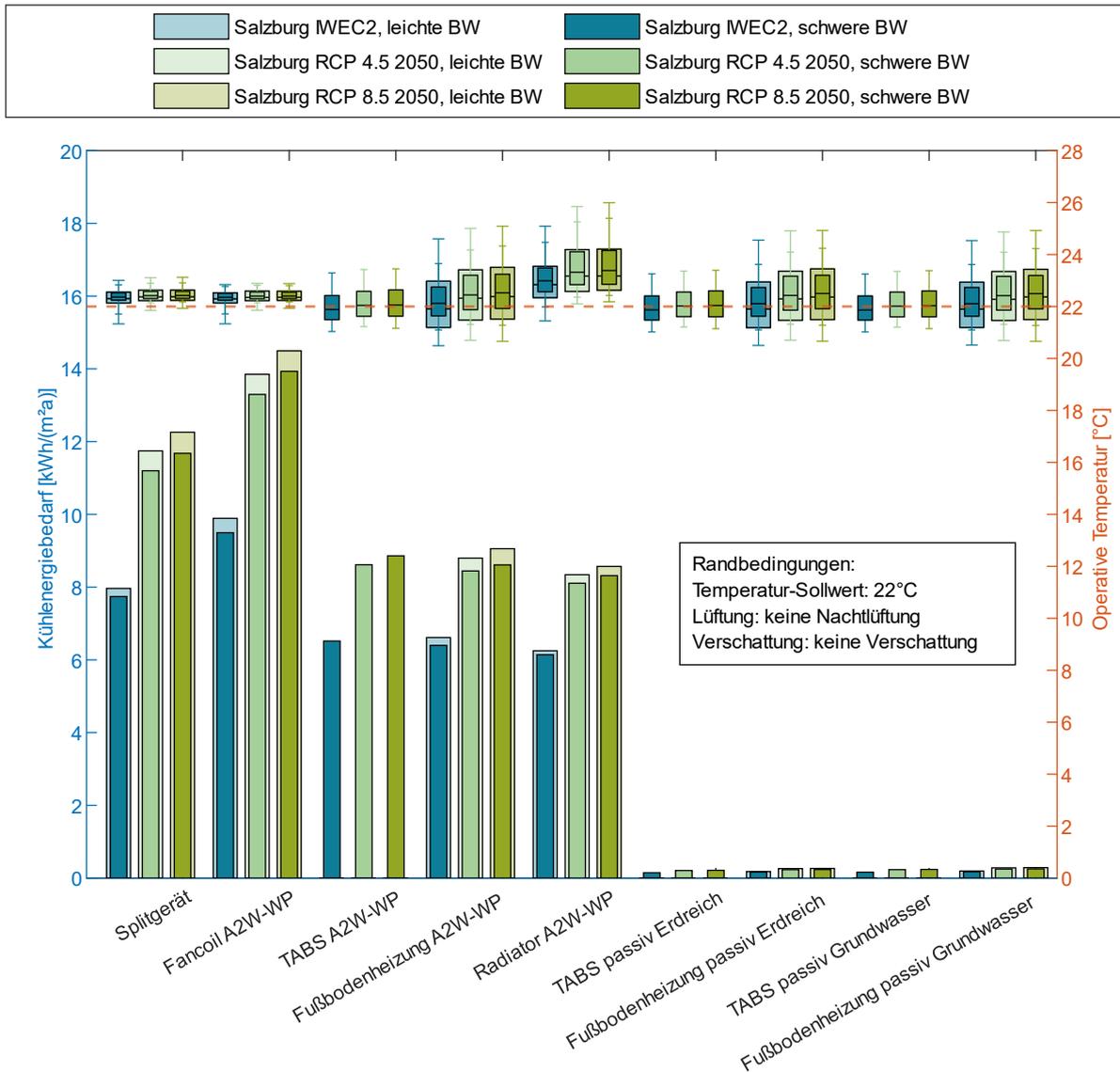


Abbildung 18: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, ohne passive Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 22 °C

