

## **Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur**

<b>Titel</b>	<b>Simulationen für gesamtheitliche und thermisch optimierte Lösungen in der Phase Vorprojekt BAT G_22_25</b>
<b>Diplomandin/Diplomand</b>	<b>Kannewischer, Constantin Robert</b>
<b>Bachelor-Studiengang</b>	<b>Bachelor Gebäudetechnik  Energie</b>
<b>Semester</b>	<b>FS22</b>
<b>Dozentin/Dozent</b>	<b>Altenburger, Adrian</b>
<b>Expertin/Experte</b>	<b>Steinmann, Markus</b>

### **Abstract Deutsch**

Mit einer quasidynamischen Simulation im Excel kann auch in frühen Projektphasen eine vereinfachte thermische Simulation durchgeführt werden. Eine solche Quasisimulation ermöglicht erste Betrachtungen komplexer Aufgabenstellungen, die mit statischen Berechnungen nicht durchgeführt werden können. Die Quasisimulation legt den Fokus auf das bauphysikalische und thermische Verhalten eines Gebäudes und den damit verbundenen Nutzenergie- und Leistungsbedarf der gebäudetechnischen Anlagen.

Die Quasisimulation berechnet analytisch jede Stunde des Jahres. Diese Berechnungsmethode wird basierend auf einem Vorprojekt verifiziert. Dafür wird sie mit einer dynamischen Simulation des Programms «IDA-ICE» verglichen, welche einen numerischen Ansatz verfolgt. Somit handelt es sich bei der Quasisimulation um eine Berechnungsmethode zwischen einer statischen Berechnung und einer vollumfänglichen Gebäudesimulation.

Mit der Quasisimulation können in frühen Projektphasen Resultate mit einer phasengerechten Genauigkeit gegenüber einer dynamischen Simulation berechnet werden. Durch kürzere Berechnungszeiten unterstützt sie als Planungstool und Diskussionsgrundlage ein interdisziplinäres Planungsteam in den frühen Entwicklungsphasen eines Projektes und generiert mehr Informationen als eine rein statische Berechnung.

---

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

### **Abstract English**

With a quasi-dynamic simulation in Excel, a simplified thermal simulation can already be carried out in the early project stages. Such a quasi-simulation enables an initial study of complex problems that cannot be carried out with statical calculations. The quasi-simulation focuses on the physical and thermal behaviour of a building and the associated useful energy and power needed by the building's technical systems.

The quasi-simulation analytically calculates every hour of the year. This calculation method is verified based on a preliminary study by comparing it to a dynamic simulation of the program «IDA-ICE», which follows a numerical approach. Therefore, the calculation method of the quasi-simulation is situated between a statical calculation and a complete building simulation. With the quasi-simulation, results can be determined in early project stages with a phase-adequate accuracy compared to dynamic simulations.

Due to shorter calculation times, this method is a supportive planning tool and discussion base for an interdisciplinary planning team in a project's early development stages, while generating more information than a static calculation.

Ort, Datum

Cham, 10.06.2022

© **Constantin Robert Kannewischer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

**Art der Arbeit:**

Bachelorthesis BAT G\_22\_25

Gebäudetechnik Energie HLKS

TA.Bachelor-Thesis Gebäudetechnik FS2201

**Verfasser:**

Constantin Robert Kannewischer

Luzernerstrasse 41

6330 Cham

[constantin.kannewischer@stud.hslu.ch](mailto:constantin.kannewischer@stud.hslu.ch)

**Institution:**

Hochschule Luzern

Technik & Architektur

Technikumstrasse 21

6048 Horw

**Betreuer:**

Erstbetreuer: Prof. Adrian Altenburger

Zweitbetreuer: Prof. Volker Wouters

Experte: Markus Steinmann

Industriepartner: IGE, ZIG; Andrii Zakovorotnyi

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Ausgangslage .....</b>	<b>3</b>
1.1 Kontext / Entstehung.....	3
1.1.1 Werkstattgebäude WSL - Konzept «Beziehungskosmos».....	4
1.1.2 Nachteile von statischen Berechnungen .....	7
1.1.3 Nachteile von Simulationsprogrammen.....	7
1.1.4 Nutzen der Quasisimulation.....	8
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	8
1.3 Methodik und Vorgehen .....	9
<b>2 IDA-ICE Simulation .....</b>	<b>10</b>
2.1 Gebäudeaufbau .....	10
2.1.1 Konstruktionen.....	10
2.1.2 Datensätze.....	12
2.1.3 Simulationsdaten.....	12
2.2 Vereinfachungen und Annahmen.....	12
2.2.1 «Natürliche» Lüftung.....	12
2.2.2 Fensteraufbau.....	13
2.2.3 Heiz- und Kühlelemente .....	14
2.2.4 Warmwasser.....	15
2.3 Kontinuierliche Anpassungen am Modell.....	15
2.3.1 Erste IDA-ICE Jahressimulation.....	15
2.3.2 Anpassungen Personenzahl.....	15
2.3.3 Anpassungen Geräteleistungen.....	15
2.3.4 Anpassungen Beleuchtung.....	16
2.3.5 Anpassung Innenwände Serverraum.....	16
2.3.6 Anpassung Infiltrationsrate.....	16
2.4 Simulationsverzeichnis .....	16
2.4.1 Szenario mit Server.....	16
2.4.2 Szenario ohne Server .....	17
2.5 Auswertungen .....	17
<b>3 Aufbau Quasisimulation.....</b>	<b>18</b>
3.1 Berechnungsmodell.....	18
3.2 Eingaben Gebäude .....	18
3.2.1 Nutzflächen.....	19
3.2.2 Bauphysikalische Eigenschaften.....	19
3.2.3 Regelparameter und Kontrollwerte.....	25
3.3 Grundlagedaten.....	26
3.3.1 Heizung.....	26
3.3.2 Externe Lasten .....	28

3.3.3	Personen.....	29
3.3.4	Lüftung.....	30
3.3.5	Sanitär - Warmwasser.....	31
3.3.6	Elektro.....	32
3.4	Simulation / Jahresberechnung .....	34
3.4.1	Aussenklima.....	34
3.4.2	Berechnung Temperaturverlauf & thermische Energien .....	35
3.5	Externe Lasten .....	43
3.5.1	1. Variante - Nur externe Lasten.....	43
3.5.2	2. Variante - Berechnete Solarstrahlung pro Fassade .....	43
3.5.3	3. Variante - Externe Lasten zuzüglich Transmissionsgewinn .....	48
3.5.4	Empfehlung der 3. Variante.....	48
3.6	Ergänzende Berechnungen Quasisimulation .....	50
3.6.1	Berücksichtigung Serverraum.....	50
3.6.2	Natürliche Lüftung.....	51
3.6.3	Eigenstromverbrauch und Autarkiegrad.....	53
3.6.4	Wärmepumpe / Kältemaschine .....	54
<b>4</b>	<b>Resultate &amp; Diskussion.....</b>	<b>55</b>
4.1	Szenario ohne Server .....	55
4.1.1	Energie und Spitzenlasten ohne Server.....	55
4.1.2	Jahresprofile ohne Server.....	56
4.1.3	Einfluss der gewählten Zeitkonstante .....	61
4.2	Szenario SIA 2028.....	65
4.2.1	Energie und Spitzenlasten SIA 2028 .....	66
4.2.2	Jahresprofile SIA 2028 .....	67
4.2.3	Auswirkung der Klimaerwärmung.....	69
4.3	Szenario mit Server.....	72
4.3.1	Einfluss des Servers .....	72
4.3.2	Vergleich Quasisimulation mit Server.....	74
<b>5</b>	<b>Ökologische Beurteilung von Stampflehm .....</b>	<b>78</b>
5.1	Freilufttemperatur.....	78
5.2	Reduktion von thermischer Nutzenergie und -leistung.....	79
5.3	Nachhaltigkeit der Stampflehmkonstruktion .....	80
<b>6</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>84</b>
	<b>Abbildungs- Diagramm- &amp; Formelverzeichnis.....</b>	<b>86</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
	<b>Normen und Richtlinien.....</b>	<b>91</b>
	<b>Literatur-/Quellenverzeichnis .....</b>	<b>92</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>94</b>

# 1 Ausgangslage

Die in dieser Arbeit beschriebene ganzheitliche Berechnungsmethode eines Gebäudes soll einem interdisziplinären Planungsteam als Hilfsmittel und Diskussionsgrundlage dienen. Es handelt sich um eine «quasidynamische» Simulation. Es ist eine Berechnung basierend auf Stundendatensätzen des Aussenklimas über das gesamte Jahr. Dabei wird jede Stunde statisch berechnet, allerdings können auch stundenübergreifende Prozesse simuliert werden. Im Gegensatz zu einer dynamischen Simulation, die auf numerischen Berechnungen basiert, handelt es sich bei der Quasisimulation um einen analytischen Ansatz. Die Quasisimulation steht somit zwischen einer statischen Berechnung und einer dynamischen Simulation.

Die Berechnungsmethode ist primär an die Bedürfnisse von Gebäudetechnikern und Bauphysikern angepasst. Sie berechnet das thermische Verhalten eines Gebäudes über ein gesamtes Jahr. Dadurch wird der thermische und elektrische Jahresenergiebedarf berechnet und es können verschiedene Aspekte genauer untersucht werden.

Da jedes Gebäude anders aufgebaut ist und es in jedem Projekt andere Schwerpunkte in den frühen Projektphasen gibt, wird bewusst kein Excel-Tool vorgelegt. Diese Dokumentation behandelt den Aufbau der Quasisimulation und die grundlegenden Bausteine, die benötigt werden, um das thermische Jahresverhalten eines Gebäudes korrekt zu berechnen. Zur Verifizierung der Resultate wird die Quasisimulation mit einer dynamischen Simulation des Programmes «IDA-ICE» verglichen. Mit dem Aufbau der Quasisimulation durch den verantwortlichen Planer entsteht ein besseres Verständnis für das Gebäude und die Berechnungsmethode, inklusive ihrer Stärken und Schwächen. Stimmen die Grundlagen, die in dieser Arbeit untersucht werden, kann die Quasisimulation individuell erweitert werden, um die entwurfsrelevanten Bereiche eines Projektes zu analysieren.

Es ist festzuhalten, dass sich die vorliegende Dokumentation auf das hier untersuchte Gebäude bezieht. Für eine allgemeine Gültigkeit der Berechnungsmethode bei anderen Gebäudetypen sind weitere Auswertungen und Verifizierungen notwendig.

## 1.1 Kontext / Entstehung

Die Berechnungsmethode wurde in den zwei interdisziplinären Projektmodulen des Programmes «Bachelor<sup>+</sup> 21/22» an der Fachhochschule Luzern – Technik & Architektur entwickelt und angewandt. Für gewisse Entwurfskriterien reichen statische Berechnungen nicht aus. Um präzise Aussagen zu machen, braucht es eine spezifischere Betrachtungsweise. Im Projekt der «Gruppe C» wurde beispielsweise mit thermischer Speichermasse aus Stampflehm gearbeitet. Das Ziel war im Sommer auf eine Kühlung zu verzichten und den Heizenergiebedarf zu senken. Um das thermische Verhalten des Gebäudes zu betrachten und die benötigte Lehmmasse zu berechnen, wurde die erste Version der hier untersuchten Quasisimulation aufgebaut.

So entstand eine Berechnungsmethode die mehr Informationen generiert als eine rein statische Berechnung, ohne einer markant grösseren Rechnerdauer bei Projektänderungen. Damit kann auf die hohe Frequenz der Entwurfsänderungen genügend schnell reagiert werden. Dadurch kann die Exceldatei als Diskussionsgrundlage während Planersitzungen verwendet werden.

## 1.1.1 Werkstattgebäude WSL - Konzept «Beziehungskosmos»

Um den Kontext der Arbeit besser zu verstehen, wird in diesem Kapitel kurz das bearbeitete Gebäude präsentiert. Detaillierte Informationen über das gesamte Projekt sind in der Schlussdokumentation der Gruppe C zu finden, die als Grundlage der folgenden Erklärungen dient.

### 1.1.1.1 Planungsauftrag

Die WSL ist die Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft des Bundes und ist der ETH angegliedert. Der Hauptsitz der WSL befindet sich in Birmensdorf. Das dort bestehende Werkstattgebäude entstand 1956 und wurde in den 1970er Jahren saniert. Der Bestandesbau erfüllt die Anforderungen der WSL nicht mehr, deshalb soll er ersetzt und vergrößert werden. Neu soll es neben den Werkstattplätzen auch Büroräumlichkeiten, ein Elektroniklabor sowie eine Cafeteria beinhalten. Von der Bauherrschaft wird grosser Wert auf die Nachhaltigkeit des Gebäudes gelegt. Als Hilfsmittel soll das SIA Merkblatt 2040 zur Anwendung kommen. Dies stützt sich auf den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft ab. Damit wird der Energiebedarf des Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, inklusive für den Bau benötigte Graue Energie.



Abbildung 1: Aussenvisualisierung Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

Als Hilfsmittel soll das SIA Merkblatt 2040 zur Anwendung kommen. Dies stützt sich auf den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft ab. Damit wird der Energiebedarf des Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, inklusive für den Bau benötigte Graue Energie.

### 1.1.1.2 Entwurfskriterien

In einem 1-wöchigen Workshop wurden mit Hilfe des SIA MB 2040 die Grundlagen des nachhaltigen Bauens erarbeitet. Aus Analysen mit dem Excel-Tool des SIA MB 2040 entstanden erste Entwurfskriterien, um die Nachhaltigkeitskriterien bereits in frühen Projektphasen zu verankern. Diese sind: neue Untergeschosse vermeiden, nachwachsende Rohstoffe verwenden, Leichtbaukonstruktion zur Reduktion der Materialmenge und wenn möglich Bauteile wiederverwenden. Um den Primärenergiebedarf im Betrieb und Graue Energie durch zusätzliche Installationen zu vermeiden, soll ein Low-Tech Gebäude entstehen. Als geeignetes Mittel hierfür soll Stampflehm als thermische Speichermasse verwendet werden. Der Bestand soll wenn möglich weiterverwendet werden, um die bereits investierte Graue Energie einzusparen.

### 1.1.1.3 Konzept Beziehungskosmos

Da das Gebäude verschiedenste Nutzungen beherbergt, soll das Gebäude den Austausch zwischen den verschiedenen Gruppen fördern. Mit Split-Levels werden Sichtbezüge geschaffen und gleichzeitig wird die Tageslichtnutzung erhöht. Das Gebäude wird in zwei Teile (Nord & Süd) unterteilt. Verbunden werden sie mit einem überhohen Zwischenraum, der die Cafeteria beherbergt und so als Treffpunkt für die Nutzer dient. Gleichzeitig vereint er die Konzepte der verschiedenen Disziplinen und ermöglicht die natürliche Belüftung der Grossraumbüros. Diese offenen Nutzungen befinden sich im Nordteil. Im Südteil befinden sich der Zwischenraum und kleinere kammerartige Arbeitsplätze.



Abbildung 2: Innenvisualisierung Zwischenraum – Eingangsbereich (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)



Abbildung 3: Innenvisualisierung Zwischenraum – Cafeteria (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

### 1.1.1.4 Tragwerkskonzept

Die Unterteilung in einen Nord- und Südteil unterstützt das Tragwerkskonzept und wird durch die unterschiedliche Materialisierung weiter betont. Um die bestehende Bodenplatte des Nordteils zu erhalten und eine nachträgliche Pfählung zu vermeiden, wird im Nordteil ein Leichtbau erstellt. Da der Südteil eine Erweiterung des Gebäudes ist, wird ein neue Bodenplatte benötigt. Dadurch kann dieser massiver sein. Er wird aus Stampflehmwänden erstellt, welche bei vergleichbarer thermischer Speichermasse weniger graue Energie als Stahlbeton benötigen. Die 1 Meter dicke Außenfassade hat kleinere Fenster, um einen baulichen Sonnenschutz zu ermöglichen. Im Inneren des Südteils gibt es zusätzlich zwei Lehmwandschichten, welche die thermische Speichermasse ins Gebäude bringen und so die thermische Trägheit des Gebäudes erhöhen.

Damit auch im Nordteil thermische Speichermasse vorhanden ist, werden vier senkrechte gebäudehohe Wandscheiben eingezogen. Diese haben keine tragende Funktion. Sie werden gezielt eingesetzt, um die Trägheit der Räume im Nordteil zu erhöhen. Zusätzlich werden alle freistehenden Lehmwände als Heiz- und Kühlflächen verwendet.

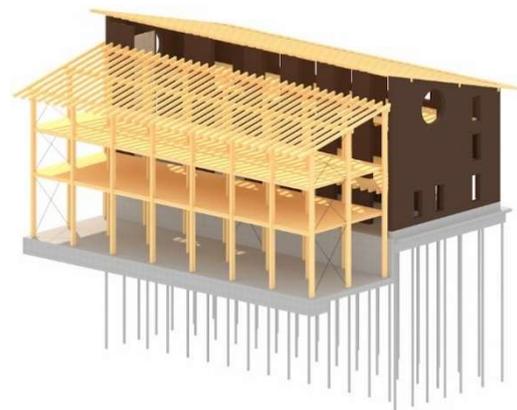


Abbildung 4: Visualisierung Tragwerksmodell Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

### 1.1.1.5 Gebäudetechnikkonzept

Unter dem Entwurfskriterium Low-Tech soll die Gebäudetechnik nur mit den lokal vorhandenen Ressourcen auskommen. Im A-Geschoss (EG-Nordteil) wird neu ein Serverraum untergebracht. Dieser hat eine Leistung von 25kW, was der Spitzenheizlast des Gebäudes entspricht. Die im Serverraum anfallende Abwärme kann somit optimal genutzt werden. Dadurch bedarf es keinen zusätzlichen Wärmerzeuger.

Überschüssige Abwärme wird an das Grundwasser abgegeben. Die Grundwassertemperaturen sind genügend tief, um auf eine Kältemaschine verzichten zu können. Im Sommer soll auch der Rest des Gebäudes über das Grundwasser gekühlt werden. Die gesamte benötigte thermische Energie wird also über Abwärme und Freecooling bereitgestellt.

In die massiven innenliegenden Lehmwände werden Heizungsrohre eingelegt. Die Wände dienen so den Räumen als Heiz- bzw. Kühlflächen. Um die Abgabefläche zu vergrößern und ein selbstregulierendes System zu ermöglichen, ist zusätzlich eine Fussbodenheizung und -kühlung vorgesehen.

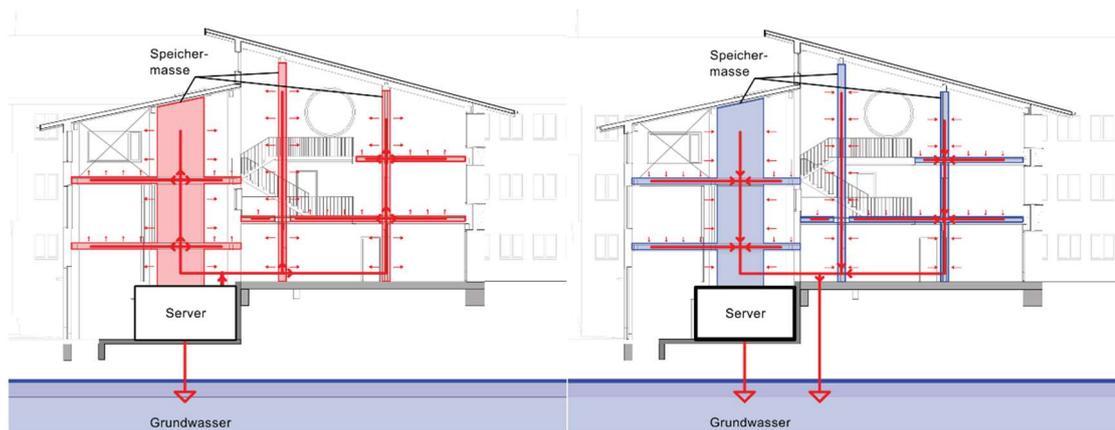


Abbildung 5: Heizungskonzept Werkstattgebäude WSL  
(Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

Abbildung 6: Kühlungskonzept Werkstattgebäude WSL  
(Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

Um mit raumnahen Systemtemperaturen auszukommen, höhere thermische Lastspitzen zu vermeiden und Installationsfläche zu reduzieren, wird eine natürliche Lüftung angestrebt. Die Räume im Südteil und im A-Geschoss können dank ihrer Geometrie über die Aussenfassade belüftet werden. Die Bürogeschosse im Nordteil werden mittels Kamineffekt über den Zwischenraum belüftet.

Durch den tiefen Warmwasserbedarf werden Elektro-Boiler eingesetzt, die ausschliesslich von der PV-Anlage gespeist werden. Durch ein dezentrales System wird Energie in Form von Wärmeverlusten der Warmwasserverteilung und die Graue Energie der gedämmten Rohre eingespart. Die PV-Anlage produziert in Spitzenstunden mehr Strom als das Gebäude benötigt. Der überschüssige Strom wird an das Arealnetz zurückgespeist.

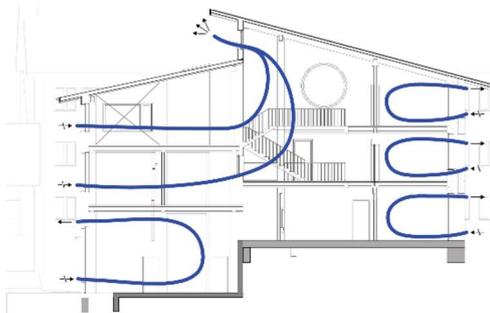


Abbildung 7: Lüftungskonzept Werkstattgebäude WSL  
(Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

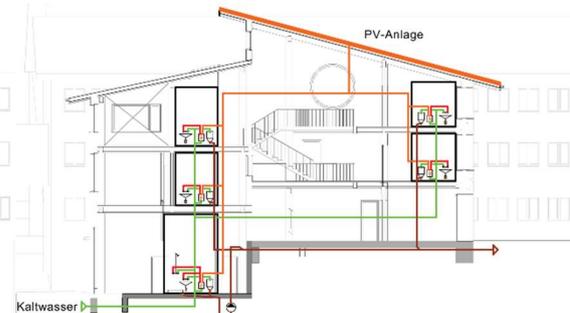


Abbildung 8: Elektro- & Sanitärkonzept Werkstattgebäude WSL  
(Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

Die Quasisimulation wurde in diesem Projekt verwendet, um das Gebäudetechnikkonzept zu verifizieren und die benötigte Lehmtonmasse zu berechnen, was mit einer statischen Berechnung nicht möglich ist.

### 1.1.2 Nachteile von statischen Berechnungen

Statische Berechnungen, wie sie meist in Vorprojektphasen vorgenommen werden, sind eine schnelle und gute Variante, um sich ein erstes Bild der Jahresenergien zu machen. Dabei wird mit Erfahrungswerten oder Kennwerten aus Normen wie dem SIA Merkblatt 2024 «Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik» gerechnet. Der Entwurf des Gebäudes (Gebäudehüllzahl, Fensteranteil etc.) wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Gleichzeitig hat man kein Jahresprofil der elektrischen und thermischen Lasten. Diese spielen oft eine essenzielle Rolle bei der Entwicklung von intelligenten und nachhaltigen Energiekonzepten.

### 1.1.3 Nachteile von Simulationsprogrammen

Der Einsatz eines Simulationsprogrammes wie «IDA-ICE» oder «WUFI» wäre eine Alternative, um die Schwächen einer statischen Berechnung zu eliminieren. Sie benötigt jedoch hohe Programmkenntnis. Gleichzeitig führen Entwurfsänderungen zu einem hohen Zeitaufwand. Durch die fehlende Qualität der IFC-Modelle in frühen Projektphasen, muss das Gebäude im Simulationsprogramm separat aufgebaut werden. Anpassungen an Grundrissen und Gebäude-dimensionen stellen sich als zeitaufwändige Arbeit heraus. Ein weiterer Grund für den hohen Zeitaufwand ist die lange Berechnungsdauer der Simulationsprogramme. Dadurch können in der Diskussion entstehende Ideen nicht direkt beurteilt werden. Will man aus dynamischen Simulationen schnelle Schlussfolgerungen ziehen, kommen die Erkenntnisse immer verspätet. Ein weiteres Problem mit vollumfänglichen Simulationsprogrammen ist der hohe Detaillierungsgrad. Für die Simulation werden Informationen benötigt, die in der Entwicklungsphase eines Projektes noch nicht vorhanden sind.

### 1.1.4 Nutzen der Quasisimulation

Die Quasisimulation steht zwischen einer statischen Berechnung und einer dynamischen Simulation. Sie basiert teilweise auf Kennwerten aus dem SIA Merkblatt 2024, aber berechnet die Jahresenergien über die Gebäudegeometrie, die Nutzungsprofile und das Aussenklima.

Da die Quasisimulation Excel-basiert ist, ist es möglich während einer Planersitzung auf eine Entwurfsänderung der anderen Disziplinen direkt zu reagieren. Somit ist eine hohe Reaktionsfähigkeit auf die zahlreichen Entwurfsänderungen in frühen Projektphasen möglich.

Mit der Quasisimulation können Lastprofile der Heizungs-, Lüftungs-, Kälte-, Sanitär- und Elektrotechnik dargestellt werden. Die Berechnung der Jahresenergien ist folglich genauer als die Berechnung über Energiekennzahlen, da das Gebäude, das Aussenklima und die Nutzer berücksichtigt werden. Projektspezifische Nutzerverhalten werden bereits in den frühen Projektphasen integriert. Die Ausgabe von Jahreslastprofilen ermöglicht die frühe Erkennung von möglichen Synergien der gebäudetechnischen Anlagen und unterstützt somit die Entwicklung des Energiekonzeptes. Dieses kann in einem vereinfachten Grad bereits untersucht werden. Beispielsweise können Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen und der Einsatz von Speicherbatterien, sowie deren Einfluss auf den Autarkiegrad und den Eigenenergieverbrauch des Gebäudes beschleunigt berechnet werden.

Zusätzlich können verschiedene Szenarien des Aussenklimas verglichen und untersucht werden. Dadurch kann untersucht werden, ob die geplante Anlage sowohl in der Gegenwart wie auch in der Zukunft den Anforderungen gerecht wird.

Wie in der Entwicklung des neuen Werkstattgebäudes angewendet, kann auch die Freilauftemperatur des Gebäudes berechnet und visualisiert werden. Die Freilauftemperatur ist die resultierende Gebäudetemperatur, wenn die Heiz- und Kühlsysteme ausgeschaltet sind. Interne und externe Wärmegewinne und -verluste werden aber berücksichtigt. Dadurch kann die Notwendigkeit eines Heiz- oder Kühlsystems abgeschätzt werden, oder ob sogar komplett darauf verzichtet werden kann, wie im Beispiel der Architekten Baumschlager Eberle mit ihrem Projekt «2226», möglich ist. Liegt die Durchschnittstemperatur der Freilauftemperatur nicht im Komfortbereich, sind tiefgreifende Anpassungen am Entwurf notwendig, um ein solches Projekt zu realisieren.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Umfang dieser Arbeit soll die Quasisimulation verifiziert werden. Dafür wird das Gebäude mit IDA-ICE simuliert. Die Resultate sind anschliessend zu vergleichen und notwendige Anpassungen am Excel sind vorzunehmen.

Die Quasisimulation soll das gesamte Gebäude abbilden und den architektonischen Entwurf, sowie die thermische Speichermasse berücksichtigen. Die in der Quasisimulation berechneten Jahresenergien und Leistungen sollen eine maximale Abweichung von +/- 20% zur dynamischen Simulation aufweisen. Hier ist festzuhalten, dass auch eine dynamische Simulation nicht der Realität entspricht. Die Arbeit legt den Hauptfokus auf den Vergleich zwischen der Berechnung eines Gebäudes mit dynamischen Simulationsprogrammen und einer Quasisimulation, nicht auf den Vergleich zwischen der Quasisimulation und einem realen, im Betrieb stehenden Gebäude.

Damit die Berechnungsmethode für die Baubranche zugänglich ist, wird eine Anleitung zum Aufbau einer solchen Quasisimulation vorgelegt. Dabei werden notwendige Vereinfachungen, Annahmen, Faktoren und Formeln beschrieben. Die Berechnungen im Excel werden im Kapitel 3 thematisiert, welches die Anleitung für den Aufbau einer solchen Quasisimulation bildet. Dabei ist festzuhalten, dass gute Kenntnisse über Excel vorhanden sein sollten, um die physikalischen Formeln korrekt ins Excel zu übertragen und die Quasisimulation in einer angemessenen Zeit aufzubauen.

Zusätzlich soll die thermische Speichermasse detaillierter untersucht werden. Dabei wird der Einfluss auf die Freilauftemperatur und den Energie- und Leistungsbedarf des Gebäudes untersucht. Allfällige Betriebsenergieeinsparungen müssen im Kontext des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet werden, um eine Aussage über die Nachhaltigkeit der Massnahmen machen zu können (siehe Kapitel 5).

### 1.3 Methodik und Vorgehen

Da die erste Version der Quasisimulation im Projektmodul bereits aufgebaut wurde, muss in einem ersten Schritt die IDA-ICE Simulation vorbereitet werden. Dafür wird das Gebäude direkt im IDA-ICE nachgezeichnet, da das IFC-Modell wie so oft in frühen Projektphasen nicht perfekt ist. Das Modell im IDA-ICE soll möglichst gut das Architekturmodell widerspiegeln.

Um einen korrekten Vergleich der Berechnungsmethoden zu garantieren, ist das Wichtigste in beiden Simulationen mit den gleichen Grundlagen zu rechnen. Dafür werden mit dem Programm «Meteonorm» Stundendatensätze am Standort des Werkstattgebäudes für das Jahr 2050 (RCP 4.5) erzeugt. Zum Vergleich und zur Veranschaulichung des Einflusses der prognostizierten Klimaerwärmung wird auch eine Variante mit einem Standardjahr des SIA MB 2028 – Klimastation Zürich Kloten berechnet. Fassadenflächen, Nutzungsprofile, interne Lasten und Regelparameter müssen zwischen der Quasisimulation und der IDA-ICE-Simulation abgeglichen werden.

In einem nächsten Schritt werden erste Resultate der Nutzenergien, Leistungen und Freilauftemperaturen verglichen. Dadurch werden die grössten Abweichungen identifiziert, um die Abfolge der Anpassungen an der Quasisimulation festzulegen. So können nicht bemerkte Unterschiede von Standardwerten und Nutzungsprofilen zwischen den zwei Berechnungsmethoden identifiziert werden. Im geplanten Werkstattgebäude der WSL ist ein Serverraum mit einer Leistung von 25 kW vorgesehen. Nach der ersten Analyse wird klar, dass dieser das thermische Verhalten des restlichen Gebäudes stärker beeinflusst als angenommen. In einem ersten Schritt wird die Abwärme des Servers nicht berücksichtigt, um die Quasisimulation abzugleichen. So soll zuerst der allgemeine Fall stimmen, bevor projektspezifische Punkte berücksichtigt werden. Die grösste Herausforderung stellt der Abgleich der Kühllast und Kühlenergie mit der IDA-ICE Simulation. Um diese zu berechnen, werden verschiedene Berechnungsmethoden im Excel getestet. Mehr dazu im Kapitel 0. In einem letzten Schritt werden die Resultate verschiedener Szenarien verglichen und diskutiert. Dadurch soll ein besseres Verständnis für das thermische Verhalten des Gebäudes geschaffen werden. Mögliche Erweiterungen der Excelberechnung werden im Kapitel 3.6 präsentiert. Zum Schluss wird die Nachhaltigkeit von thermischer Speichermasse aus Stampflehm im Gebäude untersucht.

## 2 IDA-ICE Simulation

Mit einer dynamischen Simulation des Gebäudes im Programm «IDA-ICE» werden die Berechnungen der Quasisimulation verifiziert. Der Hauptfokus liegt wie in der Quasisimulation auf der Freilufttemperatur und dem Energie- und Leistungsbedarf des kompletten Gebäudes. Es werden also keine Einzelräume im IDA-ICE untersucht. Das vorgeschlagene Energiekonzept wird mit IDA-ICE nicht genauer analysiert. Einzige Ausnahme ist die natürliche Lüftung. Bei den ausgegebenen Werten handelt es sich immer um Nutzenergien und -leistungen. Die IDA-ICE Simulation wird teilweise vereinfacht, um sie den Berechnungsmöglichkeiten von Excel anzugleichen und so einen Vergleich zu ermöglichen.

### 2.1 Gebäudeaufbau

Weil das Architektur-IFC in einer frühen Projektphase noch nicht perfekt sein kann, muss das Gebäude selbst aufgebaut werden. So wird wie im «Getting Started Guide» von IDA-ICE beschrieben die gesamte Simulation aufgebaut. Mit dem Zonentool werden automatisch die umliegenden Flächen generiert und internen Lasten, Massen und Personenprofile aus dem SIA MB 2024.2015 implementiert. Als Grundlage für den Aufbau des Gebäudes dienen die Architekturgrundrisse vom 04.04.2022. Dabei wird ein Augenmerk auf die genaue Ausrichtung des Gebäudes gelegt.

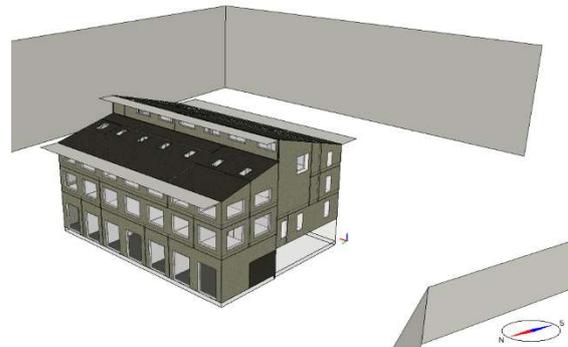


Abbildung 9: 3D IDA-ICE Modell Werkstattgebäude WSL

Beim Aufbau im IDA-ICE muss beachtet werden, dass die Nettogeschossfläche (NGF), in diesem Projekt entspricht diese der Energiebezugsfläche (EBF), nicht genau mit dem effektiven Projekt übereinstimmt, da die Wanddicke automatisch generiert wird. Gerade im Südteil mit den 40cm dicken Lehmschichten vergrößert dies die Nettogeschossfläche. Die geplante NGF beträgt 1335 m<sup>2</sup>, die im IDA-ICE generierte NGF beträgt 1405 m<sup>2</sup>.

#### 2.1.1 Konstruktionen

Speziell in diesem Projekt müssen die freistehenden Stampflehmwänden innerhalb einer Zone zusätzlich als interne Masse eingefügt werden, damit deren Speicherfähigkeit vom Programm berücksichtigt wird. Zusätzlich sind die Stampflehmwände in den Raumwänden zu ergänzen.

Da die genaue Baukonstruktion des Gebäudes nicht im IDA-ICE abgebildet werden kann, werden für die Bauteile (Aussenwände, Fenster, Innenwände, Dach, Bodenplatte) Standardelemente vom IDA-ICE verwendet. Es wird darauf geachtet, dass die Dicke und U-Werte der Bauteile möglichst mit dem geplanten Objekt übereinstimmen. Für einen korrekten Vergleich werden in der Quasisimulation die U-Werte und Bauteilflächen vom IDA-ICE übernommen. Als Materialkennwerte von Stampflehm werden die in Tabelle 1 aufgeführten Werte verwendet.

Tabelle 1: Materialkennwerte Stampflehm

Materialkennwert	Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit / Thermische Konduktivität	1.5 (Claytec.de)	W/(m K)
Dichte	2'000.0 (Dachverband-lehm.de)	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität	1'000.0 (schweizer-fn.de)	J/(kg K)

Für die Berechnung der Zeitkonstante des Gebäudes muss darauf geachtet werden, dass die Materialkennwerte im IDA-ICE und in den Handberechnungen übereinstimmen. In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die verwendeten Materialkennwerte von Beton und Holz aufgeführt.

Tabelle 2: Materialkennwerte Stahlbeton (Manz, 2017)

Materialkennwert	Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit / Thermische Konduktivität	2.3	W/(m K)
Dichte	2'300.0	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität	1'000.0	J/(kg K)

Tabelle 3: Materialkennwerte Vollholz (IDA-ICE)

Materialkennwert	Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit / Thermische Konduktivität	0.14	W/(m K)
Dichte	500.0	kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität	2'300.0	J/(kg K)

Ein vergleichbares Vorgehen musste bei den Fenstern und dem aussenliegenden Sonnenschutz vorgenommen werden. Die g-Werte von Fenstern und Sonnenschutz wurden im IDA-ICE auf die Zielwerte des SIA MB 2024.2021 angepasst. Die dort angegebenen externen Lasten basieren auf einem gesamt-g-Wert (Fenster + aussenliegender Sonnenschutz) von 0.1 und einem g-Wert der Verglasung von 0.5. Die Sonnenschutzsteuerung entspricht der in der SIA 382-1.2014 beschriebenen Regelstrategie. Die Regelparameter entsprechen der Empfehlung von Andrii Zakovorotnyi (IGE) basierend auf der SIA 382-1.2007 sowie der Studie «SADLESS». Der Sonnenschutz wird aktiviert, sobald die Strahlung auf die Fassade 200 W/m<sup>2</sup> überschreitet. Um die winterlichen Solargewinne zu erhöhen, wird auch die Raumtemperatur berücksichtigt. Steigt diese über 24°C, wird der Sonnenschutz aktiviert und wieder deaktiviert, wenn die Raumtemperatur unter 22°C abfällt. Bei Windgeschwindigkeiten über 10 m/s wird der Sonnenschutz aus Sicherheitsgründen deaktiviert.

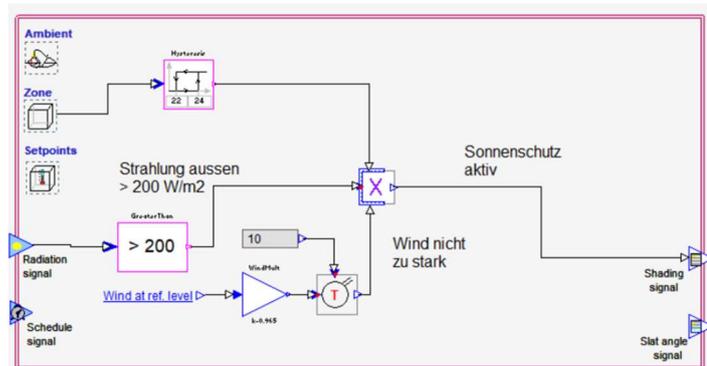


Abbildung 10: Blockscheema Sonnenschutzsteuerung IDA-ICE (IGE, Zakovorotnyi, 2022)

Die Positionierung der Fenster ist an den im IDA-ICE hinterlegten DWG-Dateien orientiert und wurde anhand des 3D-Modells der Architektur kontrolliert. Die mangelnde Präzision im 3D Modell von IDA-ICE erschwert den Abgleich der Positionen von Fenster und externen Verschattungen mit dem Architekturmodell. Die Vordächer können nicht modelliert werden und müssen als horizontale Verschattung im Übersichtsplan nach Augenmass eingezeichnet werden. Da die Grossraumbüros im Nordteil, die Cafeteria und die gesamte Erschliessungsfläche des Gebäudes den gleichen Luftraum teilen, muss darauf geachtet werden, dass sie auch in der IDA-ICE Simulation im selben simulierten Luftraum sind.

### 2.1.2 Datensätze

Fast alle Szenarien werden mit einem Datensatz des Aussenklimas aus dem Programm Meteonorm durchgeführt. Als Standort wird die genaue Position des Werkstattgebäudes in Birmensdorf berücksichtigt. Es handelt sich um einen Datensatz mit einer Prognose für das Jahr 2050 (RCP 4.5), um der zukunftsorientierten Planung Rechnung zu tragen. Einzige Ausnahme bildet das Szenario SIA 2028 in welchem ein Standardjahr des SIA MB 2028.2010 bei der Wetterstation Zürich-Kloten verwendet wird.

### 2.1.3 Simulationsdaten

Die vorliegenden Resultate werden mit benutzerdefinierten Simulationen von IDA-ICE generiert. Dabei werden alle internen und externen Lasten vollständig berücksichtigt.

Als weitere Simulationsdaten müssen Vorlaufzeit und maximale Zeitschritte definiert werden. Die Vorlaufzeit wird in jeder Simulation auf 28 Tage (Standard 14 Tage) gesetzt. Bei den Freilauftemperatur-Simulationen ist dies essenziell, damit das Gebäude korrekt einschwingt bis zum Beginn des simulierten Jahres. Des Weiteren werden bei den klimatisierten Simulationen 0.02 Stunden (72 Sekunden) als grösster Zeitschritt definiert. Bei den Freilauftemperaturen wird mit einem maximalen Zeitschritt von 0.01 Stunden (36 Sekunden) simuliert. Bei grösseren Zeitschritten würde es ansonsten zu falschen Resultaten kommen (Empfehlung A. Zakovorotnyi, IGE).

