

Konstantin Holzmann, BSc

# **Abluftanlage mit Nutzung der Abwärme mittels einer Wärmepumpe für Gründerzeitgebäude**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium

Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

## **Betreuer**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Monsberger

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Rainer Kogler, BSc

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau

Graz, Mai 2024

---

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

## **Danksagung**

Großer Dank gilt meinen Betreuern Herrn Prof. Michael Monsberger und Dipl.-Ing. Rainer Kogler für die fachliche Betreuung und Begleitung während der Ausarbeitung dieser Arbeit. Auch meinen ehemaligen Kollegen am Institut bin ich dankbar für fachliche Diskussionen und ihre Hilfsbereitschaft bei Fragen und Anliegen.

Meinen Eltern möchte ich besonders danken für ihre jahrelange Unterstützung während meiner Studienzeit.

---

## Kurzfassung

Gründerzeitgebäude aus der Zeit von ca. 1850 bis 1910 haben einen beträchtlichen Anteil an attraktiver Innenstadtlagen in vielen mitteleuropäischen Städten. Sie unterliegen zum Schutz des Ortsbildes häufig Vorschriften, die Eingriffe in die äußere Erscheinung des Gebäudes einschränken. Dies wirkt sich auch auf Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz aus. Insbesondere größere Veränderungen an der Gebäudehülle gestalten sich aufwändig, da spezielle bautechnische Lösungen angewendet werden müssen. Der Einsatz von Lüftungsanlagen erlaubt es, Energieeinsparungen durch Reduktion der Lüftungswärmeverluste zu erreichen, ohne dabei große Eingriffe in die Außenhaut eines Gebäudes zu verursachen. Klassische Zu- und Abluftanlagen können Wärme durch den Einsatz von Wärmetauschern rückgewinnen, haben jedoch mit ihren Zu- und Abluftleitungen einen hohen Installationsaufwand. Eine reine Abluftanlage erlaubt hingegen geringere Leitungslängen und vereinfacht dadurch die Nachrüstung. Frischluft strömt direkt durch spezielle Durchlässe in Außenbauteilen in die Aufenthaltsräume nach. Dadurch geht jedoch die Möglichkeit der Vorwärmung der kalten Außenluft durch die abgeführte Abluft verloren, die normalerweise zur Wärmerückgewinnung eingesetzt wird. Das geringe Temperaturniveau der Abluft macht es unmöglich, die Wärme in einem Wärmetauscher auf andere nutzbare Medien zu übertragen. Um die Wärme dennoch nicht ungenutzt in die Umwelt abzugeben, kann eine Abluftwärmepumpe eingesetzt werden. Diese nutzt die Wärme, erreicht dabei ein höheres Temperaturniveau und erlaubt es damit, die Wärme zur Unterstützung der Raumheizung und der Warmwasserbereitung einzusetzen.

Dieser technische Ansatz wird für ein ausgewähltes Grazer Gründerzeitgebäude ausgearbeitet und beurteilt. Für zwei verschiedene Nutzungsszenarien – einmal als Wohn- und einmal als Bürogebäude – wird eine Anlage mit allen relevanten Komponenten entworfen. Aus dem Anlagenentwurf und aufgenommenen sowie recherchierten Daten wird ein Simulationsmodell in einer dynamischen Gebäudesimulationssoftware erstellt.

Es werden umfangreiche Simulationen durchgeführt, um das Gebäude in seiner Bestandsform sowie mit der nachgerüsteten Abluftanlage inklusive Wärmepumpe analysieren und vergleichen zu können. Untersucht werden der Einfluss der Anlage auf die Belüftung der Räume, die Auswirkung auf die sommerliche Überwärmung bei Nachtlüftung mit der Abluftanlage und die Veränderungen des Energiebedarfs durch die Wärmerückgewinnung. Als besonders relevant für die Menge an rückgewonnener Wärme stellen sich die Wärmepumpengröße und der Warmwasserbedarf (nur beim Wohngebäude) heraus. Die Wärmepumpe kann beim Wohngebäude je nach Größe rund 20 bis 40 % und beim Bürogebäude rund 20 bis 26 % des Heizenergiebedarfs abdecken. Die Jahresarbeitszahlen sinken bei höheren Wärmepumpen-Nennleistungen.

Des Weiteren wird das Lüftungstechnische Konzept wirtschaftlich beurteilt. Die Anlagenkosten werden den durch die Wärmerückgewinnung entstehenden Energieeinsparungen gegenübergestellt. Die statischen Amortisationszeiten der Anlagen für Büro- und Wohngebäude werden berechnet. Dabei zeigt sich, dass sich die für das Wohngebäude entworfene Anlage in einem Zeitraum von rund 9 bis 16 Jahren amortisieren kann. Die Amortisationszeit bei Büronutzung liegt im Bereich von 24 bis 31 Jahren. Abhängig von den tatsächlichen Anlagenkosten und den zukünftigen Energiepreisen für Strom und Fernwärme (Hauptwärmquelle des betrachteten Beispielgebäudes), können diese Ergebnisse beträchtlich variieren. Das entworfene System stellt für Wohngebäude eine energetisch und wirtschaftlich adäquate Nachrüstung dar, während bei Bürogebäuden mit einer langen Amortisationsdauer zu rechnen ist.

---

## Abstract

Buildings from the so-called 'Gründerzeit' (from approximately 1850 to 1910) are an important part of Central European city centers. They are often protected in order to keep their unique appearance. This makes it more difficult to retrofit these buildings to achieve better energy efficiency. Especially changes to the building envelope like exterior insulation or the exchange of existing windows are hardly possible. Ventilation systems make it possible to save energy by reducing ventilation heat losses. Furthermore, there is no need for obvious changes to the appearance of the building. Conventional ventilation systems that provide supply air and extract exhaust air from the rooms can recover heat by preheating the cold outdoor air with warm exhaust air using a heat exchanger. However, the installation of these systems is costly. An exhaust air system requires less air ducts as it only extracts air from the rooms whereas fresh outdoor air enters the building via special inlets in exterior walls. This makes it easier to use these systems for refurbishments. The drawback is that an immediate heat recovery from exhaust air to the incoming outdoor air is not possible. To overcome this disadvantage, an exhaust air heat pump can be used to recover heat from the exhaust air and to use this heat for space heating and domestic hot water preparation.

An exhaust air ventilation system with heat recovery using an exhaust air heat pump is designed for a Gründerzeit building in Graz. Two different types of use are investigated – housing and office. The design includes all components for ventilation, heat recovery and use of the recovered heat. The system is modelled using a building performance simulation software.

Various simulations are carried out to analyse and compare the naturally ventilated building to the building equipped with the exhaust air ventilation system with heat recovery using a heat pump. The analyses focus on the effect of the system on room ventilation, on reducing the risk of overheating during summer and on the energy efficiency of the building. The results show that the amount of recovered heat strongly depends on the heat pump capacity and the domestic hot water consumption (in case of housing). Depending on the heat pump capacity, it is possible to cover approximately 20 % to 40 % of the overall heat demand in the case of housing and 20 % to 26 % in the case of office use. The achievable energy efficiency ratios decrease with increasing heat pump capacities.

Finally, the ventilation system is evaluated using a static amortization calculation. Installation and operating costs are compared with achievable energy cost savings. In the case of residential buildings, the payback period is about 9 to 16 years; for office buildings it is in the range of approximately 24 to 31 years. Energy prices for district heat (main heat energy source of the investigated building) and electric energy affect the payback period significantly. The system is an adequate solution for retrofitting residential buildings. For office buildings the payback period is too long.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation und Motivation der Arbeit .....	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfragen .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1	Gründerzeitgebäude .....	4
2.2	Gebäudetechnik.....	5
2.2.1	Lüftungstechnik .....	5
2.2.1.1	Luftarten .....	5
2.2.1.2	Klassifizierung von Lüftungen .....	6
2.2.2	Wärmepumpen .....	10
2.2.2.1	Funktion .....	10
2.2.2.2	Kennzahlen zur Beschreibung von Wärmepumpen .....	11
2.2.2.3	Betriebsarten von Wärmepumpen .....	14
2.2.2.4	Leistungsregelung.....	14
2.2.3	Wärmerückgewinnung mit Abluftwärmepumpen .....	15
<b>3</b>	<b>Randbedingungen für Klima und Nutzung .....</b>	<b>17</b>
3.1	Normen und weitere Regelwerke .....	17
3.2	Außenklima .....	19
3.2.1	Testreferenzjahre .....	19
3.2.2	Systemauslegung .....	20
3.2.3	Normaußenklima für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ..	21
3.3	Raumklima.....	22
3.3.1	Behaglichkeit .....	22
3.3.2	Solltemperaturen .....	23
3.3.3	Raumluft.....	26
3.4	Luftaustausch .....	27
3.4.1	Lüftung .....	27
3.4.1.1	Darstellung des Luftwechsels.....	28
3.4.1.2	Werte zur Bemessung des Luftwechsels.....	29
3.4.2	Infiltration .....	33
3.5	Warmwasser .....	35
3.6	Innere Wärmegewinne .....	37
3.6.1	Personenwärme .....	37
3.6.2	Gerätewärme.....	40
<b>4</b>	<b>Bestandsgebäude .....</b>	<b>43</b>
4.1	Allgemeines .....	43
4.2	Gebäudegeometrie.....	44
4.3	Aktuelle Nutzung .....	45
4.4	Gebäudesubstanz .....	46
4.4.1	Bauteile und Baustoffe .....	46
4.4.1.1	Baustoffe .....	46
4.4.1.2	Bauteile.....	48
4.4.1.3	Fenster und Türen .....	49
4.4.2	Gebäudetechnik .....	50
<b>5</b>	<b>Gebäudetechnikkonzept .....</b>	<b>51</b>
5.1	Lüftung.....	51
5.1.1	Allgemeines .....	51
5.1.2	Zonierung .....	52
5.1.3	Luftvolumenströme .....	55
5.1.3.1	Büronutzung .....	55
5.1.3.2	Wohnnutzung.....	56

---

5.1.4	Außenluftdurchlässe .....	57
5.1.5	Überströmung.....	61
5.1.6	Abluftleitungen .....	61
5.1.7	Druckverlust und pneumatischer Abgleich .....	64
5.1.8	Zentralventilator .....	65
5.1.9	Fortluft .....	66
5.1.10	Regelung und Betriebsstrategien der Lüftung .....	66
5.2	Abluftwärmepumpe .....	68
5.3	Warmwasseraufbereitung und Heizung .....	69
<b>6</b>	<b>Simulationen und Ergebnisse .....</b>	<b>71</b>
6.1	Modellbildung und Vereinfachungen .....	71
6.2	Aufbau der Simulationsreihen .....	72
6.3	Plausibilitätskontrolle des Modells .....	73
6.3.1	Vergleich des Simulationsmodells mit dem Energieausweis .....	73
6.3.2	Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Verbrauchsdaten .....	74
6.4	Allgemeines Verhalten der Abluftanlage .....	76
6.4.1	Einfluss der Strömungswiderstände auf den Luftstrom .....	76
6.4.2	Einfluss der Luftdichtheit der Gebäudehülle .....	78
6.4.3	Regelbarkeit und Feinabstimmung .....	79
6.5	Untersuchung des Einflusses auf sommerliche Überwärmung .....	80
6.5.1	Wohnnutzung .....	81
6.5.2	Büronutzung .....	82
6.6	Energetische Betrachtung .....	84
6.6.1	Wohnnutzung .....	84
6.6.1.1	Wohnnutzung im Bestandsgebäude .....	85
6.6.1.2	Wohnnutzung im Gebäude mit Abluftanlage .....	87
6.6.1.3	Vergleich von Bestand und Abluftanlage für das Wohngebäude .....	91
6.6.2	Büronutzung .....	92
6.6.2.1	Büronutzung im Bestandsgebäude .....	92
6.6.2.2	Büronutzung im Gebäude mit Abluftanlage .....	93
6.7	Wirtschaftliche Betrachtung .....	96
6.7.1	Kosten .....	96
6.7.1.1	Schätzung der Anlagenkosten .....	96
6.7.1.2	Energiekosten .....	97
6.7.2	Amortisationsrechnung Wohngebäude .....	97
6.7.2.1	Vergleich der Basismodelle für das Wohngebäude .....	97
6.7.2.2	Einflüsse auf die Amortisation beim Wohngebäude .....	98
6.7.3	Amortisationsrechnung Bürogebäude .....	100
6.7.3.1	Vergleich der Basismodelle für das Bürogebäude .....	100
6.7.3.2	Einfluss der Wärmepumpenleistung auf die Amortisation beim Bürogebäude .....	101
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>102</b>
7.1	Zusammenfassung .....	102
7.2	Schlussfolgerungen und Fazit .....	104
7.3	Ausblick .....	106
<b>8</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>107</b>
8.1	Literaturverzeichnis .....	107
8.2	Abbildungsverzeichnis .....	113
8.3	Tabellenverzeichnis .....	114
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>116</b>