Durch die prognostizierte Klimaerwärmung ist ein merklicher Anstieg des Kühlenergiebedarfs zu erwarten. Im oberen Bereich der Abbildung ist zu erkennen, dass bei einer Soll-Lufttemperatur von 22 °C ohne passive Maßnahmen sehr oft ein höheres empfundenes Temperniveaurereicht wird. Die Schwankungen der operativen Temperatur sind bei den trägeren Kühlsystemen (Kühlung über TABS bzw. Fußbodenheizung) viel größer als bei jenen Systemen, die der Raumluft schnell Wärme entziehen können, jedoch ist das durchschnittliche Temperaturniveau bei der Kühlung über TABS geringer. Des Weiteren sind die trägeren Flächenkühlsysteme insgesamt energieeffizienter.

Im Vergleich dazu ist in Abbildung 19 der Kühlenergiebedarf mit beiden passiven Maßnahmen, bei sonst gleichen Bedingungen, dargestellt.

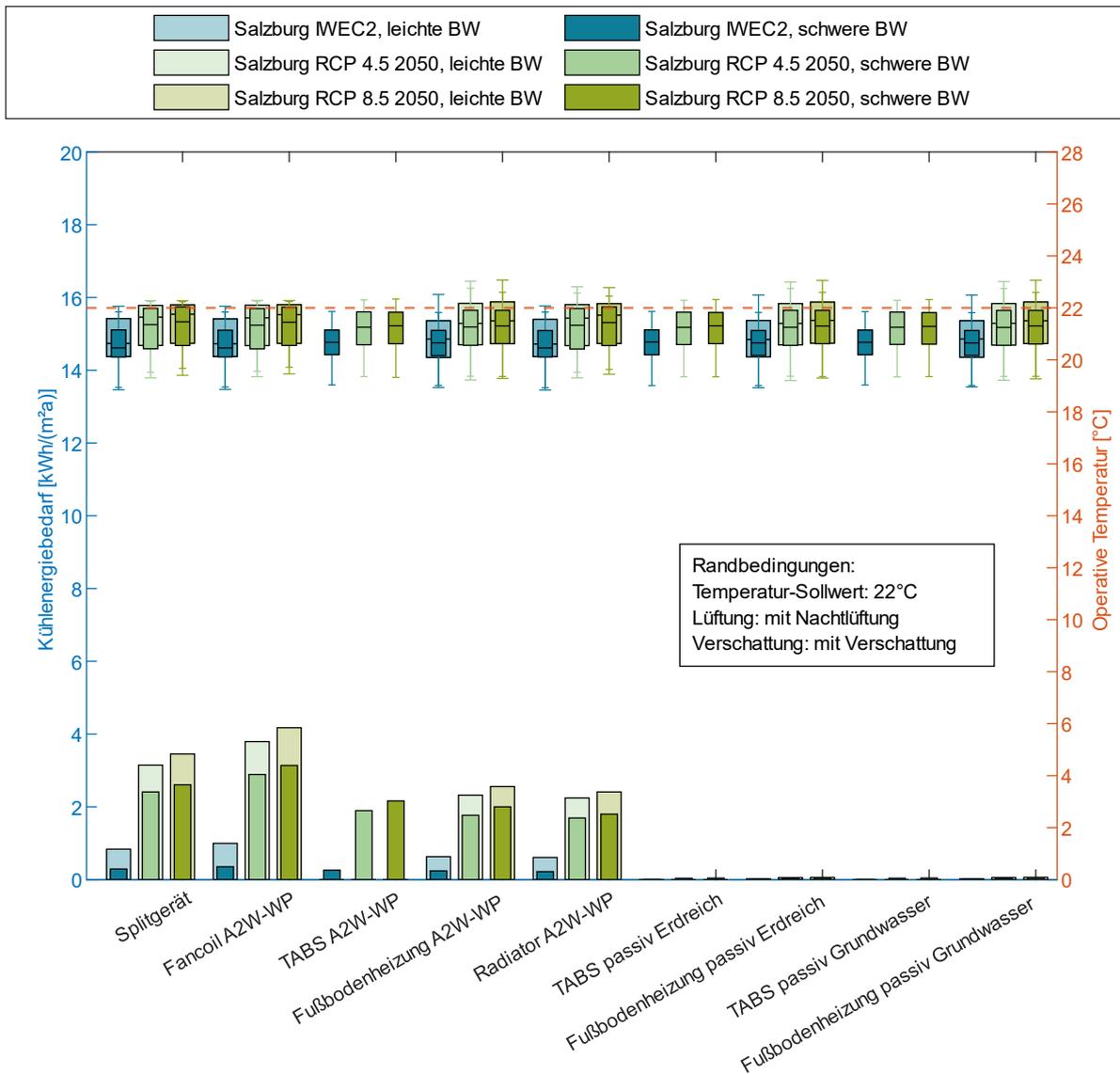


Abbildung 19: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, zwei passive Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 22 °C

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Kühlenergiebedarf aller Varianten durch die passiven Maßnahmen stark reduziert werden kann. Durch das Verhindern starker solarer Einträge (außenliegende Verschattung) profitieren Gebäude in schwerer Bauweise zusätzlich.

Am Beispiel der Kühlung über TABS in Verbindung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe ist zu erkennen, dass sich der Kühlenergiebedarf, im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abbildung 18, nur durch den Einsatz der passiven Maßnahmen und sonst gleichen Randbedingungen,