## 2.2 Vereinfachungen und Annahmen

Wie in jedem Modell gibt es auch in der IDA-ICE Simulation Vereinfachungen und Annahmen. Diese erleichtern den Aufbau und reduzieren die Komplexität der Simulation, ohne die Genauigkeit des Resultates stark zu beeinflussen.

### 2.2.1 «Natürliche» Lüftung

Eine natürliche Lüftung über die Fenster, wie sie im Projekt vorgesehen ist, kann man im IDA-ICE problemlos einprogrammieren. Es macht die Simulation jedoch komplexer und langsamer. Gleichzeitig kann eine solche Lüftung nicht im Excel berechnet werden. In der Quasisimulation wird der Einfluss der natürlichen Lüftung auf den Energiebedarf und die Raumtemperatur über den benötigten Volumenstrom berechnet. Die Temperaturdifferenz zwischen Gebäude und Umgebung ergibt den Energieverlust bzw. -gewinn durch den Luftstrom. Dasselbe Prinzip wird in

der IDA-ICE Simulation angewandt. Über ein zentrales Lüftungsgerät werden alle Räume bedarfsgerecht (VVS, CO<sub>2</sub>-geregelt) versorgt. Das Lüftungsgerät enthält keine Aufbereitungskomponenten. Die Erwärmung durch den Ventilator von ca. 1 Kelvin ist ausgeschaltet.

Da auf Grund des Nutzerverhaltens die Luftqualität bei einer Fensterlüftung schlechter ist als bei einer mechanischen Lüftung, werden die Regelparameter dementsprechend angepasst. In den Büroräumen wird der CO<sub>2</sub>-Gehalt zwischen 800 und 1200 ppm gehalten. In den restlichen Räumen ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf 1000 bis 1400 ppm geregelt.

Eine klassische Fensterlüftung würde den Temperaturverlauf im Raum unterschiedlich beeinflussen. Dieser steht jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit. Die beschriebene Vereinfachung ist im Rahmen dieser Arbeit somit vertretbar.

## 2.2.2 Fensteraufbau

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 erläutert, wurden die g-Werte von Fenstern und externen Sonnenschutz den Zielwerten der externen Last gemäss SIA MB 2024.2021 angepasst. Zusätzlich wurde im IDA-ICE die relative Grösse des Fensterrahmens angepasst. Normal nimmt der Fensterrahmen 10-15% der gesamten Fensterfläche ein. Da im Architektorentwurf Lüftungsflügel aus Holz neben den Fenstern projiziert sind, wurde dieser Anteil auf 20% angehoben. Der Fensterrahmen ist die thermisch schwächste Stelle im gesamten Fensteraufbau. Um die bauphysikalischen Eigenschaften des gesamten Fensteraufbaus nicht negativ zu beeinflussen, wird ein besserer U-Wert von 1.2 angenommen, da für die Lüftungsflügel ein ähnlicher U-Wert wie bei Fenstern erwartet wird.



Abbildung 11: Fensteraufbau Westfassade Nordteil mit Lüftungsflügel (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022)

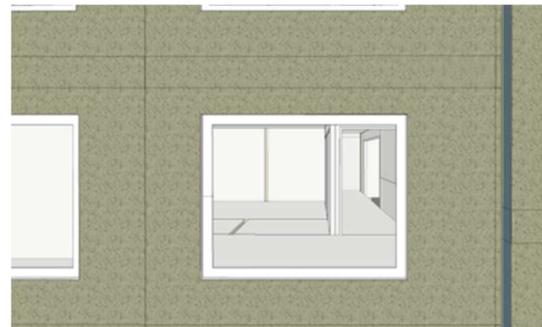


Abbildung 12: Fensteraufbau Westfassade Nordteil (IDA-ICE)

Zur Belüftung der WCs an der Ostfassade des Gebäudes sind nur solche Holzflügeln vorgesehen. Um den fensterähnlichen Aufbau der Lüftungsflügel zu berücksichtigen, werden sie als Fenster modelliert. Der aussenliegende Sonnenschutz ist das ganze Jahr geschlossen und hat einen tieferen g-Wert. So wird die Wärmetransmission durch die Lüftungsflügel berücksichtigt, die solaren Gewinne aber reduziert. Die Lüftungsflügel neben Fenstern konnten programmbedingt nicht so modelliert werden, da IDA-ICE immer eine Wand zwischen zwei Fenstern erzeugt. Dadurch würde eine nichtexistierende bauliche Verschattung entstehen.

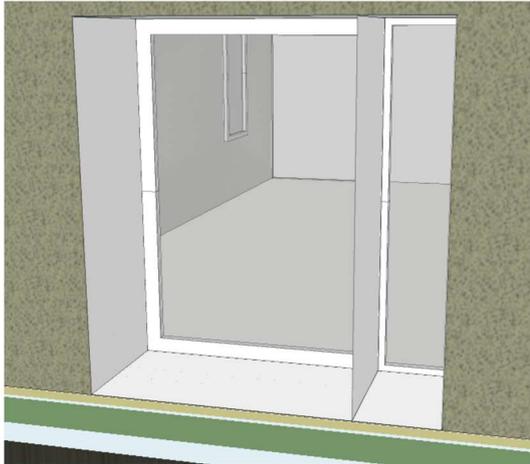


Abbildung 13: Versuch Lüftungsflügel separat zu modellieren (IDA-ICE)

Eine weitere Vereinfachung wurde bei den grossen Fenstern in der Cafeteria vorgenommen. Diese sind quadratisch statt rund. Die Fensterfläche von 4 m<sup>2</sup> stimmt jedoch mit dem architektonischen Entwurf überein.

Wie die U-Werte verschiedener Aussenbauteile werden auch die Fensterflächen vom IDA-ICE in die Quasisimulation übertragen, um einen korrekten Vergleich zu garantieren.

### 2.2.3 Heiz- und Kühlelemente

Das Kapitel 1.1.1.5 erläuterte Gebäudetechnikkonzept wird mit der IDA-ICE Simulation nicht untersucht. Dadurch können ideale Heiz- und Kühlelemente in den Räumen verwendet werden. Diese regulieren die Raumtemperatur unrealistischerweise immer perfekt auf den Regelsollwert und dies ohne Verzögerung.

Eine weitere Annahme auf Grund der Quasisimulation, ist die Betrachtung des Gebäudes als ein Raum (siehe im Kapitel 3.1). Dadurch wird das gesamte Gebäude beheizt und gekühlt. Somit müssen auch Nebenräume, die normalerweise nicht gekühlt werden, mit einem idealen Kühlelement ausgerüstet werden. Damit werden gleiche Grundlagen in beiden Simulationen geschaffen, um sie korrekt zu vergleichen. Die Sollwerte der Raumtemperaturen im Heiz- und Kühlfall entsprechen den geplanten Werten des Werkstattgebäudes (siehe Kapitel 3.3.1, Abbildung 19).

## 2.2.4 Warmwasser

Das benötigte Warmwasser pro Tag wird im IDA-ICE über einen Eingabewert berücksichtigt. Dieser wird von der Quasisimulation übernommen und ist somit ein projektspezifischer Wert. Um dem Warmwasserbezug ein Tagesprofil zu geben, wird die Option «zu Tarifzeiten» im IDA-ICE verwendet. Der Energiebedarf der Warmwassererzeugung wird im Umfang dieser Arbeit jedoch nicht weiter vertieft.

## 2.3 Kontinuierliche Anpassungen am Modell

Im Verlaufe der Arbeit wurde die IDA-ICE Simulation immer wieder angepasst, da verschiedene Parameter im Modell fehlerhaft oder noch nicht angepasst waren. Die meisten vorzunehmenden Korrekturen konnten nach einem ersten Vergleich der IDA-ICE Simulation und der Quasisimulation identifiziert werden.

### 2.3.1 Erste IDA-ICE Jahressimulation

Nach einem Vergleich der Quasisimulation und der ersten Simulation im IDA-ICE wiesen die in der Quasisimulation berechneten Nutzenergien des gesamten Gebäudes kaum Abweichungen auf. Die Nutzenergie für die Raumheizung stimmte mit einer Abweichung von 11.83% überein, die Kühlenergie des gesamten Gebäudes inklusive Serverkühlung weicht nur 2.29% von der IDA-ICE Simulation ab. Wird die Kühlenergie aufgeteilt zeigte sich, dass die in der Quasisimulation berechnete Nutzenergie der Raumkühlung ohne Serverraum 84% vom Vergleichswert der IDA-ICE Simulation abweicht. Ein Grund für den höheren Kühlenergiebedarf der Räume sind Unterschiede bei den Personenzahlen und dem elektrischen Energieverbrauch im Gebäude. Ein weiterer Grund ist die Wärmeabgabe des Serverraumes an die angrenzenden Räume. Dies wurde bis dahin in der Quasisimulation nicht berücksichtigt. Für einen Vergleich der Berechnungsmethoden wird das Gebäude in einem ersten Schritt ohne die interne Last des Servers betrachtet. In einem zweiten Schritt wird das Gebäude inklusive der internen Last des Servers untersucht.

### 2.3.2 Anpassungen Personenzahl

Ursprünglich wurde für die Personenbelegung im IDA-ICE die Standard-Personenfläche des SIA MB 2024.2015 berücksichtigt. Da die Personen den Luftvolumenstrom im Gebäude beeinflussen und kontinuierlich Wärme abgeben, werden die Personenzahlen dem Planungsstand vom 04.04.2022 angepasst. Die Personenzahlen wurden anschliessend wieder in die Quasisimulation übertragen, damit die Belegungsprofile übereinstimmen.

### 2.3.3 Anpassungen Geräteleistungen

Die Leistung von elektrischen Geräten in den verschiedenen Zonen wird im IDA-ICE über die Fläche definiert. Als Vorgabewerte werden die Standardwerte des SIA MB 2024.2021 verwendet. Für die Nutzungsprofile werden die Tagesprofile des SIA MB 2024.2015 verwendet, da diese bereits im IDA-ICE einprogrammiert sind. Die Profile und Standardwerte der Quasisimulation werden der IDA-ICE Simulation angeglichen.

### 2.3.4 Anpassungen Beleuchtung

Die Lichtausbeute ist ein wichtiger Wert für die Berechnung der Beleuchtungsleistung. Im IDA-ICE sind standardmässig 12 lm/W einprogrammiert. Mit neuen LED-Leuchten wird jedoch eine Lichtausbeute von 100 lm/W erreicht. Die Zielwerte für die Beleuchtungsleistung des SIA MB 2024.2021 basieren ebenfalls auf einer Lichtausbeute von 100 lm/W. Nach der Anhebung der Lichtausbeute im IDA-ICE konnten die Zielwerte des SIA MB 2024.2021 für die installierte Beleuchtungsleistung übernommen werden. So können die Zielwerte des SIA MB 2024.2021 auch in der Quasisimulation verwendet werden.

### 2.3.5 Anpassung Innenwände Serverraum

Um die abgegebene Wärme des Serverraumes an die angrenzenden Räume zu reduzieren, werden die Innenwände des Serverraumes gedämmt. Diese Massnahme müsste auch im realen Projekt diskutiert werden, da der Serverraum auf 27°C gekühlt wird und somit eine höhere Temperatur aufweist als die angrenzenden gekühlten Räume.

### 2.3.6 Anpassung Infiltrationsrate

Als Infiltrationsrate wurde im Verlaufe der Arbeit ein 0.1-facher Luftwechsel definiert. Dieser musste in einem letzten Anpassungsschritt auch im IDA-ICE festgelegt werden. Dadurch konnten der eher hohe Heiz- und Kühlenergiebedarf des Gebäudes gesenkt werden, um dem heutigen Stand der Technik und den Energievorschriften zu entsprechen.

## 2.4 Simulationsverzeichnis

Im Verlaufe der Arbeit wurden verschiedene Szenarien und Varianten untersucht. Von jedem Szenario wird eine vollklimatisierte Variante mit aktiven Heiz- und Kühlelementen simuliert. Diese sind in einer zweiten Variante deaktiviert, um die Freilufttemperatur des Gebäudes zu simulieren. Insgesamt wurden 5 Szenarien erstellt und 10 Varianten simuliert. Die Berichte der IDA-ICE Simulationen befinden sich im Anhang 3

### 2.4.1 Szenario mit Server

Dies ist die Ursprungsvariante. Darin ist das Gebäude so genau wie möglich entsprechend dem Projekt der Gruppe C abgebildet. Die Bandlast des Servers von 25 kW wird berücksichtigt. Die Kühlung des Serverraumes wird bei der Simulation der Freilufttemperatur nicht ausgeschaltet. Der Serverraum würde ansonsten überhitzen und die umliegenden Räume noch stärker beeinflussen.

## 2.4.2 Szenario ohne Server

In dieser Variante wird die interne Last des Servers nicht berücksichtigt. Dadurch soll ein allgemeinerer Fall untersucht werden, da ein Serverraum mit 25 kW Leistung nicht in jedem Gebäude vorzufinden ist. Diese Variante gilt als Hauptvergleich für die Quasisimulation. Diese wird in einem ersten Schritt angepasst, um möglichst genau mit dem Szenario ohne Server im IDA-ICE übereinzustimmen. Wenn der Allgemeinfall stimmt, wird die Quasisimulation mit der Wärmeabgabe durch den Serverraum ergänzt, um sie dann mit dem 1. Szenario inkl. Server zu vergleichen. Basierend auf diesem Szenario werden weitere Szenarien des Gebäudes aufgebaut.

### 2.4.2.1 Szenario SIA 2028

In diesem Szenario wird mit einem Standardjahr des SIA MB 2028.2010 am Standort Zürich-Kloten gerechnet. Damit soll der Abgleich zu einem anderen Klimadatensatz gemacht werden, um zu untersuchen, ob die Quasisimulation auch mit einem anderen Klimadatensatz noch funktioniert. Gleichzeitig lässt sich damit der Einfluss der Klimaerwärmung auf den Nutzenergiebedarf eines Gebäudes aufzeigen.

### 2.4.2.2 Szenario Leichtbau

Dieses Szenario soll den Einfluss der thermischen Speichermasse auf das thermische Verhalten des Gebäudes abbilden. Die Frage ist, wie viel Nutzenergie und Spitzenleistung durch ein trägeres Gebäude eingespart werden kann und ob diese Einsparung über den gesamten Lebenszyklus den erhöhten Aufwand an Grauer Energie kompensieren kann. Dafür werden interne Lehmwände durch normale Innenwände ersetzt. Die Aussenfassade des Südteils wird durch eine Holzfassade ersetzt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der U-Wert der Aussenwandkonstruktion unverändert bleibt.

### 2.4.2.3 Szenario ohne interne Masse

Dieses Szenario wurde ebenfalls unter der Frage der Nachhaltigkeit von thermischer Speichermasse erstellt. Mit dieser Simulation wird der Einfluss des innenliegenden Lehmolumens, in Form von freistehenden Stampflehmwänden und dem Bodenaufbau, auf das Gebäude untersucht. Die massive Stampflehmwand des Südteils bleibt wie im Projekt vorgesehen bestehen. Die Frage über den Einfluss und die Nachhaltigkeit von thermischer Speichermasse wird im Kapitel 5 genauer thematisiert.

## 2.5 Auswertungen

Die Auswertung der IDA-ICE Simulationen erfolgt in Excel, um direkt mit den Resultaten der Quasisimulationen zu vergleichen. Es werden die Nutzenergien und Leistungen verglichen. Zusätzlich Last- und Temperaturprofile ausgewertet. Um die mittlere simulierte Gebäudetemperatur zu untersuchen, muss mit den Raumtemperaturverläufen das geometrische Mittel aller Zonen berechnet werden

Die aufbereiteten Daten werden graphisch, aber auch rechnerisch mit dem Excel verglichen und im Kapitel 4 präsentiert und diskutiert.

## 3 Aufbau Quasisimulation

Folgend werden der Aufbau und die Berechnungen inklusive verwendeter Formeln und Standardwerten erläutert. Übersichtshalber wird die Quasisimulation in mehreren Mappen aufgebaut. In der ersten Mappe werden die Grundlagedaten des Gebäudes eingegeben (siehe Kapitel 3.2). In Grundlagen-Mappen werden die einzelnen Gewerke behandelt (siehe Kapitel 3.3). Hier werden auch Tages- und Wochenprofile erstellt. Ziel ist es, die Jahresberechnungsmappe möglichst schlank halten zu können. Darin werden die effektiven Nutzenergien und die Gebäudetemperatur berechnet (siehe Kapitel 3.4). Auf diesen liegt der Fokus der Quasisimulation. So soll das Gebäude in der Grundlage korrekt berechnet werden. Stimmt diese, kann die Quasisimulation individuell erweitert werden, um auch Endenergien zu berechnen. Mögliche Erweiterungen werden im Kapitel 3.6 thematisiert. Eine Übersicht der gesamten Mappen befindet sich jeweils im Anhang 1.

### 3.1 Berechnungsmodell

Um die Quasisimulation besser zu verstehen, werden die Annahmen und das Berechnungsmodell kurz erläutert.

Bei der Quasisimulation wird das Gebäude als Punktmasse betrachtet. Das Gebäude wird auf einen grossen Raum reduziert, der alle Nutzungen und ihre internen Lasten beinhaltet. Dadurch können modellbedingt keine Einzelräume genauer untersucht werden. Die Quasisimulation dient also nur der Betrachtung eines ganzen Gebäudes. Dies führt dazu, dass in allen Räumen gleichzeitig die Kühlung oder die Heizung aktiviert wird. Die berechnete Gebäudetemperatur ist somit als geometrischer Mittelwert aller Räume im Gebäude zu verstehen. Lokale Abweichungen von diesem Mittelwert sind immer zu erwarten.

Eine modellbedingte Vereinfachung ist die Berücksichtigung der erdberührenden Teile. In einem Punktemassemodell ist die gesamte Oberfläche des Gebäudes derselben Aussenbedingung (Aussenklima) ausgesetzt. Dadurch kann das abweichende Verhalten bei erdberührenden Teilen nicht berücksichtigt werden.

### 3.2 Eingaben Gebäude

Die Mappe «Eingaben Gebäude» beinhaltet Grundlagedaten des Gebäudes und funktioniert gleichzeitig als Control-Panel. Zusätzlich werden Diagramme und die relevanten Energiekennzahlen in dieser Mappe zusammengefasst. Dadurch kann der Einfluss von Änderungen der Regelparametern direkt im Temperaturverlauf des Gebäudes und den Energiekennzahlen beobachtet werden. In dieser Mappe wird die Zeitkonstante, also die thermische Trägheit des Gebäudes, berechnet.

### 3.2.1 Nutzflächen

In einer ersten Tabelle werden die unterschiedlichen Nutzungen des geplanten Projektes und deren Flächen aufgelistet. Da die meisten Kennwerte der einzelnen Gewerke aus dem SIA MB 2024.2021 stammen, macht es Sinn sich grob an diesen Standardnutzungen zu orientieren. Dabei ist es wichtig, wie bei einer statischen Berechnung gemäss SIA MB 2024.2021, jede Nutzung separat aufzuführen. Ein Bürogebäude besteht nicht nur aus Grossraumbürofläche, sondern auch aus Lagerräumen, WCs, Serverraum, Sitzungszimmer, Einzelbüros etc. Diese sind separat auszuweisen.

Nutzungen	Nutzungsfläche
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>
WC	51.00 m <sup>2</sup>
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>
<b>Total EBF</b>	<b>1335.00 m<sup>2</sup></b>

Abbildung 14: Eingabe Nutzungen

### 3.2.2 Bauphysikalische Eigenschaften

Dieser Eingabeblock behandelt die bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Dafür müssen Aussenflächen, Abmessungen, Gebäudevolumen und Materialkennwerte eingegeben werden. In einem zweiten Schritt kann die Zeitkonstante berechnet werden.

Dimensionierung Speichermasse			Gebäudeabmessungen					
Zeitkonstante Gebäude	277 h		Länge	28.00 m	Gebäudevolumen	6137.90 m <sup>3</sup>		
Berechnung benötigtes Lehmvolumen			Breite	21.14 m				
	Massen total	Massen nutzbar						
Oberfläche	2359.52 m <sup>2</sup>		Bauteilliste	Fassade total	Fensterfläche	netto Fassadenfläche	U-Wert	U-Wert * Fläche
Volumen	6137.90 m <sup>3</sup>		Südfassade	266.63 m <sup>2</sup>	55.78 m <sup>2</sup>	210.85 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	35.3 W/K
mittlerer U-Wert	0.4 W/m <sup>2</sup> *K		Westfassade Südteil	133.63 m <sup>2</sup>	13.48 m <sup>2</sup>	120.15 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	20.1 W/K
Wärmekapazität Holz	2300.0 J/kg*K		Westfassade Nordteil	108.34 m <sup>2</sup>	18.72 m <sup>2</sup>	89.62 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	13.8 W/K
Masse Holz	38'875 kg	30'930 kg	Nordfassade	374.22 m <sup>2</sup>	145.92 m <sup>2</sup>	228.30 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	35.1 W/K
Wärmekapazität Beton	1000.0 J/kg*K		Ostfassade Nordteil	108.34 m <sup>2</sup>	13.68 m <sup>2</sup>	94.66 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	14.6 W/K
Masse Beton	486'908 kg	279'703 kg	Ostfassade Südteil	133.63 m <sup>2</sup>	7.44 m <sup>2</sup>	126.19 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	21.1 W/K
Wärmekapazität Lehm	1000.0 J/kg*K		Dach	562.40 m <sup>2</sup>	9.45 m <sup>2</sup>	552.95 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	93.1 W/K
Dichte Lehm	2000 kg/m <sup>3</sup>		<b>Total</b>	<b>1687.19 m<sup>2</sup></b>	<b>264.47 m<sup>2</sup></b>	<b>1422.72 m<sup>2</sup></b>		<b>233.1 W/K</b>
Masse Lehm	279'661 kg	505'139 kg	Fensterfläche Total	264.47 m <sup>2</sup>			1.0 W/m <sup>2</sup> *K	264.5 W/K
Volumen Lehm benötigt	139.83 m <sup>3</sup>	252.57 m <sup>3</sup>	Fassadenfläche	869.77 m <sup>2</sup>				140.0 W/K
			Dachfläche	552.95 m <sup>2</sup>				93.1 W/K
Volumenermittlung Lehm			erdberührende Flächen	672.33 m <sup>2</sup>			0.2 W/m <sup>2</sup> *K	103.5 W/K
Bodenplatten	788.54 m <sup>2</sup>	788.54 m <sup>2</sup>	<b>Fläche Total</b>	<b>2359.52 m<sup>2</sup></b>				<b>601.0 W/K</b>
Dicke Lehmaufbau Boden	0.08 m <sup>2</sup>	0.08 m <sup>2</sup>	Wärmebrückenfaktor	0.1		Wärmetransferkoeffizient Wärmebrücken		60.1 W/K
Volumen Boden Lehm	63.08 m <sup>3</sup>	63.08 m <sup>3</sup>	Luftwechsel Infiltration	0.1/h		Wärmetransferkoeffizient Infiltration		197.2 W/K
Volumen in Wände	514.66 m <sup>3</sup>	189.23 m <sup>3</sup>				<b>Wärmetransferkoeffizient Gebäude</b>		<b>858.4 W/K</b>
Volumen Lehm Total	577.74 m <sup>3</sup>	252.31 m <sup>3</sup>						
Zeitkonstante berechnet	560 h	277 h	U-Wert mittel	0.36 W/m <sup>2</sup> *K				

Abbildung 15: Eingabe bauphysikalische Eigenschaften

#### 3.2.2.1 Gebäudeabmessungen & Bauteilliste

Als Erstes müssen die Dimensionen des Gebäudes eingegeben werden. Die Länge und Breite sind später für die Beleuchtungssteuerung notwendig. Das Gebäudevolumen wird für die Berechnung des Infiltrationsvolumenstrom benötigt. Für den Vergleich der Berechnungsmethoden wurde als Bauvolumen die Summe der Zonenvolumen aus IDA-ICE übernommen.

Mit der Bauteilliste werden die verschiedenen Aussenbauteile erfasst. In diesem Projekt wurden die Fassaden nach ihrer Orientierung, wie auch nach der Konstruktion der Fassade aufgeteilt (siehe Abbildung 16). Die Aufteilung nach Fassadenkonstruktion sollte in jedem Fall vorgenommen werden, da diese meistens unterschiedliche U-Werte haben. Von der brutto Aussenfläche werden die Fensterflächen abgezogen. Die Nettoaussenfläche wird anschliessend mit dem U-

Wert multipliziert, um den Wärmetransmissionskoeffizient  $H_{Trans}$  der Fassade gemäss Formel 1 zu berechnen. Dasselbe wird für Fensterflächen sowie erdberührende Flächen durchgeführt.

Aus der Summe der Wärmetransmissionskoeffizienten der Aussenflächen wird der Wärmetransferkoeffizient der Wärmebrücken berechnet (gem. Formel 2). Hierfür wird ein Prozentsatz von 10% angenommen (Empfehlung Prof. Manz). Zusätzlich wird mit dem Volumen des Gebäudes und einer Luftwechselrate von  $0.1 \text{ h}^{-1}$  (Empfehlung Prof. Manz) der Wärmetransferkoeffizient des Infiltrationsvolumenstromes berechnet (gem. Formel 3). Die Summe der Wärmetransferkoeffizienten der Bauteile, der Wärmebrücken und des Infiltrationsluftvolumenstromes ergeben den Wärmetransferkoeffizient des gesamten Gebäudes  $H_{tot}$  (Formel 4) Dieser wird benötigt, um die Zeitkonstante des Gebäudes und den Transmissionsverlust bzw. -gewinn durch die Aussenfläche des Gebäudes in jeder Stunde zu berechnen.

Formel 1: Wärmetransmissionskoeffizient Bauteil

$$H_{Trans} = A \cdot U \left[ \frac{W}{K} \right]$$

Formel 2: Wärmetransferkoeffizient Wärmebrücken

$$H_{WB} = (\sum H_{Trans}) \cdot f_{WB} \left[ \frac{W}{K} \right]$$

Formel 3: Wärmetransferkoeffizient Infiltrationsvolumenstrom

$$H_{Inf} = \frac{V_{Geb} \cdot n_{50} \cdot \rho_{Luft} \cdot c_{Luft}}{3600} \left[ \frac{W}{K} \right]$$

Formel 4: Wärmetransferkoeffizient Gebäude

$$H_{tot} = (\sum H_{Trans}) + H_{WB} + H_{Inf} \left[ \frac{W}{K} \right]$$

$A$	Bauteilfläche	$[\text{m}^2]$
$A_{tot}$	Aussenfläche Gebäude	$[\text{m}^2]$
$U$	U-Wert Bauteil	$\left[ \frac{W}{\text{m}^2 \text{ K}} \right]$
$f_{WB}$	Wärmebrückenfaktor	$[-]$
$V_{Geb}$	Gebäudevolumen	$[\text{m}^3]$
$n_{50}$	Luftwechselrate Infiltration	$[\text{h}^{-1}]$
$\rho_{Luft}$	Dichte Luft	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
$c_{Luft}$	Wärmekapazität Luft	$\left[ \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$

Die Division des Wärmetransferkoeffizient des gesamten Gebäudes durch die gesamte Aussenfläche ergibt den mittleren U-Wert des Gebäudes (Formel 5). Dieser wird in der Berechnung der Zeitkonstante verwendet.

Formel 5: Mittlerer U-Wert Gebäude

$$U_{mittel} = \frac{H_{tot}}{A_{tot}} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

$H_{tot}$	Wärmetransferkoeffizient Gebäude	$\left[ \frac{W}{K} \right]$
$U_{mittel}$	Mittlerer U-Wert Gebäude	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$A_{tot}$	Aussenfläche Gebäude	$[m^2]$

Gebäudeabmessungen					
	Länge	28.00 m	Gebäudevolumen	6137.90 m <sup>3</sup>	
	Breite	21.14 m			
Bauteilliste	Fassade total	Fensterfläche	netto Fassadenfläche	U-Wert	U-Wert * Fläche
Südfassade	266.63 m <sup>2</sup>	55.78 m <sup>2</sup>	210.85 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	35.3 W/K
Westfassade Südteil	133.63 m <sup>2</sup>	13.48 m <sup>2</sup>	120.15 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	20.1 W/K
Westfassade Nordteil	108.34 m <sup>2</sup>	18.72 m <sup>2</sup>	89.62 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	13.8 W/K
Nordfassade	374.22 m <sup>2</sup>	145.92 m <sup>2</sup>	228.30 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	35.1 W/K
Ostfassade Nordteil	108.34 m <sup>2</sup>	13.68 m <sup>2</sup>	94.66 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	14.6 W/K
Ostfassade Südteil	133.63 m <sup>2</sup>	7.44 m <sup>2</sup>	126.19 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	21.1 W/K
Dach	562.40 m <sup>2</sup>	9.45 m <sup>2</sup>	552.95 m <sup>2</sup>	0.17 W/m <sup>2</sup> *K	93.1 W/K
<b>Total</b>	<b>1687.19 m<sup>2</sup></b>	<b>264.47 m<sup>2</sup></b>	<b>1422.72 m<sup>2</sup></b>		<b>233.1 W/K</b>
Fensterfläche Total	264.47 m <sup>2</sup>			1.0 W/m <sup>2</sup> *K	264.5 W/K
Fassadenfläche	869.77 m <sup>2</sup>				140.0 W/K
Dachfläche	552.95 m <sup>2</sup>				93.1 W/K
erdberührende Flächen	672.33 m <sup>2</sup>			0.2 W/m <sup>2</sup> *K	103.5 W/K
<b>Fläche Total</b>	<b>2359.52 m<sup>2</sup></b>				<b>601.0 W/K</b>
Wärmebrückenfaktor	0.1		Wärmetransferkoeffizient Wärmebrücken		60.1 W/K
Luftwechsel Infiltration	0.1/h		Wärmetransferkoeffizient Infiltration		197.2 W/K
			<b>Wärmetransferkoeffizient Gebäude</b>		<b>858.4 W/K</b>
<b>U-Wert mittel</b>	<b>0.36 W/m<sup>2</sup>*K</b>				

Abbildung 16: Eingabe Gebäudeabmessungen & Bauteilliste

### 3.2.2.2 Berechnung Zeitkonstante

Die Zeitkonstante  $\tau$  wird benötigt, um das thermische Verhalten des Gebäudes zu berechnen. Mit der Zeitkonstante wird das Leistungsverhältnis im Gebäude abgeschwächt. Damit wird die Trägheit des Gebäudes in der Quasisimulation berücksichtigt. Je grösser die Zeitkonstante ist, umso träger ist das Gebäude.

Die Zeitkonstante kann mit der Halbwertszeit in anderen Wissenschaften verglichen werden. Es handelt sich jedoch nicht um die Zeitspanne bis zur Halbierung eines Startwerts wie beim Zerfall von Atomen, sondern um die Zeitspanne bis der Startwert auf 37% ( $e^{-1}$ ) absinkt. Im Kontext von Gebäuden wird damit der Temperaturverlauf beschrieben, wenn die Aussentemperatur einen

Sprung macht. Das Gebäude gleicht sich in einem exponentiellen Verlauf der Aussentemperatur an. Sobald die Temperaturdifferenz nur noch 37% beträgt, ist die Zeitkonstante  $\tau$  erreicht.

«Die Beschreibung der Auskühlung eines Gebäudes mit der Zeitkonstante gilt als das simpelste Modell zur Auskühlung eines Gebäudes.» (Seerig, 2021)

Zur Vereinfachung der Erklärung werden im Diagramm 1 verschiedene Zeitkonstanten verglichen. Zum Zeitpunkt 0 springt die Aussentemperatur von 20°C auf 0°C. Das Gebäude hat bis zum Zeitpunkt 0 ebenfalls eine Temperatur von 20°C und kühlt sich anschliessend auf Grund des Wärmeverlustes zur nun kälteren Umgebung ab. Dabei werden keine externen oder internen Lasten berücksichtigt. Es wird also das Temperaturverhalten eines leerstehenden Gebäudes betrachtet.

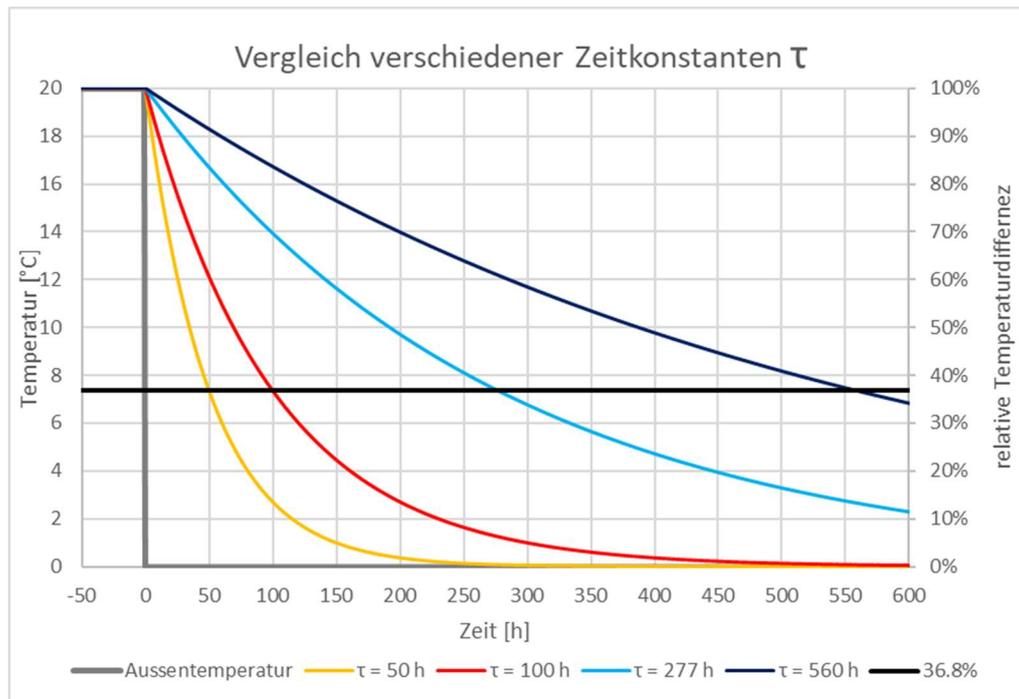


Diagramm 1: Vergleich verschiedener Zeitkonstanten  $\tau$

Das Gebäude kühlt sich in der Dauer der Zeitkonstante genau auf 7.35°C ab, was 36.8% des Temperaturunterschieds von 20 Kelvin zum Zeitpunkt 0 entspricht. Der Verlauf der Gebäudetemperatur bei unterschiedlichen Zeitkonstanten wird gemäss Formel 6 berechnet.

Formel 6: Temperaturverlauf Zeitkonstante

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [\text{K}]$$

$\Delta\theta(t)$	Temperaturunterschied zum Zeitpunkt t	[K]
$\Delta\theta_0$	Temperaturunterschied zum Zeitpunkt 0	[K]
$t$	Zeit	[h]
$\tau$	Zeitkonstante	[h]

Für die Berechnung der Zeitkonstante werden die Aussenfläche, der mittlere U-Wert und die thermisch nutzbare Masse des Gebäudes benötigt. Die Zeitkonstante eines Gebäudes wird gemäss Formel 8 berechnet.

Für die korrekte Berechnung muss zuerst die thermisch nutzbare Masse, auch aktivierbare Masse genannt, des Gebäudes ermittelt werden. Diese ist abhängig von den speicherwirksamen Dicken der verschiedenen Materialien. Sie beschreibt, wie tief eine periodische Schwingung in eine Materialschicht eindringt und ist abhängig von der thermischen Leitfähigkeit, der Wärmekapazität, der Materialdichte sowie der Periodendauer.

Für die Quasisimulation müssen nur die massgeblichen Baumaterialien berücksichtigt werden. Im Beispiel des Werkstattgebäudes sind es der Stampflehm, der Stahlbeton und die Holzträger und -stützen des Tragwerks. Die speicherwirksamen Dicken werden gemäss Formel 7 berechnet. Sind diese bekannt, kann das speicherwirksame Volumen und somit die speicherwirksame Masse berechnet werden.

Formel 7: Berechnung speicherwirksame Dicke

$$d_{k_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_i \cdot T}{\pi \cdot \rho_i \cdot c_i}} \quad [m]$$

Formel 8: Berechnung Zeitkonstante Gebäude

$$\tau_{Geb} = \frac{\sum(m_i \cdot c_i)}{A_{tot} \cdot U_{mittel}} \cdot 3600 \quad [h]$$

$$\tau_{Geb} = \frac{\sum(m_i \cdot c_i)}{H_{tot}} \cdot 3600 \quad [h]$$

$A_{tot}$	Aussenfläche Gebäude	$[m^2]$
$H_{tot}$	Wärmetransferkoeffizient Gebäude	$\left[\frac{W}{K}\right]$
$U_{mittel}$	Mittlerer U-Wert Gebäude	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$
$\lambda_i$	Wärmeleitfähigkeit	$\left[\frac{W}{m K}\right]$
$T$	Periodendauer	[s]
$\rho_i$	Materialdichte	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$c_i$	Wärmekapazität Material	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$
$m_i$	aktivierbare Materialmasse	[kg]

Für die Berechnung der speicherwirksamen Dicken wird eine Periodendauer von 24h – 48h empfohlen. Dabei ist zu berücksichtigen, wie genau die Konstruktion des Gebäudes erfasst werden kann. Mit höheren Periodendauern können die Trägheit der Möblierung und anderen Bauteilen kompensiert werden. Der Einfluss der gewählten Zeitkonstante auf die Resultate der Quasisimulation wird im Kapitel 4.1.361 genauer diskutiert.

Um den Einfluss der Zeitkonstante zu untersuchen, sollte die in der Simulation verwendete Zeitkonstante separat erfasst werden (gelb markiert). Dadurch kann in einem früheren Stadium auch nur mit einer Annahme der Zeitkonstante gearbeitet werden. Im Planungsprozess des Werkstattgebäudes konnte so auch das benötigte Lehmvolumen berechnet werden. Über das Entwurfskriterium keine Kühlung im Sommer zu benötigen, konnte die notwendige Zeitkonstante ermittelt werden. Wird die Formel 8 umgestellt zur Formel 9, kann die notwendige aktivierbare Lehm Masse berechnet werden, um die geforderte Zeitkonstante zu erhalten.

Dimensionierung Speichermasse		
Zeitkonstante Gebäude	277 h	
Berechnung benötigtes Lehmvolumen		
	Massen total	Massen nutzbar
Oberfläche	2359.52 m <sup>2</sup>	
Volumen	6137.90 m <sup>3</sup>	
mittlerer U-Wert	0.4 W/m <sup>2</sup> *K	
Wärmekapazität Holz	2300.0 J/kg*K	
Masse Holz	38'875 kg	30'930 kg
Wärmekapazität Beton	1000.0 J/kg*K	
Masse Beton	486'908 kg	279'703 kg
Wärmekapazität Lehm	1000.0 J/kg*K	
Dichte Lehm	2000 kg/m <sup>3</sup>	
Masse Lehm	279'661 kg	505'139 kg
<b>Volumen Lehm benötigt</b>	<b>139.83 m<sup>3</sup></b>	<b>252.57 m<sup>3</sup></b>
Volumenermittlung Lehm		
Bodenplatten	788.54 m <sup>2</sup>	788.54 m <sup>2</sup>
Dicke Lehmaufbau Boden	0.08 m <sup>2</sup>	0.08 m <sup>2</sup>
Volumen Boden Lehm	63.08 m <sup>3</sup>	63.08 m <sup>3</sup>
Volumen in Wände	514.66 m <sup>3</sup>	189.23 m <sup>3</sup>
<b>Volumen Lehm Total</b>	<b>577.74 m<sup>3</sup></b>	<b>252.31 m<sup>3</sup></b>
<b>Zeitkonstante berechnet</b>	<b>560 h</b>	<b>277 h</b>

Abbildung 17: Berechnung Zeitkonstante

Formel 9: Berechnung benötigter Lehm Masse

$$m_{Lehm} = \frac{\tau_{Geb} \cdot 3600 \cdot A_{tot} \cdot U_{mittel} - (m_{Beton} \cdot c_{Beton} + m_{Holz} \cdot c_{Holz})}{c_{Lehm}} \quad [kg]$$

$A_{tot}$	Aussenfläche Gebäude	[m <sup>2</sup> ]
$U_{mittel}$	Mittlerer U-Wert Gebäude	$\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$\tau_{Geb}$	Zeitkonstante Gebäude	[h]
$c_i$	Wärmekapazität Material	$\left[ \frac{J}{kg K} \right]$
$m_i$	aktivierbare Materialmasse	[kg]

### 3.2.3 Regelparameter und Kontrollwerte

Im letzten Bereich der Mappe «Eingaben Gebäude» befinden sich Regelparameter und Kontrollwerte. Diese sind projektspezifisch, je nach dem was man steuern können möchte und welche Werte projektrelevant sind.