<sup>1</sup> Soweit in diesem Dokument personenbezogene Ausdrücke verwendet werden, umfassen sie alle Geschlechter gleichermaßen.  
 www-Adressen aus Textformatierungsgründen ggf. mit eingefügtem Leerzeichen bzw. empfiehlt es sich oft, die Adressen zu kopieren und in die Adressenzeile einzufügen (und nicht als Link zu verwenden)

# 1 Einleitung

Einleitend werden die Motivation der Arbeit und die Zielsetzung beschrieben. Weiters dient ein kurzer Abriss der Arbeit dem Überblick über die Inhalte und den Aufbau.

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation der Arbeit

Gründerzeitgebäude bilden in vielen mitteleuropäischen Städten einen wesentlichen Anteil der gebauten Infrastruktur. Meist errichtet in Form von zusammenhängenden Häuserblöcken in der Zeit von ca. 1850 bis 1910, bilden sie heute vielfältig genutzte Innenstadtareale. Sie erfreuen sich großer Beliebtheit und gelten als gefragte Viertel für Wohnungen, Büros und Geschäftslokale.

Die klimatischen Besonderheiten von Innenstädten mit ihren hohen Bebauungsdichten in Kombination mit dem sich ändernden Klima beeinflussen jedoch zunehmend das Wohlbefinden der Menschen auch in diesen historischen Bauwerken. Behaglichkeit in heißen Sommern zu gewährleisten wird schwieriger. Gleichzeitig erhöhen sich die Anforderungen der Nutzer an das Raumklima in Gebäuden. Während bei Neubauten Maßnahmen zur Anpassung an diese Veränderung eingeplant werden können, stellt sich bei existierenden Gebäuden die Frage, ob und wenn ja, welche Adaptierungen umsetzbar und zielbringend sind.

Die Maßnahmen müssen dabei nicht nur aus technischer und wirtschaftlicher Sicht zielführend sein. Gründerzeitviertel besitzen in vielen Städten besondere Auflagen, um das schützenswerte Stadtbild in diesen Arealen zu bewahren. Diese Vorgaben schränken die Möglichkeiten für Veränderung ein. Dämmungen, Fenster, Sonnenschutz und gebäudetechnische Anlagenteile dürfen das Erscheinungsbild nicht beeinträchtigen. Die oft unkoordiniert in Form von Einzelmaßnahmen errichteten dezentralen Systeme wie sie in Abbildung 1 gezeigt werden, sind in dieser Hinsicht keine zufriedenstellende Lösung.



Abbildung 1: Beispiele für den optischen Einfluss von Geräten auf das Erscheinungsbild

Der Erhalt der historisch bedeutenden Substanz verbunden mit der Erfüllung der Anforderungen an Gebäude auch in Zukunft unter den neuen Rahmenbedingungen sind das übergeordnete Ziel. Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt COOL-KIT ins Leben gerufen, das sich besonders dem Problem der sommerlichen Überwärmung in Gründerzeitgebäuden widmet.



Da Gründerzeitgebäude in der Regel eine sehr ähnliche besitzen, sollen sich die gewonnen Erkenntnisse nicht nur auf die konkret betrachteten Gebäude beschränken, sondern auch darüber hinaus Aussagekraft besitzen.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts COOL-KIT durchgeführt. COOL-KIT wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und ist Teil von Green Energy Lab, einer Forschungsinitiative für nachhaltige Energielösungen im Rahmen der österreichischen Innovationsoffensive „Vorzeigeregion Energie“ des Klima- und Energiefonds. [1]

In dieser Arbeit wird der Fokus auf ein spezielles System gelegt: Eine reine Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung mithilfe einer Wärmepumpe. Dieses System wird entworfen, bemessen und anschließend mithilfe der Software IDA ICE simuliert. Der Schwerpunkt liegt auf der energetischen Betrachtung und der Bewertung des Effekts auf die sommerliche Überwärmung.

Eine Abluftanlage hat im Vergleich zu einem Zu- und Abluftsystem einen geringeren Installationsaufwand bei der Lüftungszentrale und Leitungen, die nur für den Abtransport der verbrauchten Raumluft benötigt werden. Die Außenluft strömt über Öffnungen in der Gebäudehülle nach. Damit kann die Abluft allerdings nicht dazu genutzt werden, die kalte Außenluft in einem Wärmetauscher vorzuwärmen. Um die Wärme der Abluft dennoch nicht ungenutzt mit der Fortluft zu verlieren, wird eine Abluftwärmepumpe eingesetzt. Durch diese kann je nach System ein Teil der benötigten Wärmeenergie für Warmwasser und/oder Raumheizung durch die Abluftwärme gedeckt werden.

In den Sommermonaten, wenn die Gefahr von Überwärmung in den Innenräumen besteht, kann das System zur Nachtlüftung der Räume eingesetzt werden. Dabei wäre man nicht wie bei der gewöhnlichen, manuellen Fensterlüftung von der Bedienung durch Nutzer abhängig, was besonders bei Büronutzung Vorteile mit sich bringt. Da Außenluft durch spezielle Öffnungen nachströmt und deshalb keine Fenster offengehalten werden müssen, ist der Einbruchschutz während der Nachtlüftung sichergestellt. In Gebieten mit nächtlicher Lärmbelastung von außen, kann es für Bewohner unzumutbar sein, Fenster in Aufenthaltsräumen zu Lüftungszwecken offen zu halten. Schallgedämmte Außenlufteinlässe bieten in diesem Fall eine Alternative, die Lüftung und Schallschutz vereint.

## 1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Diese genannten Überlegungen führen zum Ansatz einer Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, die an einem Grazer Gründerzeitgebäude exemplarisch untersucht wird. Dabei sollen insbesondere folgende Fragen behandelt werden:

1. Wie sehen die Randbedingungen aus, die sich aus der Gebäudesubstanz selbst und der Umgebung ergeben? Welche Einflüsse aus der Nutzung wirken auf das Gebäude? Betrachtet werden die beiden Nutzungsarten Büro und Wohnen.
2. Wie sieht ein konkretes Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung durch eine Wärmepumpe für das Gebäude aus? Was sind die Bestandteile einer derartigen Anlage?
3. Wie wirkt sich eine solche Anlage auf die Behaglichkeit im Sommer aus?
4. Wie hoch sind die energetischen Verluste und Rückgewinne bei dieser Anlage?

5. Steht der Aufwand einer Nachrüstung mit einer derartigen Anlage im Verhältnis zum ökonomischen Nutzen? Als Vergleich dient der Ist-Zustand des Gebäudes mit Fensterlüftung.

Verglichen wird das Abluftsystem mit dem derzeitigen Zustand – einer manuellen Fensterlüftung. Da keine Messdaten für das betrachtete Gebäude vorliegen, wird für beide Lüftungskonzepte – Abluftanlage und Fensterlüftung (Bestand) – auf Gebäudesimulationen zurückgegriffen. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen beim energetischen und wirtschaftlichen Vergleich der beiden Lüftungskonzepte einerseits und der Beurteilung des Einflusses auf das sommerliche Überwärmungsverhalten andererseits.

Für die Behaglichkeit können auch weitere, lokal wirkende Einflüsse wie beispielsweise Zugluft in der Nähe von Luftdurchlässen entscheidend sein. Derartige kleinräumige, aber durchaus relevante Effekte werden im Rahmen der gemachten Untersuchungen nicht betrachtet. Hauptkriterium für die Beurteilung der Behaglichkeit ist die operative Raumtemperatur des gesamten Raumes. Der Schallschutz wie auch die ökologische Bilanzierung sind kein Bestandteil der Arbeit.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit befasst sich zu Beginn mit den theoretischen Grundlagen betreffend Gründerzeitgebäude, Lüftungstechnik und Wärmepumpen. Dieses Kapitel soll das Verständnis und die Einordnung des untersuchten Abluftsystems im Bereich der Raumlufttechnik fördern. Im folgenden Kapitel werden die Randbedingungen für Simulationen betrachtet. Diese umfassen Klimadaten, Nutzungsdaten und Grundlagen zur Auslegung von Lüftungssystemen. Später werden diese beim Entwurf der Anlage wieder aufgegriffen. Es folgt eine kurze Beschreibung der wesentlichen Eigenschaften und Eckdaten des untersuchten Gebäudes (Lessingstraße 27 – abgekürzt „L27“). Es wird eine Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung für dieses Objekt entworfen – dabei werden zwei Varianten unterschieden: Wohn- und Büronutzung. Die Systeme für beide Nutzungsarten unterscheiden sich aufgrund der verschiedenen Anforderungen voneinander. In Kapitel 6 wird aus Randbedingungen, den Objektdaten und dem Anlagenentwurf ein Simulationsmodell erstellt. Dieses wird anschließend für diverse Simulationen herangezogen. Einleitend wird kurz auf das allgemeine Verhalten einer Abluftanlage mitsamt ihren Besonderheiten eingegangen. Darauf folgend wird zuerst die Wirksamkeit der Anlage zur Verringerung der Gefahr sommerlicher Überwärmung untersucht und anschließend der Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes behandelt. Letztgenannte Untersuchungen bilden die Grundlage für die abschließende wirtschaftliche Betrachtung. Das nachgerüstete Abluftsystem mittels Wärmerückgewinnung durch eine Wärmepumpe wird mit dem Bestandsgebäude mit natürlicher Fensterlüftung verglichen. Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse und der Ausblick.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zu Gründerzeitgebäuden, Raumklima und Gebäudetechnik behandelt, die für das Verständnis der später beschriebenen Untersuchungen benötigt werden.