bei typischem Klima um ca. 96 % reduziert. Derselbe Vergleich, jedoch unter Annahme des Klimaszenarios RCP 4.5, ergibt eine Reduzierung des Kühlenergiebedarfs von ca. 78 % und bei angenommenem Klimaszenario RCP 8.5 einen um ca. 76 % reduzierten Kühlenergiebedarf.

Der obere Bereich der Grafik zeigt, dass die operative Temperatur, bei einem Sollwert der Lufttemperatur von 22°C, (im Vergleich zu den Ergebnissen in Abbildung 18) durch die Nutzung der passiven Maßnahmen das gewünschte Temperaturniveau einhalten kann.

7.3. Wärmeentzugsleistungen der Kühlsysteme

Um die oben genannten Ergebnisse genauer analysieren zu können, wurden die Entzugsleistungen der verschiedenen Systeme betrachtet. In folgender Abbildung ist jeweils die auftretende maximale Entzugsleistung (Kühllast) der fünf Kälteabgabesysteme angegeben. Dabei wurde die Wärmeabfuhr (inkl. Latentwärme) durch Luft- und Raumgeräte simuliert und jeweils Mittelwerte über 3 Stunden betrachtet. Diese Vorgehensweise soll verhindern, dass kurzfristige, starke Schwankungen in der Simulation, aufgrund der Regelung, eine falsche Reihung der Kälteabgabesysteme ergeben.

In Abbildung 20 sind die maximalen Wärmeentzugsleistungen (in W/m^2_{BGF}) der verschiedenen Varianten dargestellt. Dabei stellen die „Boxen“ jeweils die mittleren 50 % der Ergebniswerte dar und die darin enthaltenen Striche die dazugehörigen Mediane. Der obere und untere Whisker stellt jeweils die Spannweite der mittleren 90 % der Ergebnisse dar. Punkte über oder unter diesem Bereich sind als Ausreißer der Simulationswerte zu sehen.