#### 3.2.3.1 Regelparameter

Im Beispiel der hier bearbeiteten Quasisimulation können unter den Regelparametern der ausenliegende Sonnenschutz, die Heizung, die Kühlung und die Lüftung ein- und ausgeschaltet werden. Damit kann den anderen Disziplinen beispielsweise die Notwendigkeit eines ausenliegenden Sonnenschutzes direkt vorgeführt werden.

Mit dem Aktivieren und Deaktivieren der Heizung und der Kühlung kann die Freilauftemperatur des Gebäudes berechnet werden oder die Notwendigkeit einer Kühlung untersucht werden.

Neben Ein- und Ausschaltbefehlen können auch Regelparameter oder verwendete Konstanten angepasst werden. Beim Sonnenschutz wird zusätzlich der g-Wert des Sonnenschutzes eingetragen. Bei der Kühlung kann der Sollwert der Gebäudetemperatur eingegeben werden. Im Bereich der Lüftung kann die mittlere Luftdichte dem Standort angepasst werden oder die Luftmenge pro Person verändert werden. So können unterschiedlichste Szenarien untersucht werden. Auch der Fensteranteil des Gebäudes kann eingegeben werden, dessen Manipulation die Architektur in der Planung unterstützen kann. Dafür ist jedoch auch der Standard-Fensteranteil notwendig. Dieser kann entweder selbst eingegeben werden, sollte aber über die Standardwerte des SIA MB 2021.2024 berechnet werden (siehe Kapitel 3.3.2).

#### 3.2.3.2 Kontrollwerte

Im Bereich der Kontrollwerte werden Projektwerte von Interesse abgebildet, wie die maximale und minimale berechnete Raumtemperatur, Anzahl Stunden über einem bestimmten Sollwert oder die berechneten Jahresenergien.

In der Quasisimulation des Werkstattgebäudes wird beispielsweise die thermische Nutzenergie der Räume angezeigt, um die Einhaltung von Energievorschriften überprüfen zu können, aber auch die gesamte an das Grundwasser abgegebene Wärme inklusive Serverkühlung. Die gleiche Unterscheidung wird auch bei der Kälteleistung vorgenommen. Die Spitzenlast der an das Grundwasser abgegebene Kälteleistung dient der Dimensionierung der Grundwasserpumpe.

Regelparameter		Kontrollwerte	
<b>Sonnenschutz ein/aus (1/0)</b>	<b>1</b>	<b>berechnete Raumtemperaturen</b>	
g-Wert Sonnenschutz	0.2	maximal	25.83 °C
Temperatur innen	21.00 °C	minimal	20.45 °C
Temperatur aussen	21.00 °C	Anzahl Stunden über 25.7°C	1103
<b>Heizung ein/aus (1/0)</b>	<b>1</b>	Gebäudetemperatur Auslegung	20.50 °C
<b>Kühlung ein/aus (1/0)</b>	<b>1</b>	Anzahl Stunden mit zuwenig Luft	0
Kühlung ab	25.74 °C	<b>berechnete Energien</b>	
<b>Lüftung ein/aus (1/0)</b>	<b>1</b>	Heizenergie	36'814 kWh 27.58 kWh/m <sup>2</sup>
mittlere Luftdichte	1.15 kg/m <sup>3</sup>	max. Heizleistung	23.05 kW
Luftmenge pro Person	30 m <sup>3</sup> /h	Kühlenergie Raum	12'146 kWh 9.10 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Fensteranteil</b>	<b>0.36</b>	Kühlenergie Total	194'332 kWh
standard Fensteranteil	0.39	maximale Kühlleistung Grundwasser	64.41 kW
		maximale Kühlleistung Raum	39.41 kW

Abbildung 18: Regelparameter & Kontrollwerte

### 3.3 Grundlagedaten

In den Grundlagenmappen werden die einzelnen Gewerke berechnet. Diese basieren zum grössten Teil auf Kennwerten des SIA MB 2024.2021. Sie werden vorbereitet, um anschliessend in die Jahresberechnung der Mappe «Raumtemperatur Simulation» einzufließen (siehe Kapitel 3.4).

#### 3.3.1 Heizung

In dieser Mappe werden die Sollwerte der mittleren Gebäudetemperatur im Heiz- bzw. Kühlfall berechnet. Für eine erste Phase, in welcher die Konstruktionen der Aussenflächen noch nicht definiert sind, kann mit den Kennwerten des SIA MB 2024.2021 eine erste Abschätzung der Normheizlast gemacht werden. Die berechneten Werte werden später in der Simulation verwendet. Zusätzlich können auch Systemkennwerte für die Berechnung der Endenergie in dieser Mappe ergänzt werden.

##### 3.3.1.1 Berechnung der Normheizlast mit SIA MB 2024.2021

Als Grundelement der Berechnungen werden die Nutzungen im Gebäude und ihre Fläche (Kapitel 3.2.1) mit einem Zellenverweis in die Heizungs-Mappe übertragen. Für die Berechnung der Normheizlast des Gebäudes wird die Tabelle mit der Normheizlast pro m<sup>2</sup> der Standardnutzungen und den Raumtemperaturen des SIA MB 2024.2021 ergänzt. In der nächsten Spalte werden die geplanten Raumtemperaturen eingetragen, die im Projekt für den Winterfall geplant werden. Unterscheiden sich diese von den Standardwerten, wird mit dem Temperaturfaktor die spezifische Normheizlast dementsprechend korrigiert. Der Temperaturfaktor wird gemäss Formel 10 berechnet. Dafür sind zusätzlich die projektspezifische und die im SIA MB 2024.2021 verwendete Auslegeaussentemperatur benötigt. Für die Normheizlast pro Nutzung können die Flächen nun mit der korrigierten spezifischen Normheizlast multipliziert werden.

Formel 10: Temperaturfaktor Normheizlast

$$f_T = \frac{\theta_{i_A} - \theta_{a_A}}{\theta_{i_N} - \theta_{a_N}}$$

- $\theta_{i_A}$  Auslegeraumtemperatur Projekt [°C]
  - $\theta_{i_N}$  Auslegeraumtemperatur SIA MB 2024 [°C]
  - $\theta_{a_A}$  Auslegeaussentemperatur Projekt [°C]
  - $\theta_{a_N}$  Auslegeaussentemperatur SIA MB 2024 [°C]
- = -8

Nutzungen	Nutzungsfläche	Heizfall						
		spez. Bedarf standard	Temperatur Standard	Raumtemperatur	Faktor Temperatur	spez. Bedarf	Bedarf pro Nutzung	
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	18.8 W/m <sup>2</sup>	18.0 °C	18.0 °C	1.00	18.8 W/m <sup>2</sup>	2632.00 W	
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	20.9 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	20.0 °C	0.97	20.2 W/m <sup>2</sup>	1150.22 W	
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	12.6 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	21.0 °C	1.00	12.6 W/m <sup>2</sup>	4158.00 W	
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	19.8 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	21.0 °C	1.00	19.8 W/m <sup>2</sup>	930.60 W	
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	19.8 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	21.0 °C	1.00	19.8 W/m <sup>2</sup>	2178.00 W	
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	11.5 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	21.0 °C	1.00	11.5 W/m <sup>2</sup>	782.00 W	
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	1.7 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	21.0 °C	1.00	1.7 W/m <sup>2</sup>	102.00 W	
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>	10.3 W/m <sup>2</sup>	18.0 °C	20.0 °C	1.08	11.1 W/m <sup>2</sup>	1552.92 W	
WC	51.00 m <sup>2</sup>	26.1 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	20.0 °C	0.97	25.2 W/m <sup>2</sup>	1285.20 W	
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	6.9 W/m <sup>2</sup>	21.0 °C	21.0 °C	1.00	6.9 W/m <sup>2</sup>	2290.80 W	
						<b>Total / Mittelwert</b>	<b>12.8 W/m<sup>2</sup></b>	<b>17'061.74 W</b>

Abbildung 19: Berechnung Normheizlast mit SIA MB 2024.2021

### 3.3.1.2 Berechnung der mittleren Gebäudetemperatur

Die mittlere Gebäudetemperatur wird in der Jahressimulation benötigt, um zu bestimmen, ob die Heizung bzw. die Kühlung eingeschaltet werden muss oder nicht. Dafür werden die projektspezifischen Raumtemperaturen mit ihrer zugehörigen Nutzfläche multipliziert. Die Summe wird durch die Nettogeschossfläche dividiert, um die geometrische Mitteltemperatur des Gebäudes zu berechnen (Formel 11). Mit der mittleren Gebäudetemperatur im Heizfall, der Auslegeaussentemperatur und dem berechneten Wärmetransferkoeffizienten (siehe Kapitel 3.2.2.1) kann mit der Formel 12 die Normheizlast des Gebäudes präziser berechnet werden als über die Flächenkennwerte des SIA MB 2024.2021.

Formel 11: Berechnung mittlerer Gebäudetemperatur Auslegung

$$\theta_{i_m} = \frac{\sum(A_i \cdot \theta_{i_A})}{\sum A_i} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Formel 12: Berechnung Normheizlast Gebäude mit Wärmetransferkoeffizient

$$\Phi_{H_N} = H_{tot} \cdot (\theta_{i_{mW}} - \theta_{a_A}) \quad [W]$$

$H_{tot}$	Wärmetransferkoeffizient Gebäude	$\left[\frac{W}{K}\right]$
$\theta_{i_A}$	Auslegeraumtemperatur Projekt	$[^{\circ}\text{C}]$
$\theta_{a_A}$	Auslegeaussentemperatur Projekt	$[^{\circ}\text{C}]$
$\theta_{i_{mW}}$	Mittlere Gebäudetemperatur Heizfall	$[^{\circ}\text{C}]$
$A_i$	Nutzungsfläche	$[\text{m}^2]$

### 3.3.1.3 Werte für die Jahresberechnung

Die Quasisimulation benötigt folgende vier Werte aus der Heizungs-Mappe: die Auslegeaussentemperatur, die mittlere Gebäudetemperaturen für die Steuerung der Heizungs- und Kälteversorgung sowie der absolute Wärmewiderstand des Gebäudes. Der Wärmewiderstand entspricht dem Kehrwert des Wärmetransferkoeffizienten und wird gemäss Formel 13 berechnet. Er kann auch mittels Division der Normheizlast durch die Temperaturdifferenz bei Auslegebedingungen ermittelt werden.

Wenn in einer ersten Berechnung die Normheizlast des Gebäudes nach SIA MB 2024.2021 über die Energiebezugsfläche berechnet wird, macht es Sinn, einen kleinen Bereich für die verwendeten Zahlen zu reservieren. Dadurch kann der verwendete Wert in der Heizungs-Mappe durch die genauere Berechnung ersetzt werden, ohne in der Simulationsmappe alle Zellenbezüge anpassen zu müssen.

in Quasisimulation verwendete Zahlen	
Norm Aussentemperatur	-8.0 °C
mittlere Gebäudetemperatur Sollwert Heizen	20.5 °C
mittlere Gebäudetemperatur Sollwert Kühlen	25.7 °C
Normheizlast Gebäude	24463.64 W
absoluter Wärmewiderstand Gebäude	0.001165 K/W

Abbildung 20: In Quasisimulation verwendete Werte der Heizungs-Mappe

Formel 13: absoluter Wärmewiderstand Gebäude

$$R_{th} = \frac{1}{H_{tot}} = \frac{\theta_{i_{mW}} - \theta_{aA}}{\Phi_{H_N}} \left[ \frac{K}{W} \right]$$

$H_{tot}$	Wärmetransferkoeffizient Gebäude	$\left[ \frac{W}{K} \right]$
$\theta_{aA}$	Auslegeaussentemperatur Projekt	$[^{\circ}C]$
$\theta_{i_{mW}}$	Mittlere Gebäudetemperatur Heizfall	$[^{\circ}C]$
$\Phi_{H_N}$	Normheizlast Gebäude	$[W]$

### 3.3.2 Externe Lasten

In der Mappe «externe Lasten» wird der externe Wärmegewinn des Gebäudes für die Quasisimulation berechnet. Zusätzlich muss der Fensteranteil bei Standardbedingungen berechnet werden.

Dafür wird dasselbe Vorgehen wie bei der Heizungs-Mappe verwendet. Die verschiedenen Nutzungen und ihre Flächen werden wiederum mit einem Zellenbezug in die Mappe übertragen. Die Flächen werden mit den Zielwerten der externen Lasten des SIA MB 2024.2021 multipliziert. Die Summe aller externen Lasten ergibt die externe Last des gesamten Gebäudes. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass die im SIA MB 2024.2021 aufgeführten externen Lasten den ausenliegenden Sonnenschutz für die solaren Gewinne bereits berücksichtigen. Zusätzlich zu den solaren Gewinnen sind auch Wärmegewinne durch Transmission und Infiltration berücksichtigt. Hier werden die Zielwerte des SIA MB 2024.2021 verwendet, da sie mit einem g-Wert der Fenster von 0.5 und einem g-Wert des ausenliegenden Sonnenschutzes von 0.2 rechnen und dies dem heutigen Stand der Technik entspricht.

Zusätzlich zu den externen Lasten wird auch der Standard-Fensteranteil  $f_{GSIA2024}$  des Gebäudes berechnet. Dafür wird wiederum das geometrische Mittel verwendet. Die im SIA MB 2021.2024 angegebenen Fensteranteile werden mit der Nutzungsfläche multipliziert. Die Summe davon wird wiederum durch die gesamte Energiebezugsfläche geteilt. Dieser wird benötigt, um den effektiven Fensteranteil des Gebäudes berücksichtigen zu können (siehe Kapitel 3.4.2.8).

Nutzungen	Nutzungsfläche	spez. Last	externe Last pro Nutzung	Fensteranteil pro Nutzung	Fensteranteil * Fläche
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	14.0 W/m <sup>2</sup>	1960.00 W	0.5	70
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	16.0 W/m <sup>2</sup>	912.00 W	0.5	28.5
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	11.0 W/m <sup>2</sup>	3630.00 W	0.5	165
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	21.0 W/m <sup>2</sup>	987.00 W	0.5	23.5
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	21.0 W/m <sup>2</sup>	2310.00 W	0.5	55
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	11.0 W/m <sup>2</sup>	748.00 W	0.3	20.4
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	1.0 W/m <sup>2</sup>	60.00 W	0	0
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>	11.0 W/m <sup>2</sup>	1540.00 W	0.3	42
WC	51.00 m <sup>2</sup>	27.0 W/m <sup>2</sup>	1377.00 W	0.3	15.3
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	5.0 W/m <sup>2</sup>	1660.00 W	0.3	99.6
<b>Total / Mittelwert</b>	1335.00 m <sup>2</sup>	11.4 W/m <sup>2</sup>	<b>15184.00 W</b>	<b>0.39</b>	519.3

Abbildung 21: Berechnung externe Lasten mit SIA MB 2024.2021

### 3.3.3 Personen

In der Mappe «Personen» werden die internen Gewinne durch die anwesenden Personen berechnet. Mit den Anwesenheitsprofilen der einzelnen Nutzungsarten im Gebäude wird diesen internen Lasten jeweils ein Lastprofil zugeschrieben. Diese Profile definieren ebenfalls das Beleuchtungs- und Lüftungsprofil.

#### 3.3.3.1 Personenzahl

In einem ersten Block werden die Personen pro Nutzungsart erfasst. Die Nutzungen und die zugehörigen Flächen sollten wieder mit einem Zellenbezug aus der Mappe «Eingaben Gebäude» in die Personen-Mappe übertragen werden. In einer nächsten Spalte werden die Personenflächen eingetragen. Dafür können Werte aus dem SIA MB 2024.2021 oder eigene Abschätzungen verwendet werden. Diese werden nur benötigt, wenn die genauen Personenzahlen gemäss Grundrissen noch nicht bekannt sind. Ansonsten sollte die effektiv geplante Personenzahl separat pro Nutzung erfasst werden. In einer zusätzlichen Spalte wird die Wärmeabgabe gemäss SIA MB 2024.2021 pro Person eingegeben. In einer letzten Eingabespalte wird der Jahresfaktor des SIA MB 2024.2021 erfasst. Dieser soll berücksichtigen, dass gerade in grossen Gebäuden fast nie alle Personen anwesend sind.

Die Multiplikation von Personenanzahl, Wärmeabgabe pro Person und dem Jahresfaktor ergibt die Wärmeabgabe durch Personen in jeder einzelnen Nutzung.

Nutzungen	Nutzungsfläche	Personenfläche	Personen effektiv	Wärmeabgabe Person	Jahresfaktor	Wärmeabgabe pro Nutzung
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	15.00 m <sup>2</sup> /P	3	70.0 W	0.8	168.0 W
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	15.00 m <sup>2</sup> /P	5	70.0 W	0.8	280.0 W
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	10.00 m <sup>2</sup> /P	50	70.0 W	0.8	2800.0 W
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	14.00 m <sup>2</sup> /P	8	70.0 W	0.8	448.0 W
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	3.00 m <sup>2</sup> /P	27	70.0 W	0.8	1512.0 W
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	2.00 m <sup>2</sup> /P	30	70.0 W	0.8	1680.0 W
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	11.00 m <sup>2</sup> /P	1	70.0 W	0.8	56.0 W
Lageraum	140.00 m <sup>2</sup>	40.00 m <sup>2</sup> /P	0	70.0 W	0.8	0.0 W
WC	51.00 m <sup>2</sup>	40.00 m <sup>2</sup> /P	0	70.0 W	0.8	0.0 W
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	20.00 m <sup>2</sup> /P	0	70.0 W	0.8	0.0 W
					<b>Total</b>	<b>6944.00 W</b>

Abbildung 22: Erfassung Personenzahl und abgegebene Personenwärme

#### 3.3.3.2 Personenprofile

Mit den Personenprofilen wird die stündliche Anwesenheit von Personen in den einzelnen Nutzungen erfasst. Um einen korrekten Vergleich zur IDA-ICE Simulation zu machen, entsprechen die Profile in dem hier aufgeführten Beispiel exakt dem Personenprofil des SIA MB 2024.2015 und nicht den effektiven Profilen des geplanten Werkstattgebäudes.

Die Personenprofile müssen für die gesamte Woche geschrieben werden. Bei einem Verwaltungsbau, wie hier bearbeitet, muss also ein Tagesprofil für Werkstage und Wochenenden geschrieben werden. Je nach Nutzer können diese auch detaillierter aufgebaut werden. Für die Erstellung dieser Nutzerprofile ist eine spezifische Bedürfnisanalyse der zukünftigen Nutzer hilfreich.

Die Anwesenheit in den verschiedenen Nutzungen, zu jeder Tagesstunde wird mit einem Prozentsatz von 0-100% erfasst. Dieser wird anschliessend mit der berechneten Wärmeabgabe der Personen in der Nutzung multipliziert, um die Wärmeabgabe zu jeder Stunde zu erfassen. Zum Schluss werden alle internen Personenlasten der verschiedenen Nutzungen aufsummiert für das Tagesprofil des gesamten Gebäudes. Dieses wird mit einem Zellenbezug in die Berechnung der Quasisimulation übertragen.

Tagesprofil Personen MO-FR									
Uhrzeit	Stunde	Werkstatt	Leistung Werkstatt	Elektronik	Erschliessung	Leistung Erschliessung	Total relativ	Personenabwärme total	
0000-0100	1	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	
0100-0200	2	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	
0200-0300	3	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	
0300-0400	4	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	
0400-0500	5	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	
0500-0600	6	50%	84.00 W	0%	0%	0.00 W	1.21%	84.00 W	
0600-0700	7	80%	134.40 W	0%	20%	0.00 W	1.94%	134.40 W	
0700-0800	8	100%	168.00 W	20%	40%	0.00 W	17.58%	1220.80 W	
0800-0900	9	100%	168.00 W	60%	40%	0.00 W	38.06%	2643.20 W	
0900-1000	10	80%	134.40 W	100%	40%	0.00 W	71.13%	4939.20 W	
1000-1100	11	100%	168.00 W	100%	40%	0.00 W	85.32%	5924.80 W	
1100-1200	12	50%	84.00 W	80%	40%	0.00 W	70.56%	4900.00 W	
1200-1300	13	80%	134.40 W	40%	40%	0.00 W	46.77%	3248.00 W	
1300-1400	14	100%	168.00 W	60%	40%	0.00 W	52.74%	3662.40 W	
1400-1500	15	100%	168.00 W	100%	40%	0.00 W	76.61%	5320.00 W	
1500-1600	16	80%	134.40 W	80%	40%	0.00 W	69.84%	4849.60 W	
1600-1700	17	80%	134.40 W	60%	40%	0.00 W	46.29%	3214.40 W	
1700-1800	18	80%	134.40 W	20%	40%	0.00 W	17.10%	1187.20 W	
1800-1900	19	50%	84.00 W	0%	20%	0.00 W	1.21%	84.00 W	
1900-2000	20	50%	84.00 W	0%	0%	0.00 W	1.21%	84.00 W	
2000-2100	21	50%	84.00 W	0%	0%	0.00 W	1.21%	84.00 W	
2100-2200	22	50%	84.00 W	0%	0%	0.00 W	1.21%	84.00 W	
2200-2300	23	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	
2300-2400	24	20%	33.60 W	0%	0%	0.00 W	0.48%	33.60 W	

Abbildung 23: Beispiel Personenprofile Werktag

### 3.3.4 Lüftung

In der Lüftungs-Mappe wird das Tagesprofil des Luftvolumenstromes berechnet. Der Berechnungsgang entspricht dem der Personen-Mappe. Mit einem Zellenbezug werden die Nutzungen und ihre Flächen aus der Mappe «Eingabe Gebäude» übertragen. Die Personenflächen und die effektiven Personenzahlen werden aus der Mappe «Personen» übertragen. Anstelle der Wärme, die von Personen abgegeben wird, werden in der nächsten Spalte der Luftvolumenstrom pro Person eingegeben. Da in diesem Projekt mit einer natürlichen Lüftung gearbeitet wird, werden  $30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{P})$  verwendet. Der Volumenstrom pro Person sollte mit einem Zellenbezug aus den Regelparameter übertragen werden. Die nächste Spalte ist wie in der Personenmappe der Jahresfaktor. Mit Multiplikation wird wiederum die Luftmenge pro Nutzungsart berechnet.

Nutzungen	Nutzungsfläche	Personenfläche	Personen effektiv	Volumenstrom pro Person	Jahresfaktor	Luftmenge pro Nutzung
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	15.00 m <sup>2</sup> /P	3	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	72 m <sup>3</sup> /h
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	15.00 m <sup>2</sup> /P	5	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	120 m <sup>3</sup> /h
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	10.00 m <sup>2</sup> /P	50	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	1200 m <sup>3</sup> /h
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	14.00 m <sup>2</sup> /P	8	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	192 m <sup>3</sup> /h
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	3.00 m <sup>2</sup> /P	27	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	648 m <sup>3</sup> /h
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	2.00 m <sup>2</sup> /P	30	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	720 m <sup>3</sup> /h
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	11.00 m <sup>2</sup> /P	1	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	24 m <sup>3</sup> /h
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>	40.00 m <sup>2</sup> /P	0	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	0 m <sup>3</sup> /h
WC	51.00 m <sup>2</sup>	40.00 m <sup>2</sup> /P	0	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	0 m <sup>3</sup> /h
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	20.00 m <sup>2</sup> /P	0	30 m <sup>3</sup> /h	0.8	0 m <sup>3</sup> /h
Total						2'976 m <sup>3</sup> /h

Abbildung 24: Eingaben Luftmengenberechnung

Die Tagesprofile können per Zellenbezug von der Personen-Mappe übernommen werden. Dadurch müssen allfällige Anpassungen an den Personenprofilen nur in einer Mappe vorgenommen werden.

Die Belegung jeder Tagesstunde wird wiederum mit der vorher berechneten Luftmenge pro Nutzungsart multipliziert. Die Summe aller Zonenprofile ergibt den Luftvolumenstrom im gesamten Gebäude. Dieser wird in der Jahresberechnung verwendet.

### 3.3.5 Sanitär - Warmwasser

Die Berechnung des Warmwasserbedarfs des Gebäudes erfolgt in der Mappe «Sanitär». Personenzahlen basieren ebenfalls auf der Mappe «Personen». Die Nutzungen und die dazugehörigen Flächen werden mit einem Zellenbezug aus der Mappe «Eingabe Gebäude» übertragen. Pro Nutzungsart ist der Warmwasserbedarf pro Person und Tag [ $l/(P \cdot d)$ ] einzugeben. Die Multiplikation von Personen und Warmwasserbedarf pro Person ergibt den Warmwasserbedarf der Nutzung in Liter pro Tag.

Zur Berücksichtigung des Nutzenergiebedarfs ist die thermische Energie für die Bereitstellung des Warmwasservolumen zu berechnen. Dafür sind die Dichte von Kaltwasser (0.997 kg/l), die Wärmekapazität von Wasser (4.187 kJ/kg\*K) und die Temperaturerhöhung bei der Erzeugung von Warmwasser (ca. 50 K) einzugeben. Die Tagesenergie wird gemäss Formel 14 und die Bandlast mit der Formel 15 berechnet. Die Bezugszeit pro Tag kann mit der Excelformel 1 direkt aus dem Personenprofil des gesamten Gebäudes erfasst werden.

Formel 14: Berechnung Nutzenergie Warmwasser

$$Q_{WW} = \frac{\dot{V}_{\text{nutz}} \cdot \rho_{KW} \cdot c_W \cdot \Delta T}{3600} \left[ \frac{kWh}{d} \right]$$

Excelformel 1: Bezugszeit pro Tag von Warmwasser

$$t_{\text{Bezug}} = \text{ZÄHLENWENN}(\text{Personen}!(\text{erste Zelle Tagesprofil}):(\text{letzte Zelle Tagesprofil});">0")$$

Formel 15: Bandlast Warmwasser

$$\Phi_{WW} = \frac{Q_{WW}}{t_{\text{Bezug}}} \cdot 1000 \quad [W]$$

$\dot{V}_{\text{nutz}}$	Tageswarmwasser-bedarf	$\left[ \frac{l}{d} \right]$
$\rho_{KW}$	Dichte Kaltwasser	$\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
$c_W$	Wärmekapazität Wasser	$\left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$
$\Delta T$	Erwärmung Warmwasser	[K]

Nutzungen	Nutzungsfläche	Personenfläche	Personen effektiv	Warmwasserbedarf pro Person	Warmwasserbedarf pro Nutzung
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	15.00 m <sup>2</sup> /P	3	5 l/P*d	15.00 l/d
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	15.00 m <sup>2</sup> /P	5	3 l/P*d	15.00 l/d
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	10.00 m <sup>2</sup> /P	50	3 l/P*d	150.00 l/d
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	14.00 m <sup>2</sup> /P	8	3 l/P*d	24.00 l/d
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	3.00 m <sup>2</sup> /P	27	3 l/P*d	81.00 l/d
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	2.00 m <sup>2</sup> /P	30	4 l/P*d	120.00 l/d
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	11.00 m <sup>2</sup> /P	1	1 l/P*d	1.00 l/d
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>	40.00 m <sup>2</sup> /P		1 l/P*d	3.50 l/d
WC	51.00 m <sup>2</sup>	40.00 m <sup>2</sup> /P		1 l/P*d	1.28 l/d
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	20.00 m <sup>2</sup> /P		0 l/P*d	0.00 l/d
				<b>Warmwasserbedarf total</b>	<b>406.00 l/d</b>
Dichte Kaltwasser	0.997 kg/l			Energie Total	23.54 kWh/d
Wärmekapazität Wasser	4.187 kJ/kg*K			Bezugszeit	24.00 h/d
Erwärmung Wasser	50.0 K			Dauerleistung	980.8 W

Abbildung 25: Eingaben und Berechnung Warmwasserbedarf

Auf Grund des tiefen Warmwasserbedarfs wurde in der frühen Projektphase des Werkstattgebäudes kein Fokus auf die Warmwassererzeugung gelegt. Durch den tiefen Warmwasserbedarf und das projektierte Warmwasserkonzept (siehe Kapitel 1.1.1.5) kann der Warmwasserenergiebedarf in einer so vereinfachten Form berechnet werden (siehe Abbildung 25)

Bei Bauten mit grösserem Warmwasserbedarf ist es sinnvoll wie für die Personenbelegung ein Nutzungsprofil des Warmwasserbezuges zu erstellen. Dadurch kann der Bedarf an Warmwasser genauer berechnet werden und so ein Warmwassererzeugungskonzept entwickelt werden.

### 3.3.6 Elektro

In der Mappe «Elektro» werden die Profile der künstlichen Beleuchtung und der Geräte für die Quasisimulation vorbereitet. Diese bilden zusammen mit der Personenwärme die internen Abwärmelasten. Zusätzlich werden Regelparameter der Beleuchtungssteuerung vorbereitet und die Grundlagendaten für die Berechnung der PV-Anlage erfasst.

#### 3.3.6.1 Beleuchtung

Die installierte Beleuchtungsleistung pro Zone wird mit dem Zielwert des SIA MB 2024.2021 über die Fläche der Nutzungen berechnet. Anders als bei anderen aus dem SIA MB 2024.2021 verwendeten Werten, werden hier nicht die Standardwerte, sondern die Zielwerte verwendet. Diese entsprechen bereits dem heutigen Stand der Technik, da sie auf einer Lichtausbeute von 100 lm/W basieren (Standardwert mit 70 lm/W).

Auch hier werden die Nutzungen und ihre zugehörigen Flächen mit einem Zellenbezug zur Mappe «Eingabe Gebäude» in die Mappe «Elektro» übertragen. Die Flächen werden mit den Zielwerten multipliziert, um die installierte Leistung pro Nutzung zu erhalten. Die Beleuchtungsregelung erfolgt in einer ersten Phase über die Anwesenheitsprofile der Personen (Grundprofil). In einem zweiten

Elektrobezug Beleuchtung			
Nutzungen	Nutzungsfläche	spez. Bedarf	Beleuchtungsleistung pro Nutzung
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	4.5 W/m <sup>2</sup>	630.00 W
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	7.5 W/m <sup>2</sup>	427.50 W
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	6.4 W/m <sup>2</sup>	2112.00 W
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	8.1 W/m <sup>2</sup>	380.70 W
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	8.1 W/m <sup>2</sup>	891.00 W
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	3.3 W/m <sup>2</sup>	224.40 W
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	2.2 W/m <sup>2</sup>	132.00 W
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>	1.9 W/m <sup>2</sup>	266.00 W
WC	51.00 m <sup>2</sup>	6.4 W/m <sup>2</sup>	326.40 W
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	2.3 W/m <sup>2</sup>	763.60 W
		<b>Total</b>	<b>6153.60 W</b>

Künstliche Beleuchtungsfläche gesamtes Jahr		
	Gebäude	Kunstlicht
Länge	28.00 m	18.00 m
Breite	21.14 m	11.14 m
Fläche	591.92 m <sup>2</sup>	200.52 m <sup>2</sup>
		<b>Grundlast Beleuchtung</b>
		<b>0.338761995</b>

Abbildung 26: Eingaben Beleuchtung

Schritt wird die Beleuchtung mit zunehmender Globalstrahlung zurückgefahren. Da das natürliche Licht ab 5 Meter vom Fenster entfernt nicht mehr ausreichend ist für Büroarbeiten, wird die Beleuchtung bei maximaler Globalstrahlung nicht komplett ausgeschaltet. Dieser Grundwert lässt sich über die Gebäudefläche berechnen.

Mit der in der Mappe «Eingaben Gebäude» eingegebenen Länge und Breite des Gebäudes wird die Grundfläche des Gebäudes berechnet. Zusätzlich wird die Fläche 5 Meter innerhalb der Fassade berechnet. Die Division dieser kleineren Fläche durch die Grundfläche des Gebäudes ergibt den Grundwert der Beleuchtungssteuerung.

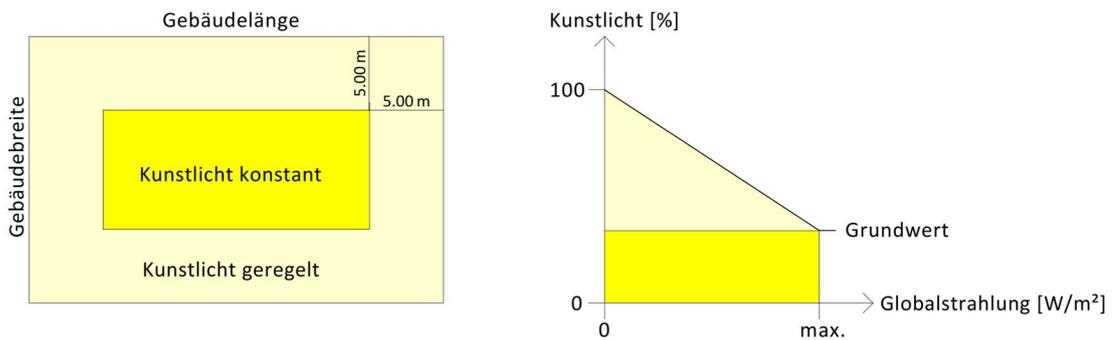


Abbildung 27: Kunstlichtregulierung nach Globalstrahlung

Für das Grundprofil der Beleuchtung ohne Berücksichtigung der Globalstrahlung werden die Personenprofile verwendet. Die stündlich prozentuale Anwesenheit wird mit der installierten Beleuchtungsleistung der Nutzung multipliziert. Es wird also von einer bedarfsgerechten Beleuchtungsregulierung ausgegangen. Diese berücksichtigt die Anwesenheit der Personen sowie den Tageslichtanteil. Die Summe aller Nutzungsprofile bilden das Grundprofil, welches in der Quasisimulation verwendet wird, um dort mit Kunstlichtregulierung an die stündliche Globalstrahlung angepasst zu werden.

### 3.3.6.2 Geräte

Die installierte Leistung der Geräte pro Nutzung wird, wie die Beleuchtungsleistung durch Multiplizieren der Standardwerte des SIA MB 2024.2021 mit den Nutzungsflächen berechnet.

Sind grössere Geräte-Lasten vorhanden, sollten diese separat ausgewiesen werden.

Elektrobezug Geräte			
Nutzungen	Nutzungsfläche	spez. Bedarf	Geräte Leistung pro Nutzung
Werkstatt	140.00 m <sup>2</sup>	5.0 W/m <sup>2</sup>	700.00 W
Elektronikwerkstatt	57.00 m <sup>2</sup>	8.0 W/m <sup>2</sup>	456.00 W
Grossraumbüro	330.00 m <sup>2</sup>	15.0 W/m <sup>2</sup>	4950.00 W
Einzel-, Gruppenbüro	47.00 m <sup>2</sup>	11.0 W/m <sup>2</sup>	517.00 W
Sitzungszimmer	110.00 m <sup>2</sup>	8.0 W/m <sup>2</sup>	880.00 W
Cafeteria	68.00 m <sup>2</sup>	20.0 W/m <sup>2</sup>	1360.00 W
Serverraum	60.00 m <sup>2</sup>	0.0 W/m <sup>2</sup>	0.00 W
Lagerraum	140.00 m <sup>2</sup>	0.0 W/m <sup>2</sup>	0.00 W
WC	51.00 m <sup>2</sup>	0.0 W/m <sup>2</sup>	0.00 W
Erschliessung	332.00 m <sup>2</sup>	0.0 W/m <sup>2</sup>	0.00 W
Server	50.00 m <sup>2</sup>	500.0 W/m <sup>2</sup>	25000.00 W
		<b>Total</b>	<b>8863.00 W</b>

Abbildung 28: Eingaben Geräteleistungen

wiesen werden. Zum Beispiel ein Serverraum, welcher das ganze Jahr über gekühlt wird, beeinflusst das restliche Gebäude nur indirekt, da die Wärme lokal abgeführt wird. Dieser Fall wird im Kapitel 3.6.1 detaillierter betrachtet.

Die benötigten Tagesprofile der Geräte werden aus dem SIA MB 2024 entnommen. Die Personenprofile können nicht wie bei der Beleuchtung direkt übernommen werden, da die von den Geräten bezogene Grundleistung zu berücksichtigen ist. Der Aufbau und die Berechnung des gesamten Geräteprofils entsprechen dem Vorgehen der bereits erklärten Profilen.

### 3.3.6.3 Photovoltaik-Anlage

Die exakte Berechnung der PV-Anlage liegt nicht im Fokus dieser Arbeit. Es wird dennoch eine grobe Abschätzung des Leistungsprofils und Jahresertrags gemacht, da Neubauten mehrheitlich mit PV-Anlagen ausgerüstet werden. Der stündliche Ertrag wird mit Hilfe der Globalstrahlung und der installierten Kilowattpeak-Leistung berechnet. Diese ist in der Elektro-Mappe zu erfassen. Die erste Berechnung des Jahresertrags kann zur Kontrolle mit einem anderen Tool wie «PV-GIS» verglichen werden. Auf Abweichungen kann mit der Integration eines Korrekturfaktors in der Quasisimulation reagiert werden. Der Vergleich ist mit möglichst identischem Datensatz zu erstellen, um Veränderungen durch klimatische Entwicklungen auszuschliessen. Der Korrekturfaktor wird hier mit simulierten Erträgen für das Jahr 2020 berechnet, siehe Abbildung 29.

PV-Anlage		
installierte Leistung	69.00 kWp	
PV-Ertrag PV-GIS	70'459.00 kWh/a	Jahr 2020
PV-Ertrag Quasisimulation	80'815.42 kWh/a	Jahr 2020
Korrekturfaktor	0.87185092	Jahr 2020
<b>PV-Ertrag Quasisimulation mit Korrekturfaktor</b>	<b>74'558.51 kWh/a</b>	<b>Jahr 2050</b>

Abbildung 29: Eingaben PV-Anlage

## 3.4 Simulation / Jahresberechnung

In der Mappe «Simulation» werden die vorbereiteten Grundlagen vereint und die Nutzenergien berechnet. Die wichtigsten Berechnungen in dieser Mappe sind die Heiz- und Kühlleistungen, sowie die Gebäudetemperatur zu jeder Stunde. Die Quasisimulation kann anschliessend als belastbare Basis des Energiekonzeptes verwendet werden.

### 3.4.1 Aussenklima

Als Berechnungsbasis werden die Jahresdaten der Aussentemperatur und der Globalstrahlung benötigt. Diese können beispielsweise aus dem Programm «Meteonorm» entnommen werden, zum Überblick hilfreich sind zusätzlich Tagesnummer und die Tagesstunde. Theoretisch könnten dank Monatstagen auch Feiertag berücksichtigt werden. Der komplette Klimadatenatz kann ebenfalls in einer separaten Mappe erfasst werden, um nur die benötigten Werte in die Simulations-Mappe zu übertragen wie in der Abbildung 30 ersichtlich ist.

1 Quasisimulation thermisch									
2 Jahresdaten									
3 Jahr	Monat	Tag des Monats	Tagesstunde	Tag des Jahres	Jahresstunde	Aussen-temperatur	Globalstrahlung horizontal		
4 y	m	dm	h	dy	hy	Ta	G_Gh		
5 2050	1	1	1	1	1	9.5	0		
6 2050	1	1	2	1	2	9.2	0		
7 2050	1	1	3	1	3	8.9	0		
8 2050	1	1	4	1	4	8.7	0		
9 2050	1	1	5	1	5	8.6	0		
10 2050	1	1	6	1	6	8.4	0		
11 2050	1	1	7	1	7	8.3	0		
12 2050	1	1	8	1	8	8.2	0		
13 2050	1	1	9	1	9	8.4	5		
14 2050	1	1	10	1	10	9.6	74		

Abbildung 30: Ausschnitt Klimadatenatz Simulations-Mappe

### 3.4.2 Berechnung Temperaturverlauf & thermische Energien

Die stündliche Berechnung des Gebäudetemperaturverlaufs basiert auf dem Leistungsverhältnis aller Energiegewinne und -verluste. Mit dem Leistungsverhältnis und dem Wärmewiderstand wird die stündliche Temperaturänderung des Gebäudes berechnet. Diese wird durch die Zeitkonstante abgeschwächt.