### 2.1 Gründerzeitgebäude

Unter Gründerzeitgebäuden werden Häuser verstanden, die in einer Zeit von ca. 1850 bis 1918 errichtet wurden. Sie stellen in vielen mitteleuropäischen Städten einen bedeutenden Teil der Innenstadtbezirke. In Graz und Wien machen Gründerzeitgebäude ein Viertel bis ein Drittel des Wohnbestandes aus. [2] Die Gebäude werden überwiegend zu Wohnzwecken, als Büroräume sowie für Geschäftstätigkeiten genutzt. Gründerzeitgebäude besitzen Ähnlichkeiten in Hinsicht auf ihre Bauweise. Charakteristisch für die Anordnung der Gebäude ist die Struktur der Blockrandbebauung. Dabei bilden mehrere Gebäude ohne Lücke aneinandergereiht einen Häuserblock rund um einen zentralen Innenhof. Typisch sind vier bis fünf oberirdische Geschosse mit aus heutiger Sicht großen Geschosshöhen von bis zu vier Metern. Die Wände bestehen meist aus massivem Vollziegel-Mauerwerk und können beträchtliche Wandstärken erreichen. Die Geschossdecken wurden häufig in der Form von Holzbalken- oder Dippelbaumdecken ausgebildet. Die Fassaden, besonders jene zur Straßenseite, sind üblicherweise reich dekoriert gestaltet. [3]

Gebäude in Gründerzeitvierteln unterliegen mitunter gesetzlichen Regelungen, welche die Erhaltung des Erscheinungsbilds und der Bausubstanz sichern sollen. Neben dem Denkmalschutz, der für ausgewählte schützenswerte Objekte gilt, wird dies in Graz insbesondere durch das Grazer Altstadterhaltungsgesetz 2008 (GAEG) geregelt. Dieses legt in Verbindung mit Landesverordnungen verschiedene Schutzzonen für das Grazer Stadtgebiet fest. Während sich die Zonen I und II des GAEG auf den mittelalterlichen Stadtkern (Historisches Zentrum) bzw. eine diesen umgebende Pufferzone erstrecken, liegt ein großer Teil der Grazer Gründerzeitgebäude in der Zone III (Gründerzeitviertel). Auch das untersuchte Gebäude befindet sich in dieser Zone III (Abbildung 2).

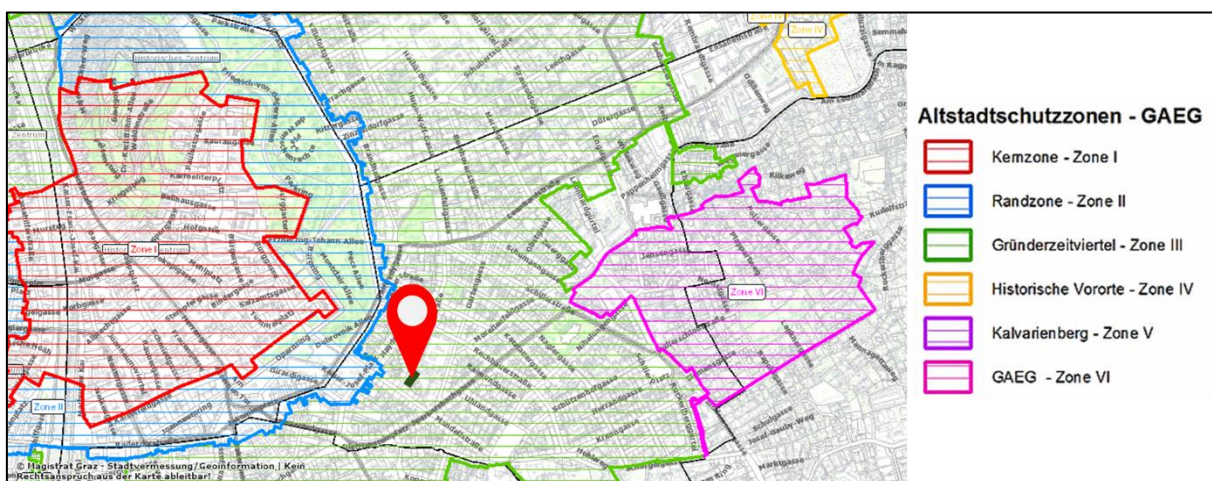


Abbildung 2: Grazer Altstadtschutzzonen und Lage des untersuchten Gebäudes in der Lessingstraße 27 (roter Marker) [4]

Die Regelungen zum Schutz des Erscheinungsbildes von Stadtteilen und zum Erhalt der Bausubstanz schränken die Möglichkeiten für Veränderungen an Bestandsgebäuden ein. So bedürfen laut GAEG auch Maßnahmen wie z. B. das Anbringen von Markisen einer Bewilligung, die nur erteilt werden darf, wenn das Erscheinungsbild nicht beeinträchtigt wird [5]. Davon sind auch Maßnahmen zur Verbesserung des Gebäudeenergiebedarfs und der Behaglichkeit wie Dämmung und außenliegender Sonnenschutz sowie gebäudetechnische Anlagenteile, die von außen sichtbar sind, wie z. B. Split-Klimaanlagen betroffen.

## **2.2 Gebäudetechnik**

In diesem Abschnitt werden relevante Teilbereiche der Gebäudetechnik beschrieben, um einen Überblick über den Stand der Technik zu vermitteln und eine Einordnung der später verwendeten Systeme in einen größeren Kontext ermöglichen.

### **2.2.1 Lüftungstechnik**

Der Hauptzweck des Lüftens ist es, die Qualität der Luft in den Innenräumen eines Gebäudes zu verbessern bzw. zu erhalten. Dazu wird die mit Schadstoffen belastete („verbrauchte“) Raumluft abgeführt und durch frische Luft ersetzt, die für gewöhnlich eine geringere Konzentrationen an unerwünschten Stoffen enthält. Darüber hinaus existiert auch die Möglichkeit der Luftaufbereitung von Raumluft, beispielsweise durch Umluftanlagen, auf die in dieser Arbeit mangels Relevanz nicht eingegangen wird.

#### **2.2.1.1 Luftarten**

Die Luftströme werden je nach Herkunft oder Verwendungszweck in verschiedene Luftarten eingeteilt. Die ÖNORM EN 16798-3 [6] legt die Definitionen der Luftarten fest. Die im Rahmen dieser Arbeit erwähnten Luftarten werden in Tabelle 1 angeführt. Zusätzlich sind die Abkürzungen und Farben aus der ÖNORM H 6010 [7] angegeben. Diese Farben werden in weiterer Folge auch verwendet.

Tabelle 1: Definitionen der wichtigsten Luftarten in der Gebäudetechnik

Luftart	Abkürzung (ÖNORM EN 16798-3)	Farbe (ÖNORM EN 16798-3)	Definition (ÖNORM EN 16798-3)	Abkürzung (ÖNORM H 6010)	Farbe (ÖNORM H 6010)
Außenluft	ODA	Grün	Unbehandelte Luft, die von außen in die Anlage oder in eine Öffnung einströmt	AUL	
Zuluft	SUP	Blau	Luftstrom, der in den behandelten Raum eintritt, oder Luft, die in die Anlage eintritt, nachdem sie behandelt wurde	ZUL	
Raumluft	IDA	Grau	Luft im behandelten Raum oder Bereich		
Überström- luft	TRA	Grau	Raumluft, die vom behandelten Raum in einen anderen behandelten Raum strömt		
Abluft	ETA	Gelb	Luftstrom, der den behandelten Raum verlässt und in die Luftbehandlungsanlage strömt	ABL	
Fortluft	EHA	Braun	Luftstrom, der die Abluftbehandlungsanlage verlässt und ins Freie strömt	FOL	
Infiltration	INF	Grün	Lufteintritt in das Gebäude über Undichtheiten in der Gebäudehülle, unbeabsichtigte Luft von draußen		

Zur Klarstellung wird hier erwähnt, dass durch Außenbauteil-Luftdurchlässe direkt in Räume einströmende Außenluft auch unter Außenluft fällt und nicht unter Zuluft.

### 2.2.1.2 Klassifizierung von Lüftungen

Die Lüftung eines Gebäudes kann durch unterschiedliche gebäude- und bautechnische Maßnahmen erreicht werden. Um die Vielfalt der möglichen Systeme besser ordnen zu können, werden sie anhand von bestimmten Eigenschaften klassifiziert. Zu beachten ist, dass es stets mehrere Kriterien gibt, an denen die Unterscheidung von Systemen festgemacht werden kann. Das führt auch zu Überschneidungen zwischen unterschiedlichen Ansätzen der Klassifizierung.

Eine grundlegende Unterscheidung teilt in Gebäude ohne und Gebäude mit mechanischen Lüftungsanlagen ein. Besitzt ein Gebäude keine Lüftungsanlage, spricht man von natürlicher (freier) Lüftung. Ist eine vorhanden, liegt eine mechanische (auch ventilatorgestützte, maschinelle) Lüftung vor. Einen Überblick über die Systematik von Gebäudelüftungen eingeteilt nach diesem Kriterium zeigt Abbildung 3.

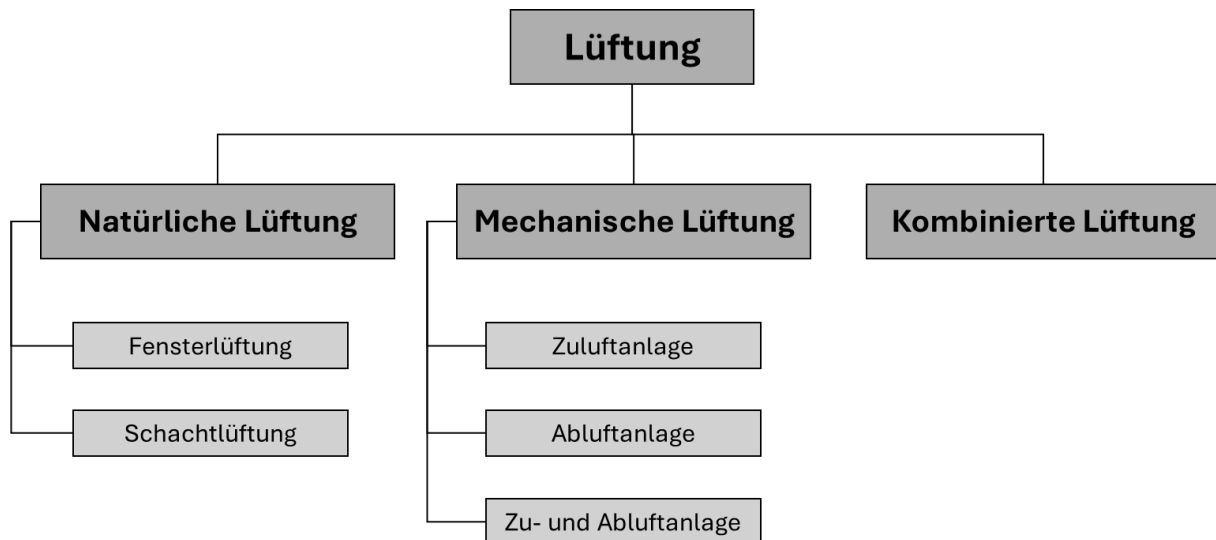


Abbildung 3: Einteilung der Lüftungsanlagen in natürliche, mechanische und kombinierte Systeme

Bei der **natürlichen Lüftung** erfolgt der Luftaustausch ohne mechanische, ventilatorgestützte Luftförderung. Durch Öffnungen in der Gebäudehülle wie z. B. Fenster aber auch durch unvermeidbare Undichtigkeiten kann Luft ein- und ausströmen. Der Antrieb für diese Transportvorgänge stammt aus thermischen Auftriebswirkungen und Windeinflüssen. Die verbreitetste Variante der natürlichen Lüftung stellt die Fensterlüftung dar, bei der die Nutzer durch das Öffnen von Fenstern den Luftaustausch ermöglichen. Aus der Funktionsweise der natürlichen Lüftung folgt der große Einfluss des Nutzerverhaltens auf den tatsächlich vorhandenen Luftaustausch und in weiterer Folge auch auf die Lüftungswärmeverluste. Sonderformen der freien Lüftung sind natürliche Schachtlüftungen, bei denen die Abluft aus den Räumen durch vertikale Schächte nach oben aus dem Gebäude abgeführt werden, während Außenluft nach wie vor über Undichtigkeiten und Öffnungen nachströmt. Die Strömung erfolgt auch bei diesen Schächten allein aufgrund thermischen Auftriebs und ohne mechanischen Antrieb. [8, Sf. 16, 17]