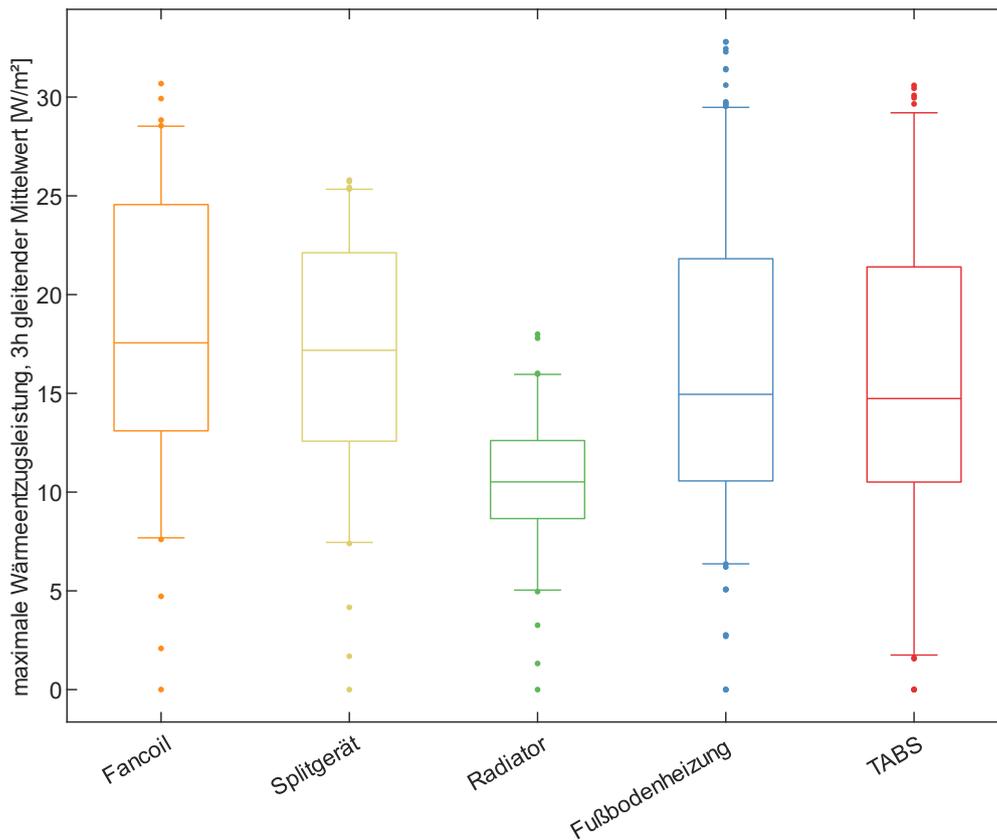


Abbildung 20: maximale Wärmeentzugsleistung der Kälteabgabesysteme der verschiedenen Varianten, 3h-Mittel

Es ist zu erkennen, dass lt. den Simulationsergebnissen die höchste auftretende Wärmeentzugsleistung durch die Kühlung über die Fußbodenheizung erreicht wird, gefolgt vom Fancoil-System. Die Kühlung über Fußbodenheizung oder TABS profitieren dabei von den sehr großen Kühlflächen, die die Wärme aus den Räumen entziehen und abführen können. Jene Kühlsysteme, die direkt über die Raumluft kühlen, können hingegen sehr rasch auf Temperaturveränderungen im Raum reagieren und Wärmeenergie ableiten. Da die Radiatoren in der Praxis für den Heizfall ausgelegt werden, sind die Flächen des Kälteabgabesystems im Verhältnis zu den Räumen relativ klein und erwirken dadurch eine geringe Wärmeentzugsleistung. Zum Teil ist die erzielbare Wärmeentzugsleistung auch zu gering, um die erforderliche Leistung der jeweiligen Variante abdecken zu können.

8. Conclusio und Ausblick

Für die Durchführung der Simulationen waren einige Festlegungen und Einschränkungen notwendig. Deshalb sind die Ergebnisse auch nicht direkt auf andere Gebäude mit abweichenden Eigenschaften (Gebäudetyp, -größe, Fensterflächenanteil, Ausrichtung, Kompaktheit, U-Werte, etc.) übertragbar. Dennoch konnten die generellen Einflüsse der variierten Parameter gut dargestellt werden und sind auch für eine große Bandbreite von Gebäuden gültig.

Passive Maßnahmen & Bauweise

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass passive Maßnahmen wie Nachtlüftung und außenliegende Verschattung den Kühlbedarf bzw. Kühlenergiebedarf erheblich reduzieren. Besonders bei schwerer Bauweise, die durch ihre hohe thermische Masse sehr träge auf Temperaturveränderungen reagieren, sind die Vorteile signifikant. Hier ist nochmals zu erwähnen, dass die Fenster in den Simulationen nur zu den Randzeiten als geöffnet angenommen wurden und nicht über die gesamte Nacht, um den Witterungs- und Einbruchschutz etc. zu beachten und somit diese passive Maßnahme umsetzbar zu machen. Wenn die Möglichkeit besteht, die Fenster nachts geöffnet zu lassen, könnten die Vorteile dieser Maßnahme noch höher ausfallen.