Berechnung Gebäudetemperaturverlauf & thermische Energien																
Wärmetransferkoeffizient	mittlere Gebäudetemperatur	Wärmetransmission	interne Last Personen	interne Last Luftmenge	Leistung Lüftung	interne Last Geräte	interne Last Beleuchtung	Beleuchtungs-faktor	interne Last Beleuchtung effektiv	externe Last	Leistungsverhältnis ohne H / K	Heizleistung	Kühlleistung	Leistungsverhältnis	Temperaturänderung Gebäude	
[W/K]	[°C]	[W]	[W]	[m³/h]	[W]	[W]	[W]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[K]	
5	858.38	20.5	-9441.9	33.60	14.40	-50.90	1001.9	126	1.000	126.00	0.00	-8331.31	8331.3	0.00	0.0	0.00
6	858.38	20.5	-9699.4	33.60	14.40	-52.29	1001.9	126	1.000	126.00	0.00	-8590.21	8590.2	0.00	0.0	0.00
7	858.38	20.5	-9956.9	33.60	14.40	-53.68	1001.9	126	1.000	126.00	0.00	-8849.12	8849.1	0.00	0.0	0.00
8	858.38	20.5	-10128.6	33.60	14.40	-54.60	1001.9	126	1.000	126.00	0.00	-9021.72	9021.7	0.00	0.0	0.00
9	858.38	20.5	-10214.5	33.60	14.40	-55.07	1001.9	126	1.000	126.00	0.00	-9108.02	9108.0	0.00	0.0	0.00
10	858.38	20.5	-10386.1	84.00	36.00	-139.98	1211.9	315	1.000	315.00	0.00	-8915.21	8915.2	0.00	0.0	0.00
11	858.38	20.5	-10472.0	134.40	57.60	-225.82	1421.9	709.92	1.000	709.92	0.00	-8431.57	8431.6	0.00	0.0	0.00
12	858.38	20.5	-10557.8	1220.80	523.20	-2068.01	2244.6	1762.44	1.000	1762.44	0.00	-7397.98	7398.0	0.00	0.0	0.00
13	858.38	20.5	-10386.1	2643.20	1132.80	-4404.72	4613.8	3022.2	0.997	3011.93	361.51	-4160.42	4160.4	0.00	0.0	0.00
14	858.38	20.5	-9356.1	4939.20	2116.80	-7414.55	6189.6	4690.56	0.950	4454.67	5350.28	4163.14	0.0	0.00	4163.1	0.02
15	858.38	20.5	-8426.8	5924.80	2539.20	-8010.76	8047	5309.52	0.908	4822.40	9760.64	12117.24	0.0	0.00	12117.2	0.05
16	858.38	20.6	-7612.1	4900.00	2100.00	-5884.63	6528.4	3965.64	0.874	3467.07	13375.70	14674.41	0.0	0.00	14674.4	0.06
17	858.38	20.6	-7150.0	3248.00	1392.00	-3726.11	4377.2	2491.68	0.867	2159.79	14171.01	13079.91	0.0	0.00	13079.9	0.05
18	858.38	20.7	-6853.8	3662.40	1569.60	-4027.44	5429.8	3248.52	0.877	2848.94	13086.49	14146.42	0.0	0.00	14146.4	0.06
19	858.38	20.7	-6990.6	5320.00	2280.00	-5967.05	7695	4953.12	0.922	4566.02	8314.62	12938.02	0.0	0.00	12938.0	0.05
20	858.38	20.8	-7466.4	4849.60	2078.40	-5809.67	6450.4	4554.6	0.963	4384.36	3976.56	6384.86	0.0	0.00	6384.9	0.03
21	858.38	20.8	-8090.3	3214.40	1377.60	-4172.51	4737.8	3252.6	0.999	3248.18	144.60	-917.80	0.0	0.00	-917.8	0.00
22	858.38	20.8	-8602.0	1187.20	508.80	-1638.54	2104.6	1636.44	1.000	1636.44	0.00	-5312.30	0.0	0.00	-5312.3	-0.02

Abbildung 31: Übersicht Quasisimulation - Berechnung Temperaturverlauf und Nutzenergien

Da jede Stunde der Jahresberechnung von der Vorhergehenden abhängig ist, muss als Basis die erste Jahresstunde mit einer vordefinierten Gebäudetemperatur berechnet werden, bevor die Berechnung der Ganzjahressimulation vorgenommen werden kann.

In Folgenden werden die einzelnen Berechnungsschritte im Detail erklärt. (Siehe in Abbildung 31, von links nach rechts)

#### 3.4.2.1 Wärmetransferkoeffizient

Als erstes wird er in der Mappe «Eingaben Gebäude» berechnete Wärmetransferkoeffizient mit einem Zellenbezug in die Simulations-Mappe übertragen. Dieser ist konstant und verändert sich im Verlaufe des Jahres nicht.

#### 3.4.2.2 Gebäudetemperatur

Die Gebäudetemperatur zur ersten Stunde muss vom Planer selbst gesetzt werden, hier wird mit einem Zellenbezug die berechnete Mitteltemperatur im Heizfall verwendet.

Die Gebäudetemperatur zur zweiten Stunde berechnet sich aus dem Startwert und der resultierenden Temperaturänderung der ersten Stunde auf Grund derer Leistungsverhältnis. Jede Stunde bezieht sich dann auf die jeweils vorhergehende.

#### 3.4.2.3 Wärmetransmission

In der Spalte Wärmetransmission wird der Energieverlust bzw. -gewinn über die Aussenflächen des Gebäudes berechnet. Dafür wird der Wärmetransferkoeffizient mit dem Temperaturunterschied zwischen der Gebäude- und der Aussentemperatur multipliziert.

Formel 16: Berechnung Wärmetransmission

$$\dot{Q}_{Trans} = H_{tot} \cdot (\theta_i - \theta_a) \quad [W]$$

$H_{tot}$	Wärmetransferkoeffizient Gebäude	$\left[\frac{W}{K}\right]$
$\theta_i$	mittlere Gebäudetemperatur	$[^{\circ}C]$
$\theta_a$	Aussentemperatur	$[^{\circ}C]$

### 3.4.2.4 Interne Last Personen

Die interne Last der Personen ist deren abgegebene Abwärme. Zur Berechnung wird das Profil aus der Personen-Mappe in die Simulation übertragen. Es müssen sowohl das Tages- und das Wochenprofil in die jeweiligen Jahresstunden übernommen werden. Hierfür wird mit einem Zellenbezug das Werktagprofil für den Montag übertragen. Anschliessend werden die Zellen einzeln fixiert, um das Profil auf die restlichen Werktage zu übertragen. Ebenso wird der erste Wochenendtag mit einem Zellenbezug zum entsprechenden Profil ausgefüllt.

Ist die erste Woche übertragen und sind die Zellenbezüge fixiert, kann die gesamte Woche schnell auf das restliche Jahr übertragen werden. Für weitere Präzisierungen könnten auch Feiertagsprofile in den jeweiligen Stunden integriert werden.

### 3.4.2.5 Luftmenge und Leistung Lüftung

Das Profil der benötigten Luftmenge muss gleich wie die interne Last der Personen aus der Lüftungs-Mappe übertragen werden. In einer zweiten Spalte wird der daraus resultierende stündliche Wärmegewinn bzw. -verlust berechnet.

Da bei diesem Projekt eine natürliche Lüftung geplant ist, ist die Berechnung relativ einfach. Der Wärmeverlust bzw. -gewinn berechnet sich aus der Luftmenge und der Differenz der Gebäude- und Aussentemperatur gemäss Formel 17.

Formel 17: stündlicher Lüftungswärmeverlust / gewinn

$$\dot{Q}_L = \frac{\dot{V}_L \cdot \rho_{Luft} \cdot c_{Luft} \cdot (\theta_i - \theta_a)}{3600}$$

$\rho_{Luft}$	Dichte Luft	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$c_{Luft}$	Wärmekapazität Luft	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$
$\theta_i$	Mittlere Gebäudetemperatur	$[^{\circ}C]$
$\theta_a$	Aussentemperatur	$[^{\circ}C]$
$\dot{V}_L$	Luftvolumenstrom	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$

Bei der Eingabe im Excel kann für die Dichte der Luft ein Zellenbezug zu den Regelparameter in der Mappe «Eingaben Gebäude» gemacht werden. Zusätzlich kann die Formel mit einer Multiplikation mit dem Steuerwert in der Mappe «Eingaben Gebäude» erweitert werden. So kann im Control-Panel eine 1 eingegeben werden, um die Lüftung einzuschalten, bzw. eine 0, um die Lüftung auszuschalten.

### 3.4.2.6 Interne Lasten Geräte

Die durch elektrische Geräte produzierte Abwärme wird ebenfalls mit einem Zellenbezug zur Mappe «Elektro» in die Simulation übertragen. Hier ist wieder das Vorgehen für das Übertragen von Wochenprofilen anzuwenden, wie in Kapitel 3.4.2.4 beschrieben.

### 3.4.2.7 Interne Last Beleuchtung

Für die Berechnung der durch die Beleuchtung abgegebene Wärme wird in einer ersten Spalte das Beleuchtungsprofil aus der Mappe «Elektro» übertragen. In einer zweiten Spalte wird der Beleuchtungsfaktor berechnet. Dieser berücksichtigt die Globalstrahlung und fährt so die Beleuchtungsleistung mit zunehmender Globalstrahlung zurück. Die Regulierung wurde im Kapitel 3.3.6.1 bereits genauer beschrieben. Die Beleuchtungsleistung wird bei maximaler Globalstrahlung nicht auf 0 % zurückgefahren, sondern auf den in der Mappe «Elektro» berechnete Grundwert. Zur Übersicht der Regulierung wird hier nochmals das Regeldiagramm und die Darstellung zur Herleitung des Grundwertes abgebildet.

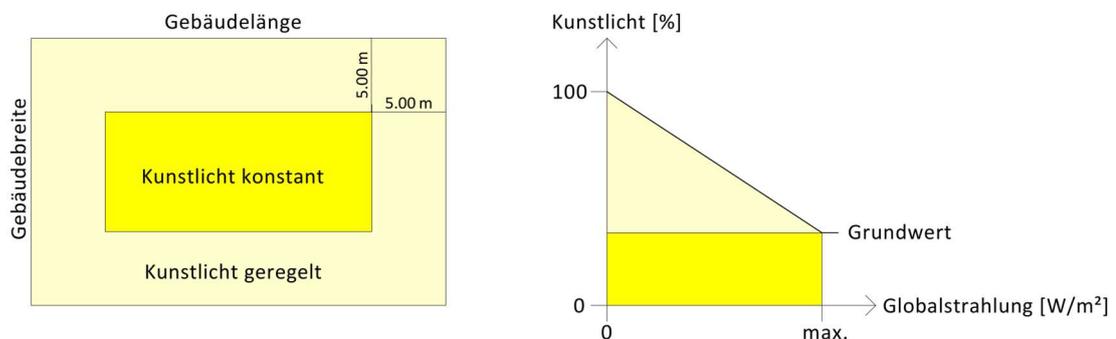


Abbildung 32: Kunstlichtregulierung nach Globalstrahlung

Der Beleuchtungsfaktor wird mit der Excelformel 2 berechnet. Anschliessend wird die Leistung des Beleuchtungsprofils mit dem Beleuchtungsfaktor multipliziert, um die effektive Beleuchtungsleistung zu jeder Stunde zu erhalten.

Excelformel 2: Beleuchtungsfaktor durch Globalstrahlung

$$f_B = (1 - \text{Grundwert}) \cdot \left( 1 - \frac{S_{Gh}}{\text{MAX}(S_{Gh1} : S_{Gh8760})} \right) + \text{Grundwert}$$

$$S_{Gh} \quad \text{Globalstrahlung horizontal} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

### 3.4.2.8 Externe Lasten

Die Berechnung der externen Lasten sind die grösste Schwierigkeit in der Quasisimulation. In der ersten Version wurde basierend auf dem Stundenwert der horizontalen Globalstrahlung versucht, die nach SIA MB 2024.2021 kalkulierte maximale externe Last für jede Stunde zu berechnen. Dadurch steigt die externe Last linear mit zunehmender Globalstrahlung. Gemäss SIA MB 2024.2021 sind in den Zielwerten der externen Last die solaren Gewinne bei ausgefahrenem Sonnenschutz mit g-Wert von 0.2 sowie die Wärmegewinne durch Transmission und Infiltration bereits berücksichtigt. Um die Transmissionsgewinne nicht doppelt zu berücksichtigen, werden in dieser Variante bei der Berechnung des Leistungsverhältnis ohne Heizung / Kühlung (Kapitel 0) keine Wärmegewinne berücksichtigt, die über den Wärmetransferkoeffizienten (Kapitel 3.4.2.3) berechnet werden. Die Transmissionsleistung wird in dieser Variante nur berücksichtigt, wenn sie negativ ist. Der resultierende Kühlenergiebedarf ist bei dieser Berechnung 14% zu tief im Vergleich zur IDA-ICE Simulation. Es wird versucht, die externen Gewinne über verschiedene Berechnungswege genauer zu berechnen, siehe Kapitel 0.

Hier wird nur die Variante 3 vorgestellt. Diese optimiert die erste Variante. Die maximale externe Last berücksichtigt gemäss SIA MB 2024.2021 die Transmissionsgewinne, sowie die solaren Gewinne bei ausgefahrenem aussenliegendem Sonnenschutz mit einem g-Wert von 0.2. Um die genannten Abweichungen zu reduzieren, wird auch der mittels Quasisimulation berechnete projektspezifische Transmissionsgewinn berücksichtigt (siehe Kapitel 0). Die maximale externe Last des SIA MB 2024.2021 wird in dieser Variante rein als maximaler solarer Gewinne betrachtet.

Die Berechnung erfolgt somit wie in der ersten Variante über den Stundenwert der horizontalen Globalstrahlung. Um die Sonnenschutzsteuerung einzuprogrammieren, wird bis zu einem Globalstrahlungswert von 200 W/m<sup>2</sup> die externe Last mit 0.2 dividiert. Ab einer Globalstrahlung von 200 W/m<sup>2</sup> wird der Sonnenschutz aktiviert und die externen Lasten können direkt aus der Mappe «externe Lasten» übernommen werden. Die Berechnung der stündlichen solaren Gewinne mit der Excelformel 3 ergibt folgendes «Regeldiagramm».

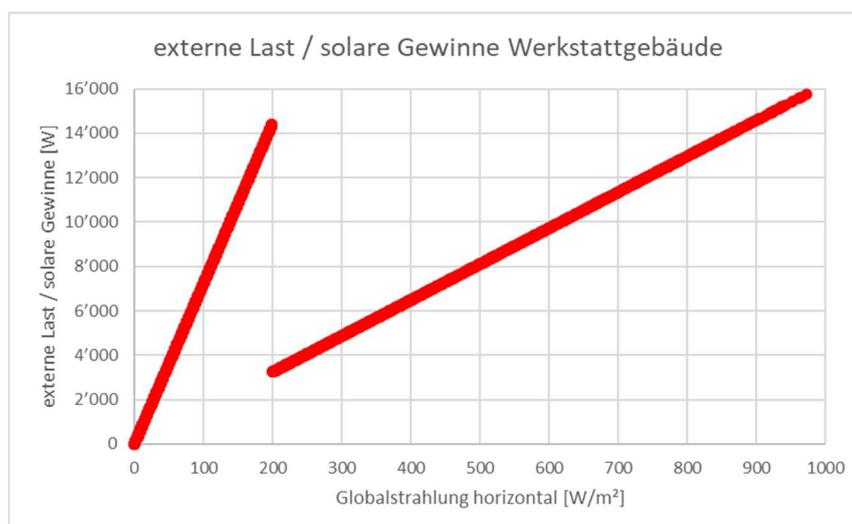


Diagramm 2: externe Lasten / solare Gewinne in Abhängigkeit der Globalstrahlung

Die berechneten externen Gewinne werden mit einem Faktor des Fensteranteils multipliziert. Dadurch soll die relative Abweichung des Fensteranteils des Projektes zum Fensteranteil des SIA MB 2024.2021 berücksichtigt werden.

*Excelformel 3: stündliche externe Lasten / Solargewinne*

$$\dot{Q}_{\text{ext}} = \frac{S_{\text{Gh}}}{\text{MAX}(S_{\text{Gh}}; 8760)} \cdot \text{WENN}\left(S_{\text{Gh}} < 200; \frac{\dot{Q}_{\text{ext}_{\text{tot}}}}{0.2}; \dot{Q}_{\text{ext}_{\text{tot}}}\right) \cdot \frac{f_{G_{\text{Projekt}}}}{f_{G_{\text{SIA2024}}}}$$

$S_{\text{Gh}}$	Globalstrahlung horizontal	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$
$\dot{Q}_{\text{ext}_{\text{tot}}}$	Maximum externe Lasten	[W]
$f_{\text{G}}$	Fensteranteil	[-]

Die Sonnenschutzsteuerung kann hier mit einem «ODER-Befehl» implementiert werden. Wenn im Control-Panel eine 0 in der Steuerzelle des Sonnenschutzes eingetragen ist, übersteuert dieser die Sonnenschutzregelung nach Globalstrahlung und der aussenliegende Sonnenschutz ist dadurch permanent ausgeschaltet. Wenn ein anderer Wert als 0 eingetragen wird, gilt die normale Sonnenschutzsteuerung.

Sind im Gebäude Fenster ohne aussenliegenden Sonnenschutz geplant wie beispielsweise die grossen runden Fenster in der Cafeteria des Werkstattgebäudes, sind die entsprechenden Fensterflächen zu unterscheiden. Dafür wird der «Wert\_wenn\_falsch» im WENN-Befehl der Excelformel 3 folgendermassen angepasst:

*Excelformel 4: Berücksichtigung von Fenstern ohne aussenliegenden Sonnenschutz*

$$\text{Wert\_wenn\_falsch} = \left(1 - \frac{A_{\text{Fohne Sonnenschutz}}}{A_{\text{Ftot}}}\right) \cdot \dot{Q}_{\text{ext}_{\text{tot}}} + \frac{A_{\text{Fohne Sonnenschutz}}}{A_{\text{Ftot}}} \cdot \frac{\dot{Q}_{\text{ext}_{\text{tot}}}}{0.2}$$

$A_{\text{F}}$	Fensterfläche	$[m^2]$
----------------	---------------	---------

Die solaren Gewinne werden in dieser Berechnung gleichmässig auf alle Fenster verteilt.

### 3.4.2.9 Leistungsverhältnis ohne Heizung / Kühlung

Um die Berechnungen der Heiz- und Kühllast etwas schlanker zu halten, wird vorgängig das Leistungsverhältnis im Gebäude ohne Heizung und Kühlung berechnet. Dieses bildet sich aus der Summe aller Wärmeverluste und Wärmegewinne.

Formel 18: Leistungsverhältnis Gebäude ohne Heizung / Kühlung

$$\Delta\dot{Q}_{Geb} = \dot{Q}_{Trans} + \dot{Q}_{int_P} + \dot{Q}_{int_G} + \dot{Q}_{int_B} + \dot{Q}_L + \dot{Q}_{ext}$$

$\dot{Q}_{Trans}$	Transmissionsleistung	[W]
$\dot{Q}_L$	Leistung Luftvolumenstrom	[W]
$\dot{Q}_{ext}$	Solare Gewinne	[W]
$\dot{Q}_{int_P}$	Interne Last Personen	[W]
$\dot{Q}_{int_G}$	Interne Last Geräte	[W]
$\dot{Q}_{int_B}$	Interne Last Beleuchtung	[W]

### 3.4.2.10 Heizleistung

Mit dem Leistungsverhältnis ohne Heizung / Kühlung des Gebäudes wird die stündlich benötigte Heizleistung berechnet und gesteuert. Damit die Heizung aktiviert wird, müssen zwei Parameter erfüllt sein:

- Das Leistungsverhältnis (ohne Heizung und Kühlung) des Gebäudes muss negativ sein, das Gebäude würde sich also abkühlen.
- Die Gebäudetemperatur muss der Auslege-Gebäudetemperatur im Heizfall entsprechen oder darunter liegen.

Sind diese zwei Bedingungen erfüllt, ist die Heizlast der Absolutwert des Leistungsverhältnis, gleicht also den Leistungsverlust genau aus. Das effektive Lastverhältnis ist damit im Gleichgewicht. Das Gebäude wärmt sich nicht auf und kühlt sich nicht ab.

Excelformel 5: Heizleistung

$$\dot{Q}_H = \text{WENN}(\text{UND}(\Delta\dot{Q}_{Geb} < 0; \theta_i \leq \theta_{i,mw}); \text{ABS}(\Delta\dot{Q}_{Geb}); 0)$$

$\theta_{i,mw}$	Mittlere Gebäudetemperatur Heizfall	[°C]
$\theta_i$	Mittlere Gebäudetemperatur	[°C]
$\Delta\dot{Q}_{Geb}$	Leistungsverhältnis ohne Heizung / Kühlung	[W]

Dies ist die einfachste Form der Heizungsregulierung. Soll eine Heizgrenzschtaltung berücksichtigt werden, kann das Leistungsverhältnis ohne Heizung und Kühlung der letzten 72 Stunden

aufsummiert werden. Ist diese Summe positiv ist, gleichen sich die Wärmegewinne und -verluste aus. Die Heizung kann ausgeschaltet werden. Sobald die Summe wieder negativ wird, wird die Heizung wieder freigegeben. Um den Überblick zu behalten, sollte dafür eine zusätzliche Spalte eingefügt werden.

Gleich wie bei der Lüftung, kann der Heizleistungswert mit einem Steuerfaktor ein- bzw. ausgeschaltet werden. Dafür wird die gesamte Formel mit einem Zellenbezug in die Regelparameter (Mappe «Eingaben Gebäude») am Ende multipliziert. Soll die Heizung aktiviert sein, ist in der Zelle der Steuerung eine 1 einzutragen. Um die Heizung abzuschalten, wird eine 0 eingesetzt.

### 3.4.2.11 Kühlleistung

Die Kälteleistung zu jeder Stunde wird nach gleichem Prinzip berechnet wie die Heizleistung. Damit die Kühlung aktiviert wird, müssen folgende zwei Parameter erfüllt sein:

- Das Leistungsverhältnis (ohne Heizung und Kühlung) des Gebäudes muss positiv sein, das Gebäude würde also überhitzen.
- Die Gebäudetemperatur muss der Auslege-Gebäudetemperatur im Kühlfall entsprechen oder darüber liegen.

Sind diese zwei Parameter erfüllt, entspricht die Kühlleistung dem negativen Wert des Leistungsverhältnis ohne Heizung und Kühlung. Sie gleicht also die überschüssige Leistung aus und das effektive Leistungsverhältnis des Gebäudes im Gleichgewicht ist. Das Gebäude wärmt sich nicht weiter auf, kühlt sich jedoch ab, sobald das Leistungsverhältnis ohne Heizung oder Kühlung negativ wird.

*Excelformel 6: Kälteleistung*

$$\dot{Q}_K = \text{WENN}(\text{UND}(\Delta\dot{Q}_{Geb} > 0; \theta_i \geq \theta_{i,s}); -\Delta\dot{Q}_{Geb}; 0)$$

$\Delta\dot{Q}_{Geb}$	Leistungsverhältnis ohne Heizung / Kühlung	[W]
$\theta_{i,s}$	Mittlere Gebäudetemperatur Kühlfall	[°C]

Gleich wie die Heiz- und Lüftungsleistung wird die Formel der Kälteleistung noch zur Steuerung mit der Eingabe im Control-Panel multipliziert.

### 3.4.2.12 Leistungsverhältnis Gebäude und Temperaturänderung

In der zweitletzten Spalte wird das resultierende Leistungsverhältnis des Gebäudes mit Heizung und Kühlung berechnet. Dieses besteht aus dem Leistungsverhältnis ohne Heizung und Kühlung, der Heizleistung und der Kälteleistung.

Formel 19: effektives Leistungsverhältnis

$$\Delta\dot{Q}_{Geb_{eff}} = \Delta\dot{Q}_{Geb} + \dot{Q}_H + \dot{Q}_K$$

$\Delta\dot{Q}_{Geb}$	Leistungsverhältnis ohne Heizung / Kühlung	[W]
$\dot{Q}_H$	Heizleistung	[W]
$\dot{Q}_K$	Kälteleistung	[W]

Mit dem effektiven Leistungsverhältnis wird die Temperaturänderung des Gebäudes berechnet. Dafür wird die Leistung mit dem in der Heizungsmappe berechneten Wärmewiderstand des Gebäudes multipliziert und so in eine resultierende Temperaturdifferenz umgewandelt. Diese wird über die Zeitkonstante abgeschwächt. Die dafür verwendete Formel 20 basiert auf der Formel 6 im Kapitel 3.2.2.2.

Formel 20: Gebäudetemperaturänderung aus Leistungsverhältnis

$$\Delta T_{Geb} = \Delta\dot{Q}_{Geb_{eff}} \cdot R_{th} \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{\tau_{Geb}}}\right) [K]$$

$R_{th}$	Absoluter Wärmewiderstand Gebäude	$\left[\frac{K}{W}\right]$
$\Delta\dot{Q}_{Geb_{eff}}$	Effektives Leistungsverhältnis	[W]
$\tau_{Geb}$	Zeitkonstante Gebäude	[h]

Diese berechnete Gebäudetemperaturänderung wird verwendet, um die Gebäudetemperatur der nächsten Stunde zu berechnen.

## 3.5 Externe Lasten

Wie bereits im Kapitel 3.4.2.8 angedeutet, sind die externen Lasten die komplexeste Berechnung. Dies liegt vor allem daran, dass die solaren Gewinne nur annähernd aus Standardwerten zu berechnen sind. Im Verlaufe der Arbeit wurden 3 verschiedenen Berechnungsmethoden für die externen Lasten angewendet. Die genaueste wurde bereits im Kapitel 3.4.2.8 eingehend beschrieben.

### 3.5.1 1. Variante - Nur externe Lasten

In der ersten Variante wurden die externen Lasten gleich berechnet wie die im Kapitel 3.4.2.8 beschriebenen Variante. Im Leistungsverhältnis wird die über die Aussen- und Gebäudetemperatur Transmissionsleistung nur berücksichtigt, wenn sie ein Verlust ist. Die über den Wärmetransferkoeffizienten berechneten Transmissionsgewinne wurden jedoch nicht berücksichtigt, da gemäss SIA MB 2024.2021 die Transmissionsgewinne bereits in den angegebenen externen Lasten berücksichtigt sind.

Mit dieser Variante wird 14% zu wenig Kühlenergie berechnet. Die maximale Kälteleistung liegt 12% unter der IDA-ICE Simulation. Diese Werte wären zwar innerhalb der festgelegten 20% Grenze, da jedoch alle anderen Werte nicht mehr als 9% von der IDA-ICE Simulation abweichen, wird eine bessere Lösung gesucht.

### 3.5.2 2. Variante - Berechnete Solarstrahlung pro Fassade

Dies ist die wissenschaftlich korrekteste Variante. Dabei wird mit dem Sonnenverlauf bestehend aus Sonnenazimut und -höhe und der Leistung der Direktnormalstrahlung (senkrecht auftreffend) gerechnet. Es wird pro Fassade die stündliche Globalstrahlung berechnet. Anschliessend wird die effektive Fensterfläche berücksichtigt. Der Sonnenschutz wird pro Fassade gesteuert. Da die solaren Gewinne exakt berechnet werden, müssen im Gegensatz zur ersten Variante die über den Wärmetransferkoeffizienten berechneten Transmissionsgewinne ebenfalls Leistungsverhältnis ohne Heizung und Kühlung (Kapitel 0) berücksichtigt werden.

Die Solarstrahlung auf eine Fassade setzt sich aus der direkten, der diffusen und der reflektierten Strahlung zusammen. Für solare Gewinne von Dachfenstern eines Flachdaches (oder bei kleiner Dachneigung) kann zur Vereinfachung die horizontale Globalstrahlung verwendet werden.

### 3.5.2.1 Direkte Strahlung

Die Berechnung der direkten Strahlung basiert auf der Formel 21 und wird gemäss der Excelformel 7 in die Quasisimulation implementiert. In einem ersten Schritt muss der Sonnenwinkel auf die Fassade berechnet werden.

Formel 21: Sonnenwinkel auf beliebig geneigte Fläche (Rouvel & Seifert, 2007, S.3)

$$\cos(\nu) = \sin(\gamma_S) \cdot \cos(\gamma_F) + \cos(\gamma_S) \cdot \sin(\gamma_F) \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) \quad [-]$$

Da die Fassadenneigung im behandelten Projekt  $\gamma_F$   $90^\circ$  ist, kann die Formel 21 vereinfacht werden.

Formel 22: Sonnenwinkel auf senkrechte Fassade

$$\cos(\nu) = \cos(\gamma_S) \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) \quad [-]$$

$\gamma_S$	Sonnenhöhe	$[\circ]$
$\gamma_F$	Fassadenneigung	$[\circ]$
$\alpha_F$	Ausrichtung / Azimut Fassade	$[\circ]$
$\alpha_S$	Sonnenazimut	$[\circ]$

Für die Berechnung der auf die Fassade auftreffenden Leistung, wird die Direktnormalstrahlung mit dem Cosinus des Sonnenwinkels multipliziert.

Formel 23: Direktstrahlung auf Fassade

$$I_{BF} = I_{Bn} \cdot \cos(\nu) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$\nu$	Sonnenwinkel	$[\circ]$
$I_{Bn}$	Direktnormalstrahlung	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

Für die Eingabe im Excel werden zuerst in der Mappe «Eingabe Gebäude» die Orientierungen der Fassade eingegeben. Dabei ist zu beachten, dass die hier verwendete Formel mit positivem Sonnenazimut zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  rechnet. Da die Fassade mit der Formel 23 von beiden Seiten bestrahlt werden kann, wird im Excel mit einem WENN-Befehl eine Einschränkung des Sonnenstandes gemacht. Die Fassade wird effektiv bestrahlt, wenn der Flächen-Sonnenazimut kleiner als  $90^\circ$  ist. Die Berechnung der Direktstrahlung pro Fassade wird mit der Excelformel 7 in die Quasisimulation implementiert.

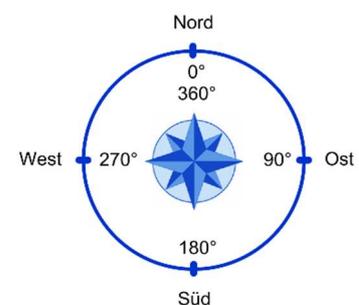


Abbildung 33: Sonnenazimut & Fassadenorientierung (Rouvel & Seifert, 2007, S.3)

Excelformel 7: Direktstrahlung auf Fassade

$$I_{B_F} = \text{WENN} \left( \text{UND} \left( \text{ABS}(\alpha_F - \alpha_s) < 90; \gamma_s > 20 \right); \right. \\ \left. I_{B_n} \cdot \cos \left( \text{BOGENMASS}(\gamma_s) \right) \cdot \cos \left( \text{BOGENMASS}(\text{ABS}(\alpha_F - \alpha_s)) \right); 0 \right)$$

$\gamma_s$	Sonnenhöhe	[°]
$\alpha_F$	Ausrichtung / Azimut Fassade	[°]
$\alpha_s$	Sonnenazimut	[°]
$I_{B_n}$	Direktnormalstrahlung	$\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

In der Excelformel 7 wird kein baulicher Sonnenschutz berücksichtigt. Nur die umliegenden Gebäude werden mit dem zweiten Regelparameter (Sonnenhöhe > 20°) berücksichtigt. Diese unterscheiden sich von Fassade zu Fassade.

Für die Fenster des Südteils wird versucht den baulichen Sonnenschutz durch die 1 Meter dicke Südfassade zu berücksichtigen. Diese basiert auf einer Fensteranalyse vom 28.03.2022 (Abbildung 34). Einerseits wird der Regelparameter des Flächen-Sonnenazimut auf 45° reduziert, andererseits wird abhängig von der Sonnenhöhe das Fenster verschattet. Dafür werden vereinfacht 3 Verschattungsstufen definiert:

- 0° - 45°: Keine Verschattung, vollständige Einstrahlungsleistung
- 45° - 63°: Teilweise Verschattung, Einstrahlungsleistung halbiert
- >63°: komplette Verschattung des Fensters, keine Einstrahlungsleistung

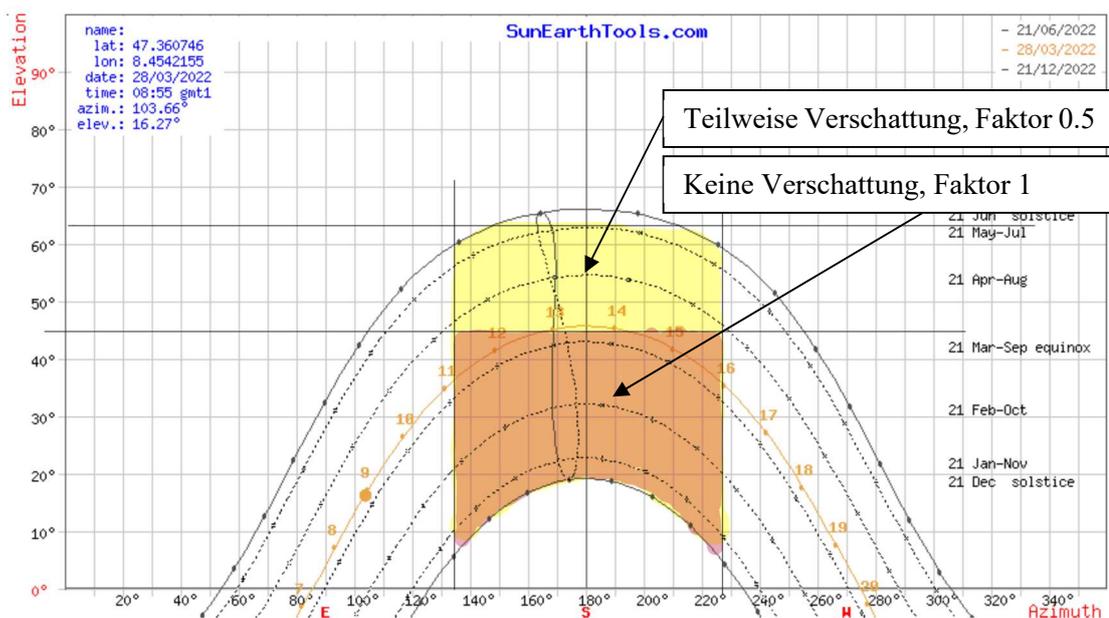


Abbildung 34: Fensteranalyse bauliche Verschattung (P. Lustenberger, 2022)

Der Faktor für die bauliche Verschattung der Südfassade wird im Excel mit einer separaten Spalte berechnet. Dafür wird die Excelformel 8 verwendet

*Excelformel 8: Faktor bauliche Verschattung Südfassade*

$$f_{BS} = \text{WENN}(\text{UND}(\text{ABS}(\alpha_F - \alpha_S) < 45; \gamma_S < 63); \text{WENN}(\gamma_S < 45; 0.5); 0)$$

$\gamma_S$	Sonnenhöhe	[°]
$\alpha_F$	Ausrichtung / Azimut Fassade	[°]
$\alpha_S$	Sonnenazimut	[°]

### 3.5.2.2 Diffuse Strahlung

Für die diffuse Strahlung gibt es zwei Hypothesen, das isotrope Modell und das anisotrope Modell. Im isotropen Modell wird davon ausgegangen, dass die diffuse Strahlung gleichmässig über den Himmel verteilt ist. Das anisotrope Modell geht davon aus, dass der sonnennahe Bereich des Himmels mehr diffuse Strahlung abgibt. Dies spielt vor allem bei klarem Himmel eine Rolle. (Gassel, 1996, S.21)

In der Quasisimulation wird das isotrope Modell verwendet. Dadurch kann gemäss Formel 24 und Formel 25 die diffuse Strahlung auf jede Fassade über die horizontale diffuse Strahlung berechnet werden.

*Formel 24: Diffuse Strahlung auf beliebig geneigte Oberfläche (Gassel, 1996, S.21)*

$$I_{DF} = I_{Dh} \cdot \frac{1 + \cos(\gamma_F)}{2} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Da die Fassaden senkrecht sind, kann die Formel 24 vereinfacht werden:

*Formel 25: Diffuse Strahlung auf senkrechte Fassade*

$$I_{DF} = I_{Dh} \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$\gamma_F$	Fassadenneigung	[°]
$I_{Dh}$	Diffuse Strahlung horizontal	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

Die diffuse Strahlung auf jede Fassade ist somit die Hälfte der horizontalen diffusen Strahlung. Diese kann nicht gemessen werden. Deshalb berechnet sich die diffuse Strahlung aus der Subtraktion der horizontalen Direktstrahlung von der horizontalen Globalstrahlung.

### 3.5.2.3 Reflexionsstrahlung

Die Reflexionsstrahlung auf jede Fassade ist abhängig von der Globalstrahlung auf die Fassade (direkte & diffuse Strahlung) sowie dem Albedo-Wert der Umgebung. Dieser liegt meistens zwischen 0.2 und 0.4. (Gassel, 1996, S.22)

Die Reflexionsstrahlung wird gemäss Formel 26 berechnet:

*Formel 26: Reflexionsstrahlung auf beliebig geneigte Oberfläche (Gassel, 1996, S.21)*

$$I_{RF} = 0.5 \cdot I_{GF} \cdot (1 - \cos(\gamma_F)) \cdot \rho_G \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Auch hier kann auf Grund der senkrechten Fassade eine Vereinfachung der Formel vorgenommen werden. Die Reflexionsstrahlung wird in der Quasisimulation mit der Formel 27 berechnet.

*Formel 27: Reflexionsstrahlung auf eine senkrechte Fassade*

$$I_{RF} = 0.5 \cdot (I_{BF} + I_{DF}) \cdot \rho_G \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$\gamma_F$	Fassadenneigung	[°]
$I_{BF}$	Direktstrahlung auf Fassade	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$I_{DF}$	Diffuse Strahlung auf Fassade	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$I_{GF}$	Globalstrahlung auf Fassade (Diffus + Direkt)	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$\rho_G$	Albedo	[-]

### 3.5.2.4 Gesamtstrahlung auf Fassade & solare Gewinne

Um die solaren Gewinne pro Fassade zu berechnen, wird die Gesamtstrahlung auf die Fassade berechnet. Diese setzt sich zusammen aus der Direktstrahlung, der diffusen Strahlung und der Reflexionsstrahlung.

*Formel 28: Gesamtstrahlung auf Fassade*

$$I_{SF} = I_{BF} + I_{DF} + I_{RF} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$I_{BF}$	Direktstrahlung auf Fassade	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$I_{DF}$	Diffuse Strahlung auf Fassade	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
$I_{RF}$	Reflexionsstrahlung auf Fassade	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

Anschliessend können über die Fensterflächen pro Fassade die effektiven solaren Gewinne berechnet werden. Wichtig hier ist, dass die Globalstrahlung mit dem g-Wert des Fensters multipliziert wird. Zusätzlich wird ab einer Strahlung von  $200 \text{ W/m}^2$  auch der g-Wert des aussenliegenden Sonnenschutzes von 0.2 berücksichtigt.

Durch eine genaue Unterscheidung der Fenster ohne Sonnenschutz oder mit nur einem baulichen Sonnenschutz sollten die solaren Gewinne und daher auch die Kühlenergie und die Kälteleistung exakter berechnet werden können.

Die mit dieser Variante berechnete Kühlenergie im Gebäude ist 12% unter der IDA-ICE Simulation. Die maximal notwendige Kühlleistung im Raum ist 18% zu hoch.

Es wird also ersichtlich, dass diese Berechnungsmethode um einiges komplexer und aufwändiger ist als die Berechnung über die Zielwerte des SIA MB 2024.2021. Sie zeigt jedoch kaum genauere Resultate auf. Grund dafür könnte der bauliche Sonnenschutz der 1 Meter dicken Südfassade sein. Dieser wurde vereinfacht über Grenzwerte des Einstrahlungswinkel berücksichtigt. Eine genaue Verschattungsberechnung bei jedem denkbaren Sonnenwinkel ist jedoch zeit- und aufwändig und würde den Rahmen eines Vorprojektes sprengen. Bei einem Gebäude ohne bauliche Verschattung wäre diese Berechnungsmethode aber in Erwägung zu ziehen.