Bei der **mechanischen Lüftung** wird die nötige Luftbewegung mithilfe von Ventilatoren erzeugt. Andere Begriffe, die als Synonym verwendet werden, sind „ventilatorgestützte Lüftung“ und „raumluftechnische Anlagen“. Unterteilen kann man die mechanischen Lüftungen danach, welche Luftart mechanisch gefördert wird, in reine Zuluftanlagen, reine Abluftanlagen und Zu- und Abluftanlagen. Zuluftanlagen sorgen für den nötigen Luftaustausch, indem die durch technische Anlagen eingebrachte Zuluft einen Überdruck erzeugt (deshalb auch als „Überdruckanlagen“ bezeichnet). Die Abluft aus den Räumen entweicht durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle oder durch eigens dafür vorgesehene Öffnungen, in der Form von Außenbauteil-Luftdurchlässen (ALD). Demgegenüber wird bei Abluftanlagen die verbrauchte Raumlufte durch die Lüftungsanlage abgesaugt, während Außenluft über Undichtigkeiten oder ALD nachströmt (Unterdruckanlage). Bei Zu- und Abluftanlagen werden beide Luftarten durch die Lüftungsanlage in Räume eingebracht bzw. abtransportiert. [9]

Umluftanlagen sind Systeme ohne Lüftungsfunktion – also ohne einen Anteil an zugeführter Außenluft. Sie bereiten verbrauchte Luft auf und führen sie wieder in die Räume zurück. Diese Anlagen werden mangels Relevanz im Kontext dieser Arbeit nicht weiter beschrieben.



Für alle mechanischen Systeme gilt, dass sich nicht in jedem einzelnen Raum Vorrichtungen für das Ein- und Abströmen von Zu- und Abluft befinden müssen. Die belüftete Nutzungseinheit kann in Lüftungszonen eingeteilt werden, die jeweils unterschiedliche Formen der Luftführung besitzen. Beim auch als Kaskadenlüftung bezeichneten Prinzip wird Zuluft in der Zuluftzone (Hochdruckzone) eingeleitet, strömt von dort in Überströmbereiche und anschließend weiter die Abluftzone (Niederdruckzone), wo sie als Abluft entfernt wird. Die unverbrauchte Zuluft wird in Aufenthaltsräumen (Wohnräume, Büroräume) eingebracht, um dort die höchste Luftqualität zu gewährleisten, und in weiterer Folge aus Bereichen wie Küchen und Sanitärräumen abgeführt. Man spricht bei dieser Ausführung auch von Mehrfachnutzung der Luft. [10]

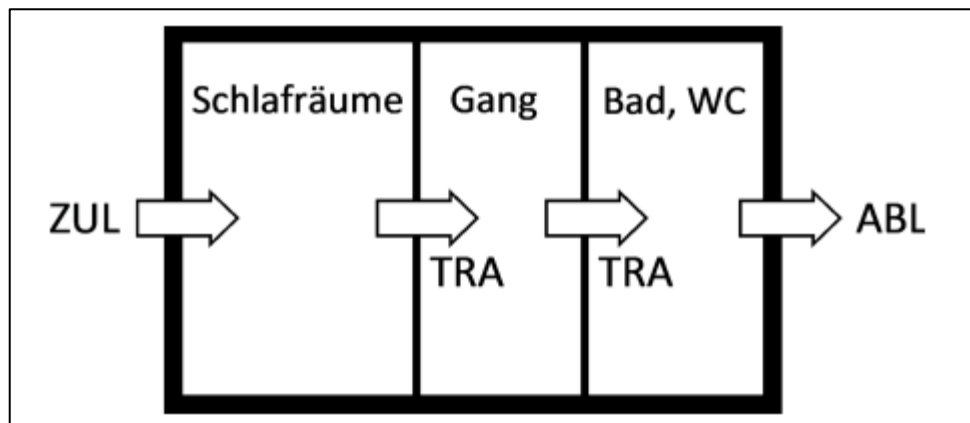


Abbildung 4: Beispiel für Mehrfachnutzung der Luft [10]

Mechanischen Lüftungsanlagen können anhand der **thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen** weiter unterteilt werden. Mit Luftbehandlungsfunktionen werden üblicherweise die vier thermodynamischen Behandlungsarten Heizen, Kühlen, Entfeuchten und Befeuchten verstanden. Je nach Anzahl und Art der Luftbehandlung werden verschiedene Systeme unterschieden. Anlagen ohne einer dieser vier Funktionen sind reine Lüftungsanlagen. Sind die zwei Funktionen Heizen und Kühlen vorhanden oder eine beliebige Kombination von drei der vier Funktionen, dann spricht man von einer Teilklimaanlage. Beherrscht ein Lüftungssystem alle vier genannten Luftbehandlungsfunktionen wird sie als (Voll-)Klimaanlage bezeichnet. Als weitere Behandlung kann die Filterung der Luft betrachtet werden. [11, S. 372, 373] Bei Abluftanlagen strömt die Außenluft durch Außenbauteil-Durchlässe in den Raum, weshalb sie üblicherweise nicht thermodynamisch behandelt werden kann.

Schließlich können Anlagen auch anhand der Positionierung der Lüftungsgeräte beschrieben werden in **zentrale und dezentrale Systeme**. Bei zentralen Anlagen werden entweder Zu- und/oder Abluft über Lüftungskanäle zu einer Zentrale gebracht bzw. von dort aus in die Räume verteilt. In dieser Zentrale finden je nach Anlage die thermodynamischen Behandlungsfunktionen statt. [11, S. 346] Im Gegensatz dazu werden bei dezentralen Anlagen mehrere kleine Geräte in den belüfteten Räumen oder Nutzungseinheiten selbst installiert. Diese sorgen dann lokal für den nötigen Luftaustausch. Lüftungskanäle werden dabei je nach System nicht zwingend zur Verteilung benötigt. Auch dezentralen Anlagen können über Luftbehandlungsfunktionen verfügen. Ebenso sind Mischformen aus zentralen und dezentralen Anlagen sind möglich, bei denen beispielsweise dezentrale Zuluftgeräte mit einem zentralen Abluftgerät kombiniert werden. [12, S. 405]

Bei Abluftsystemen muss genauer unterschieden werden, wo die Ventilatoren positioniert sind. Ein Gebäude mit zentralen Luftleitungen kann sowohl zentral als auch dezentral angeordnete Lüftungsgeräte besitzen (Abbildung 5). Diese Unterscheidung hat Einfluss auf die Lärmbelastung in den Nutzungseinheiten, den Installation- und Wartungsaufwand wie auch auf die Regelungsstrategie.

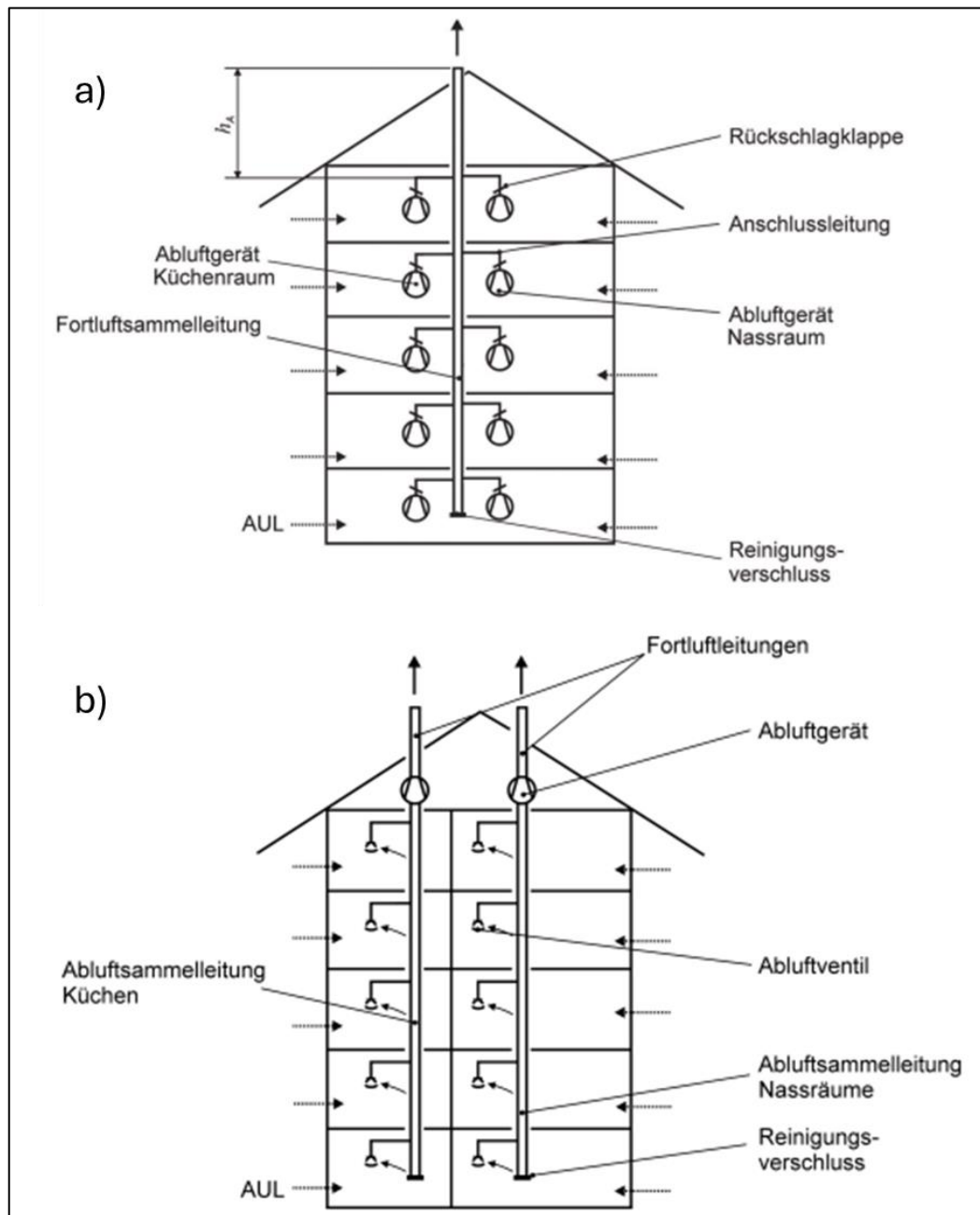


Abbildung 5: Varianten von Abluftsystemen mit dezentralen Einzelventilatoren (a) und Zentralventilatoren (b) [13, Sf. 8, 10]



## 2.2.2 Wärmepumpen

Wärmepumpen gehören zu den Kraftwärmemaschinen. Sie können unter Einsatz von mechanischer Energie Kältemittel von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau heben. Die Beschreibungen in diesem Abschnitt beziehen sich nur auf eine elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen, andere Bauformen werden nicht behandelt.