Ohne außenliegende Verschattung können solare Einträge ungehindert in das Gebäude eindringen und die thermischen Speichermassen erwärmen, wodurch eine sommerliche Überwärmung stattfindet. Die leichte Bauweise erfährt ohne die genannten passiven Maßnahmen sehr große tageszeitliche Temperaturschwankungen. Die besten Ergebnisse für schwere und leichte Bauweisen werden erzielt, wenn beide passiven Maßnahmen kombiniert werden, was den Kühlbedarf einiger Varianten zur Gänze eliminiert. Daher sollten passive Maßnahmen in zukünftigen Kühlstrategien unbedingt berücksichtigt werden, um den Energiebedarf der Gebäudekühlung zu minimieren und sommerliche Überwärmung effektiv zu verhindern. Nicht Gegenstand der Betrachtung waren sonstige bauliche Maßnahmen wie etwa Dachüberstände. Auch solche Maßnahmen können erheblich der sommerlichen Erwärmung entgegenwirken und sollten daher bei Kühlstrategien mitbetrachtet werden.

Kälteabgabesysteme

Kühlsysteme, die über die Zuluft kühlen (wie Splitgeräte und Fancoils), können schnell auf Änderungen der Lufttemperatur (Regelgröße in diesen Simulationen) reagieren. Allerdings weisen auch diese Systeme, vor allem bei fehlender außenliegender Verschattung, erhebliche Schwankungen der operativen (gefühlten) Temperatur auf.

Auch trägere Kühlsysteme wie die Flächenkühlung sind bei fehlender Verschattung tagszeitlichen Schwankungen unterworfen. Dies ist hauptsächlich auf die solaren Wärmeeinträge und die Trägheit des Systems zurückzuführen. Jedoch weisen diese Flächenkühlsysteme eine bessere Energieeffizienz auf und bieten in Kombination mit einer schweren Bauweise meist ein niedrigeres durchschnittliches Temperaturniveau im Gebäude im Vergleich zu luftgeführten Systemen.

Soll-Innentemperatur

Die Wahl einer niedrigeren Soll-Innentemperatur (z.B. 22 °C oder 24 °C statt 26 °C) führt bereits bei einer Differenz von 2 °C zu erheblichen Unterschieden im Kühlenergiebedarf. Eine niedrigere Soll-Innentemperatur erhöht den Kühlenergiebedarf signifikant. Es wurde festgestellt, dass die operative (empfundene) Temperatur im Raum bei einigen Varianten über dem jeweiligen Sollwert (Regelgröße Lufttemperatur) liegen, wobei dies hauptsächlich Varianten ohne passive Maßnahmen bzw. ohne außenliegende Verschattung betrifft.

Kühlsysteme, die die Luft zur Wärmeabfuhr nutzen, schneiden beim durchschnittlichen Niveau der operativen Temperatur schlechter ab, weisen jedoch insgesamt geringere Schwankungen auf als Flächenkühlsysteme, da sie schneller auf Veränderungen reagieren können.

Klimaszenarien

Die betrachteten Klimaszenarien verdeutlichen, dass sich die Umgebungsbedingungen durch höhere durchschnittliche Temperaturen und eine Zunahme an Hitzetagen nachteilig verändern werden. Es ist erkennbar, dass der Kühlbedarf bis 2050 gemäß den betrachteten Szenarien erheblich ansteigen wird. Daher ist es umso wichtiger, solche Entwicklungen bereits in aktuellen Planungen zu berücksichtigen.

Einige Simulationsergebnisse wichen leicht von den Erwartungen ab. Dies zeigt, dass besonders im sehr niedrigen Wertebereich, in dem kaum Kühlenergiebedarf besteht, die Simulationen empfindlich auf das Verhalten der Speichermassen und die Regelung reagieren. Solche Abweichungen sind nur bei sehr geringen Bedarfswerten auffällig und betreffen vernachlässigbar kleine Energiemengen, weshalb sie keine allgemeingültigen Aussagen erlauben.