Zusätzlich würde die Solareinstrahlung zu einer früheren Überhitzung der Räume im Südteil führen. Dadurch würde die Kühllast mehr auf das Jahr verteilt werden. Dies kann jedoch nicht berücksichtigt werden, da die solaren Gewinne modellbedingt dem gesamten Gebäude angerechnet werden

### **3.5.3 3. Variante - Externe Lasten zuzüglich Transmissionsgewinn**

Die dritte Variante wurde bereits im Kapitel 3.4.2.8 beschrieben. Grundsätzlich basiert sie auf der 1. Variante. Zusätzlich werden die mit dem Wärmetransferkoeffizienten berechneten Transmissionsgewinne im Leistungsverhältnis ohne Heizung und Kühlung berücksichtigt. Damit ist die Kühlenergie 6 % unter dem Wert der IDA-ICE Simulation. Die maximal benötigte Kühllast der Räume ist nur 3% zu hoch.

### **3.5.4 Empfehlung der 3. Variante**

Die 3. Berechnungsmethode der externen Lasten ist einiges simpler und einfacher zu programmieren als die 2. Variante der exakt berechneten Solarstrahlung und wird aus diesem Grund empfohlen. Durch die Einfachheit dieser Variante ist die Reaktion auf mögliche Entwurfsänderungen schneller als bei der 2. Variante. Ein weiterer Vorteil ist, dass weniger Klimadaten benötigt werden. Die gesamte Quasisimulation basiert in der ersten und dritten Variante auf dem Aussentemperaturverlauf und der horizontalen Globalstrahlung.

Wenn man die Jahresenergien und Spitzenlasten in der Tabelle 4 vergleicht, zeigt sich, dass die 2. Variante nicht genauer ist als die 3. Variante.

Tabelle 4: Vergleich Berechnungsvarianten für externe Lasten

Wert	IDA-ICE Simulation	1. Variante	2. Variante	3. Variante
Heizenergie	25.9 kWh/m <sup>2</sup>	27.6 kWh/m <sup>2</sup> +6.44%	27.4 kWh/m <sup>2</sup> +5.85%	27.6 kWh/m <sup>2</sup> +6.41%
Spitzenheizlast	18.1 W/m <sup>2</sup>	17.3 W/m <sup>2</sup> -4.36%	19.3 W/m <sup>2</sup> +6.98%	17.3 W/m <sup>2</sup> -4.36%
Kälteenergie	9.7 kWh/m <sup>2</sup>	8.4 kWh/m <sup>2</sup> -13.49%	8.5 kWh/m <sup>2</sup> -11.62%	9.1 kWh/m <sup>2</sup> -5.81%
Spitzenkühlleistung	28.7 W/m <sup>2</sup>	25.3 W/m <sup>2</sup> -12.03%	33.7 W/m <sup>2</sup> +17.50%	29.5 W/m <sup>3</sup> +2.84%

Die vermeintlich höhere Genauigkeit durch die separate Berechnung der solaren Gewinne zahlt sich nicht aus. Dies zeigt sich auch im Vergleich der Kältelastprofile der 2. und 3. Variante.

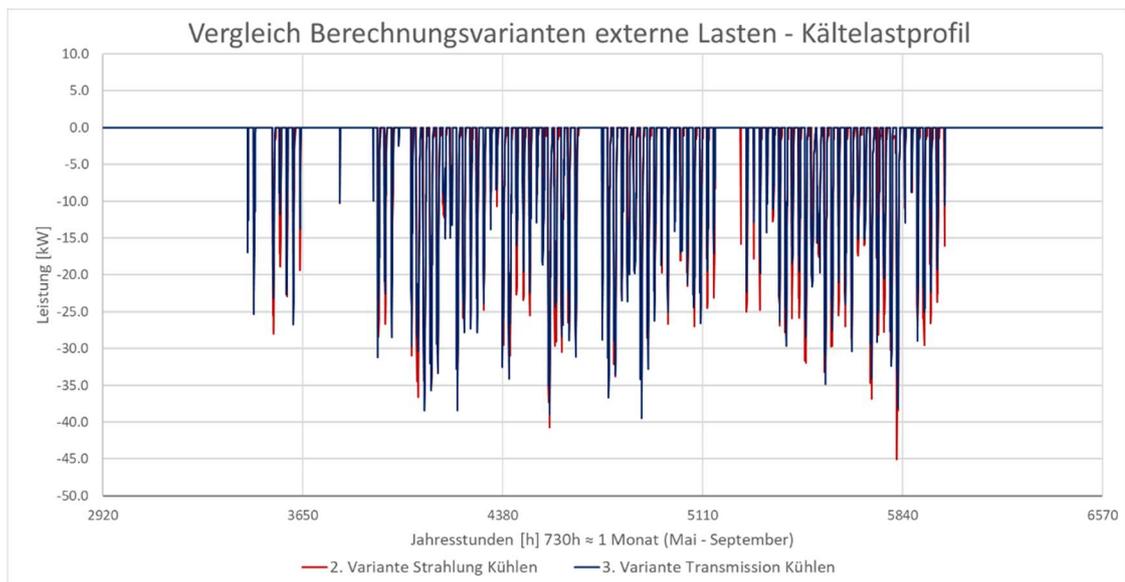


Diagramm 3: Vergleich Kältelastprofil Mai bis September

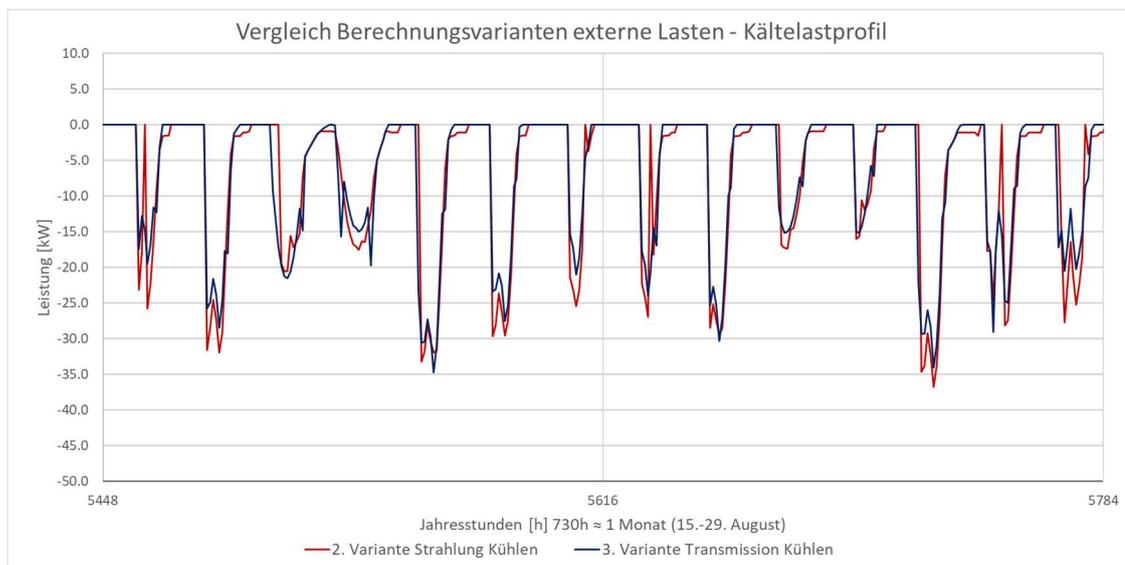


Diagramm 4: Vergleich Kältelastprofile Augustwoche

In den Diagrammen 3 & 4 zeigt sich, dass die Ausprägungen der beiden Lastprofile zwar unterschiedlich, da andere Spitzenlasten berechnet werden, der Verlauf ist aber fast identisch.

Es ist also auch in einem Tagesprofil oder einem Wochenprofil mit keiner der beiden Varianten eine höhere Genauigkeit gegeben. Daher wird durch die höhere Einfachheit und die genaueren Jahresenergie und Spitzenleistungen die Variante 3 zur Berechnung der externen Gewinne empfohlen.

Im Kapitel 4.2 wird das Szenario «SIA 2028» genauer untersucht. Es zeigt sich, dass die 3. Variante vor allem für Berechnungen von zukünftigen Jahren zu verwenden ist. Für Quasisimulationen basierend auf einem Klimadatensatz der Vergangenheit oder Gegenwart kann die 1. Variante verwendet werden. Der Variantenvergleich zeigt, dass die externen Lasten des SIA MB 2024.2021 eher optimistisch sind für die Betrachtung des Gebäudes im prognostizierten Jahr 2050.

## 3.6 Ergänzende Berechnungen Quasisimulation

Wenn die Grundlagen der Quasisimulation korrekt aufgebaut sind, kann die Berechnung individuell erweitert werden. Im Folgenden werden weitere mögliche Berechnungen erläutert.

### 3.6.1 Berücksichtigung Serverraum

Ein Serverraum mit hoher Rechenleistung, wie im Werkstattgebäude vorhanden, hat eine ganzjährig hohe Temperatur. Er wird direkt gekühlt, der Raum gibt dennoch Wärme an die umliegenden Räume ab. Um dies zu berücksichtigen, wird er als einziger Raum im Gebäude individuell betrachtet und die spezifischen Wärmetransferkoeffizienten berechnet. Dies erfolgt wie bei der Berechnung des gesamten Gebäudes in der Mappe «Eingaben Gebäude» (siehe Kapitel 3.2.2.1). Es werden die Wandflächen und ihre U-Werte erfasst. Mit der Infiltrationsrate und Wärmebrückenfaktoren werden die Wärmetransferkoeffizienten nach aussen und nach innen berechnet.

Serverraum			
Raumvolumen	228.20 m <sup>3</sup>		
Bauteil	Bauteilfläche	U-Wert	U-Wert * Fläche
Wandfläche aussen	18.65 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	2.9 W/K
Fenster	18.72 m <sup>2</sup>	1.00 W/m <sup>2</sup> *K	18.7 W/K
Wand Innenliegend	77.75 m <sup>2</sup>	0.85 W/m <sup>2</sup> *K	66.0 W/K
Stampflehmwand	23.00 m <sup>2</sup>	2.29 W/m <sup>2</sup> *K	52.7 W/K
Decke	50.71 m <sup>2</sup>	0.40 W/m <sup>2</sup> *K	20.3 W/K
Bodenfläche	50.71 m <sup>2</sup>	0.15 W/m <sup>2</sup> *K	7.8 W/K
	Wärmetransmissionskoeffizient innen		<b>139.0 W/K</b>
	Wärmetransmissionskoeffizient aussen		<b>29.4 W/K</b>
Infiltration	0.1 /h		7.3 W/K
Wärmebrücken Aussen	0.1		2.9 W/K
Wärmebrücken Innen	0.3		41.7 W/K
	Wärmeübertragungskoeffizient innen		<b>180.7 W/K</b>
	Wärmeübertragungskoeffizient aussen		<b>39.7 W/K</b>

Abbildung 35: Eingaben Serverraum Mappe "Eingaben Gebäude"

In der Raumtemperatursimulation wird in separaten Spalten der Wärmetransfer zwischen dem Serverraum und der Aussenluft, sowie der Wärmetransfer zwischen dem Serverraum und dem Gebäude berechnet. Dafür werden die entsprechenden Wärmetransferkoeffizienten mit der Temperaturdifferenz des Serverraums zur Aussenluft bzw. der Gebäudetemperatur multipliziert. Damit der Sollwert der Gebäudetemperatur im Heizfall nicht beeinflusst wird vom 27°C warmen Serverraum, wird der Server in der Berechnung der mittleren Gebäudetemperatur in der Heizungs-Mappe nicht mehr berücksichtigt. Für maximale Präzision müssten auch die externen Lasten und die Abwärme von Personen und Beleuchtung des Serverraumes separat berücksichtigt werden, ob sich diese Genauigkeit aber lohnt, wird im Kapitel 4.3.2 untersucht. Mit der Leistung des Servers von 25 kW und dem Gewinn bzw. Verlust an Leistung über die Wandflächen des Serverraums kann dessen effektive Kühlleistung berechnet werden.

### 3.6.2 Natürliche Lüftung

Wie im Kapitel 1.1.1.5 erläutert, wird im Projekt der Gruppe C mit einer natürlichen Lüftung gearbeitet. Da die Grossraumbüroflächen eine zu grosse Raumtiefe aufweisen, um sie nur über die Fassade zu belüften, wird der Kamineffekt des Zwischenraums genutzt. Diese Kaminlüftung wurde mit der Quasisimulation überprüft. Basierend auf der Gebäudetemperatur, der Aussen-temperatur und den Fensterflächen wird berechnet, wie viel Luft maximal über den Dichteunterschied gefördert werden kann.

Dafür müssen in der Lüftungsmappe die Fensterflächen und die Höhendifferenzen der Fenster eingegeben werden. Da die Fenster im Dachversatz und die Dachfenster nicht ganz offenbar sind, sind die Fensterflächen über Korrekturfaktoren zu reduzieren. Diese können bei kleinen Kippwinkeln über eine lineare Approximation berechnet werden. Dafür wird die Formel 29 verwendet. Als Öffnungswinkel werden für die Dachfenster entsprechend der Dachneigung 12° und für die Kippfenster im Dachversatz 30° definiert.

Formel 29: Korrekturfaktor Öffnungswinkel (B. Frei, 2022, S.102)

$$C_k(\alpha) = 0.45 \cdot \frac{\alpha}{30^\circ} \quad [-]$$

$\alpha$                       Öffnungswinkel Fenster                      [°]

Grundlagen natürliche Lüftung			
<b>Halbgeschoss C</b>		<b>Halbgeschoss B</b>	
Höhendifferenz	4.00 m	Höhendifferenz	7.00 m
Fensterfläche	3.71 m <sup>2</sup>	Fensterfläche	5.46 m <sup>2</sup>
<b>Fensterfläche Nordlicht</b>			
Korrektur Kippwinkel 0.45	7.09 m <sup>2</sup>		
<b>Fensterfläche Dachfenster</b>	8.40 m <sup>2</sup>		
Korrektur Kippwinkel 0.18	1.51 m <sup>2</sup>		

Abbildung 36: Eingaben natürliche Lüftung

Der maximal mögliche Luftvolumenstrom kann basierend auf den Fensterflächen, dem Höhenunterschied und der Gebäude- und Aussentemperatur mit der Formel 30 berechnet werden. Für den «Discharge coefficient»  $c_d$  wird 0.6 angenommen (Empfehlung B. Frei).

Formel 30: Luftvolumenstrom auf Grund von Kamineffekt (B. Frei, 2022, S.76)

$$\dot{V} = c_d \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot \sqrt{\frac{T_i}{T_A} - 1} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$c_d$	Discharge coefficient	[-]
$A_1$	Untere Fensterfläche	[m <sup>2</sup> ]
$A_2$	Obere Fensterfläche	[m <sup>2</sup> ]
$g$	Erdbeschleunigung	$\left[ \frac{m}{s^2} \right]$
$H$	Höhenunterschied der Fenster	[m]
$\theta_i$	mittlere Gebäudetemperatur	[°C]
$\theta_a$	Aussentemperatur	[°C]

In der Excelberechnung ist bei den Temperaturen jeweils die höhere Temperatur oberhalb des Bruchstriches zu setzen. Dies ist notwendig, um den Luftvolumenstrom auch zu berechnen, wenn die Gebäudetemperatur unter der Aussentemperatur liegt. In diesem Fall wird die Annahme gemacht, dass die Luft unten aus dem Gebäude strömt und oben nachströmt. Der Luftvolumenstrom bleibt der Gleiche. Das effektive Verhalten einer Kaminlüftung bei höherer Aussentemperatur als der Raumtemperatur wurde im Umfang dieser Arbeit nicht untersucht. Der durch den Kamineffekt erzeugte Luftvolumenstrom wird gemäss Excelformel 9 in der Quasisimulation implementiert.

Excelformel 9: Luftvolumenstrom auf Grund von Kamineffekt

$$\dot{V} = c_d \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \cdot \sqrt{\frac{\text{MAX}(\theta_i; \theta_a) + 273.15}{\text{MIN}(\theta_i; \theta_a) + 273.15} - 1} \cdot \text{WENN}(\theta_a > \theta_i; -1; 1)$$

$c_d$	Discharge coefficient	[-]
$A_1$	Untere Fensterfläche	[m <sup>2</sup> ]
$A_2$	Obere Fensterfläche	[m <sup>2</sup> ]
$g$	Erdbeschleunigung	$\left[ \frac{m}{s^2} \right]$
$H$	Höhenunterschied der Fenster	[m]
$T_i$	Innentemperatur	[K]
$T_A$	Aussentemperatur	[K]

Anschliessend kann der mögliche Luftvolumenstrom mit dem notwendigen Luftvolumenstrom verglichen werden, um eine erste Beurteilung der natürlichen Lüftung zu machen.

### 3.6.3 Eigenstromverbrauch und Autarkiegrad

Mit der vereinfachten Berechnung des PV-Ertrages und dem berechneten Stromverbrauch des Gebäudes kann eine erste Berechnung des Eigenstromverbrauchs des Gebäudes und somit des Autarkiegrades durchgeführt werden. Dafür wird in jeder Stunde der Strombedarf vom produzierten Strom der PV-Anlage subtrahiert. Anschliessend kann mit dem SUMMEWENN-Befehl berechnet werden, wie viel Strom aus dem Netz dem Gebäude zugeführt wird bzw. wie viel Strom in das Netz zurückgespielen werden kann. Der Nutzen einer Speicherbatterie kann mit den berechneten Werten entweder graphisch oder rechnerisch abgeschätzt werden.

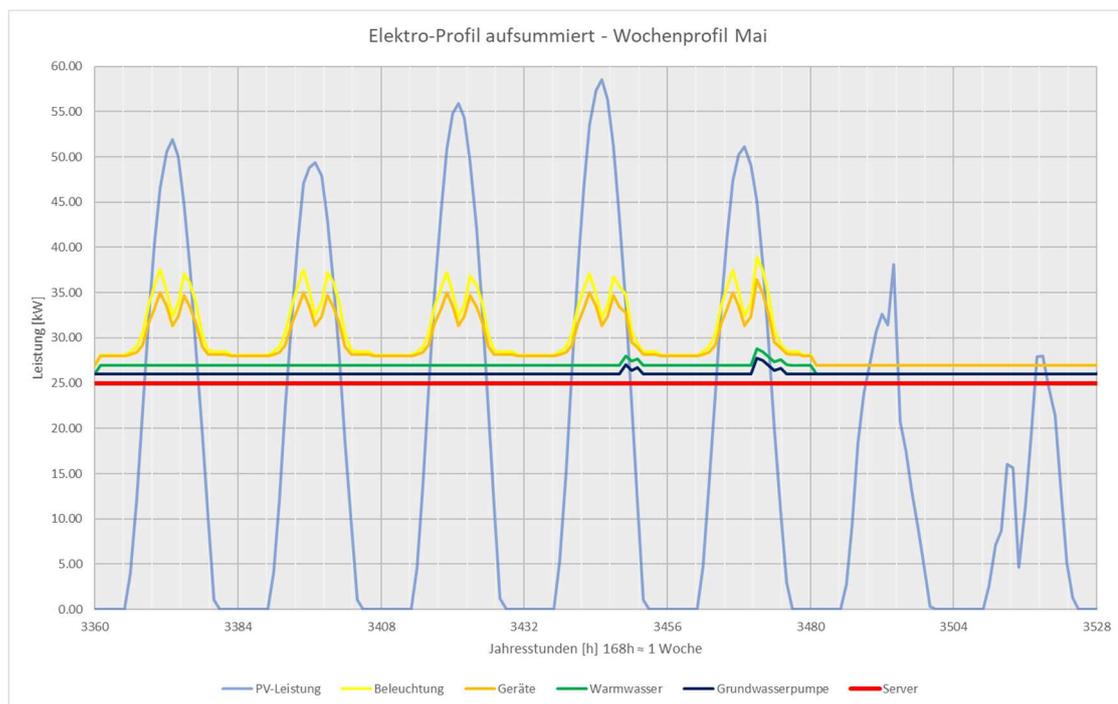


Diagramm 5: Elektro-Profil aufsummiert - Wochenprofil Mai

In diesem Diagramm wurde der gesamte Stromverbrauch des Werkstattgebäudes inklusive Grundwasserpumpe aufsummiert und dem PV-Ertrag graphisch gegenübergestellt. Die PV-Anlage produziert im Sommer zu viel Strom, der Einsatz einer Speicherbatterie wäre prüfenswert. In diesem Projekt wird der überschüssige Strom jedoch an das Arealnetz zurückgespielen.

Wird im Energiekonzept eine Wärmepumpe oder Kältemaschine vorgesehen, muss deren Stromverbrauch ebenfalls in der Eigenverbrauchs- / Autarkiegradberechnung berücksichtigt werden.

### 3.6.4 Wärmepumpe / Kältemaschine

Da Wärmepumpen und Kältemaschinen einen grossen Teil des Stromverbrauchs und somit Endenergieverbrauchs eines Gebäudes ausmachen, sollte dieser ebenfalls berechnet werden. Hier wird der Stromverbrauch einer Wärmepumpe erläutert, dieselbe Berechnungsweise gilt auch für Kältemaschinen.

Da der Heiz- und Kälteenergiebedarf des Gebäudes bekannt ist, kann der Stromverbrauch einer Wärmepumpe mit dem COP einfach berechnet werden. Dabei können drei Stufen der Genauigkeit angewendet werden. Die einfachste Methode ist die Verwendung eines Standard-COPs. Dieses kann bei Wärmepumpen mit konstanten Systemtemperaturen verwendet werden, beispielsweise bei Erdwärmesonden, Grundwassernutzung oder dem Anschluss an einem Anergie-netz.

Bei Aussenluftwärmepumpen hat die Umgebungstemperatur einen zu grossen Einfluss auf den COP. Mit vorgegebenen Grädigkeiten am Verdampfer und am Kondensator, dem Gütegrad des Kompressors und der Systemtemperatur wird vereinfacht der COP zu jeder Stunde, abhängig von der Aussenlufttemperatur berechnet. Will man noch präzisere Resultate kann auch die Änderung der Vorlauftemperatur mit einer Heizkurve einprogrammiert werden. Eine weitere Variante ist die Leistungskurve eines auf dem Markt erhältlichen Produktes zu interpolieren. Mit Excel kann die Formel der Trendlinie berechnet werden. Diese berechnet den gerätespezifischen COP bei jeder Aussentemperatur.

Wie man anhand der hier erläuterten Beispiele erkennt, sind der Erweiterung der Quasisimulation kaum Grenzen gesetzt. Wichtig ist jedoch, dass die Grundlagen des Gebäudes korrekt erfasst werden und die Quasisimulation korrekt durchgeführt wird. Die Quasisimulation eignet sich, um bereits in frühen Projektphasen verschiedenste Aspekte eines Projektes genauer zu untersuchen.

## 4 Resultate & Diskussion

Um die Quasisimulation mit der IDA-ICE Simulation zu vergleichen, werden die Jahresenergien und die thermischen Spitzenlasten der beiden Berechnungsmethoden untersucht. Graphische Vergleiche ermöglichen die Analyse der Freilufttemperaturen und der thermischen Lastprofile, um ein besseres Verständnis des Gebäudes und der Quasisimulation zu erhalten. Die im Bericht verwendeten Diagramme befinden sich für genauere Betrachtungen in einem grösseren Format im Anhang 2. Hier dienen sie nur der Orientierung.

### 4.1 Szenario ohne Server

Wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, wurde in einer ersten Phase die Quasisimulation mit der Simulation des Werkstattgebäude ohne die interne Last des Servers verglichen. Dadurch soll der Allgemeinfall untersucht werden, bevor der projektspezifische Fall betrachtet wird. Verglichen wird hier die Quasisimulation mit der 3. Variante der externen Lastberechnung.

#### 4.1.1 Energie und Spitzenlasten ohne Server

In einem ersten Schritt werden die Jahresenergien und thermischen Spitzenlasten verglichen. Dafür werden die absoluten Zahlen in der Tabelle 5 untersucht.

Tabelle 5: Vergleich absolute Werte - Szenario ohne Server

Wert	IDA-ICE	Quasisimulation	Abweichung
Heizenergie	36'419 kWh	36'814 kWh	1.08%
Kühlenergie Raum	13'574 kWh	12'146 kWh	-10.52%
max. Heizlast	25.4 kW	23.0 kW	-9.15%
max. Kühllast	40.3 kW	39.4 kW	-2.30%
Energie Geräte	20'502 kWh	21'531 kWh	5.02%
Energie Beleuchtung	9'020 kWh	8'818 kWh	-2.23%
Energie Elektro total	29'522 kWh	30'349 kWh	2.80%

Die Abweichungen der beiden Resultate sind gering. Nur die Kühlenergie hat eine Abweichung von mehr als 10% zum IDA-ICE. Da die IDA-ICE Simulation nicht die exakt gleiche Energiebezugsfläche ausweist wie im Projekt geplant, werden die Werte pro m<sup>2</sup> EBF in der Tabelle 6 analysiert. Die grösste Abweichung betrifft dann der Energiebedarf der Geräte.

Tabelle 6: Vergleich Werte pro m<sup>2</sup> EBF - Szenario ohne Server

Wert	IDA-ICE	Quasisimulation	Abweichung
Heizenergie	25.9 kWh/m <sup>2</sup>	27.6 kWh/m <sup>2</sup>	6.41%
Kühlenergie Raum	9.7 kWh/m <sup>2</sup>	9.1 kWh/m <sup>2</sup>	-5.81%
max. Heizlast	18.1 W/m <sup>2</sup>	17.3 W/m <sup>2</sup>	-4.36%
max. Kühllast	28.7 W/m <sup>2</sup>	29.5 W/m <sup>2</sup>	2.84%
Energie Geräte	14.6 kWh/m <sup>2</sup>	16.1 kWh/m <sup>2</sup>	10.55%
Energie Beleuchtung	6.4 kWh/m <sup>2</sup>	6.6 kWh/m <sup>2</sup>	2.92%
Energie Elektro total	21.0 kWh/m <sup>2</sup>	22.7 kWh/m <sup>2</sup>	8.22%

Die mit der Quasisimulation berechneten Werte haben alle eine gleich grosse Abweichung. Eine Optimierung des Energieverbrauchs der Geräte wäre wünschenswert. Die Verbrauchsprofile basieren in beiden Berechnungen auf dem Lastprofil des SIA MB 2024.2015. Im IDA-ICE wird am Wochenende jedoch keine Bandlast jeglicher Geräte berücksichtigt. In der Excelberechnung mussten sie berücksichtigt werden, um auf das vorgelegte Resultat zu kommen. Die IDA-ICE Berechnung berücksichtigt die Gerätelast also noch auf eine andere Weise. Eine Korrektur des Energieverbrauchs der Geräte hätte jedoch einen negativen Einfluss auf die Heiz- und Kühlenergie. Wenn die Abwärme der Geräte um  $1.5 \text{ kWh/m}^2$  sinkt, würde die Kühlenergie um ca.  $0.7 \text{ kWh/m}^2$  absinken und die Heizenergie um  $0.7 \text{ kWh/m}^2$  ansteigen, wodurch beide auf eine Abweichung von über 10 % fallen würden. Die Abweichung in der Geräteenergie wird akzeptiert, um grössere Abweichungen in den übergeordneten Werten zu verhindern

## 4.1.2 Jahresprofile ohne Server

Die berechneten Energien und Leistungen sollen mit Jahresverläufen überprüft werden. Mit der graphischen Analyse können zusätzliche Schlussfolgerungen für den Vergleich der Berechnungsmethoden gezogen werden. Sie sind einer der grössten Vorteile einer Quasisimulation gegenüber einer statischen Berechnung, die keine exakten Jahresprofile ausgibt.

### 4.1.2.1 Leistungsprofile Heizen & Kühlen ohne Server

Die Form der beiden Lastprofile der Berechnungsmethoden ist ähnlich. Tendenziell ergibt Quasisimulation stärkere Spitzenlasten, insbesondere beim Kältelastprofil.

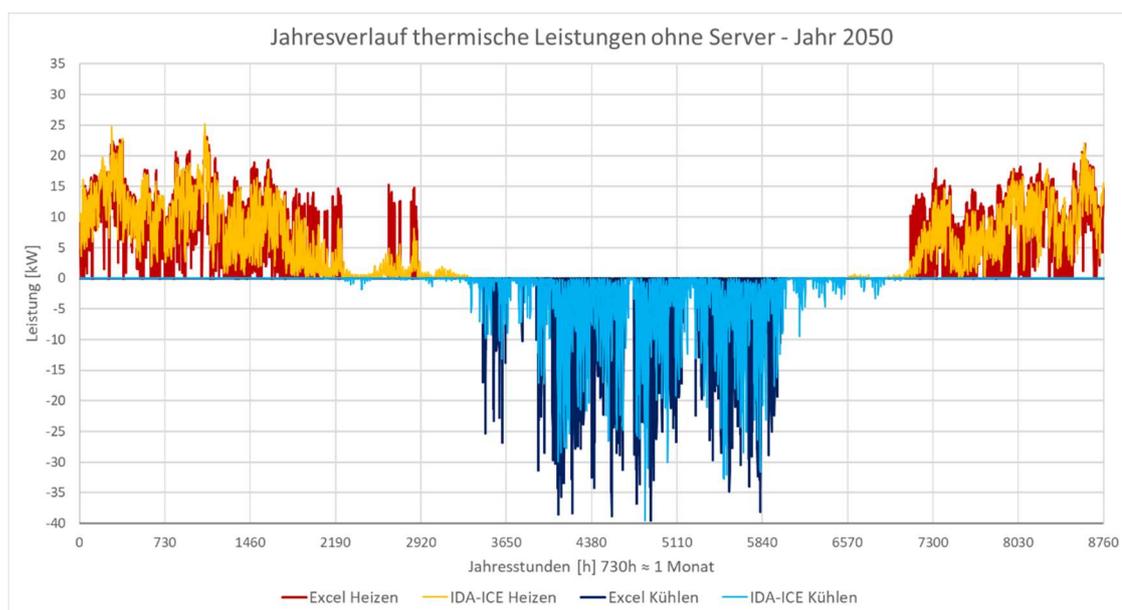


Diagramm 6: thermisches Jahreslastprofil - Szenario ohne Server

Bei einer genaueren Betrachtung wird ersichtlich, dass die IDA-ICE Simulation die Leistung genauer auf den Bedarf regelt, während die Quasisimulation die Anlage oft ausschaltet. Dies wird durch die Regulierung über die Gebäudetemperatur verursacht. Die Heizung und Kühlung der Quasisimulation schaltet komplett ab, sobald die vorgegebenen Gebäudetemperaturen erreicht sind. Sie fangen gerade in der Übergangsphase stark an zu tackten, statt kontinuierlich auf die benötigte Temperatur zu regeln (siehe Diagramm 7).

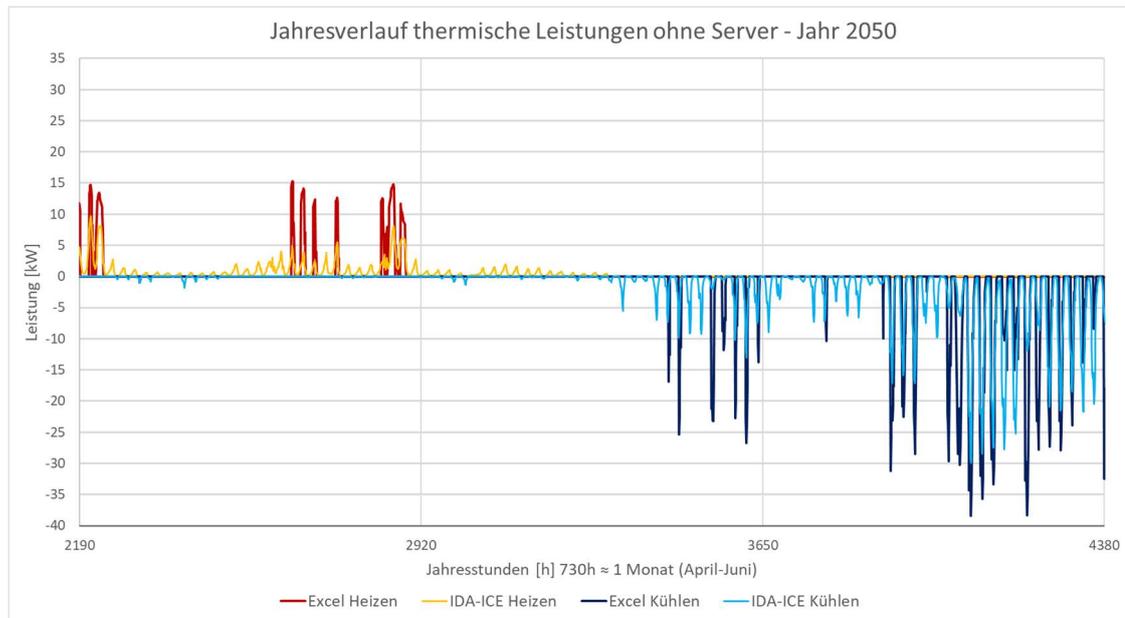


Diagramm 7: thermisches Lastprofil April bis Juni - Szenario ohne Server

Bei einer detaillierteren Betrachtung im Diagramm 8 fallen weitere Unterschiede auf. Einerseits stimmen die Wochentage der Simulationen nicht genau überein. Die Quasisimulation beginnt mit einem Montag, während die IDA-ICE Simulation an einem Samstag startet. Dadurch sind die Simulationen um 2 Tage verschoben. Dies könnte ein Grund für die Abweichung des Energiebedarfs der Geräte ein. Andererseits fällt auf, dass die Übereinstimmung der Tageslastspitzen unregelmässig ist. An einigen Tagen sind die Lastspitzen fast gleich, während an anderen Tagen die IDA-ICE Simulation oder die Quasisimulation höhere Leistungen berechnet. Dies kommt einerseits vom Unterschied der Wochentage, aber vorallem von der stark vereinfachten Berechnung der externen Gewinne in der Quasisimulation.

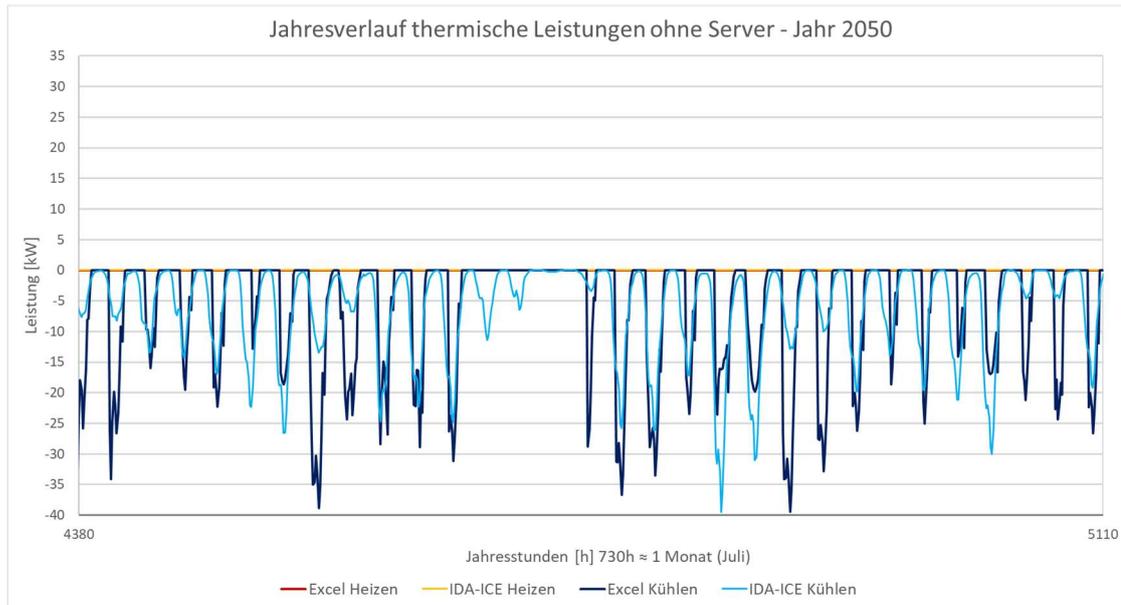


Diagramm 8: Kältelastprofil Juli - Szenario ohne Server

Tendenziell ist die IDA-ICE Simulation aber meist tiefer als die Quasisimulation, berechnet aber dennoch 1'400 kWh/a mehr Kühlenergie. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Regulierungen. Die Quasisimulation betrachtet mit einer Zonenregulierung immer das gesamte Gebäude, während die IDA-ICE Simulation mit einer Einzelraumregulierung jeden Raum separat regelt. Dadurch fängt die IDA-ICE Simulation schon viel früher an zu kühlen, da die Räume an der Südfassade zu überhitzen beginnen, während der Rest des Gebäudes noch kein Kühlbedarf hat. Dies kann in der Quasisimulation nicht berücksichtigt werden, da modellbedingt das gesamte Gebäude als eine Zone geregelt wird (siehe Kapitel 3.1).

Diese Einzelraumregulierung der IDA-ICE Simulation führt dazu, dass das Gebäude fast zeitgleich Heiz- und Kühlenergie benötigt. Betrachtet man das Lastprofil der Übergangszeit (Diagramm 7) sieht man, dass in der IDA-ICE Simulation ein direkter Wechsel vom Heizen ins Kühlen stattfindet. Dieser Einfluss der Einzelraumregulierung im IDA-ICE ist auch in der Betrachtung der Temperaturverläufe sichtbar.

#### 4.1.2.2 Temperaturverlauf ohne Server

Die Gebäudetemperatur der IDA-ICE Simulation in der Übergangszeit weist kaum einen Anstieg der Durchschnittstemperatur auf, das Lastprofil zeigt aber bereits einen Kühlenergiebedarf an. Bei gleichem Temperaturverlauf aktiviert die Quasisimulation die Kühlung noch nicht.

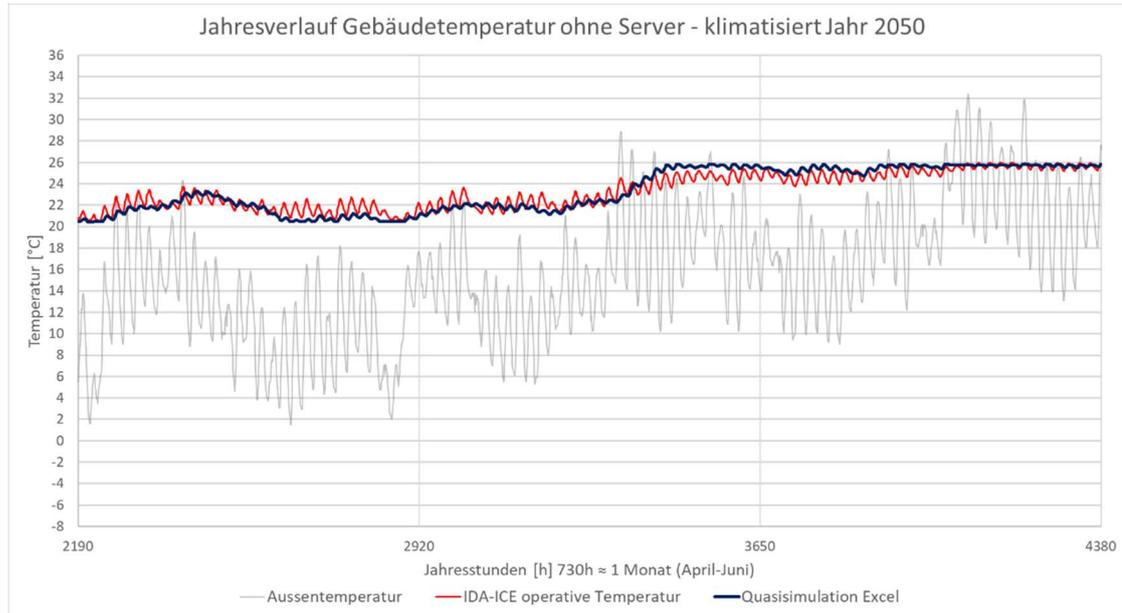


Diagramm 9: Gebäudetemperaturverlauf April bis Juni - Szenario ohne Server - klimatisiert

Obwohl die IDA-ICE Simulation früher in den Kühlfall wechselt, erreicht die Quasisimulation früher den definierten Sollwert der Gebäudetemperatur im Kühlfall. Diese Tendenz ist über das gesamte Jahr zu beobachten. Die Quasisimulation wechselt schneller zwischen den Sollwert-Temperaturen. Betrachtet man nur das Temperaturprofil der IDA-ICE Simulation, scheint sie langsamer zwischen Kühl- und Heizbetrieb zu wechseln. Effektiv ist sie aber durchgehend mit kleinen Leistungen am Heizen oder Kühlen.