### 2.2.2.1 Funktion

Die Funktion einer Kompressionswärmepumpe kann als thermodynamischer Kreisprozess beschrieben werden. Die Komponenten einer Wärmepumpe sind schematisch in Abbildung 6 dargestellt. Gemeinsam mit dem Log-p-h-Diagramm in Abbildung 7 wird hier der Ablauf des idealisierten Kreisprozesses kurz beschrieben. Die einzelnen Schritte A bis D sind im Schema und im Zustandsdiagramm eingezeichnet. [14, Sf. 411-413]

1. Verdampfer  $D \rightarrow A$ : Das Kältemittel nimmt Wärme von der Wärmequelle auf. Das Kältemittel verdampft dabei.
2. Kompressor  $A \rightarrow B$ : Das gasförmige Kältemittel wird durch den Kompressor verdichtet – er leistet die Kompressionsarbeit. Dabei erhöhen sich Druck und Temperatur des Kältemittels.
3. Kondensator (Verflüssiger)  $B \rightarrow C$ : Das Kältemittel gibt Wärme ab und kondensiert dadurch.
4. Drosselventil  $C \rightarrow D$ : Das Kältemittel entspannt am Drosselventil. Es kühlt dabei ab.

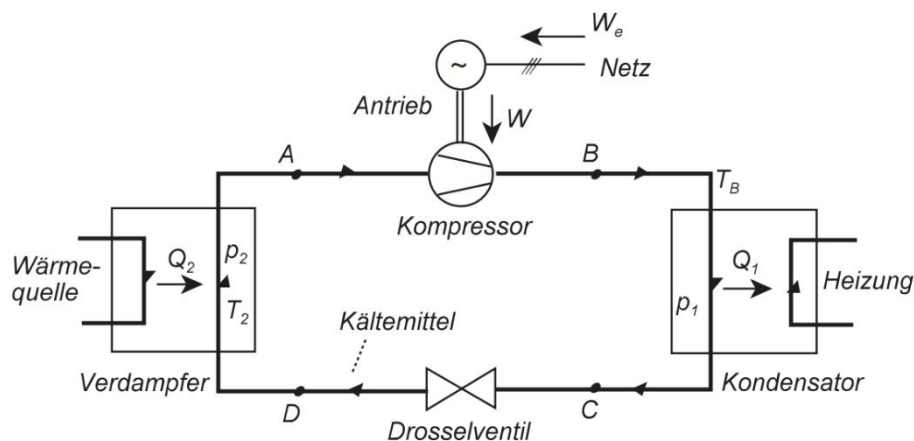


Abbildung 6: Prinzipschaltbild einer Kompressionswärmepumpe [14, S. 411]

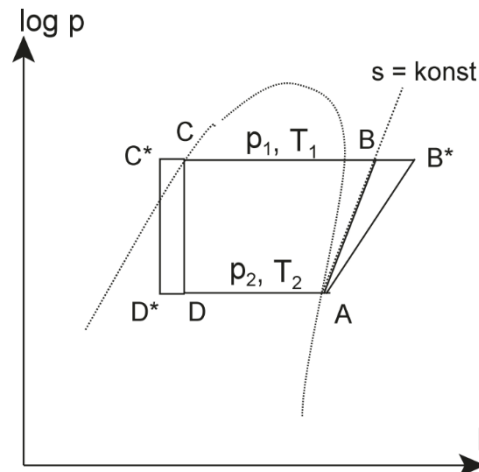


Abbildung 7: Log-p-h-Diagramm des idealisierten (ABCD) und realen (AB\*C\*D\*) Kreisprozessen [14, S. 412]

Dieser Ablauf ABCD stellt eine Idealisierung des realen Vorganges dar. Dieser wird im Log-p-h-Diagramm durch die Punkte AB\*C\*D\* gekennzeichnet. Die wichtigsten Unterschiede zwischen tatsächlichem und idealisiertem Verlauf haben ihre Ursachen in Reibungs-, Wärme- und mechanischen Verlusten (B\* und D\* statt B und D) sowie einer möglichen Unterkühlung des Kältemittels (C\* statt C). [14, Sf. 413-415]

Der Verdampfer stellt folglich die kältere Seite des Systems dar. Dort wird Wärme aufgenommen. Die Kondensatorseite ist wärmer und gibt Wärme ab. Folgende Wärmequellen kommen unter anderem in Frage [11, Sf. 247-250]:

- Erdreich: oberflächennah mithilfe von Erdkollektoren oder mit Tiefensonden
- Oberflächen- und Grundwasser
- Außenluft
- Abwärme beispielsweise aus der Abluft eines Gebäudes

In diesem Projekt stellt letzteres – also die Wärme aus Abluft – die Wärmequelle der Wärmepumpe dar.

Weitere Kreisläufe neben dem Kältemittelkreislauf der Wärmepumpe selbst können Teil der Anlage sein. So durchfließt beispielsweise bei einer Sole-Wasser-Wärmepumpe nicht das Kältemittel selbst die Kollektoren im Erdreich, sondern eine Sole, welche die Wärme zur Verdampferseite der Wärmepumpe transportiert. [11, S. 249]

### 2.2.2.2 Kennzahlen zur Beschreibung von Wärmepumpen

Zwei wichtige Kennzahlen, die zur Beschreibung von Wärmepumpen verwendet werden sind die Leistungszahl (Leistungsziffer,  $\epsilon$ ) und die Jahresarbeitszahl ( $\beta$ , JAZ). Die Leistungszahl drückt das Verhältnis von der abgegebenen Wärmeleistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung aus. [11, S. 251]

$$\varepsilon = \frac{\Phi_C}{P_{el}}$$

$\varepsilon$  Leistungszahl [-]

$\Phi_C$  vom Kondensator abgegebene Wärmeleistung [W]

$P_{el}$  zugeführte elektrische Leistung [W]

Die vom Kondensator abgegebene Wärmeleistung bzw. -energie setzt sich zusammen aus einem Anteil, der der Wärmequelle entzogen wurde und dem Anteil der eingebrachten elektrischen Energie. [11, S. 251]

$$\Phi_C = \Phi_U + P_{el}$$

$\Phi_C$  vom Kondensator abgegebene Wärmeleistung [W]

$\Phi_U$  von der Wärmequelle entzogene Wärmeleistung (Umweltwärme) [W]

$P_{el}$  zugeführte elektrische Leistung [W]

Abbildung 8 veranschaulicht diesen Sachverhalt in einem stark vereinfachten Energieflussdiagramm. [11, S. 249]

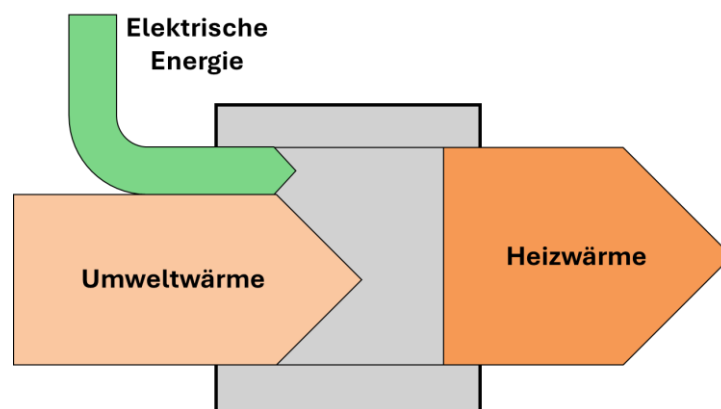


Abbildung 8: Vereinfachtes Energieflussdiagramm Wärmepumpe

Die Leistungsziffer wird auch als COP (von englisch „Coefficient of Performance“) bezeichnet und bezieht sich auf einen konkreten Betriebspunkt unter Laborbedingungen, bei dem Quellen- und Vorlauftemperatur vorgegeben sind. SCOP-Werte (Seasonal Coefficient of Performance) geben Werte für verschiedene Betriebspunkte an, um den Einsatz unter veränderlichen Randbedingungen (z. B. schwankende Quellentemperatur) besser zu beschreiben. [15, S. 29]

Die theoretische Obergrenze für die Leistungszahl lässt sich aus dem Carnot-Prozess zur Beschreibung der Wärmepumpe herleiten und kann mithilfe folgender Formel berechnet werden [11, Sf. 251, 252]:

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_{hot}}{T_{hot} - T_{cold}}$$

$\varepsilon_{max}$  maximale, theoretische Leistungszahl [-]

$T_{hot}$  Kondensatortemperatur [K]

$T_{cold}$  Verdampfertemperatur [K]

Aus dieser Formel kann gefolgert werden, dass die Leistungszahl mit steigender Verdampfertemperatur und mit sinkender Temperaturdifferenz zunimmt. Abbildung 9 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen der Leistungszahl einer Wärmepumpe und der Temperaturdifferenz (Temperaturhub) zwischen Kondensator und Verdichter. Bei geringerem Temperaturhub erhält man eine höhere Leistungszahl. [15, S. 29]

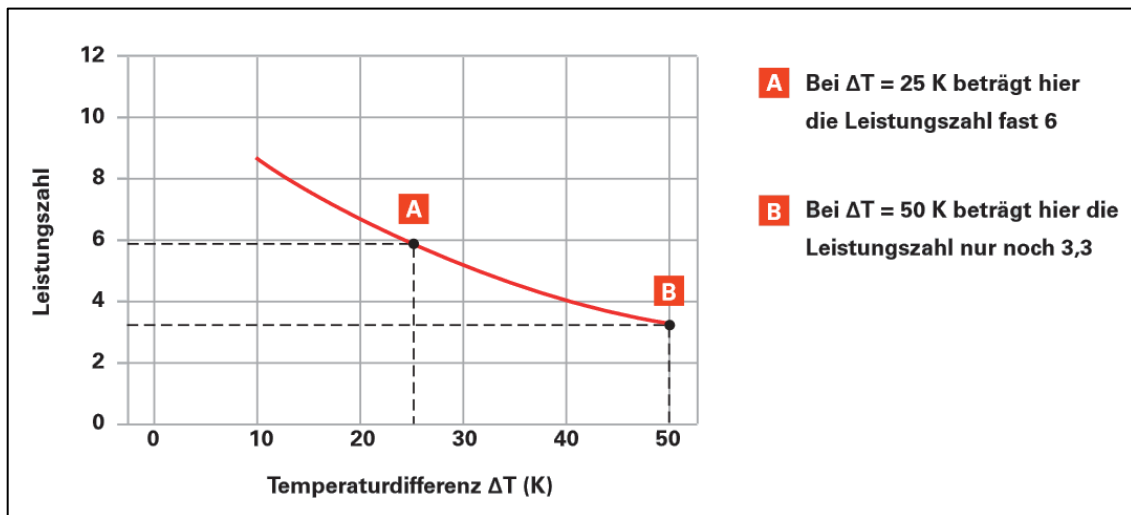


Abbildung 9: Zusammenhang der Leistungszahl und der Temperaturdifferenz zwischen Verdampf- und Kondensatorseite einer konkreten Wärmepumpe [16, S. 20]

Die Jahresarbeitszahl setzt hingegen erhaltene und eingesetzte Energien im Zeitraum eines Jahres ins Verhältnis.

$$\beta = \frac{\text{Heizwärme}}{\text{Antriebsenergie}}$$

$\beta$  Jahresarbeitszahl [-]

Der Betrachtungszeitraum für Heizwärme und Antriebsenergie beträgt üblicherweise ein Jahr. Sie stellt dadurch keinen Momentanwert dar, sondern fasst alle Betriebszustände eines Jahres zusammen. Während sich die Leistungszahl nur auf die Wärmepumpe bezieht, haben bei der JAZ auch die angrenzenden Systeme der Wärmenutzung einen Einfluss. Dadurch hängt die JAZ unter anderem auch vom Gebäude (thermische Qualität der Gebäudehülle), der Heizungsanlage (Systemtemperaturen) und dem Nutzerverhalten ab. [17, S. 6] Tabelle 2 gibt beispielhaft einige Werte für JAZ moderner Wärmepumpen an.