Die Ergebnisse helfen dem AG dabei, Anforderungen des Landes Salzburg an die Kühlung von Wohngebäuden anhand belastbarer Daten zu implementieren und die zukünftige Bewertung zu argumentieren.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich jedenfalls durch die Relevanz bauphysikalischer Themen (Kondensat/Unterschreitung der Taupunkttemperatur) sowie hinsichtlich der Behaglichkeitskriterien verschiedener Kühlstrategien. Zusätzlich kann die Untersuchung weiterer Gebäudetypen und -eigenschaften sowie in diesem Zusammenhang bauliche Maßnahmen zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung (wie z.B. Dachvorstände) zum besseren Verständnis der Auswirkungen verschiedener Maßnahmen auf zukunftsfähige Kühlstrategien beitragen. Diese Themen konnten, aufgrund des Projektrahmens, hier nicht weiter untersucht werden.

9. Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
A2W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
BGF	Bruttogrundfläche
BW	Bauweise
EPS-F	Fassadendämmplatte aus EPS (Expandiertes Polystyrol)
EPS-T	Trittschalldämmplatte aus EPS (Expandiertes Polystyrol)
FBH	Fußbodenheizung
FHS	Fachhochschule Salzburg
g_{tot}	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (ÖNORM B 8110-6-1)
IWEC2-Daten	International Weather for Energy Calculations Version 2 (Wetterdaten für Energieberechnung)
KEB	Kühlenergiebedarf
KB_{sim}	simulierter Kühlbedarf
OSB	Grobspanplatte (oriented strand board)
RCP	Representative Concentration Pathway
RL	Rücklauf
TABS	Bauteilaktivierung (thermally activated building systems)
TSD	Trittschalldämmung
VL	Vorlauf
WP	Wärmepumpe
XPS	Extrudiertes Polystyrol

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Langfristige Entwicklung der Jahreswerte der Lufttemperatur global und in Salzburg von 1880 bis 2023. (Orlik et al., 2024).....	1
Abbildung 2: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Hitzetagen (oben) und Heizgradtagzahl (unten) in der Stadt Salzburg von 1874 bis 2023. (Orlik et al., 2024)	2
Abbildung 3: Vorschlag für die Prüfroutine des sommerlichen Wärmeschutzes (eigene Darstellung).....	5
Abbildung 4: Beobachtete Werte und simulierte Änderungen der mittleren Lufttemperatur in °C (Chimani et al., 2016)	13
Abbildung 5: Messwerte Temperaturverlauf Erdreich (RGK e.U., 2024)	14
Abbildung 6: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWEC2).....	21
Abbildung 7: Vergleich der operativen Temperatur und der Lufttemperatur bei verschiedenen Kälteabgabesystemen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWEC2), keine passiven Maßnahmen	22
Abbildung 8: Vergleich der operativen Temperatur und der Lufttemperatur bei verschiedenen Kälteabgabesystemen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWEC2), Einsatz beider passiver Maßnahmen	24
Abbildung 9: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 24 °C, Klimaszenario RCP8.5	25
Abbildung 10: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, keine passiven Maßnahmen, typisches Klima (IWEC2).....	26
Abbildung 11: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, mit zwei passiven Maßnahmen, Klimaszenario RCP 8.5	27
Abbildung 12: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, ohne passive Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C	29
Abbildung 13: Vergleich des simulierten Kühlbedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, mit zwei passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C.....	30
Abbildung 14: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 26 °C, typisches Klima (IWEC2).....	32
Abbildung 15: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen passiven Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 24 °C, Klimaszenario RCP 4.5	34
Abbildung 16: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, keine passiven Maßnahmen, typisches Klima (IWEC2).....	35
Abbildung 17: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Soll-Lufttemperaturen, zwei passive Maßnahmen, typisches Klima (IWEC2).....	37
Abbildung 18: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, ohne passive Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 22 °C	38
Abbildung 19: Vergleich des Kühlenergiebedarfs bei verschiedenen Klimaszenarien, zwei passive Maßnahmen, Soll-Lufttemperatur 22 °C	39
Zentrum Alpines Bauen	46