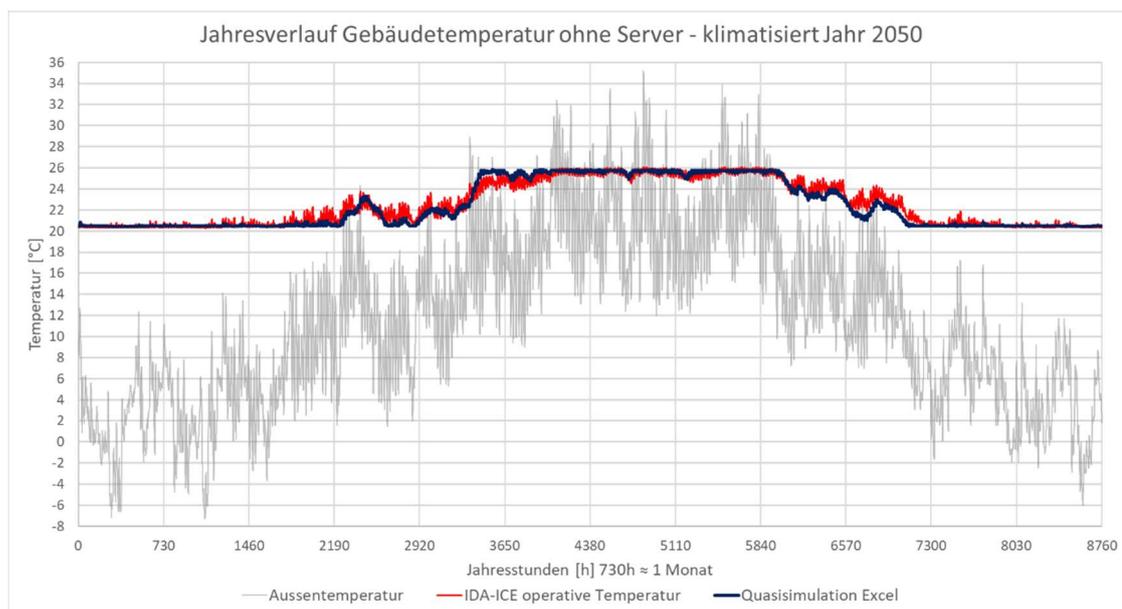


Diagramm 10: Jahrestemperaturverlauf - Szenario ohne Server - klimatisiert

Dieses Verhalten ist auch bei der Freilufttemperatur zu beobachten. In der Quasisimulation kühlt sich das Gebäude im Winter stärker ab und heizt sich im Sommer stärker auf. Interessanterweise hat das Gebäude im Frühling immer eine sehr ähnliche Temperatur wie die IDA-ICE Simulation, im Herbst kühlt es sich jedoch um einiges schneller ab und hat fast immer eine tiefere Temperatur als die dynamische Simulation.

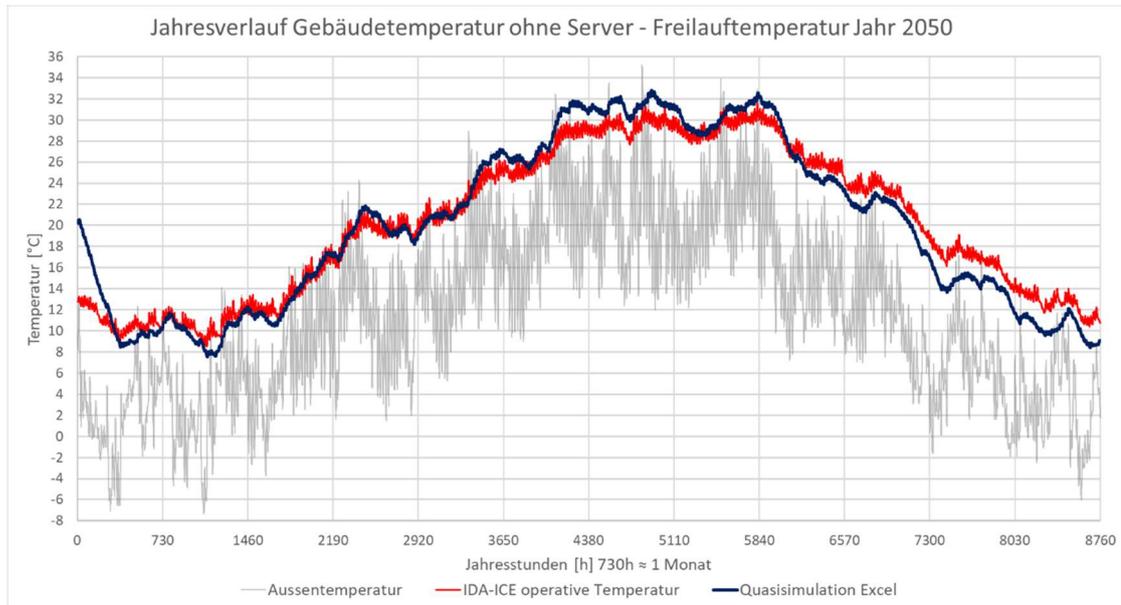


Diagramm 11: Freilufttemperatur - Szenario ohne Server

Die höhere Temperatur der Quasisimulation zum Jahresstart kommt von der Eingabe in der Berechnung, die keine Einschwingzeit einprogrammiert hat.

Die oberflächliche Analyse zeigt, dass die in der Quasisimulation verwendete Zeitkonstante zu tief ist, da das Gebäude über das gesamte Jahr betrachtet stärker schwingt. Wird jedoch der Temperaturverlauf in einem kleineren Zeitfenster betrachtet, scheint die Zeitkonstante zu gross zu sein, da sie weniger starke Tagesschwankungen aufweist als die operative Temperatur der IDA-ICE Simulation (siehe Diagramm 12).

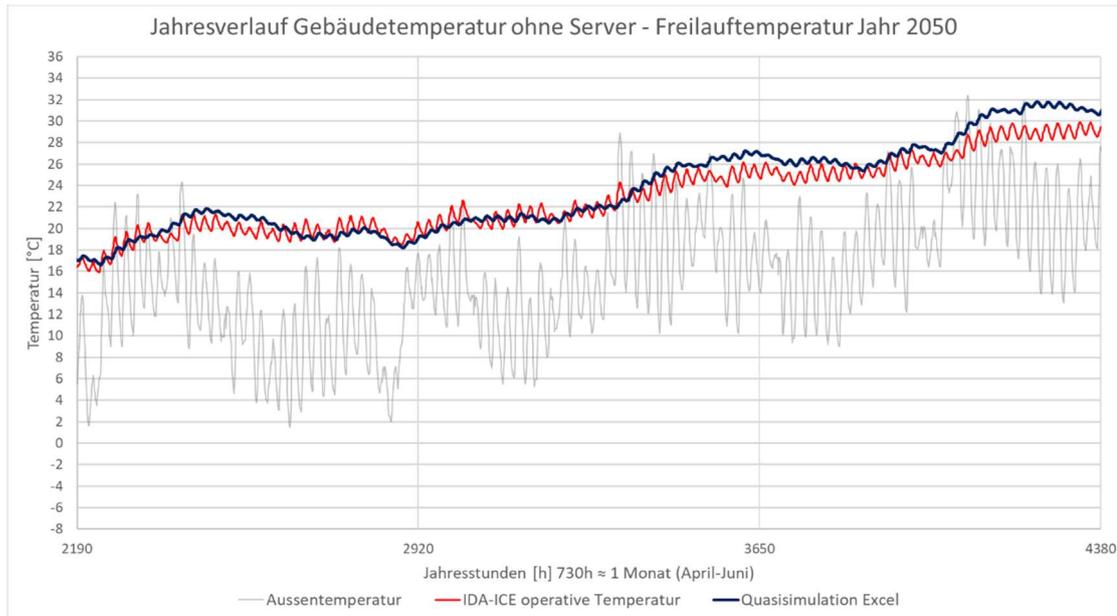


Diagramm 12: Freilufttemperatur April bis Juni - Szenario ohne Server

Die operative Temperatur der IDA-ICE Simulation schwingt um einiges stärker über den Tag als die Quasisimulation. Die Diagramme zeigen, dass die IDA-ICE Simulation tendenziell um die Quasisimulation schwingt, was ein gutes Indiz ist.

### 4.1.3 Einfluss der gewählten Zeitkonstante

Die Wahl der Zeitkonstante wird im Folgenden genauer untersucht. Wie im Kapitel 0 bereits erläutert, ist die Zeitkonstante einerseits zu hoch, um die Temperaturschwankung eines Tages korrekt abzubilden, andererseits zu tief, um den Jahresverlauf korrekt zu berechnen.

Die in den vorgängigen Diagrammen verwendete Zeitkonstante von 277 Stunden basiert auf einer Periodendauer von 48 Stunden. Sie soll mit 3 anderen Zeitkonstante verglichen werden. Dafür werden die Zeitkonstanten 50 h, 100 h und 560 h verwendet. Die Zeitkonstanten 50 & 100 Stunden charakterisieren einen Leichtbau. Die Zeitkonstante 560 Stunden ist die resultierende Zeitkonstante, wenn die gesamte verbaute Masse thermisch aktiviert werden kann und somit als Speichermasse funktionieren würde.

In einem ersten Schritt werden im Diagramm 13 die resultierenden Freilufttemperaturen mit den verschiedenen Zeitkonstanten verglichen.

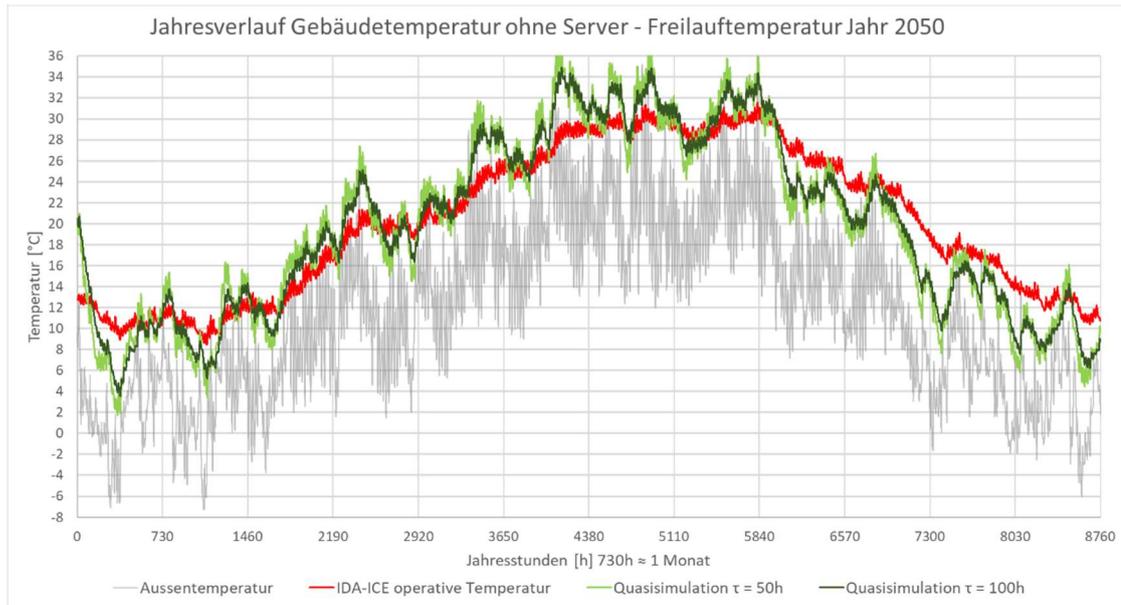


Diagramm 13: Freilufttemperatur verschiedener Zeitkonstanten in der Quasisimulation (50 h & 100 h)

Wie zu erwarten, schwanken tiefe Zeitkonstanten zu stark im Verlauf des Jahres. Man sieht klar, wie die Gebäudetemperatur stärker dem Verlauf der Aussentemperatur folgt. Die Zeitkonstante 277 Stunden weist nur zu starke Maximalwerte der Temperaturen auf, der Verlauf entspricht aber tendenziell der Freilufttemperatur der IDA-ICE Simulation.

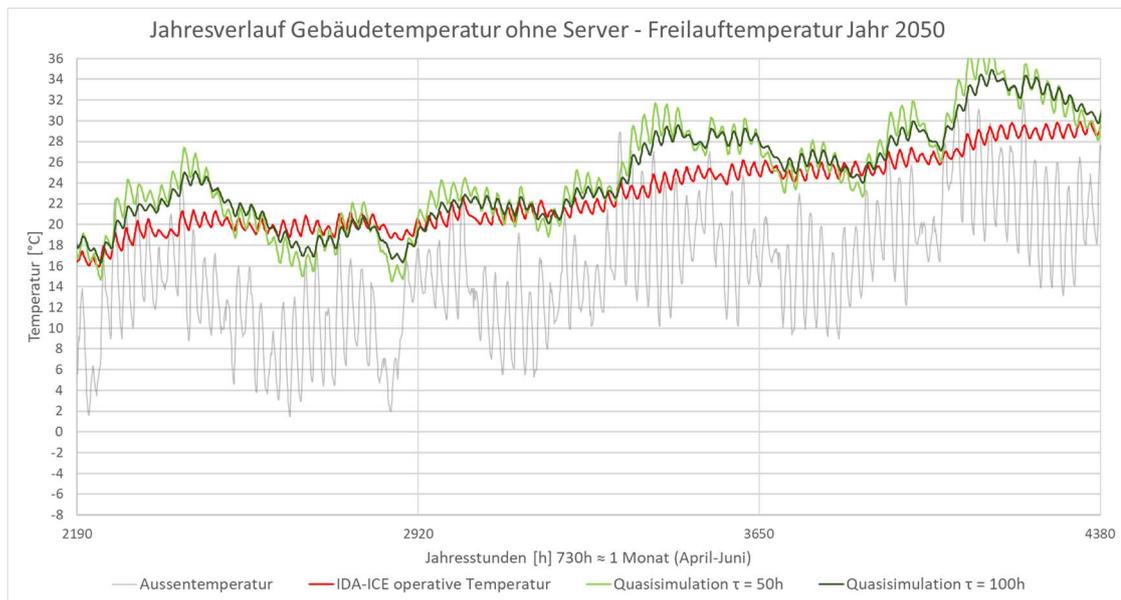


Diagramm 14: Freilufttemperatur April bis Juni verschiedener Zeitkonstanten in der Quasisimulation (50 h & 100 h)

Mit einer tieferen Zeitkonstante sollen vor allem die Tagesschwankungen besser berechnet werden. Diese stimmen in ihrer Ausprägung besser mit der IDA-ICE Simulation überein als die Freilufttemperatur mit einer Zeitkonstante von 277 Stunden. Der Ganzjahresverlauf ist jedoch um einiges ungenauer als bei grösseren Zeitkonstanten., welche den Ganzjahresverlauf besser berechnen.

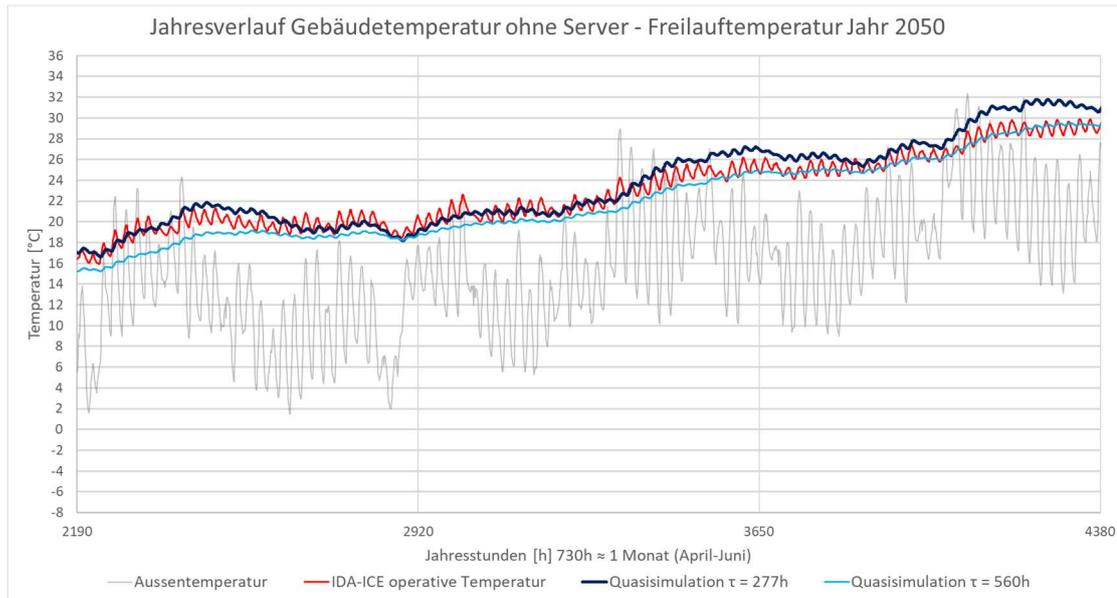


Diagramm 15: Freilufttemperatur April bis Juni verschiedener Zeitkonstante in der Quasisimulation (277 h & 560 h)

In der Übergangszeit ist ersichtlich, dass der Verlauf bei höheren Zeitkonstanten um einiges besser mit der IDA-ICE Simulation übereinstimmt. Die Tagesschwankungen sind aber wie erwartet weniger ausgeprägt. Im Diagramm 16 ist zeigt sich, dass der Gesamtjahresverlauf besser mit dem Verlauf der IDA-ICE Simulation übereinstimmt.

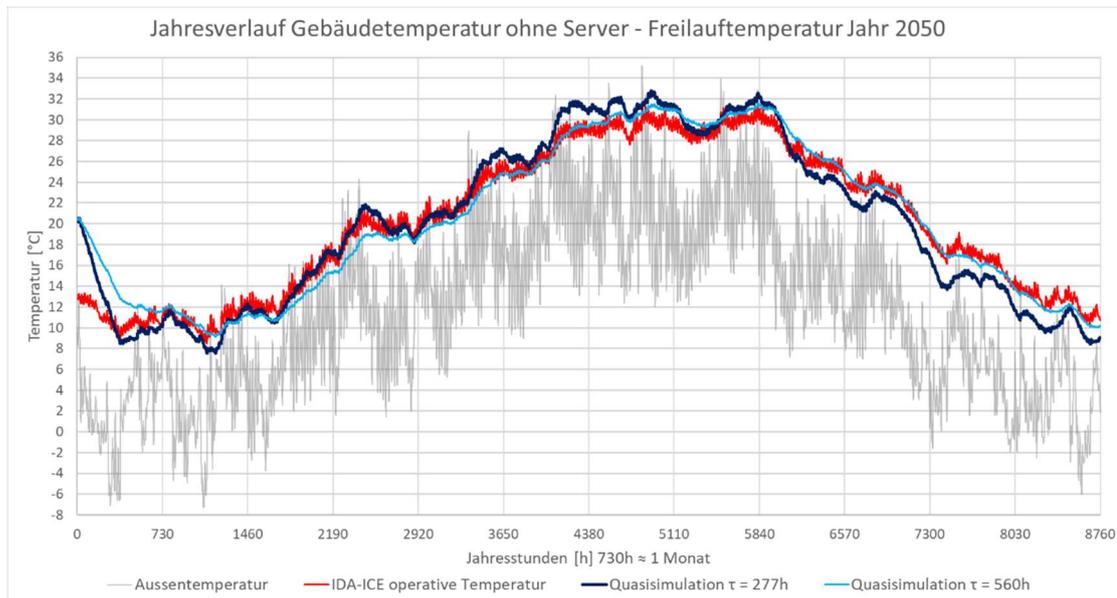


Diagramm 16: Freilufttemperatur verschiedener Zeitkonstanten in der Quasisimulation (277 h & 560 h)

Die Betrachtung der Freilufttemperatur über das gesamte Jahr zeigt, dass bei der Berücksichtigung der gesamten Masse des Gebäudes, mit einer resultierenden Zeitkonstante von 560 h, der Temperaturverlauf des Gebäudes viel besser mit der IDA-ICE Simulation übereinstimmt. Grund dafür ist, dass bei Tagesschwankungen auf Grund der kürzeren Periodendauer (siehe Formel 7,

S.23) die speicherwirksame Dicke stark abnimmt. Langsame Temperaturschwankungen mit einer grossen Periodendauer durchdringen auch grössere Materialdicken, weshalb für die korrekte Berechnung des Jahrestemperaturverlaufs die gesamte Masse berücksichtigt werden sollte.

Wie die Auswertung der Jahresenergien aber aufzeigt, ist eine höhere Zeitkonstante nicht für jede Jahresbetrachtung sinnvoll. In den folgenden Tabellen werden, die auf Grund von unterschiedlichen Zeitkonstanten berechneten Jahresenergien verglichen. In der Tabelle 7 werden die absoluten Werte und in der Tabelle 8 die Werte pro m<sup>2</sup> EBF verglichen.

Tabelle 7: Vergleich absolute Werte bei verschiedenen Zeitkonstanten  $\tau$  in der Quasisimulation – Szenario ohne Server

Wert	IDA-ICE	$\tau = 50\text{h}$	$\tau = 100\text{h}$	$\tau = 277\text{h}$	$\tau = 560\text{h}$
Heizenergie	36'419 kWh	38'154 kWh + 4.76%	37'540 kWh + 3.08%	36'814 kWh + 1.08%	36'139 kWh - 0.77%
max. Heizlast	25.4 kW	23.0 kW - 9.50%	23.0 kW - 9.3%	23.0 kW - 9.15%	23.1 kW - 9.11%
Kühlenergie Raum	13'574 kWh	13'525 kWh - 0.36%	12'866 kWh - 5.21%	12'146 kWh - 10.52%	11'405 kWh - 15.98%
max. Kühllast	40.3 kW	39.1 kW - 3.06%	39.3 kW - 2.51%	39.4 kW - 2.3%	39.4 kW - 2.27%

Tabelle 8: Vergleich Werte pro m<sup>2</sup> EBF bei verschiedenen Zeitkonstanten in der Quasisimulation – Szenario ohne Server

Wert	IDA-ICE	$\tau = 50\text{h}$	$\tau = 100\text{h}$	$\tau = 277\text{h}$	$\tau = 560\text{h}$
Heizenergie	25.9 kWh	28.6 kWh + 10.26%	28.1 kWh + 8.48%	27.6 kWh + 6.39%	27.1 kWh + 4.44%
max. Heizlast	18.1 W	17.2 W - 4.76%	17.2 W - 4.55%	17.3 W - 4.39%	17.3 W - 4.35%
Kühlenergie Raum	9.7 kWh	10.1 kWh + 4.86%	9.6 kWh - 0.24%	9.1 kWh - 5.83%	8.5 kWh - 11.57%
max. Kühllast	28.7 W	29.3 W + 2.02%	29.5 W + 2.60%	29.5 W + 2.82%	29.5 W + 2.85%

Da die Energiebezugsflächen der zwei Berechnungen nicht ganz übereinstimmen, werden vor allem die Werte pro Quadratmeter EBF der Tabelle 8 untersucht, siehe Diagramm 17.

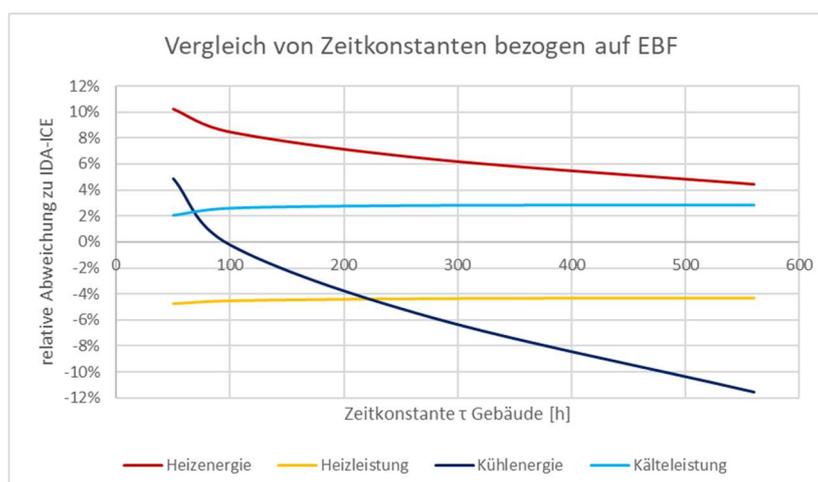


Diagramm 17: relative Abweichungen von Energien und Leistungen bei verschiedenen Zeitkonstanten in der Quasisimulation.

Der Vergleich zeigt:

- Mit steigender Zeitkonstante wird die berechnete Heizenergie genauer und die Kühlenergie wird ungenauer.
- Mit sinkender Zeitkonstante wird die berechnete Heizenergie ungenauer, die Kühlenergie wird zuerst genauer, anschliessend aber wieder ungenauer.
- Die Zeitkonstante hat in der Quasisimulation vor allem einen Einfluss auf thermische Nutzenergien. Die Spitzenlasten ändern kaum. Grund dafür ist, dass die Leistung jeder Stunde über das momentane Leistungsverhältnis berechnet wird. Dieses wird mit der Zeitkonstante kaum verändert.

Es zeigt sich, dass eine etwas tiefere Zeitkonstante, aber auch eine grössere Zeitkonstante ihre Vorteile haben. Die Zeitkonstante sollte also abhängig von den gewünschten Erkenntnissen aus der Quasisimulation gewählt werden. Liegt der Fokus auf dem Jahrestemperaturverlauf, sollte die gesamte Masse des Gebäudes berücksichtigt werden. Liegt der Fokus auf genaueren Jahresenergien, sollte eine tiefere Zeitkonstante gewählt werden. Ein guter Mittelwert ist eine Zeitkonstante basierend auf einer Periodendauer von 24 - 48 Stunden. Im untersuchten Projekt resultieren dadurch Zeitkonstanten zwischen 212 und 277 Stunden. Diese Zeitkonstanten ergeben gleichmässige Abweichungen für die thermischen Nutzenergien und gleichzeitig stimmt der Jahrestemperaturverlauf des Gebäudes gut mit der IDA-ICE Simulation überein.

## 4.2 Szenario SIA 2028

In diesem Szenario werden die Simulationen mit den Daten für ein Standardjahr des SIA MB 2028.2010 durchgeführt. Damit wird überprüft, inwiefern die Quasisimulation für vergangene Jahre korrekte Ergebnisse berechnet. Auch für diesen Vergleich werden die berechneten Jahresenergien und die Temperaturverläufe der beiden Berechnungsmethoden untersucht.

Hier ist anzumerken, dass nach einem ersten Vergleich festgestellt werden musste, dass die Kühlenergie und Kälteleistung viel zu hoch sind, wenn die externen Lasten gemäss der 3. Variante (Kapitel 0) berechnet werden. Aus diesem Grund wird in diesem Szenario mit der 1. Variante für die Berechnung der externen Lasten gerechnet.

Somit ist die 3. Variante zur Berechnung der externen Lasten vor allem für die Betrachtung von Zukunftsjahren zu verwenden. So kann auch eine Quasisimulation, basierend auf den aktuellen Zielwerten des SIA MB 2024.2021 für die externen Lasten, die Klimaerwärmung berücksichtigen. Es ist aber auch festzuhalten, dass die Standardjahre der SIA 2028.2010 auf den Jahren 1984 – 2003 basieren und somit veraltet sind, während das SIA MB 2024 mit den darin aufgeführten Kennwerten für das Jahr 2021 neu veröffentlicht wurden. Das SIA MB 2024.2021 verwendet Zahlen des aktuellen SIA MB 2028.2010, in welchem Umfang auf die Entwicklung der Klimaerwärmung reagiert wurde ist jedoch nicht bekannt. Bei Veröffentlichung des neuen SIA MB 2028 sollte der hier untersuchte Vergleich deshalb neu durchgeführt werden.

Um dennoch die Auswirkungen der Klimaerwärmung zu untersuchen, wird im Kapitel 4.2.3 ein Vergleich zwischen den IDA-ICE Simulationen vorgenommen.

## 4.2.1 Energie und Spitzenlasten SIA 2028

In einem ersten Schritt werden die Jahresenergien und thermischen Spitzenlasten verglichen. Dafür werden die absoluten Zahlen in der Tabelle 9, wie auch die Energiekennzahlen pro m<sup>2</sup> in der Tabelle 10 betrachtet.

Tabelle 9: Vergleich absolute Werte – Szenario SIA 2028

Wert	IDA-ICE	Quasisimulation	Abweichung
Heizenergie	49'650 kWh	44'857 kWh	-9.65%
Kühlenergie Raum	4'658 kWh	4'929 kWh	5.81%
max. Heizlast	29.1 kW	27.8 kW	-4.52%
max. Kühllast	27.6 kW	35.1 kW	26.94%
Energie Geräte	20'658 kWh	21'531 kWh	4.23%
Energie Beleuchtung	9'424 kWh	8'629 kWh	-8.44%
Energie Elektro total	30'082 kWh	30'160 kWh	0.26%

Auch hier stimmen hier die berechneten Energien und Leistungen ziemlich gut überein. Einziger Ausreisser ist die Spitzenkühlleistung, welche 27% zu hoch ist. Analysiert man die Werte bezogen auf die EBF zeigt sich, dass die Kühlenergie, statt wie im 1. Szenario 11% zu tief, im Szenario 2028 11% zu hoch ist

Tabelle 10: Vergleich Werte pro m<sup>2</sup> EBF – Szenario SIA 2028

Wert	IDA-ICE	Quasisimulation	Abweichung
Heizenergie	35.3 kWh/m <sup>2</sup>	33.6 kWh/m <sup>2</sup>	-4.89%
Kühlenergie Raum	3.3 kWh/m <sup>2</sup>	3.7 kWh/m <sup>2</sup>	11.39%
max. Heizlast	20.7 W/m <sup>2</sup>	20.8 W/m <sup>2</sup>	0.51%
max. Kühllast	19.7 W/m <sup>2</sup>	26.3 W/m <sup>2</sup>	33.63%
Energie Geräte	14.7 kWh/m <sup>2</sup>	16.1 kWh/m <sup>2</sup>	9.72%
Energie Beleuchtung	6.7 kWh/m <sup>2</sup>	6.5 kWh/m <sup>2</sup>	-3.61%
Energie Elektro total	21.4 kWh/m <sup>2</sup>	22.6 kWh/m <sup>2</sup>	5.54%

Grund für die zu hohe Kühlenergie und vorallem die viel zu hohe Spitzenkühlleistung ist die Berechnungsweise der externen Gewinne. Deren Maximalwert entspricht, unabhängig vom Klimadatensatz, dem in der Mappe «externe Lasten» berechneten Wert. Dieser basiert auf den Nutzungsflächen des Gebäudes und den entsprechenden Zielwerten des SIA MB 2024.2021. Bei maximaler Globalstrahlung im verwendeten Klimadatensatz tritt regulierungsbedingt auch die maximale Externe Last auf (siehe Excelformel 3, S.39).

Hier würde sich die Berechnung der externen Lasten über die effektiven solaren Gewinne lohnen. Da im Datensatz des SIA MB 2028.2010 jedoch keine Direktnormalstrahlungswerte vermerkt sind, konnte dieser Vergleich im Umfang dieser Arbeit nicht gemacht werden.

## 4.2.2 Jahresprofile SIA 2028

Die Abweichungen der Spitzenkühlleistung wird auch im Jahreslastprofil des Gebäudes klar sichtbar.

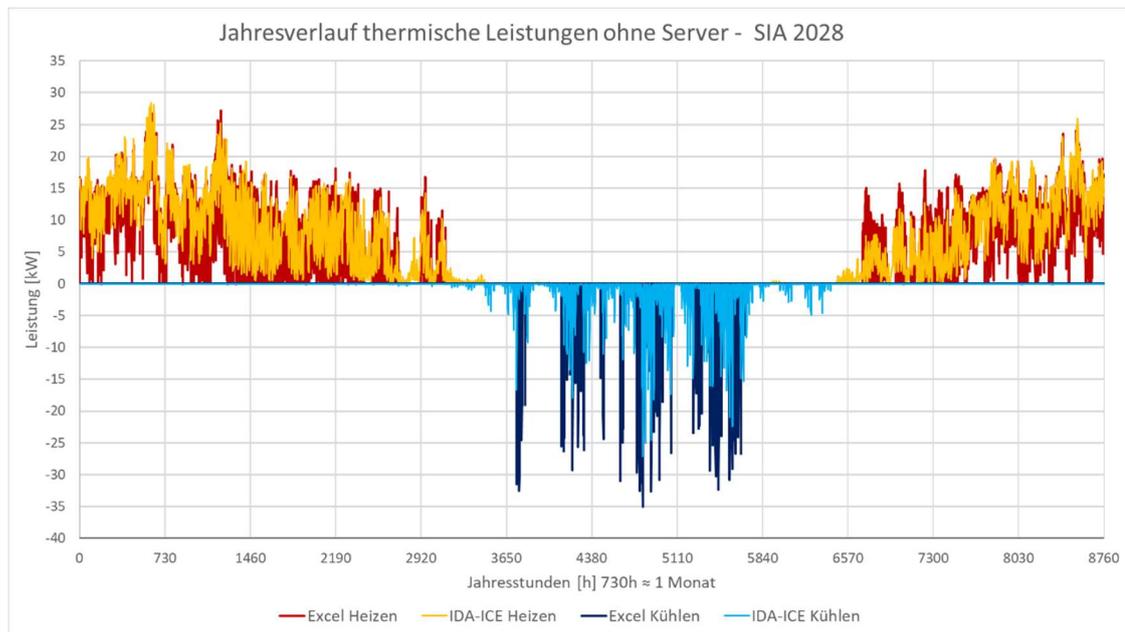


Diagramm 18: thermisches Jahreslastprofil - Szenario SIA 2028

In diesem Szenario ist vorallem die Abweichung der Kältelasten zu erkennen. Die Quasisimulation gibt meist höhere Leistungen aus. Auf Grund der Einzelraumregulierung in der IDA-ICE Simulation wird die Kälteenergie jedoch gleichmässiger über das Jahr verteilt. Bei einer Betrachtung eines Sommermonats zeigt sich, dass die IDA-ICE Simulation fast jeden Tag Kühlenergie benötigt, während die Quasisimulation mehrere Tage kein Kältebedarf hat.

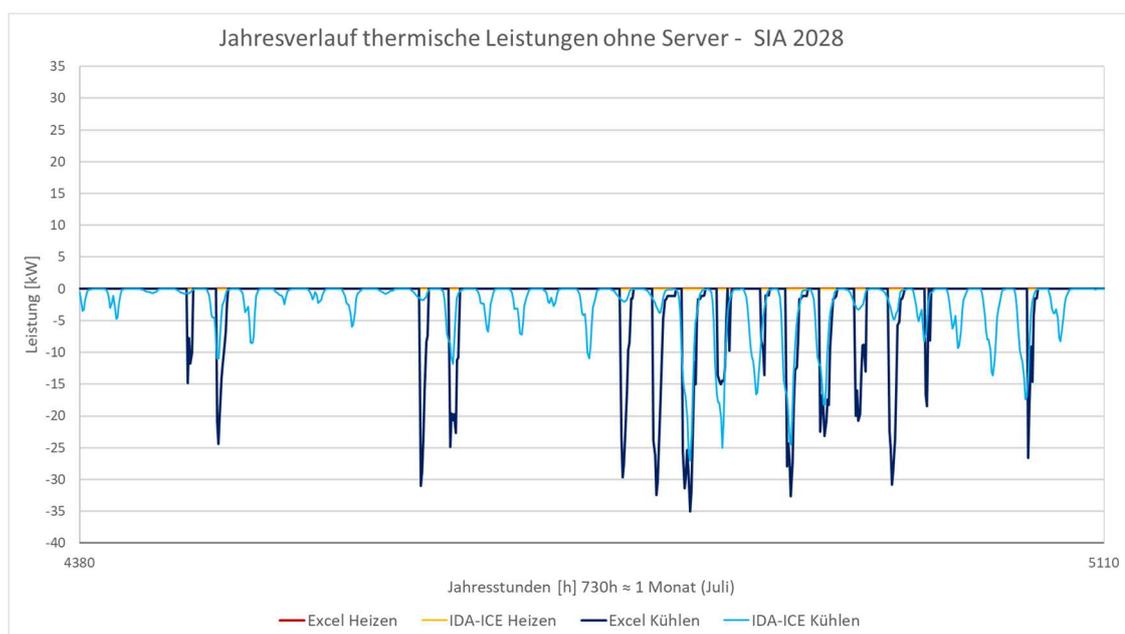


Diagramm 19: Kältelastprofil Juli – Szenario SIA 2028

Auch im Diagramm 19 fällt wieder die Tagesverschiebung der Simulationen auf. Die Quasisimulation beginnt an einem Montag, während die IDA-ICE Simulation an einem Donnerstag startet. Die Quasisimulation ist somit drei Tage voraus. Dies begründet die starken Unterschiede bei den Lastspitzen der Quasisimulation in der Mitte des Monats. Während in der Quasisimulation Montag ist und gekühlt werden muss, ist in der IDA-ICE Simulation Samstag und es fällt kaum Abwärme im Gebäude an.

Beim Vergleich der Gebäudetemperaturen können kaum neue Erkenntnisse gewonnen werden. Die Quasisimulation berechnet für die Freilufttemperatur im Sommer ebenfalls höhere Gebäudetemperaturen, die Unterschiede sind jedoch nicht so markant, da sich das Gebäude regelmäßiger abkühlen kann als im 1. Szenario (Diagramm 11, S.60) mit einem Datensatz für das Jahr 2050.

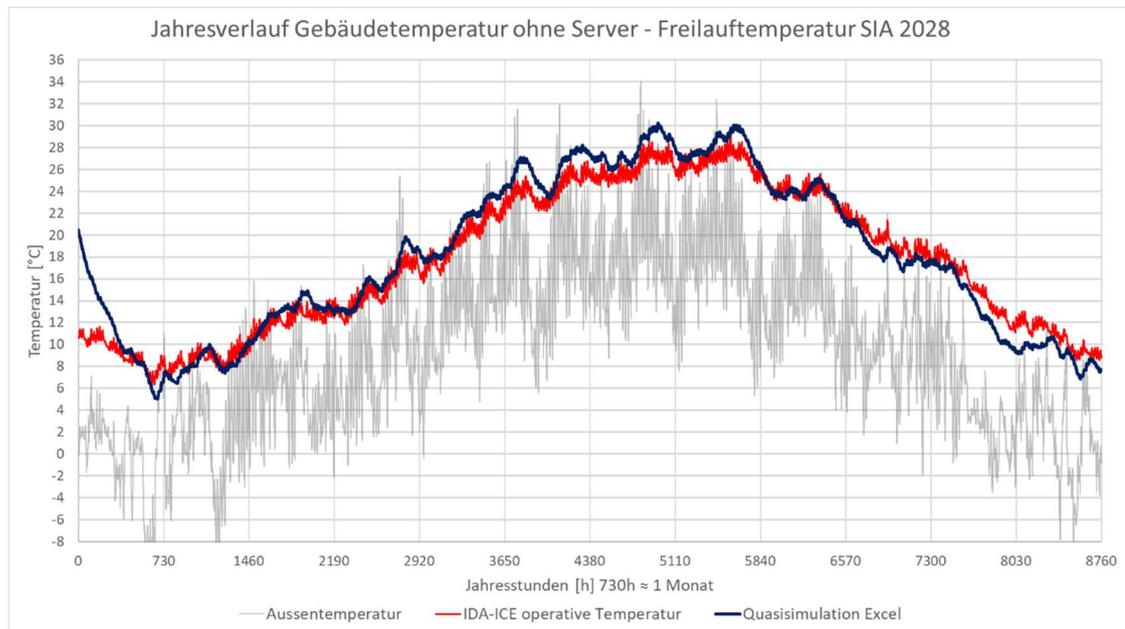


Diagramm 20: Freilufttemperatur - Szenario SIA 2028

Auch der klimatisierte Gebäudetemperaturverlauf im Diagramm 21 zeigt kein unterschiedliches Verhalten der Quasisimulation zum ersten Szenario (Diagramm 10, S.59). Betrachtet man die Gebäudetemperatur scheint die Quasisimulation weniger lang in der Übergangszeit zu sein als die IDA-ICE Simulation.