Tabelle 2: Typische Werte für JAZ von verschiedenen Wärmepumpen [11, S. 251]

Wärmequelle	Heiztemperaturen Vorlauf/Rücklauf [°C]	JAZ [-]
Grundwasser	55/45	3,8
	45/38	4,6
Erdreich	55/45	3,6
	45/38	4,2
Außenluft	55/45	2,7
	45/38	3,2

### 2.2.2.3 Betriebsarten von Wärmepumpen

Die Betriebsarten beschreiben, ob und wie die Wärmepumpenanlage unter bestimmten Randbedingungen – hier in Bezug auf die Temperatur der Wärmequelle bezogen – betrieben wird. Je niedriger die Quellentemperaturen, desto ungünstiger stellt sich die Situation für eine Wärmepumpe dar. Bei der Planung einer Anlage muss dieses Verhalten berücksichtigt werden. Bei Wärmepumpen werden folgende Betriebsarten unterschieden:

- Monovalent
- Bivalent-alternativ
- Bivalent-parallel
- Bivalent-teilparallel

Beim monovalenten Betrieb ist die Wärmepumpe der alleinige Wärmeerzeuger. Sie muss deshalb auf den ungünstigen Fall eines sehr kalten Tages ausgelegt werden, um auch in diesem Fall den gesamten Wärmebedarf abdecken zu können. Bei bivalenten Betriebsarten gibt es neben der Wärmepumpe noch weitere Wärmeerzeuger. Von bivalent-alternativ spricht man, wenn ab der Unterschreitung einer bestimmten Quellentemperatur (Bivalenzpunkt) die Wärmepumpe abgeschaltet und der alternative Wärmeerzeuger die gesamte Heizleistung übernimmt. Bivalent-parallele Systeme schalten bei Temperaturen unterhalb des Bivalenzpunktes den anderen Wärmeerzeuger hinzu, während die Wärmepumpe weiterhin in Betrieb ist. Auch eine Kombination aus beiden Betriebsarten ist möglich, dies wird als bivalent-teilparallel bezeichnet. Vor allem bei Wärmequellen deren Temperatur stark schwankt wie z. B. Außenluft werden bivalente Anlagen eingesetzt. [16, Sf. 108-110]

### 2.2.2.4 Leistungsregelung

Da Wärmepumpen aufgrund wechselnder Randbedingungen sowohl aufseiten der Wärmequelle als auch aufseiten des Wärmebedarfs nicht durchgehend im selben Betriebszustand gehalten werden können, ist eine Regelung der Anlage erforderlich. Unterschieden werden kann in Fixed-Speed- und drehzahlgeregelte Wärmepumpen. Fixed-Speed-Wärmepumpen kennen nur die beiden Betriebszustände ein und aus. Wird die Anlage eingeschaltet, läuft sie mit voller Leistung. Über- oder unterschreitet die Vorlauftemperatur einen eingestellten Wert, schaltet sich die Wärmepumpe aus bzw. ein (Abbildung 10, dünne blaue Linie). Häufiges Ein- und Ausschalten ist energetisch und in Hinsicht auf die Lebensdauer der Wärmepumpe nachteilig. Dies muss durch eine Abstimmung der Anlagenkomponenten und eine entsprechende Regelung vermieden werden. Leistungsgeregelte Wärmepumpen können ihre Heizleistung durch Änderung der Verdichterdrehzahl anpassen. Die Regelung ist allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen möglich. Vor allem bei Außenluftwärmepumpen ist diese Art der Regelung vorteilhaft. [15, Sf. 106-108]

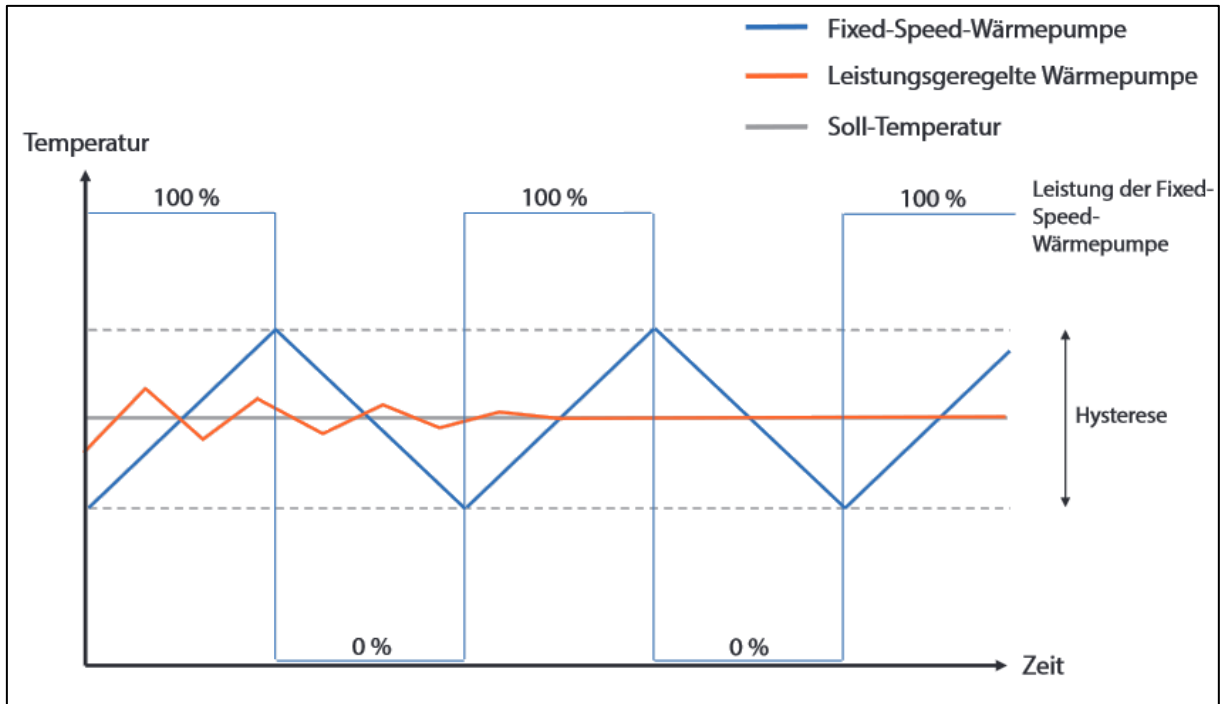


Abbildung 10: Arbeitsprinzip einer Fixed-Speed-Wärmepumpe und einer leistungsgeregelten Wärmepumpe [15, S. 106]

### 2.2.3 Wärmerückgewinnung mit Abluftwärmepumpen

Nachdem die Grundlagen der Lüftung und Wärmepumpen beschrieben wurden, kann näher auf jenes Thema eingegangen werden, das diese beiden Bereiche kombiniert – die Wärmerückgewinnung bei einer reinen Abluftanlage. In Abluftsystemen besteht keine Möglichkeit die Außenluft mit einem Wärmetauscher durch die Abluft vorzuwärmen und auf diese Weise Energie zurückzugewinnen. Deshalb bleibt – möchte man die Wärme nicht ungenutzt mit der Fortluft in die Umgebung abgeben – nur eine Abluftwärmepumpe als mögliche technische Lösung. Die so zurückgewonnene Wärme kann prinzipiell für die Raumheizung, die Warmwasserbereitung oder beides verwendet werden. Das Gesamtsystem besteht somit aus mehreren Anlagenkomponenten. Diese müssen sowohl untereinander als auch auf die Einflüsse aus dem Gebäude, der Umgebung und der Nutzung abgestimmt werden. Zusammengefasst sind hier einige wesentliche Punkte, die bei der Konzeption einer Abluftanlage mit Wärmepumpe beachtet werden können:

- Trinkwarmwasserbedarf: Entnahmemengen sowie deren zeitliche Verteilung
- Lüftung: Die Außenlufttemperaturen und die Höhe des benötigten Luftwechsels haben Einfluss auf den Lüftungswärmeverlust aber auch auf die Menge an nutzbarer Abluft.
- Thermische Qualität der Gebäudehülle: Sie wirkt sich auf die Transmissionswärmeverluste und die Infiltration durch Undichtigkeiten aus.
- Art der Heizung: Die Art der Wärmeabgabe an den Raum (z. B. Flächenheizung, Radiatoren) hat großen Einfluss auf die benötigten Systemtemperaturen und diese wirken sich wiederum auf die Effizienz der Wärmepumpe aus. Niedrigere Vorlauftemperaturen sind hier vorteilhaft.

- Speicher als Teil des Heizungs- und/oder Warmwassersystems, die als Puffer dienen.
- Zusammenspiel von Lüftungskonzept und Regelung der Wärmepumpe
- Zusätzliche Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser, falls die Abluftwärmepumpe alleine nicht ausreicht, den Bedarf abzudecken.

Die derzeit am Markt erhältlichen Abluftwärmepumpen eignen sich für verschiedene Anwendungsgebiete. Produkte für Einfamilienhäuser (z. B. NIBE F750, MAICO AWP 200 in Tabelle 3) werden zur Raumheizung und/oder Warmwasserbereitung eingesetzt. Sie sind in diesem Anwendungsbereich trotz der vergleichsweise niedrigen Heizleistung oft als einziges Wärmebereitstellungssystem eines Gebäudes vorgesehen. Deshalb wird von Herstellern häufig auf die hohen Wärmeschutzanforderungen bei Verwendung dieser Produkte hingewiesen. Für Wohngebäude mit mehreren Nutzungseinheiten gibt es einerseits Produkte für gebäudezentrale Abluftsysteme (z. B. Limodor WPL-3001, EcoHeater 060 und AWN WPA 240 in Tabelle 3). Eine Alternative für diesen Anwendungsbereich bieten dezentrale Systeme, die jeweils nur eine Wohnungseinheit versorgen.

Tabelle 3: Vergleich einiger Abluftwärmepumpen

Produkt	Einheit	NIBE SF750	MAICO AWP 200	Limodor WPL- 3001	EcoHeater 060	Aereco AWN WPA 240
<b>Max. Luftvolumenstrom</b>	m <sup>3</sup> /h	250	280	780	1800	1650
<b>Max. Heizleistung</b>	kW	5.3	2.1	1.9	14.6	5.6
<b>bei Vorlauftemperatur</b>	°C	45	-	55	40	35
<b>COP</b>	-	2.4 bis 5.3	4	3.2	4	6
<b>Fortlufttemperatur</b>	°C	bis -15	0-3	8	2	-
<b>Max. Vorlauftemperatur</b>	°C	70	55	70	-	-
<b>Quelle</b>		[18]	[19]	[20]	[21]	[22]

### 3 Randbedingungen für Klima und Nutzung

Ein Gebäude kann als System betrachtet werden, auf das Einflüsse von innen und außen einwirken. Um das Verhalten eines Gebäudes näher untersuchen zu können, ist es deshalb notwendig, die Einwirkungen zu quantifizieren. Zu diesem Zweck werden die allgemeinen Randbedingungen in Bezug auf Außen- und Innenklima sowie auf alle nutzungsbedingten Einflüsse auf das Gebäude behandelt. Das Außenklima umfasst alle relevanten Einflüsse, die von außen auf das Gebäude einwirken. Unter Innenklima wird hier das gewünschte Raumklima verstanden, das im Gebäude herrschen soll, um für die Nutzer eine behagliche Umgebung zu erzielen. Die nutzerbedingten Einflüsse beziehen sich auf alle Interaktionen und Austauschprozesse von Personen mit dem Gebäude wie z. B. Wärmeabgabe an den Raum, Warmwassernutzung oder auch die Lüftung eines Gebäudes.