Abbildung 20: maximale Wärmeentzugsleistung der Kälteabgabesysteme der verschiedenen Varianten, 3h-Mittel	41
---	----

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gewählte Bauteilaufbauten der thermischen Gebäudehülle für die Simulationsmodelle, Materialkennwerte aus ÖNORM 8110-7.....	10
---	----

12. Quellen

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2012): International Weather for Energy Calculations 2.0. ASHRAE IWECC2
- Austrian Standards International (2024): ÖNORM EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden. Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6. Wien: Austrian Standards International
- Austrian Standards International (2024). ÖNORM B 8110-6-1: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 6-1: Grundlagen und Ermittlung des Heizwärmebedarfs und Kühlbedarfs. Wien: Austrian Standards International
- Austrian Standards International (2020): ÖNORM B 8110-3: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 3: Ermittlung der operativen Temperatur im Sommerfall. Wien: Austrian Standards International
- Austrian Standards International (2019): ÖNORM H 5058-1: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Kühltechnikenergiebedarf. Wien: Austrian Standards International
- Austrian Standards International (2013): ÖNORM B 8110-7: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte. Wien: Austrian Standards International
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (2023): Erhebung der Wassergüte in Österreich gemäß Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV) BGBl. II Nr. 479/2006, i.d.g.F. durch das BML, Abteilung I / 2 Nationale und internationale Wasserwirtschaft und die Ämter der Landesregierungen sowie zusätzliche Erhebungen der Ämter der Landesregierungen gemäß Wasserrechtsgesetz (WRG) BGBl. Nr. 215/1959 i.d.g.F.
- Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M., Truhetz H. (2016): Klimaszenarien für das Bundesland Salzburg bis 2100, Hrsg. Land Salzburg. Online verfügbar unter: <https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:f0d2b57e-1239-4754-8dcf-15f63c76af10/Factsheet-Salzburg.pdf>
- Deutscher Wetterdienst (2024): Stadtklima – die städtische Wärmeinsel. Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html

- Deutscher Wetterdienst (2023): Was wir 2023 über das Extremwetter in Deutschland wissen – Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland. ExtremWetter-Kongress 2023. Online verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/230927/Faktenpapier-Extremwetterkongress_download.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Europäischer Rat (2024): Website des Rates der EU und des Europäischen Rates. Politikbereiche: Maßnahmen der EU gegen den Klimawandel. Online verfügbar unter: Maßnahmen der EU gegen den Klimawandel - Consilium (europa.eu)
- Land Salzburg (2024): Klima- und Energiestrategie SALZBURG 2050. Klimaschutz: SALZBURG2050. Online verfügbar unter: https://www.salzburg.gv.at/themen/umwelt/salzburg2050/klima_energie
- Orlik A., Rohrböck A., Müller P., Tilg A.-M. (2024): Klimarückblick Salzburg 2023, Wien, © Klimastatusbericht Österreich 2023, Klimarückblick Salzburg, Hrsg. CCCA 2024. Online verfügbar unter: https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/Klimastatusbericht/KSB_2023/KRB_2023/Klimarueckblick_Salzburg_2023.pdf
- Österreichisches Institut für Bautechnik (2023): OIB Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz. Wien: OIB
- Österreichisches Institut für Bautechnik (2024): OIB Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz - Kostenoptimalität. Wien: OIB
- Reindl P., Moltinger M., Heidenthaler D., Leeb M., Bühler M., Bednar T., Rehbogen M., Graupner G. (2022): TABS im EA – Endbericht. Online verfügbar unter: https://www.zukunft-bau.at/sites/default/files/dateien/inhalt/endbericht-tabs-im-ea_220930.pdf
- RGK e.U. (2024): Messwerte Temperatur Erdreich – Juni 2023 - Juni 2024 in Virgen, Tirol