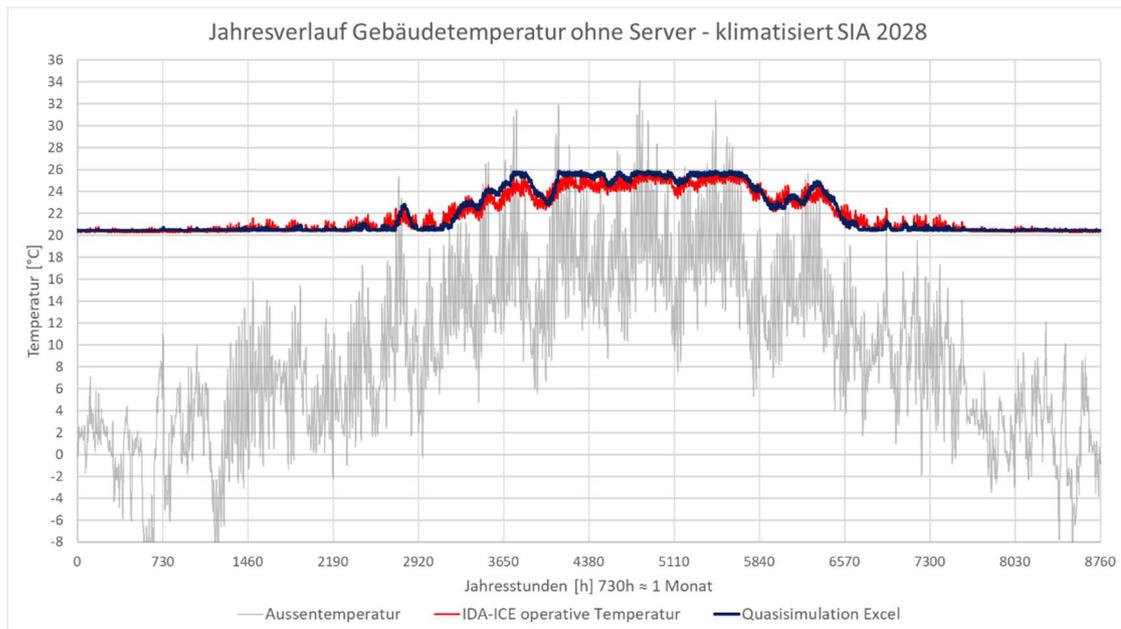


Diagramm 21: Gebäudetemperaturverlauf - Szenario SIA 2028 klimatisiert

Wie bereits erläutert, ist das Gebäude in der IDA-ICE Simulation aber immer entweder im Kühl- oder Heizbetrieb, dies verzögert die Verschiebung der Gebäudetemperatur vom Heiz-Sollwert zum Kühl-Sollwert und umgekehrt. Bei der Abkühlung des Gebäudes werden beispielsweise die ersten Räume bereits wieder beheizt, was der Abkühlung des gesamten Gebäudes entgegenwirkt.

### 4.2.3 Auswirkung der Klimaerwärmung

Um die Auswirkung der Klimaerwärmung darzustellen, werden zwei IDA-ICE Simulationen mit den unterschiedlichen Klimadatensätzen verglichen. Einerseits werden wieder die Nutzenergien und -leistungen verglichen, andererseits werden auch die Jahresprofile und Gebäudetemperaturverläufe betrachtet.

Tabelle 11: Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Jahresenergien & -leistungen

Wert	Standardjahr SIA 2028	Meteonorm Jahr 2050	Veränderung durch Klimaerwärmung
Heizenergie	49'650 kWh	36'419 kWh	- 26.65%
Kühlenergie Raum	4'658 kWh	13'574 kWh	+ 191.39%
max. Heizlast	29.1 kW	25.4 kW	- 12.88%
max. Kühllast	27.6 kW	40.3 kW	+ 46.05%
Energie Geräte	20'658 kWh	20'502 kWh	- 0.76%
Energie Beleuchtung	9'424 kWh	9'020 kWh	- 4.29%
Energie Elektro total	30'082 kWh	29'522 kWh	- 1.86%

Es ist klar erkennbar, dass der Kühlenergiebedarf des Gebäudes im Jahr 2050 fast dreimal so gross ist, wie in der Simulation mit dem Standardjahr des SIA MB 2028.2010. Auch die Spitzenkälteleistung fällt fast 1.5-mal grösser aus. Für die Heizungswerte sind die Auswirkungen

weniger markant. Die Änderungen der Energie durch die Geräte kommt wiederum vom Tagesstart der Simulationen. Die Simulation im Jahr 2050 startet an einem Samstag, die Simulation mit dem Standardjahr des SIA MB 2028.2010 (Jahr 2004) startet an einem Donnerstag. Zusätzlich war das Jahr 2004 ein Schaltjahr, was zu einem höheren Elektroverbrauch führt. Die Beleuchtung ist etwas tiefer im Jahr 2050. Dies kommt vermutlich von einer Zunahme der Globalstrahlung im Jahr 2050.

Die Veränderung der thermischen Energie lässt sich auch bei einem Vergleich der thermischen Lastprofile erkennen. Zur Visualisierung wurde der tiefere Energieverbrauch jeweils in den Vordergrund genommen.

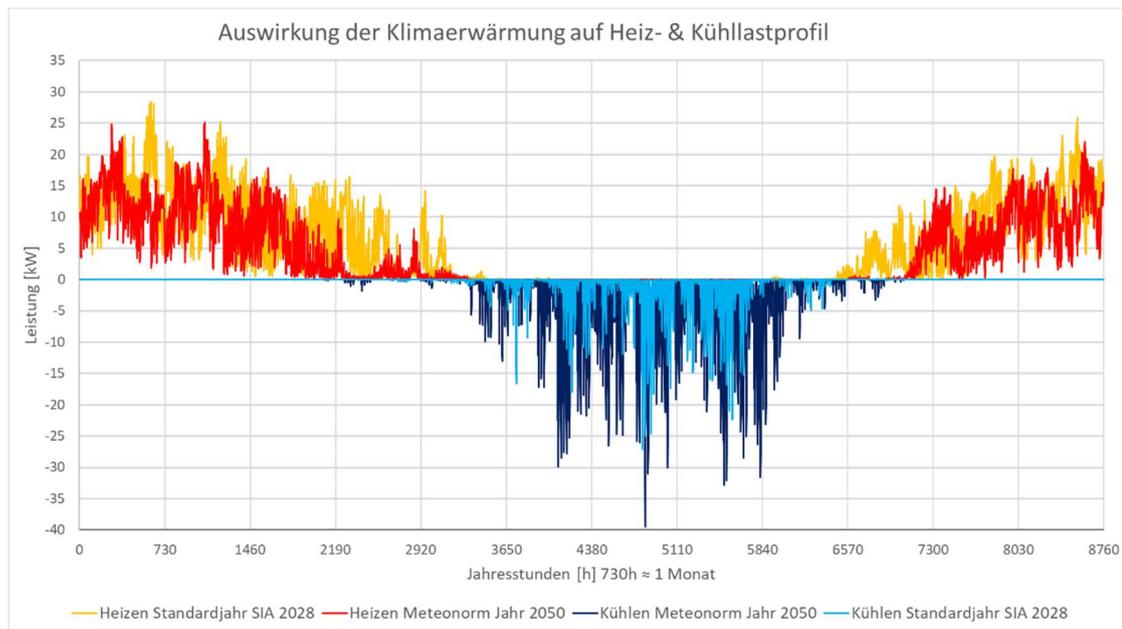


Diagramm 22: Auswirkung der Klimaerwärmung auf das thermische Lastprofil

Das Gebäude ist im Jahr 2050 weniger lang im Heizbetrieb und kommt früher in den Kühlfall als bei der Simulation mit dem Standardjahr des SIA MB 2028.2010. Im Herbst verschiebt sich die Übergangsphase vom Kühlfall in den Heizfall fast um einen Monat. Diese Veränderung ist auch in den Temperaturprofilen der klimatisierten Gebäude zu erkennen, siehe Diagramm 23.

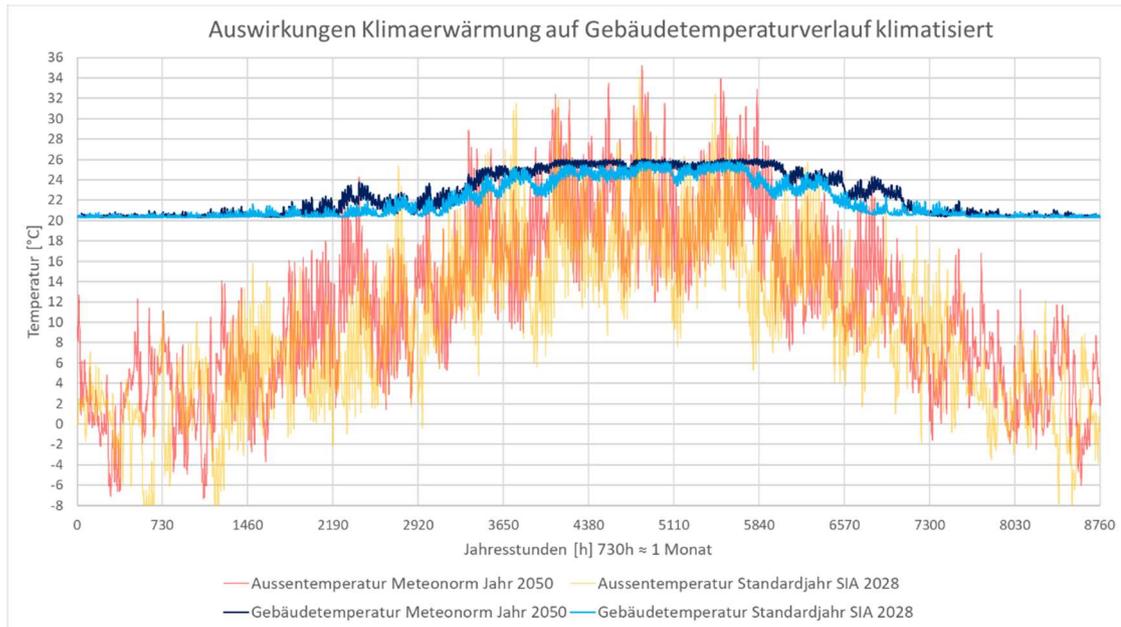


Diagramm 23: Auswirkung der Klimaerwärmung auf den klimatisierten Gebäudetemperaturverlauf

Es zeigt sich, dass das Gebäude in Zukunft früher im Jahr aufheizen wird und später beginnen wird wieder abzukühlen. Ebenfalls im Diagramm erkennbar ist die höhere Aussentemperatur im Jahr 2050. Die höheren externen Gewinne und tieferen Wärmeverluste auf Grund der höheren Aussentemperatur zeigen sich auch bei einer Betrachtung der Freilufttemperaturen.

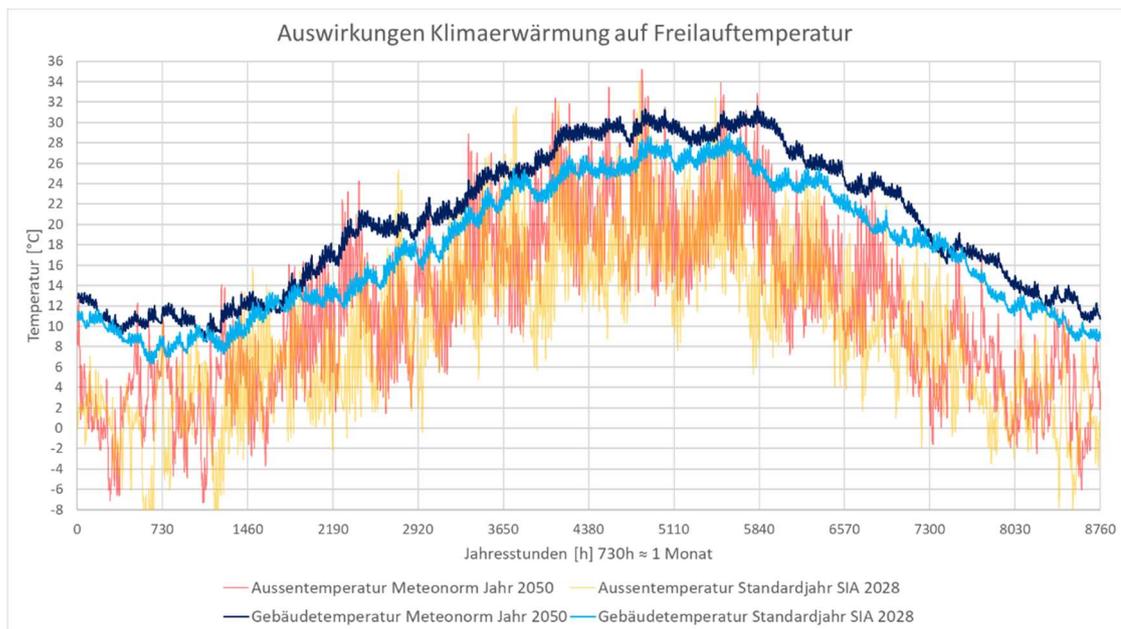


Diagramm 24: Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Freilufttemperatur

Die Gebäude weisen in beiden Simulationen einen ähnlichen Verlauf der Freilufttemperatur auf. Die Freilufttemperatur im Jahr 2050 ist jedoch meist 4 Kelvin höher als die Freilufttemperatur der Simulation mit dem Standardjahr des SIA MB 2028.2010.

Die Jahresenergien, die Spitzenleistungen und auch die Jahresprofile zeigen auf, dass in Zukunft ein höherer Kühlbedarf vorhanden sein wird. Da das SIA MB 2028.2010 auf Jahren basiert, die

20 Jahre in der Vergangenheit liegen, ist klar, dass für eine zukunftsorientierte Planung mindestens mit aktuelleren Datensätzen gerechnet werden sollte. Um ein auch in der Zukunft funktionierendes Gebäude zu planen, sollte das Gebäude auch in einem Zukunftsjahr untersucht werden.

## 4.3 Szenario mit Server

In diesem Szenario wird der Einfluss des Serverraumes auf das restliche Gebäude untersucht. Der grösste Einfluss entsteht durch die Wärmeübertragung vom Serverraum in die angrenzenden Räume, da der Serverraum immer eine höhere Temperatur aufweist.

In einem ersten Schritt wird der Einfluss des Servers anhand der zwei IDA-ICE Simulationen untersucht. Im Kapitel 4.3.2 wird die entsprechende Quasisimulation mit der IDA-ICE Simulation verglichen.

### 4.3.1 Einfluss des Servers

Um den thermischen Einfluss auf das restliche Gebäude zu untersuchen, werden die thermischen Nutzenergien und -leistungen untersucht. Der elektrische Verbrauch der Beleuchtung und der Geräte im Rest des Gebäudes müssen nicht verglichen werden, da diese nicht von der Abwärme des Servers beeinflusst werden.

*Tabelle 12: Einfluss des Servers auf thermische Nutzenergien und -leistungen*

Wert	Ohne Server	Mit Server	Einfluss Server
Heizenergie	36'419 kWh	29'173 kWh	- 19.90%
Kühlenergie Raum	13'574 kWh	15'608 kWh	+ 14.99%
max. Heizlast	25.4 kW	23.7 kW	- 6.58%
max. Kühllast Raum	40.3 kW	41.1 kW	+ 1.81%

Es zeigt sich, dass auf Grund der Wärmetransmission vom Serverraum zu den angrenzenden Räumen die benötigte Heizenergie im restlichen Gebäude um 20% sinkt. Die Kühlenergie steigt um 15%. Die Spitzenheizlast sinkt um 1.7 kW (7%) und die Spitzenkühllast steigt um 0.8 kW (2%). Der Heizfall ist stärker vom Serverraum beeinflusst, da in dieser Zeit der Temperaturunterschied zwischen den angrenzenden Räumen und dem Serverraum 6 Kelvin beträgt. Im Kühlfall beträgt der Temperaturunterschied nur 1-3 Kelvin. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Freilauftemperaturen im Diagramm 25.

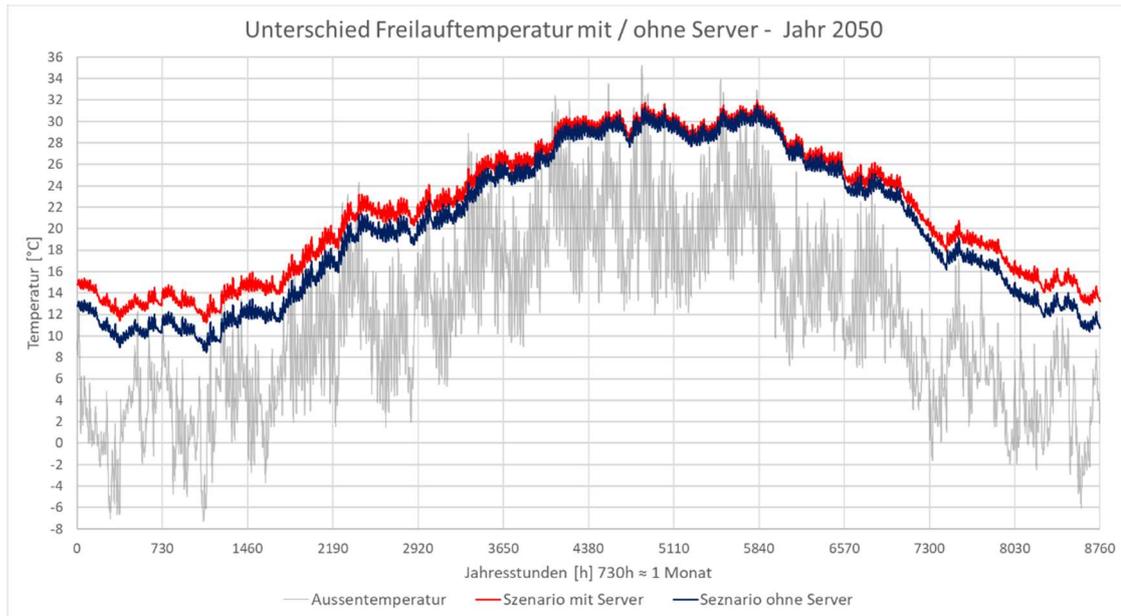


Diagramm 25: Vergleich Freilauftemperatur mit / ohne Server

Es ist ersichtlich, dass durch die hohe interne Last des Servers die Gebäudetemperatur im Winter ca. 2.5 Kelvin höher ist, während im Sommer der Unterschied bei ca. 0.5 Kelvin liegt. Diese Verschiebung ist auch durch die hohe Temperatur im Serverraum angetrieben. Diese ist in der Mitteltemperatur des Gebäudes ebenfalls berücksichtigt. Die erhöhte Temperatur des Servers hat im Winter den grösseren Einfluss auf das geometrische Mittel. Betrachtet man aber den klimatisierten Temperaturverlauf des Gebäudes im Diagramm 26, zeigt sich, dass dies keine Differenz von 2.5 Kelvin ausmacht.

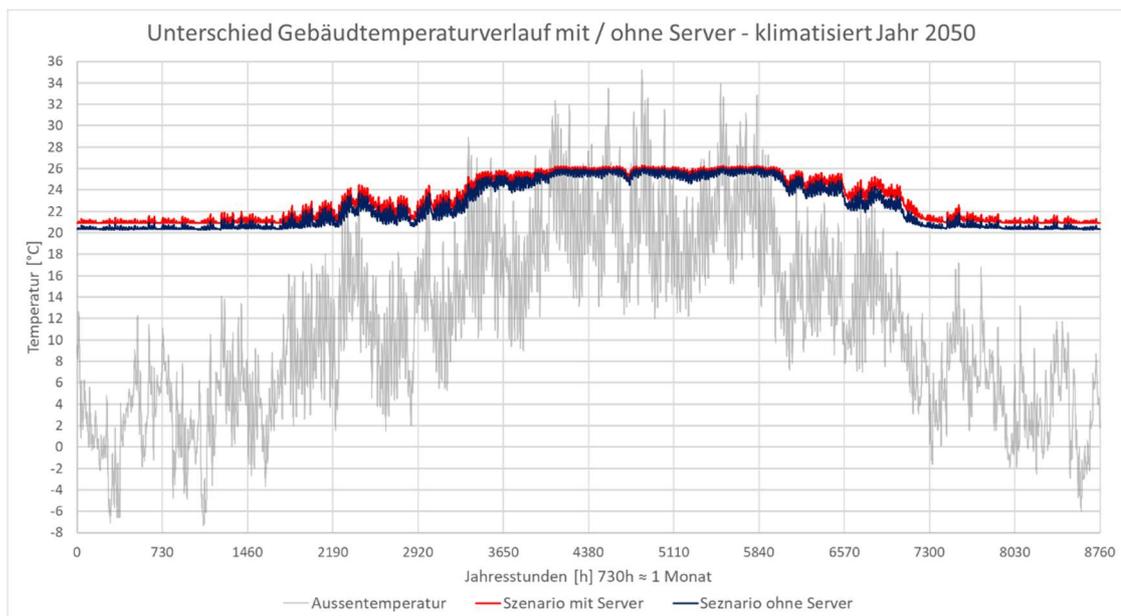


Diagramm 26: Vergleich klimatisierter Gebäudetemperaturverlauf mit / ohne Server

Im geometrischen Mittel hebt die höhere Temperatur im Serverraum die mittlere Gebäudetemperatur von ca. 20.5°C auf ca. 21°C, also nur eine Differenz von 0.5 Kelvin. Zum Vergleich: wenn im Diagramm 25 die Freilufttemperatur der Variante ohne die interne Last des Servers 20°C beträgt, ist die Temperatur bei der Variante mit Server bereits auf einer Temperatur von 22°C.

Dass im Winter mehr Wärme an das Gebäude abgegeben wird als im Sommer, ist beim Vergleich der Jahreslastprofile im Diagramm 27 ebenfalls ersichtlich.

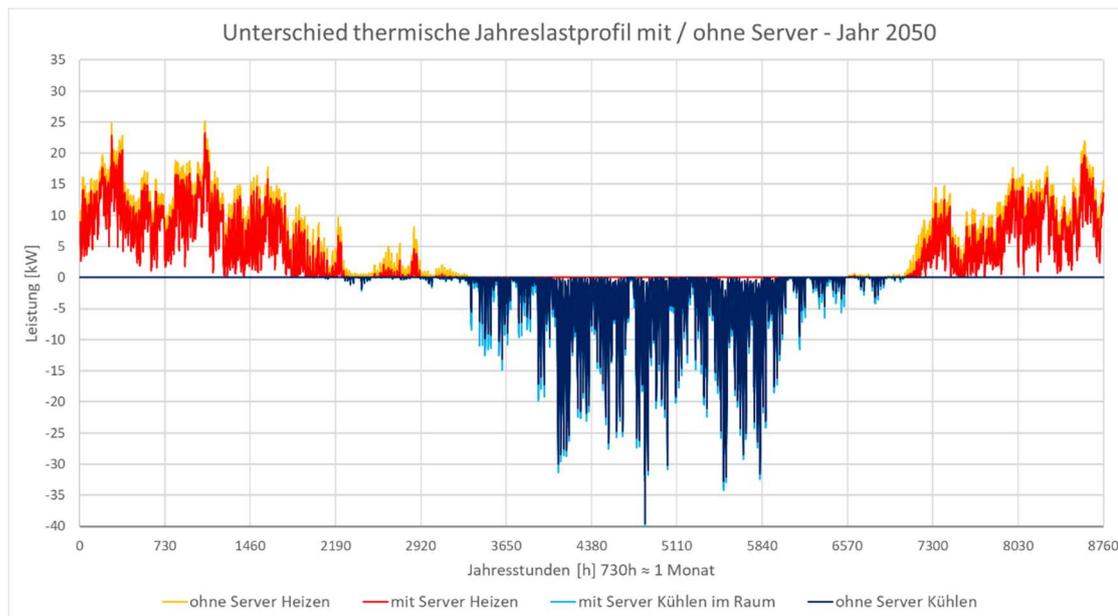


Diagramm 27: Vergleich thermischer Jahreslastprofile mit / ohne Server

Im Heizfall ist die Heizleistung der Variante ohne die Abwärme des Servers durchgehend ca. 1.7 kW höher. Im Kühlfall hat die Variante ohne Server durchgehend eine 0.8 kW tiefere Kühlleistung in den Räumen. Das Diagramm 27 zeigt auf, dass die Gebäude ziemlich gleichzeitig vom Heizfall in den Kühlfall wechseln. Dies kommt von der Einzelraumregulierung. Die Räume im Südteil überhitzen unabhängig der Abwärme des Servers gleichzeitig und mit dem gleichen Kältebedarf. Somit beeinflusst die Wärme des Serverraumes vor allem den Nordteil.

### 4.3.2 Vergleich Quasisimulation mit Server

In diesem Kapitel soll überprüft werden, wie gut die Quasisimulation auf einen Spezialfall eines Projektes reagieren kann. Dafür wird die Quasisimulation, in welcher der thermische Einfluss des Servers berücksichtigt wird, mit der entsprechenden IDA-ICE Simulation verglichen. Wiederum werden Jahresenergien und thermische Spitzenlasten rechnerisch und graphisch verglichen.

Tabelle 13: Vergleich absolute Werte - Szenario mit Server

Wert	IDA-ICE	Quasisimulation	Abweichung
Heizenergie	29'173 kWh	31'628 kWh	8.41%
Kühlenergie Server	203'778 kWh	206'649 kWh	1.41%
Kühlenergie Raum	15'608 kWh	13'064 kWh	-16.30%
Kühlenergie total	219'386 kWh	219'713 kWh	0.15%
max. Heizlast	23.7 kW	21.8 kW	-7.89%
max. Kühllast	66.1 kW	64.7 kW	-2.10%
Energie Server	219'000 kWh	219'000 kWh	0.00%
Energie Geräte	20'502 kWh	21'531 kWh	5.02%
Energie Beleuchtung	9'027 kWh	8'818 kWh	-2.31%
Energie Elektro total	248'529 kWh	249'349 kWh	0.33%
Energie Elektro ohne Server	29'529 kWh	30'349 kWh	2.78%

Auch hier stimmen die Kennwerte überein. Nur die Kühlenergie der Räume (restliches Gebäude) weicht mit 16% ziemlich stark von der IDA-ICE Simulation ab. Bemerkenswert ist die genaue Berechnung der gesamten Kühlenergie des Gebäudes. Es zeigt sich, wie stark der Server das Endresultat beeinflusst, wenn das gesamte Gebäude inklusive Serverraum betrachtet wird und der Server und das restliche Gebäude nicht separat ausgewertet werden. Wenn man die Werte pro m<sup>2</sup> EBF vergleicht, weisen alle Werte ähnliche Ungenauigkeiten auf.

Tabelle 14: Vergleich Werte pro m<sup>2</sup> EBF – Szenario mit Server

Wert	IDA-ICE	Quasisimulation	Abweichung
Heizenergie	21 kWh/m <sup>2</sup>	24 kWh/m <sup>2</sup>	14.13%
Kühlenergie Server	145 kWh/m <sup>2</sup>	155 kWh/m <sup>2</sup>	6.75%
Kühlenergie Raum	11 kWh/m <sup>2</sup>	10 kWh/m <sup>2</sup>	-11.89%
Kühlenergie total	156 kWh/m <sup>2</sup>	165 kWh/m <sup>2</sup>	5.43%
max. Heizlast	15.5 W/m <sup>2</sup>	16.4 W/m <sup>2</sup>	5.27%
max. Kühllast	46.0 W/m <sup>2</sup>	48.4 W/m <sup>2</sup>	5.27%
Energie Server	156 kWh/m <sup>2</sup>	164 kWh/m <sup>2</sup>	5.27%
Energie Geräte	15 kWh/m <sup>2</sup>	16 kWh/m <sup>2</sup>	10.55%
Energie Beleuchtung	6 kWh/m <sup>2</sup>	7 kWh/m <sup>2</sup>	2.83%
Energie Elektro total	177 kWh/m <sup>2</sup>	187 kWh/m <sup>2</sup>	5.62%
Energie Elektro ohne Server	21 kWh/m <sup>2</sup>	23 kWh/m <sup>2</sup>	8.19%

Die meisten Werte weisen eine Abweichung von ca. 5% auf. Ausnahme sind die Heiz- und Kühlenergie des restlichen Gebäudes ohne Serverraum. Die maximale Abweichung beträgt dennoch nur 14%. Die Zielvorgabe von 20% wird also erreicht. Grund für die höheren Abweichungen der Heiz- und Kühlenergie lässt sich anhand des thermischen Lastprofils im Diagramm 28 erklären.

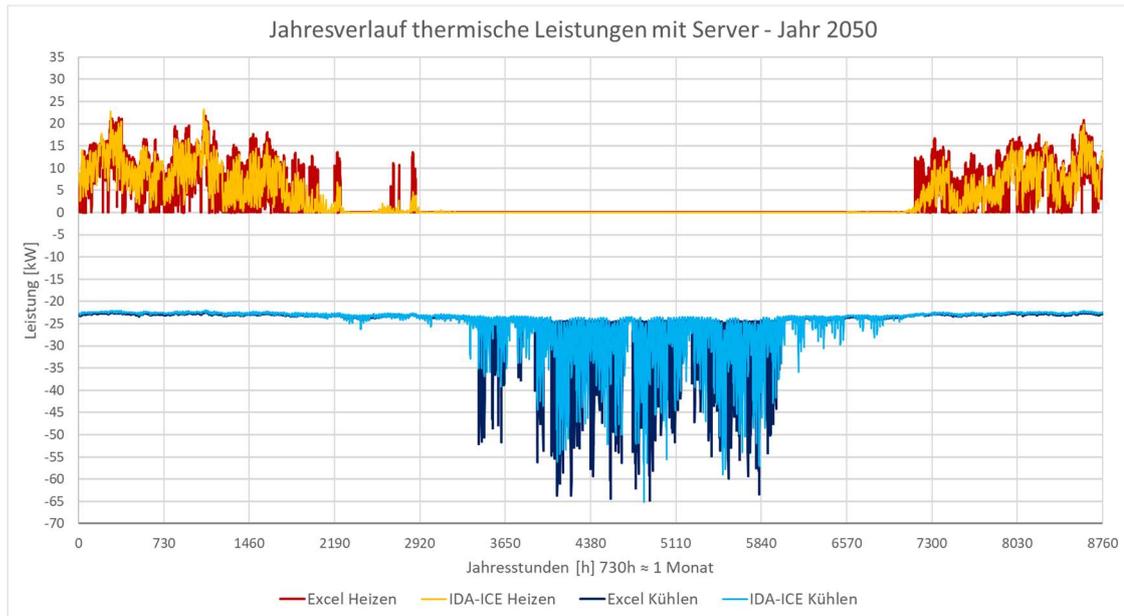


Diagramm 28: thermisches Jahreslastprofil - Szenario mit Server

In der Quasisimulation ist die Kältelast des Serverraumes im Winter etwas höher als in der IDA-ICE Simulation. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Serverraum in der Quasisimulation weniger Wärme an die umliegenden Räume abgibt als in der IDA-ICE Simulation. Dadurch steigt der Heizenergiebedarf und der Kühlenergiebedarf der Räume sinkt.

In der Quasisimulation wird für die Berechnung der Temperatursollwerte der Heizung und Kühlung die Raumtemperatur im Serverraum von 27°C nicht berücksichtigt. Dadurch soll die Wärmeabgabe des Serverraumes an das Gebäude genauer berechnet werden. Dies zeigt sich auch in der Auswertung des klimatisierten Gebäudetemperaturverlaufs im Diagramm 29.

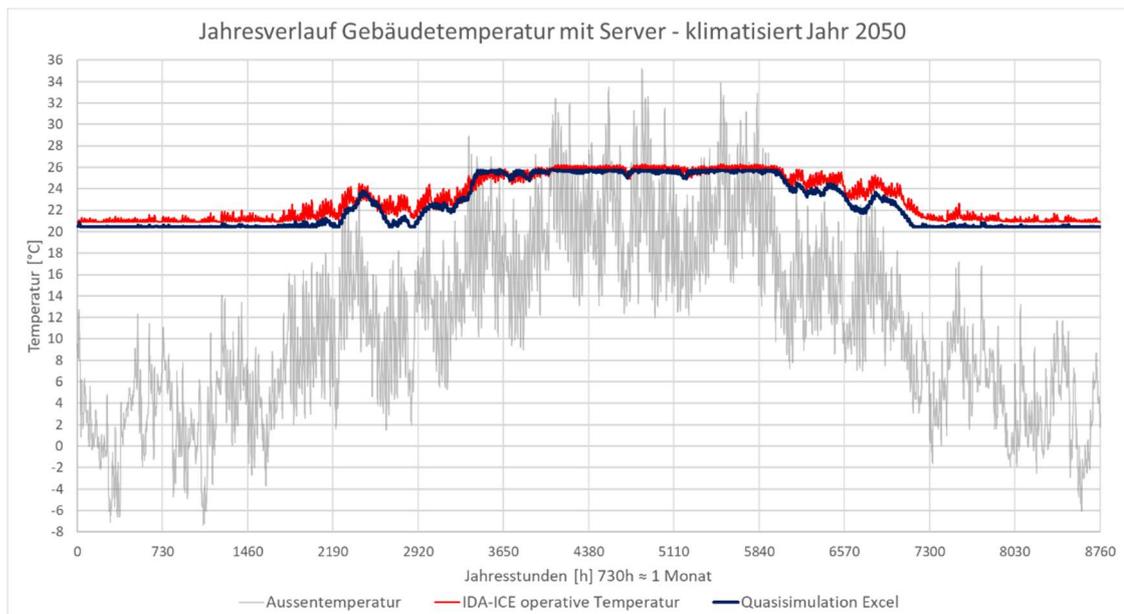


Diagramm 29: Gebäudetemperaturverlauf – Szenario mit Server - klimatisiert

Die mittlere Gebäudetemperatur in der Quasisimulation ist im Heiz- und Kühlfall tiefer als die mittlere Gebäudetemperatur der IDA-ICE Simulation. Die Verläufe stimmen in ihrer Form aber immernoch gut überein. Die Gebäude erreichen jeweils zur gleichen Zeit die Sollwerttemperaturen. Vergleicht man die Freilufttemperaturen im Diagramm 30, stimmen die beiden Temperaturverläufe sogar besser überein.

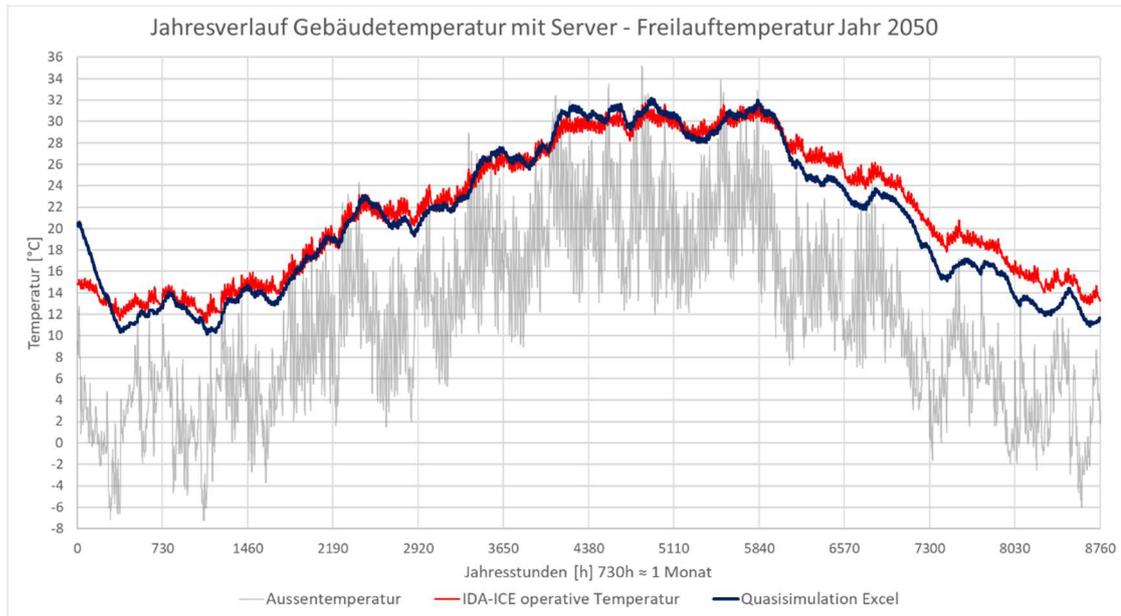


Diagramm 30: Freilufttemperatur – Szenario mit Server

Die Differenz der Simulationen ist im Sommerfall kleiner als bei den bisherigen Szenarien. Dies lässt sich mit der grösseren Differenz der berechneten Kühlenergie begründen. Die Quasisimulation berechnet im Szenario mit Server für die Kühlenergie prozentual zur IDA-ICE Simulation noch weniger als im Szenario ohne Server. Das heisst das Gebäude hat in der Quasisimulation weniger Wärmegewinne als in der IDA-ICE Simulation. Dies führt gezwungenermassen auch zu einer grösseren Abweichung im Winter.

## 5 Ökologische Beurteilung von Stampflehm

Der Grund für den Einsatz von Stampflehmwänden im untersuchten Projekt ist die Einsparung von thermischer Nutzenergie, die Reduktion von thermischen Leistungsspitzen und die Erhöhung der thermischen Trägheit des Gebäudes, um möglicherweise auf eine Kühlung im Sommer zu verzichten. Alles im Sinne der Nachhaltigkeit des Projektes über den gesamten Lebenszyklus. Der Einfluss des massiven Südteils aus Stampflehm sowie der internen Lehmmasse im Bodenaufbau und den freistehenden Stampflehmwänden wird folgend analysiert.

### 5.1 Freilauftemperatur

Der Einfluss der Stampflehmkonstruktionen auf die Trägheit des Gebäudes wird anhand der Freilauftemperaturen graphisch untersucht. Im Leichtbau wurde die Aussenfassade durch eine Holzkonstruktion ersetzt. Die tiefen Fensterleibungen bleiben bestehen, um nur den Einfluss der des Stampflehms zu untersuchen. Die interne Lehmmasse wurde komplett entfernt.

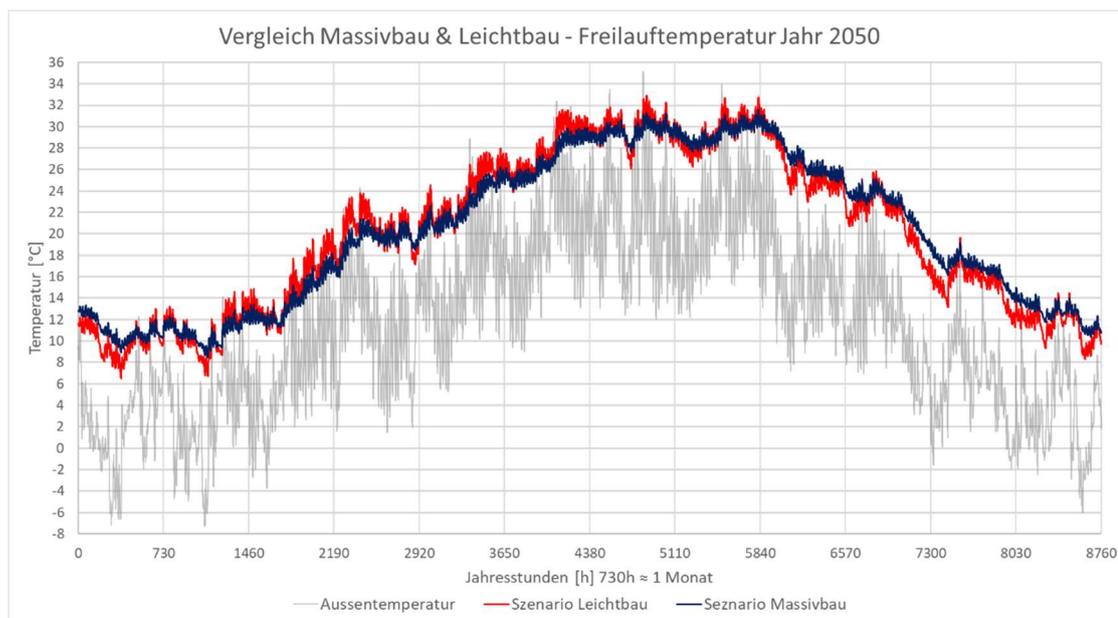


Diagramm 31: Einfluss von thermischer Speichermasse auf Freilauftemperatur

Wie erwartet ist die Freilauftemperatur des Leichtbaus stärker am Schwingen und erreicht eine höhere Maximaltemperatur im Sommer und eine tiefere Minimaltemperatur im Winter. Beide Gebäude folgen tendenziell aber einem sehr ähnlichen Jahresverlauf. Die Auswirkungen sind also nicht so markant wie im Diagramm 13, Kapitel 4.1.3.