Die Randbedingungen unterscheiden sich sowohl nach der Nutzung der Räume (z. B. Wohn- oder Büronutzung) als auch nach Art und Zielsetzung des Berechnungsverfahrens. Während beispielsweise für die Auslegung von Heizungssystemen ungünstige Extremsituationen relevant sind, werden bei der Berechnung des jährlichen Heizenergiebedarfs durchschnittliche Werte verwendet. Weiters hat die Art des Berechnungsverfahrens Einfluss auf die Eingangsdaten. Zeitlich fein aufgelösten Angaben für Simulationsberechnungen finden sich beispielsweise genauso wie monatliche Werte für Monatsbilanzverfahren.

#### 3.1 Normen und weitere Regelwerke

Als Quellen für die Randbedingungen dienen in erster Linie Normen und Richtlinien. Darüber hinaus wird in Fällen, bei denen Normen unzureichende Angaben machen oder spezielle Szenarien simuliert werden sollen, auf Fachliteratur und andere Quellen zurückgegriffen.

Die für Klima und Nutzung relevanten Angaben sind über mehrere Normen verteilt. Hier werden nur ein paar der wichtigsten Normen behandelt; die gesamten Normen zu Thema Energiebedarf von Gebäuden sind sehr umfassend. Des Weiteren muss die vorgesehene Verwendung der Normen berücksichtigt werden. So kann es vorkommen, dass beispielsweise mehrere Regelwerke zu Lüftungsraten und -verhalten Angaben machen, von denen sich eine Norm auf die Anlagendimensionierung bezieht, eine andere auf den Raumluftheizenergiebedarf und wieder eine andere auf die Lüftung bei Untersuchung der sommerlichen Überwärmung. Ebenso können verschiedene Regelwerke zu den selben Themen widersprüchliche Vorgaben machen.

Die meisten Werte und Inhalte in den Normen beziehen sich auf Berechnungsverfahren, die vereinfacht sind im Vergleich zu einer detaillierten dynamischen Gebäudesimulation. Das führt unter anderem auch dazu, dass bei zeitlich veränderlichen Eingangsparameter wie z. B. dem Warmwasserverbrauch oft nur Tagesverbräuche und keine zeitlich aufgelösten Werte angegeben sind. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Werte von manchen Normen als zusammengehörig zu betrachten sind und deshalb nicht nur einzelne Werte aus einer Norm herausgenommen und außerhalb des ursprünglichen Kontexts angewendet werden dürfen.



Die **ÖNORM B 8110-5** [23] gibt Randbedingungen in Bezug auf Außenklima, Raumklima und Nutzungsprofile für den Zweck der Berechnung von Heizwärmebedarf sowie Kühlbedarf (gem. ÖNORM B 8110-6-1) vor. Zusätzlich gibt sie Normaußentemperaturen für besonders kalte und warme Situationen vor, die z. B. bei der Beurteilung der sommerlichen Überwärmung und bei der Berechnung der Heizlast benötigt werden.

Die **ÖNORM B 8110-6-1** [24] regelt die Berechnung des Heizwärme- und des Kühlbedarfs von Gebäuden. Diese beiden Kennzahlen sind Bestandteil des Energieausweises. Randbedingungen aus Klima und Nutzung stammen aus der ÖNORM B 8110-5. Die Berechnung umfasst die Wärmeverluste aus Transmission und Lüftung sowie die Gewinne aus der Nutzung und der solaren Einstrahlung. Die Norm gibt in Reihenfolge abnehmender Genauigkeit folgende drei Verfahren zur Berechnung von Heizwärme- und Kühlbedarf an:

- Dynamische Verfahren
  - Berechnungsverfahren bei ausführlicher Simulation
  - Vollständig beschriebenes vereinfachtes Stunden-Berechnungsverfahren
- Quasi-stationäre Verfahren: Monatsbilanzverfahren

Die **ÖNORM B 8110-3** [25] beschäftigt sich in ihrer neuesten Version aus dem Juni 2020 mit der Ermittlung der operativen Raumtemperatur im Sommer. Sie legt damit ein Verfahren fest, mit dem die Gefahr sommerlicher Überwärmung beurteilt werden kann. Anwendbar ist die Norm für Wohngebäude wie auch Büroräume ohne aktive Kühlsysteme. Der Effekt der passiven Kühlung von mechanischen Lüftungssystem darf hingegen berücksichtigt werden. Das in der Norm beschriebene Verfahren stellt eine stundenweise Simulationsberechnung dar, dessen Ziel in diesem Fall die Ermittlung der operativen Raumtemperatur von einzelnen Räumen darstellt. In dieser Norm wird die operative Temperatur als arithmetischer Mittelwert aus der Raumlufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur definiert. Gemäß der Norm haben folgende Eigenschaften und Ausstattungen eines Gebäudes – ausschließlich aktiver Kühlsysteme – die größten Einflüsse auf die sommerliche Überwärmung aufgrund von Sonneneinstrahlung [25]:

- Strahlungsdurchlässige Flächen: Orientierung, Größe und Qualität
- Speicherwirksame Massen der raumbegrenzenden Bauteile sowie der Einrichtung
- Raumlüftung – insbesondere Nachtlüftung
- Sonnenschutz

Die Norm macht Angaben zu den anzuwendenden Randbedingungen in Bezug auf das Außenklima, die inneren Lasten und die Lüftung des Raumes. Die aktuelle Version aus dem Jahr 2020 macht im Gegensatz zu früheren Versionen keine Vorgaben zu den zulässigen Höchsttemperaturen. Die relevanten Obergrenzen sind in der OIB-Richtlinie 6 zu finden.

Die **OIB-Richtlinie 6** [26] beschäftigt sich allgemein mit Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden. Es werden unter anderem zulässige Grenzwerte für U-Werte, Luftdichtheit und sommerliche Höchsttemperaturen bei Neubau und Renovierung vorgeschrieben. Bei der sommerlichen Überwärmung (sommerlicher Wärmeschutz – Kap. 4.9 in [26]) wird zwischen Wohngebäuden (WG) und Nicht-Wohngebäuden (NWG) unterschieden. Die Vorgaben bestehen aus einem vorgeschriebenen Außenklima, standortabhängigen Obergrenzen für die maximal zulässigen Innenraumtemperaturen und Angaben zum ansetzbaren Lüftungsverhalten bei diesen Nachweisen.

Die **ÖNORM EN 16798-1** [6] **und -3** [27] beschäftigen sich mit der Lüftung von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Sie beinhalten umfangreiche Regelungen zur Bemessung von Luftvolumenströmen.

Die **DIN 1946-6** [9] befasst sich mit der Lüftung von Wohngebäuden und regelt dabei detailliert die Erstellung von Lüftungskonzepten für verschiedene Anlagentypen.

Die **Arbeitsstättenverordnung** (ASTVO) [28] enthält Regelungen, die relevant für die maximal erlaubte Belegungsdichte bei Bürogebäuden sowie Anforderungen an Behaglichkeit und Raumlüftung sind.

Die Schweizer Norm **SIA 2024** Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik [29] gibt Werte für Belegung und Nutzung für zahlreiche verschiedene Raumnutzungen an. Von besonderem Interesse sind die Tagesprofile für Personenbelegung und Gerätenutzung. Darüber hinaus werden auch einzelne Werte für Raumlüftung und Warmwassernutzung angegeben. Die Anzahl an unterschiedlichen Raumnutzungsarten ist im Vergleich zu anderen Normen deutlich höher.

Weitere in dieser Arbeit verwendete Normen sind:

- **ÖNORM H 6036** [13]: Bedarfsabhängige Lüftung von Wohnungen und Wohnbereichen
- **ÖNORM H 6038** [10]: Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Wohnungen mit Wärmerückgewinnung
- **ÖNORM EN 12831-3** [30]: Beschäftigt sich mit der Dimensionierung und Bedarfsbestimmung von Trinkwassererwärmungsanlagen

## 3.2 Außenklima

Zur Beschreibung des Außenklimas existieren verschiedene Ansätze. Entscheidend ist hierbei vor allem der Verwendungszweck eines Berechnungsverfahrens. Beispielsweise werden für die Auslegung von Heizungssystemen Extremwerte mit sehr niedrigen Temperaturen angewandt, die so nur selten auftreten. Dadurch soll gewährleistet sein, dass auch in diesen Fällen das Gebäude auf einem geforderten Temperaturniveau gehalten werden kann. Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs in einem Jahr wäre ein derartiges Klima jedoch zu kalt und würde demnach zu hohe Werte ergeben. Deshalb werden in diesem Fall durchschnittliche Temperaturen verwendet. Die Art des Berechnungsverfahrens bestimmt die Form der Daten. Vor allem bei den einfacheren Verfahren, die mit statischen oder quasi-statischen Ansätzen arbeiten, werden häufig Mittelwerte über längere Zeiträume (z. B. Monatsmittelwert der Außentemperatur) eingesetzt. Dynamische Verfahren mit kurzen Zeitschrittweiten benötigen hingegen zeitlich feiner aufgelöste Eingangsdaten.

### 3.2.1 Testreferenzjahre

Für Energiebedarf-Simulationen von Gebäuden werden Wetterdaten mit hoher zeitlicher Auflösung über den Zeitraum von einem Jahr benötigt. Die realen Werte unterscheiden sich von Jahr zu Jahr und eignen sich deshalb nicht für Untersuchungen, die repräsentativ und vergleichbar sein sollen. Deshalb werden für diesen Zweck aus realen Messdaten abgeleitete Testreferenzjahre (TRJ, engl. TRY – test reference year) erstellt.

Diese bestehen üblicherweise aus stündlichen Werten der für einen Anwendungszweck relevanten Klimaparameter über den Zeitraum eines Jahres. [31]

Für Testreferenzjahre gibt es verschiedene Anbieter. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein IWE2 Datensatz von AHSRAE verwendet. Der Messstandort ist der Flughafen Graz (Thalerhof). Folgende Parameter sind im Datensatz enthalten:

- Trockenkugeltemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit: aufgeteilt in Komponenten in x- und y-Richtung um auch die Windrichtung zu erfassen
- Direktstrahlung
- Diffusstrahlung
- Bewölkungsgrad
- Niederschlagshöhe

Für jeden dieser Parameter gibt es 8784 Stundenwerte. Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Außentemperatur des verwendeten Testreferenzjahres.