Bei Betrachtung einer kleineren Zeitdauer im Diagramm 32, zeigt sich, dass die mittlere Gebäudetemperatur des Leichtbaus viel stärkeren Tagesschwankungen ausgesetzt ist als der Massivbau.

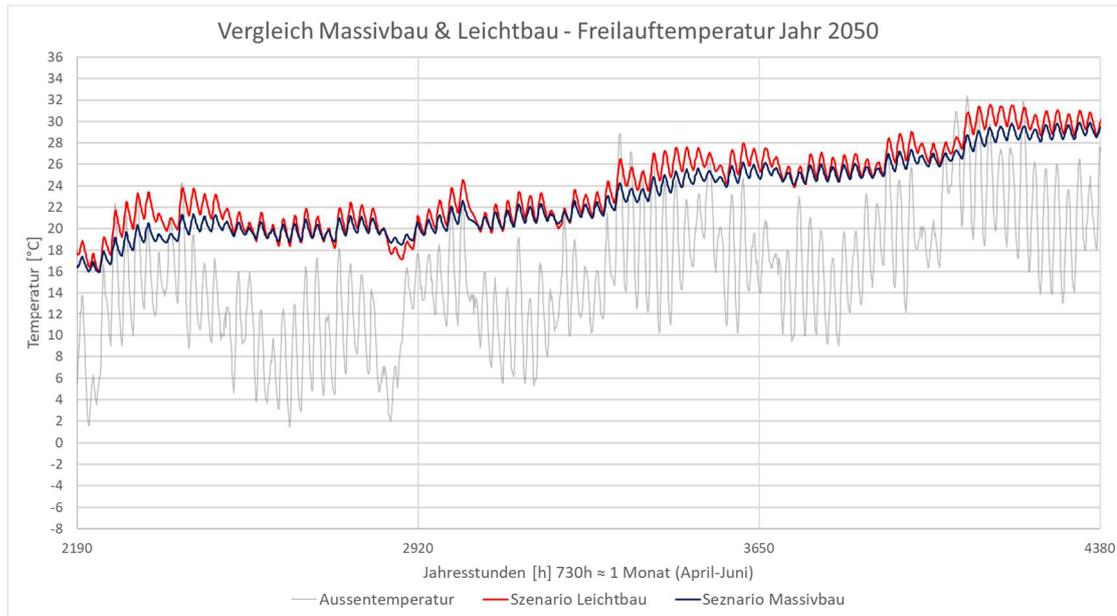


Diagramm 32: Einfluss von thermischer Speichermasse auf Freilufttemperatur April bis Juni

Das Ziel die thermische Trägheit des Gebäudes zu erhöhen, wird somit erfüllt, auch wenn auf eine Kühlung nicht verzichtet werden kann.

## 5.2 Reduktion von thermischer Nutzenergie und -leistung

Um später eine Aussage über die Nachhaltigkeit der Stampflehmkonstruktionen zu machen, müssen die Einsparungen der Nutzenergie berechnet werden. Hierfür werden zwei Varianten mit dem geplanten Werkstattgebäude verglichen. Einerseits die Leichtbaukonstruktion aus Holz, andererseits das projektierte Gebäude ohne interne Lehmmasse.

Tabelle 15: Einsparung thermischer Nutzenergie und -leistung gesamte Lehmmasse

Wert	Leichtbau	Massivbau	Einsparung Massivbau
Heizenergie	37'215 kWh	36'419 kWh	- 796.40 kWh
Kühlenergie Raum	14'978 kWh	13'574 kWh	- 1404.10 kWh
max. Heizlast	24.3 kW	25.4 kW	+ 1.07 kW
max. Kühllast Raum	43.7 kW	40.3 kW	- 3.32 kW

Durch den gesamten geplanten Stampflehm werden gegenüber einem Leichtbau rund 800 kWh Heizenergie und 1'400 kWh Kühlenergie in den Räumen eingespart. Das Ziel die Betriebsenergie zu senken, wird ebenfalls erreicht. Zusätzlich wird die Spitzenkältelast von 43.7 kW auf 40.3 kW gesenkt. Die Spitzenheizlast steigt an.

Um den Anteil der Energieeinsparungen durch die interne Lehmmasse zu untersuchen, wird die Variante ohne interne Lehmmasse mit der geplanten Massivbauvariante verglichen.

Tabelle 16: Einsparung thermischer Nutzenergie und -leistung durch interne Lehmmasse

Wert	Stampflehmfassade	Massivbau	Einsparung Massivbau
Heizenergie	37'054 kWh	36'419 kWh	- 635.20 kWh
Kühlenergie Raum	14'129 kWh	13'574 kWh	- 555.10 kWh
max. Heizlast	24.6 kW	25.4 kW	+ 0.78 kW
max. Kühllast Raum	43.2 kW	40.3 kW	- 2.87 kW

Es zeigt sich, dass die zusätzliche interne Lehmmasse die Heizenergie um 635 kWh senkt. Das heisst, dass die interne Lehmmasse 79.76 % der eingesparten Heizenergie des Massivbaus gegenüber dem Leichtbau ausmacht. Bei der Kühlenergie ist das Verhältnis weniger extrem. Die interne Lehmmasse ist nur für 39.53 % der gesamten Kühlenergieeinsparung des Massivbaus verantwortlich.

Um die Energieeinsparung durch die Lehmkonstruktionen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes zu untersuchen, ist die Graue Energie der Stampflehmwände zu berechnen.

### 5.3 Nachhaltigkeit der Stampflehmkonstruktion

Um die Nachhaltigkeit der Stampflehmkonstruktion zu beurteilen, muss die investierte Graue Energie mit der jährlichen Energieeinsparung im Betrieb verglichen werden. Für die Berechnung der Grauen Energie wird sich am Vorgehen des SIA MB 2040 orientiert. Diese gibt die Graue Energie in kWh pro Quadratmeter EBF und Jahr aus. Dabei wird unterschieden zwischen der gesamten Primärenergie, der erneuerbaren Primärenergie und der nicht erneuerbaren Primärenergie. Zusätzlich wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoss in Kilogramm pro m<sup>2</sup> EBF und Jahr berechnet. Die detaillierte Berechnung der Grauen Energie befindet sich im Anhang 1.

Als Referenz für die Graue Energie einer Holzkonstruktion wird die Holzwand des SIA MB 2040 verwendet. Die Graue Energie einer Aussenwand wird im SIA MB 2040 über die Fassadenfläche berechnet und können somit direkt übernommen werden.

Für die Berechnung der Grauen Energie der Stampflehmkonstruktionen werden hauptsächlich KBOB-Daten verwendet. Als Dämmstoff in der Stampflehmfassade ist Schafswolle vorgesehen. Da für Schafswolle keine KBOB-Daten vorhanden sind, werden zwei Konstruktionen mit alternativen Dämmstoffen untersucht. Einerseits wird eine Konstruktion mit Strohballen basierend auf KBOB-Daten untersucht, andererseits wird eine Konstruktion mit Baumwolldämmung untersucht. Die Graue Energie der Baumwolldämmung basiert auf Werten von «oekobaudat.de» und ist schlechter als die Strohdämmung. Die Berechnung mit KBOB-Daten und Werten von «oekobaudat.de» erfolgt direkt über das geplante Baustoffvolumen.

Die Graue Energie beider Stampflehmfassaden werden mit der Grauen Energie der Holzfassade verglichen. Dafür wird die gesamte Aussenfassade des Südteils verglichen. Zusätzlich wird bei der Massivbaukonstruktion die Graue Energie der internen Lehmmasse addiert. Der Vergleich des Massivbaus mit Strohballendämmung ist in der Tabelle 17 aufgeführt. Die Konstruktion mit Baumwolle wird in der Tabelle 18 mit der Holzkonstruktion verglichen.

Tabelle 17: Vergleich Graue Energie Holzkonstruktion – Massivbau mit Strohdämmung

	<b>Primärenergie total / Jahr</b>	<b>Primärenergie nicht erneuerbar</b>	<b>Primärenergie erneuerbar</b>	<b>Treibhausgas-emissionen</b>
Total Holzfassade	10499.3 kWh/a	2858.5 kWh/a	7640.8 kWh/a	563.0 kg/a
Total Lehm- Strohballen	3163.9 kWh/a	1599.9 kWh/a	1564.0 kWh/a	402.4 kg/a
<b>Einsparung absolut</b>	<b>-7335.4 kWh/a</b>	<b>-1258.6 kWh/a</b>	<b>-6076.8 kWh/a</b>	<b>-160.6 kg/a</b>
<b>Einsparung prozentual</b>	<b>-69.9%</b>	<b>-44.0%</b>	<b>-79.5%</b>	<b>-28.5%</b>

Tabelle 18: Vergleich Graue Energie Holzkonstruktion - Massivbau mit Baumwolldämmung

	<b>Primärenergie total / Jahr</b>	<b>Primärenergie nicht erneuerbar</b>	<b>Primärenergie erneuerbar</b>	<b>Treibhausgas-emissionen</b>
Total Holzfassade	10499.3 kWh/a	2858.5 kWh/a	7640.8 kWh/a	563.0 kg/a
Total Lehm- Baumwolle	5048.7 kWh/a	1921.2 kWh/a	3127.6 kWh/a	466.0 kg/a
<b>Einsparung absolut</b>	<b>-5450.5 kWh/a</b>	<b>-937.3 kWh/a</b>	<b>-4513.2 kWh/a</b>	<b>-97.0 kg/a</b>
<b>Einsparung prozentual</b>	<b>-51.9%</b>	<b>-32.8%</b>	<b>-59.1%</b>	<b>-17.2%</b>

Der vorgesehene Südteil aus Stampflehm ist unabhängig vom Dämmstoff ökologischer als eine klassische Holzkonstruktion.

In diesen Vergleichen wird beim Massivbau die interne Lehm-  
masse ebenfalls berücksichtigt. Diese wird zusätzlich im Gebäude platziert und ist für die Grundstruktur des Gebäudes unwichtig. Es wird zusätzlich Graue Energie verbaut, die aber durch die Einsparung bei der Aussenfassade aus Stampflehm kompensiert wird. Das heisst, die Aussenfassade lohnt ökologischer Sicht immer. Sie ist nachhaltiger in der Erstellung als eine Holzkonstruktion und reduziert zusätzlich die Nutzenergie im Betrieb.

Ob sich der Zusatzaufwand an Grauer Energie für die interne Masse im Vergleich zu einem Gebäude ohne der internen Lehm-  
masse lohnt, zeigt sich in der Tabelle 21. Darin wird der Aufwand an Grauer Energie mit der Einsparung an Primärenergie im Betrieb verglichen.

Mit der durch die interne Masse eingesparte Nutzenergie und den KBOB-Daten für verschiedene Wärme- und Kälteerzeuger wird die Primärenergieeinsparung im Betrieb berechnet.

Die eingesparten Nutzenergien können der Tabelle 16 entnommen werden. Zur Berechnung der Nutzenergie 2 werden Verteilverluste von 10% angenommen. Diese sind:

- Heizenergie: 698.5 kWh/a
- Kühlenergie: 610.5 kWh/a

Die eingesparte Primärenergie der Wärme- und Kälteerzeuger wird direkt dem Aufwand an Grauer Energie für die interne Lehm-  
masse gegenübergestellt.

Tabelle 19: Ökologische Bewertung der eingesparten Heizenergie durch die interne Lehm-masse

Wärmeerzeuger	Primärenergie total / Jahr	Primärenergie nicht erneuerbar	Primärenergie erneuerbar	Treibhausgas-emissionen
Graue Energie in-terne Lehm-masse	682.6 kWh/a	641.2 kWh/a	41.5 kWh/a	156.5 kg/a
Heizkessel Heizöl	-922.72 kWh/a	-915.04 kWh/a	-7.68 kWh/a	-239.59 kg/a
Heizkessel Erdgas	-742.60 kWh/a	-740.41 kWh/a	-2.19 kWh/a	-163.45 kg/a
WP EWS	-943.67 kWh/a	-302.45 kWh/a	-641.22 kWh/a	-26.96 kg/a
WP Aussenluft	-968.12 kWh/a	-338.77 kWh/a	-629.35 kWh/a	-27.94 kg/a
WP Grundwasser	-922.72 kWh/a	-282.19 kWh/a	-640.52 kWh/a	-22.28 kg/a
Fernwärme Holz	-1121.09 kWh/a	-101.28 kWh/a	-1019.81 kWh/a	-17.18 kg/a
Fernwärme KVA	-37.09 kWh/a	-29.62 kWh/a	-7.47 kWh/a	-2.33 kg/a

Grün markierte Felder bedeuten, dass mit diesem Wärmeerzeuger der Aufwand an Grauer Energie für die interne Lehm-masse kompensiert wird. Gemäss dieser Tabelle lohnt sich der Zusatzaufwand an Grauer Energie für die interne Masse vor allem bei einem fossilen Wärmeerzeuger. Die eingesparte Primärenergie der Kälteerzeugung muss ebenfalls berücksichtigt werden. Hier wird nur die klassische Kälteerzeugung mit einer Kältemaschine über einen hybriden Rückkühler betrachtet. Als ESEER+ (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) wird 4 angenommen. Dieser leitet sich aus den vorgeschriebenen Grenzwerten im Anhang C der SIA 382/1:2014 ab. Für eine wassergekühlte Kältemaschine inkl. Rückkühlung mit einer Leistung bis 100 kW wird ein EER+ (Energy Efficiency Ratio) bei Vollast von 3.2 vorgeschrieben. Bei 50% Last wird ein EER+ von 4.7 vorgeschrieben. Für den ESEER+ wird der Mittelwert angenommen, da in der SIA 382/1:2014 keine Vorgabe für den ESEER+ gemacht wird. Mit der Annahme des ESEER+ kann der Strombedarf der Kältemaschine berechnet werden. Dieser wird mit KBOB-Daten in Primärenergie umgerechnet. Es wird wie auch bei den Wärmepumpen der schweizerische Strommix verwendet.

Tabelle 20: Ökologische Bewertung der eingesparten Kühlenergie durch die interne Lehm-masse

Kälteerzeuger	Primärenergie total / Jahr	Primärenergie nicht erneuerbar	Primärenergie erneuerbar	Treibhausgas-emissionen
Graue Energie in-terne Lehm-masse	682.6 kWh/a	641.2 kWh/a	41.5 kWh/a	156.5 kg/a
Kältemaschine mit RK ESSER+ 4	-402.32 kWh/a	-317.46 kWh/a	-84.86 kWh/a	-19.08 kg/a

Die Kältemaschine allein kompensiert die aufgewendete Graue Energie für die interne Lehm-masse nicht. In der Tabelle 21 werden die kombinierten Systeme analysiert.

Tabelle 21: Ökologische Bewertung der eingesparten Primärenergie durch die interne Lehmmasse

<b>Wärmeerzeuger + Kälteerzeuger</b>	<b>Primärenergie total / Jahr</b>	<b>Primärenergie nicht erneuerbar</b>	<b>Primärenergie erneuerbar</b>	<b>Treibhausgasemissionen</b>
Graue Energie interne Lehmmasse	682.6 kWh/a	641.2 kWh/a	41.5 kWh/a	156.5 kg/a
Heizkessel Heizöl	-1325.04 kWh/a	-1232.50 kWh/a	-92.54 kWh/a	-258.66 kg/a
Heizkessel Erdgas	-1144.92 kWh/a	-1057.87 kWh/a	-87.05 kWh/a	-182.53 kg/a
WP EWS	-1345.99 kWh/a	-619.91 kWh/a	-726.08 kWh/a	-46.04 kg/a
WP Aussenluft	-1370.44 kWh/a	-656.23 kWh/a	-714.21 kWh/a	-47.02 kg/a
WP Grundwasser	-1325.04 kWh/a	-599.65 kWh/a	-725.38 kWh/a	-41.36 kg/a
Fernwärme Holz	-1523.41 kWh/a	-418.74 kWh/a	-1104.67 kWh/a	-36.26 kg/a
Fernwärme KVA	-439.41 kWh/a	-347.08 kWh/a	-92.33 kWh/a	-21.41 kg/a

Da für die ökologische Beurteilung mit Blick auf die Klimaerwärmung vor allem die nicht erneuerbare Primärenergie und die Treibhausgasemissionen von Bedeutung sind, lohnt sich die interne Lehmmasse in diesem Vergleich nur für die fossilen Wärmeerzeuger in Kombination mit der beschriebenen Kältemaschine. Die Aussenluft-Wärmepumpe kompensiert nur den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf nicht aber die Treibhausgasemissionen der internen Lehmmasse. Aus einer rein energetischen Sicht lohnen sich aber fast alle dezentralen Systeme.

Für das vorgesehene Energiekonzept des neuen Werkstattgebäudes der WSL lohnt sich die interne Lehmmasse aus einer ökologischen Sicht nicht, da die gesamte Heizenergie vom Server produziert wird und die Kühlenergie über Grundwasser-Freecooling bereitgestellt wird. Dies sind beides Systeme, die einen tiefen ökologischen Fussabdruck haben.

## 6 Fazit

Die in dieser Arbeit beschriebene Quasisimulation ist eine Berechnungsmethode zwischen statischen Berechnungen und einer vollumfänglichen dynamischen Simulation. Im Umfang dieser Arbeit wird basierend auf gleichen Grundlagen die Berechnungsmethode der Quasisimulation mit einer dynamischen IDA-ICE-Simulation verglichen. Die Quasisimulation bieten mit einer phasengerechten Genauigkeit gegenüber einer dynamischen Simulation folgende Vorteile:

- Eine vereinfachte thermische Simulation eines Gebäudes wird bereits in den frühen Planungsphasen wie Vorstudien und Vorprojekt ermöglicht.
- Die Quasisimulation berechnet genauere Jahresenergien und Spitzenleistungen als eine statische Berechnung gemäss SIA Merkblatt 2024.2021 und generiert zusätzliche Informationen in Form von Jahreslastprofilen und Temperaturverläufen.
- Die Quasisimulation kann in einem Arbeitstag aufgebaut werden. Der Einfluss von Entwurfsänderungen wird innert Sekunden verarbeitet. Dadurch kann sie auf die zahlreichen Entwurfsänderungen genügend schnell reagieren und kann somit als Diskussionsgrundlage und Planungstool bei interdisziplinären Planersitzungen verwendet werden.
- Die Quasisimulation ist individuell erweiterbar und ermöglicht erste Beurteilungen verschiedener Energiekonzepte.
- Das thermische Verhalten des Gebäudes kann sowohl in der Gegenwart wie auch in der Zukunft untersucht werden. Dadurch wird die Entwicklung eines zukunftstauglichen Energiekonzept unterstützt.
- Mit der Quasisimulation kann in einer frühen Projektphase die Betriebsenergieeinsparung durch thermische Speichermasse abgeschätzt werden. Dies ermöglicht einen ökologischen gezielten Einsatz von thermischer Speichermasse.

Die Schwächen der Quasisimulation sind die modellbedingte Regulierung des Gebäudes als eine Zone und die Berechnung der Kühlenergie und -leistung. Bei der Berechnung der externen Lasten ist noch Verbesserungspotenzial vorhanden. Ein Ansatz ist die detaillierte Berechnung der solaren Gewinne. Die Quasisimulation ist präziser als eine statische Berechnung gemäss dem SIA Merkblatt 2024.2021.

Tabelle 22: Vergleich Quasisimulation und statische Berechnung zu IDA-ICE Simulation - Standardjahr SIA 2028

Szenario ohne Server Standardjahr SIA 2028	IDA-ICE Simulation	Quasisimulation	SIA MB 2024.2021
Heizenergie	35.3 kWh/m <sup>2</sup>	33.6 kWh/m <sup>2</sup> -4.89%	26.6 kWh/m <sup>2</sup> -24.73%
Kühlenergie Raum	3.3 kWh/m <sup>2</sup>	3.7 kWh/m <sup>2</sup> +11.39%	8.8 kWh/m <sup>2</sup> +164.40%
max. Heizlast	21 W/m <sup>2</sup>	21 W/m <sup>2</sup> +0.51%	13 W/m <sup>2</sup> -38.54%
max. Kühllast	20 W/m <sup>2</sup>	26 W/m <sup>2</sup> +33.63%	22 W/m <sup>2</sup> +11.29%
Energie Geräte	14.7 kWh/m <sup>2</sup>	16.1 kWh/m <sup>2</sup> +9.72%	18.1 kWh/m <sup>2</sup> +22.81%
Energie Beleuchtung	6.7 kWh/m <sup>2</sup>	6.5 kWh/m <sup>2</sup> -3.61%	3.8 kWh/m <sup>2</sup> -43.03%
Energie Elektro total	21.4 kWh/m <sup>2</sup>	22.6 kWh/m <sup>2</sup> +5.54%	21.9 kWh/m <sup>2</sup> +2.18%

Tabelle 23: Vergleich Quasisimulation und statische Berechnung zu IDA-ICE Simulation - Meteororm Jahr 2050 (RCP4.5)

Szenario ohne Server Jahr 2050	IDA-ICE Simulation	Quasisimulation	SIA MB 2024.2021
Heizenergie	25.9 kWh/m <sup>2</sup>	27.6 kWh/m <sup>2</sup> +6.41%	26.6 kWh/m <sup>2</sup> +2.61%
Kühlenergie Raum	9.7 kWh/m <sup>2</sup>	9.1 kWh/m <sup>2</sup> -5.81%	8.8 kWh/m <sup>2</sup> -9.26%
max. Heizlast	18 W/m <sup>2</sup>	17 W/m <sup>2</sup> -4.36%	13 W/m <sup>2</sup> -29.46%
max. Kühllast	29 W/m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup> +2.84%	22 W/m <sup>2</sup> -23.80%
Energie Geräte	14.6 kWh/m <sup>2</sup>	16.1 kWh/m <sup>2</sup> +10.55%	18.1 kWh/m <sup>2</sup> +23.74%
Energie Beleuchtung	6.4 kWh/m <sup>2</sup>	6.6 kWh/m <sup>2</sup> +2.92%	3.8 kWh/m <sup>2</sup> -40.48%
Energie Elektro total	21.0 kWh/m <sup>2</sup>	22.7 kWh/m <sup>2</sup> +8.22%	21.9 kWh/m <sup>2</sup> +4.12%

Obwohl diese Arbeit den Fokus auf den Vergleich von Berechnungsmethoden und nicht die Richtigkeit der berechneten Werte legt, fällt auf, dass die Werte des SIA Merkblatt 2024.2021 für die Heiz- und Kühlleistung gerade im Hinblick auf die Klimaerwärmung etwas optimistisch sind.

Im Umfang dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Quasisimulation eine gute Annäherung an eine dynamische Simulation des Werkstattgebäudes der WSL ist. Um die Aussagen und die Berechnungswege zu stärken, muss die Quasisimulation an verschiedenen Gebäudetypen und Projekten getestet und überprüft werden. Dazu gehört auch der Vergleich mit einem im Betrieb stehenden Gebäude, da keine Simulation der Realität entspricht.

## Abbildungs- Diagramm- & Formelverzeichnis

Abbildung 1: Aussenvisualisierung Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	4
Abbildung 2: Innenvisualisierung Zwischenraum – Eingangsbereich (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	5
Abbildung 3: Innenvisualisierung Zwischenraum – Cafeteria (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	5
Abbildung 4: Visualisierung Tragwerksmodell Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	5
Abbildung 5: Heizungskonzept Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	6
Abbildung 6: Kühlungskonzept Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	6
Abbildung 7: Lüftungskonzept Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	7
Abbildung 8: Elektro- & Sanitärkonzept Werkstattgebäude WSL (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	7
Abbildung 9: 3D IDA-ICE Modell Werkstattgebäude WSL .....	10
Abbildung 10: Blockschema Sonnenschutzsteuerung IDA-ICE (IGE, Zakovorotnyi, 2022)..	11
Abbildung 11: Fensteraufbau Westfassade Nordteil mit Lüftungsflügel (Schlussdokumentation Gruppe C, 2022).....	13
Abbildung 12: Fensteraufbau Westfassade Nordteil (IDA-ICE).....	13
Abbildung 13: Versuch Lüftungsflügel separat zu modellieren (IDA-ICE) .....	14
Abbildung 14: Eingabe Nutzungen .....	19
Abbildung 15: Eingabe bauphysikalische Eigenschaften.....	19
Abbildung 16: Eingabe Gebäudeabmessungen & Bauteilliste.....	21
Abbildung 17: Berechnung Zeitkonstante.....	24
Abbildung 18: Regelparameter & Kontrollwerte .....	25
Abbildung 19: Berechnung Normheizlast mit SIA MB 2024.2021 .....	27
Abbildung 20: In Quasisimulation verwendete Werte der Heizungs-Mappe.....	27
Abbildung 21: Berechnung externe Lasten mit SIA MB 2024.2021 .....	28
Abbildung 22: Erfassung Personenanzahl und abgegebene Personenwärme.....	29
Abbildung 23: Beispiel Personenprofile Werktag.....	30
Abbildung 24: Eingaben Luftmengenberechnung.....	30
Abbildung 25: Eingaben und Berechnung Warmwasserbedarf.....	32
Abbildung 26: Eingaben Beleuchtung.....	32
Abbildung 27: Kunstlichtregulierung nach Globalstrahlung.....	33
Abbildung 28: Eingaben Geräteleistungen.....	33
Abbildung 29: Eingaben PV-Anlage.....	34
Abbildung 30: Ausschnitt Klimadatensatz Simulations-Mappe.....	34

Abbildung 31: Übersicht Quasisimulation - Berechnung Temperaturverlauf und Nutzenergien .....	35
Abbildung 32: Kunstlichtregulierung nach Globalstrahlung.....	37
Abbildung 33: Sonnenazimut & Fassadenorientierung (Rouvel & Seifert, 2007, S.3).....	44
Abbildung 34: Fensteranalyse bauliche Verschattung (P. Lustenberger, 2022).....	45
Abbildung 35: Eingaben Serverraum Mappe "Eingaben Gebäude".....	50
Abbildung 36: Eingaben natürliche Lüftung.....	51
Diagramm 1: Vergleich verschiedener Zeitkonstanten $\tau$ .....	22
Diagramm 2: externe Lasten / solare Gewinne in Abhängigkeit der Globalstrahlung .....	38
Diagramm 3: Vergleich Kältelastprofil Mai bis September.....	49
Diagramm 4: Vergleich Kältelastprofile Augustwoche .....	49
Diagramm 5: Elektro-Profil aufsummiert - Wochenprofil Mai.....	53
Diagramm 6: thermisches Jahreslastprofil - Szenario ohne Server.....	56
Diagramm 7: thermisches Lastprofil April bis Juni - Szenario ohne Server.....	57
Diagramm 8: Kältelastprofil Juli - Szenario ohne Server.....	58
Diagramm 9: Gebäudetemperaturverlauf April bis Juni - Szenario ohne Server - klimatisiert	59
Diagramm 10: Jahrestemperaturverlauf - Szenario ohne Server - klimatisiert .....	59
Diagramm 11: Freilautemperatur - Szenario ohne Server.....	60
Diagramm 12: Freilautemperatur April bis Juni - Szenario ohne Server.....	61
Diagramm 13: Freilautemperatur verschiedener Zeitkonstanten in der Quasisimulation (50 h & 100 h).....	62
Diagramm 14: Freilautemperatur April bis Juni verschiedener Zeitkonstanten in der Quasisimulation (50 h & 100 h).....	62
Diagramm 15: Freilautemperatur April bis Juni verschiedener Zeitkonstante in der Quasisimulation (277 h & 560 h).....	63
Diagramm 16: Freilautemperatur verschiedener Zeitkonstanten in der Quasisimulation (277 h & 560 h).....	63
Diagramm 17: relative Abweichungen von Energien und Leistungen bei verschiedenen Zeitkonstanten in der Quasisimulation.....	64
Diagramm 18: thermisches Jahreslastprofil - Szenario SIA 2028.....	67
Diagramm 19: Kältelastprofil Juli – Szenario SIA 2028.....	67
Diagramm 20: Freilautemperatur - Szenario SIA 2028 .....	68
Diagramm 21: Gebäudetemperaturverlauf - Szenario SIA 2028 klimatisiert .....	69
Diagramm 22: Auswirkung der Klimaerwärmung auf das thermische Lastprofil .....	70
Diagramm 23: Auswirkung der Klimaerwärmung auf den klimatisierten Gebäudetemperaturverlauf .....	71
Diagramm 24: Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Freilautemperatur .....	71
Diagramm 25: Vergleich Freilautemperatur mit / ohne Server.....	73
Diagramm 26: Vergleich klimatisierter Gebäudetemperaturverlauf mit / ohne Server.....	73

Diagramm 27: Vergleich thermischer Jahreslastprofile mit / ohne Server.....	74
Diagramm 28: thermisches Jahreslastprofil - Szenario mit Server.....	76
Diagramm 29: Gebäudetemperaturverlauf – Szenario mit Server - klimatisiert .....	76
Diagramm 30: Freilufttemperatur – Szenario mit Server .....	77
Diagramm 31: Einfluss von thermischer Speichermasse auf Freilufttemperatur .....	78
Diagramm 32: Einfluss von thermischer Speichermasse auf Freilufttemperatur April bis Juni .....	79
Formel 1: Wärmetransmissionskoeffizient Bauteil .....	20
Formel 2: Wärmetransferkoeffizient Wärmebrücken.....	20
Formel 3: Wärmetransferkoeffizient Infiltrationsvolumenstrom .....	20
Formel 4: Wärmetransferkoeffizient Gebäude .....	20
Formel 5: Mittlerer U-Wert Gebäude.....	21
Formel 6: Temperaturverlauf Zeitkonstante.....	22
Formel 7: Berechnung speicherwirksame Dicke.....	23
Formel 8: Berechnung Zeitkonstante Gebäude .....	23
Formel 9: Berechnung benötigter Lehmmasse .....	24
Formel 10: Temperaturfaktor Normheizlast.....	26
Formel 11: Berechnung mittlerer Gebäudetemperatur Auslegung.....	27
Formel 12: Berechnung Normheizlast Gebäude mit Wärmetransferkoeffizient .....	27
Formel 13: absoluter Wärmewiderstand Gebäude .....	28
Formel 14: Berechnung Nutzenergie Warmwasser.....	31
Formel 15: Bandlast Warmwasser.....	31
Formel 16: Berechnung Wärmetransmission .....	36
Formel 17: stündlicher Lüftungswärmeverlust / gewinn.....	36
Formel 18: Leistungsverhältnis Gebäude ohne Heizung / Kühlung.....	40
Formel 19: effektives Leistungsverhältnis .....	42
Formel 20: Gebäudetemperaturänderung aus Leistungsverhältnis.....	42
Formel 21: Sonnenwinkel auf beliebig geneigte Fläche (Rouvel & Seifert, 2007, S.3).....	44
Formel 22: Sonnenwinkel auf senkrechte Fassade.....	44
Formel 23: Direktstrahlung auf Fassade.....	44
Formel 24: Diffuse Strahlung auf beliebig geneigte Oberfläche (Gassel, 1996, S.21) .....	46
Formel 25: Diffuse Strahlung auf senkrechte Fassade .....	46
Formel 26: Reflexionsstrahlung auf beliebig geneigte Oberfläche (Gassel, 1996, S.21).....	47
Formel 27: Reflexionsstrahlung auf eine senkrechte Fassade.....	47
Formel 28: Gesamtstrahlung auf Fassade.....	47
Formel 29: Korrekturfaktor Öffnungswinkel (B. Frei, 2022, S.102) .....	51
Formel 30: Luftvolumenstrom auf Grund von Kamineffekt (B. Frei, 2022, S.76) .....	52

Excelformel 1: Bezugszeit pro Tag von Warmwasser .....	31
Excelformel 2: Beleuchtungsfaktor durch Globalstrahlung .....	37
Excelformel 3: stündliche externe Lasten / Solargewinne .....	39
Excelformel 4: Berücksichtigung von Fenstern ohne aussenliegenden Sonnenschutz .....	39
Excelformel 5: Heizleistung .....	40
Excelformel 6: Kälteleistung .....	41
Excelformel 7: Direktstrahlung auf Fassade .....	45
Excelformel 8: Faktor bauliche Verschattung Südfassade .....	46
Excelformel 9: Luftvolumenstrom auf Grund von Kamineffekt .....	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialkennwerte Stampflehm .....	11
Tabelle 2: Materialkennwerte Stahlbeton (Manz, 2017) .....	11
Tabelle 3: Materialkennwerte Vollholz (IDA-ICE) .....	11
Tabelle 4: Vergleich Berechnungsvarianten für externe Lasten.....	49
Tabelle 5: Vergleich absolute Werte - Szenario ohne Server.....	55
Tabelle 6: Vergleich Werte pro m <sup>2</sup> EBF - Szenario ohne Server .....	55
Tabelle 7: Vergleich absolute Werte bei verschiedenen Zeitkonstanten $\tau$ in der Quasisimulation – Szenario ohne Server.....	64
Tabelle 8: Vergleich Werte pro m <sup>2</sup> EBF bei verschiedenen Zeitkonstanten in der Quasisimulation – Szenario ohne Server.....	64
Tabelle 9: Vergleich absolute Werte – Szenario SIA 2028.....	66
Tabelle 10: Vergleich Werte pro m <sup>2</sup> EBF – Szenario SIA 2028 .....	66
Tabelle 11: Auswirkung der Klimaerwärmung auf die Jahresenergien & -leistungen.....	69
Tabelle 12: Einfluss des Servers auf thermische Nutzenergien und -leistungen.....	72
Tabelle 13: Vergleich absolute Werte - Szenario mit Server .....	75
Tabelle 14: Vergleich Werte pro m <sup>2</sup> EBF – Szenario mit Server .....	75
Tabelle 15: Einsparung thermischer Nutzenergie und -leistung gesamte Lehm Masse.....	79
Tabelle 16: Einsparung thermischer Nutzenergie und -leistung durch interne Lehm Masse ....	80
Tabelle 17: Vergleich Graue Energie Holzkonstruktion – Massivbau mit Strohdämmung .....	81
Tabelle 18: Vergleich Graue Energie Holzkonstruktion - Massivbau mit Baumwolldämmung .....	81
Tabelle 19: Ökologische Bewertung der eingesparten Heizenergie durch die interne Lehm Masse .....	82
Tabelle 20: Ökologische Bewertung der eingesparten Kühlenergie durch die interne Lehm Masse .....	82
Tabelle 21: Ökologische Bewertung der eingesparten Primärenergie durch die interne Lehm Masse .....	83
Tabelle 22: Vergleich Quasisimulation und statische Berechnung zu IDA-ICE Simulation - Standardjahr SIA 2028 .....	85
Tabelle 23: Vergleich Quasisimulation und statische Berechnung zu IDA-ICE Simulation - Meteonorm Jahr 2050 (RCP4.5).....	85

## Normen und Richtlinien

Die für diese Arbeit spezifisch relevanten Normen sind hier aufgeführt. Auf eine Auflistung aller Normen, deren Inhalte und Wissen unterschwellig in diese Arbeit eingeflossen sind, wird verzichtet.

- SIA 380/1 Heizwärmebedarf
- SIA 380/4 Elektrische Energie im Hochbau
- SIA 382/1.2007 Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen
- SIA 382/1.2014 Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen
- SIA 382/2 Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf
- SIA 384.201 Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil1: Raumheizlast, Modul M3-3
- SIA 385/1 Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen
- SIA 385/2 Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung
- SIA MB 2024.2015 Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik
- SIA MB 2024.2021 Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik
- SIA MB 2028.2010 Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik
- SIA MB 2040 SIA Effizienzpfad Energie

## Literatur-/Quellenverzeichnis

Die für diese Arbeit spezifisch relevanten Quellen sind hier aufgeführt. Auf eine Auflistung aller Unterrichtsunterlagen und anderer Fachliteraturwerke, deren Wissen in diese Arbeit eingeflossen sind, wird verzichtet.

- Betschart, W. (2021a). *HLS4\_B 7 3 Thermische Solarenergie*.
- Betschart, W. (2021b). *HLS4\_B 7 Thermische Solarenergie*. Hochschule Luzern : Horw.
- Betschart, W. (2021c). *HLS4\_B 7 Thermische Solarenergie*. Hochschule Luzern : Horw.
- Betschart, W. (2021d). *HLS4\_B 7 thermische Solarenergie Videonotizen*. Hochschule Luzern : Horw.
- Bundesamt für Energie BFE. (2010). *Gesamtenergieeffizienz von Bürobauten*. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=62449&Load=true>
- Bundesamt für Energie BFE. (2015). *SADLESS – Systemische Betrachtung von Beschattungssystemen mit dem Fokus Tageslicht und Optimierung der SIA 380/4—Texte*. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=33984>
- Bundesamt für Energie BFE. (2018). *SolarGap—Auswirkung von Sonnenschutzsystemen auf den Heizwärmebedarf von Gebäuden*. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=46277&Load=true>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (2021, Juni 25). *Downloads | Service | ÖKOBAUDAT*. <https://www.oekobaudat.de/service/downloads.html>
- Dipl.- Ing. Gassel, A. (1996). *Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme* [Technische Universität Dresden]. [http://www.ib-aton.de/service/fach-aufs/diss\\_gss/diss\\_gss.pdf](http://www.ib-aton.de/service/fach-aufs/diss_gss/diss_gss.pdf)
- Energie Schweiz. (o. J.). *Wärmebrückenkatalog*. Abgerufen 8. Oktober 2020, von [https://www.bundespublikationen.admin.ch/cshop\\_mimes\\_bbl/8C/8CDCD4590EE41EE690B5DB691275AD7A.pdf](https://www.bundespublikationen.admin.ch/cshop_mimes_bbl/8C/8CDCD4590EE41EE690B5DB691275AD7A.pdf)
- Energie Schweiz. (2017). *Infoblatt EnerCoach Gebäudeform*. <https://www.local-energy.swiss/dam/jcr:db5bb1ec-0947-4890-9d19-7c01e212dbff/Gebaeudeform.pdf>
- Frei, B. (2022). *220308\_LKT2\_Frei\_Natuerliche Lueftung\_2022\_VI.pdf*. Hochschule Luzern : Horw.
- Gitz, P. A., Kannevischer, C. R., Kern, F., Lustenberger, P., & Vogt, D. P. (2022). *B+\_Gruppe\_C\_Abgabe\_Schlussabgabe.pdf*. Hochschule Luzern : Horw.
- *IDA ICE Getting Started*. (2018). Equa.
- KBOB, K. der B. L. der öffentlichen B. (o. J.). *Ökobilanzdaten im Baubereich*. Abgerufen 24. Mai 2022, von [https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten\\_baubereich.html](https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html)
- *Lehmbaumstoffen* › Dachverband Lehm e.V. (o. J.). Dachverband Lehm. Abgerufen 15. Mai 2022, von <https://www.dachverband-lehm.de/lehmbau/lehmbaumstoffe>

- Manz, H. (2019). *HLSI\_Skript Bauphysik II - Aussenklima Komfort Waerme Energie*. Hochschule Luzern : Horw.
- Minergie Schweiz. (o. J.). *Sommerlicher wärmeschutz—Klimakomfort im Minergie-Gebäude*. Abgerufen 30. Mai 2022, von [https://www.minergie.ch/media/minergie\\_sommerlicher\\_waermeschutz\\_d.pdf](https://www.minergie.ch/media/minergie_sommerlicher_waermeschutz_d.pdf)
- Minergie Schweiz. (2016). *Minergie-Glossar*. <https://www.minergie.ch/media/glossar-dt.pdf>
- Rouvel, L. (2007). *Berechnung des Wärmeeintrags in den Raum aufgrund kurzweilliger Einstrahlung*. 20.
- *Stampflehm natur*. (o. J.). Claytec. Abgerufen 15. Mai 2022, von [https://www.claytec.de/de/produkte/mauerwerk\\_stampflehm\\_terrazzo/stampflehm-natur\\_pid383](https://www.claytec.de/de/produkte/mauerwerk_stampflehm_terrazzo/stampflehm-natur_pid383)
- *Wärmekapazität von verschiedenen Werkstoffen*. (o. J.). Schweizer-fn. Abgerufen 5. Juni 2022, von [https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet\\_baustoff\\_erde.php](https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_baustoff_erde.php)

## Anhang

### Anhang 1:

- Grundlagenmappen Quasisimulation
- Handberechnungen
- Nachhaltigkeitsberechnung Stampflehm

### Anhang 2:

- Vergleichsdiagramme gross A4

### Anhang 3:

- Berichte IDA ICE Simulationen