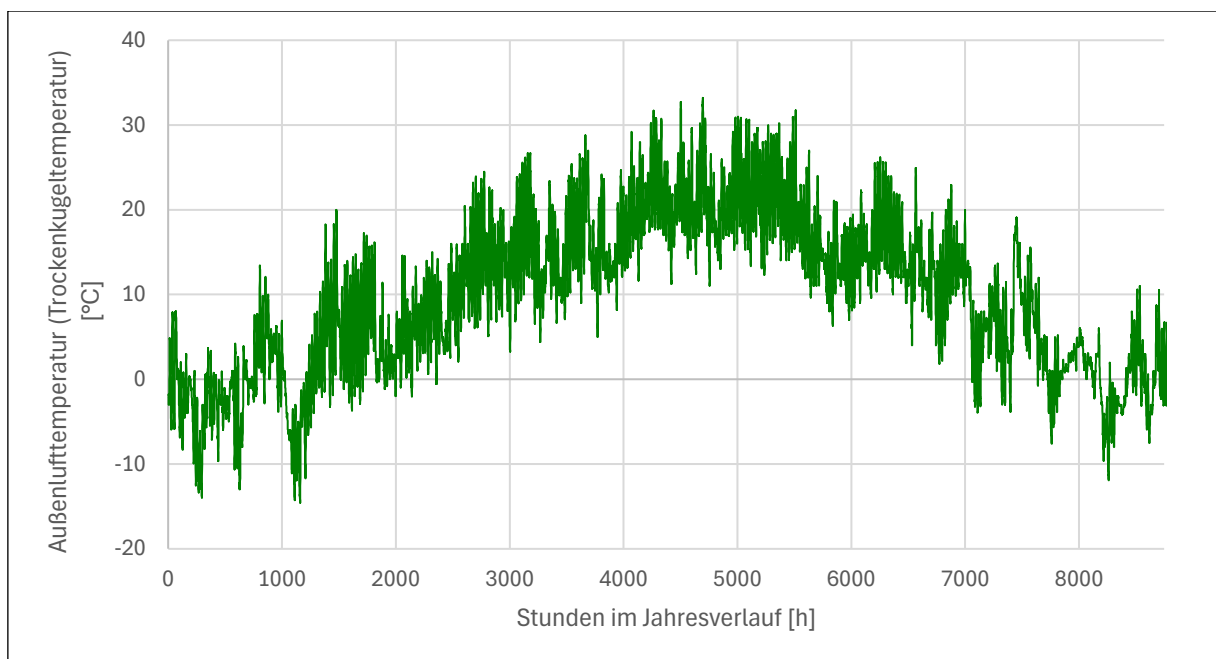


Abbildung 11: Außentemperatur Flughafen Graz IWE2 (2021) von AHSRAE

### 3.2.2 Systemauslegung

Für Systemauslegungen werden häufig klimatische Extremwetterlagen verwendet, die so nur selten auftreten. Die ÖNROM B 8110-5 [23] gibt für besonders kalte und besonders warme Situationen Normtemperaturen vor. Die Normaußentemperatur ( $\theta_{ne}$ ) stellt das tiefste Zweitagesmittel der Lufttemperatur, das 10 Mal in 20 Jahren erreicht oder unterschritten wird dar. Die Normsommeraußentemperatur ( $\theta_{MAX,13}$  oder auch  $T_{NAT,13}$ ) ist jene Außenlufttemperatur, die an 130 Tagen in 10 Jahren überschritten wird.

Für die Berechnung der beiden Werte verweist die Norm auf vom OIB zur Verfügung gestellten Excel-Dateien. Für den Standort des untersuchten Gebäudes in Graz, Katastralgemeinde St. Leonhard und eine Seehöhe von 357 m.ü.A. erhält man folgende Temperaturen:

- Normaußentemperatur:  $-10,5\text{ °C}$  [32]
- Normsommeraußentemperatur:  $22,3\text{ °C}$  [33]

### 3.2.3 Normaußenklima für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes

Das Außenklima für die Untersuchung der Gefahr der sommerlichen Überwärmung setzt sich aus den Angaben der ÖNORM B 8110-5 und der ÖNORM B 8110-3 zusammen. Es basiert laut ÖNORM B 8110-3 auf einem durchschnittlichen Sommer. Daraus abgeleitet wird ein synthetisches, sich täglich periodisch wiederholendes Außenklima festgelegt. Auf den Tagesmittelwert (entspricht der Normsommeraußentemperatur) aus der ÖNORM B 8110-5 werden für jede Stunde im Tagesverlauf die in 8110-3 Anhang A angegebenen Temperaturabweichungen angewendet. [25] Die Werte sind für den Standort des untersuchten Gebäudes in Graz in Abbildung 12 dargestellt. Das Temperaturmaximum liegt im Tagesverlauf bei  $28,94\text{ °C}$  um 16:00 Uhr, das Minimum mit  $15,02\text{ °C}$  um 5:00 Uhr.

Somit ist der Tagesmittelwert standortabhängig, die Amplitude und Form der Temperaturschwankung im Tagesverlauf aber stets einheitlich. Daraus erhält man die Außenlufttemperaturen im Tagesverlauf. Auch die Stärke der solaren Einstrahlung wird geregelt. Dieses Außenklima wird später für den Nachweis der sommerlichen Überwärmung verwendet.

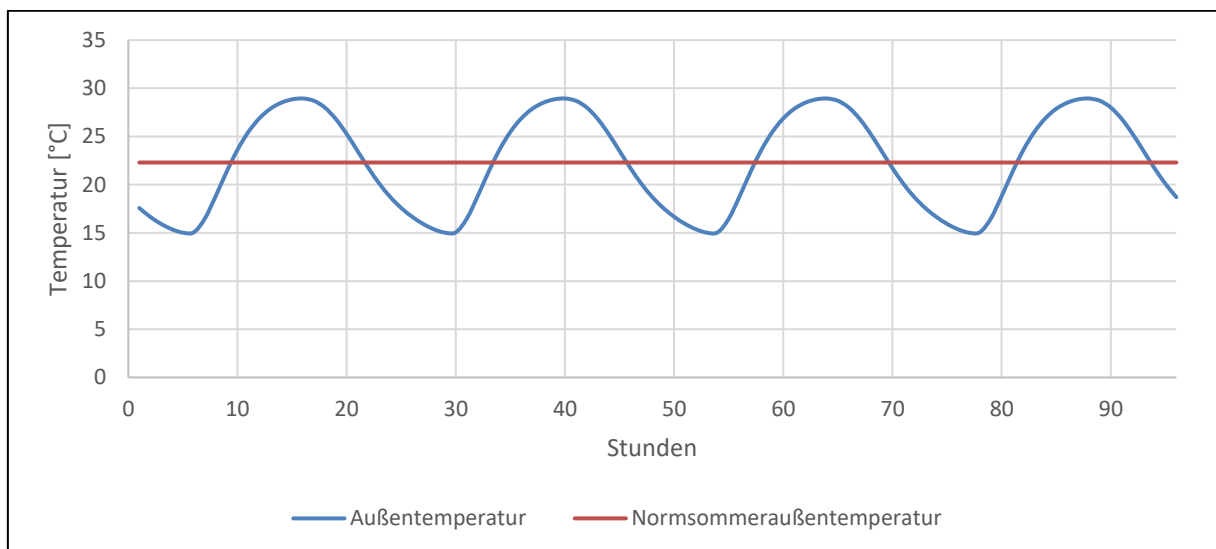


Abbildung 12: Außen temperaturverlauf für den normgerechten Nachweis der sommerlichen Überwärmung

### 3.3 Raumklima

Das Raumklima (Innenklima) beschreibt alle physikalischen Parameter, die aus Sicht von Nutzern und aus Sicht der Bauphysik relevant sind. Es hat daher entscheidenden Einfluss auf die Behaglichkeit für anwesende Personen und den Energiebedarf eines Gebäudes.

#### 3.3.1 Behaglichkeit

Gemäß [34, S. Kap. 7] ist thermische Behaglichkeit „definiert als das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt.“ Aufgrund des Stoffwechsels besitzt der Körper eines Menschen eine Wärmeleistung. Gleichzeitig steht er über Konvektion, Wärmeleitung, Strahlung, Atmung und Verdunstung auch im Austausch mit seiner Umgebung. Soll ein Raumklima für einen Menschen aus thermischer Sicht als behaglich gelten, müssen die physikalischen Parameter der Umgebung diesem die Wärmeabgabe im passenden Ausmaß ermöglichen. Aus diesem Austauschprozess lassen sich folglich einige Einflussfaktoren ableiten, von denen die Wahrnehmung des Umgebungsklimas durch einen Menschen und seine Zufriedenheit damit abhängen. Die wichtigsten davon sind [35, S. 2, 3]:

- Raumlufttemperatur
- Oberflächentemperatur der umgebenden Oberflächen (Wände, Decken, Fenster, Fußböden etc.)
- Luftfeuchtigkeit
- Luftbewegung
- Körperliche Aktivität einer Person
- Kleidung
- Raumluftqualität

Weitere Einflüsse wie beispielsweise die Raumakustik oder die Beleuchtungssituation haben ebenso Einfluss auf das Wohlbefinden eines Menschen in seiner Umgebung. Diese werden hier allerdings nicht weiter betrachtet, weil der Schwerpunkt in dieser Arbeit auf der thermischen Behaglichkeit liegt.

Ein Modell zur Beschreibung und Bewertung von thermischer Behaglichkeit gibt die ÖNORM EN ISO 7730. Für diese Zwecke wurden das Predicted Mean Vote (PMV) und Predicted percentage dissatisfied (PMD) eingeführt. Das PMV besteht aus einem siebenstufigen Index (Abbildung 13, links), der das Empfinden einer großen Personengruppe vorhersagt und von kalt über neutral bis heiß reicht. Das Modell beruht auf dem Wärmegleichgewicht des Körpers mit dem Umgebungsklima – dem Punkt, an dem sich die Wärmeerzeugung des Körpers dessen Wärmeabgabe an die Umgebung ausgleichen. [34]

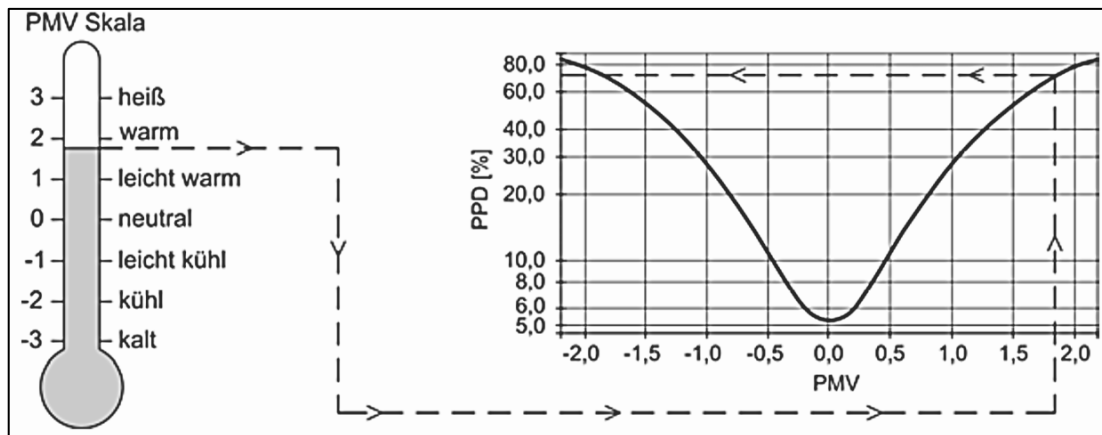


Abbildung 13: Zusammenhang PMV und PPD [35, S. 6]

Das PPD drückt aus, wie groß der Anteil an Personen ist, die mit dem Umgebungsklima unzufrieden sind. Im Sinne der ISO 7730 werden darunter Personen verstanden, die auf dem PMV-Stufen nicht auf den Stufen -1 bis +1 liegen. Aufgrund individueller Unterschiede in der Wahrnehmung, empfinden selbst bei einem PMV von 0 (neutral) nicht alle Personen einer größeren Gruppe das Raumklima als behaglich (also im Bereich -1 bis +1).

Um die körperliche Aktivität und die Bekleidung der Personen im Modell berücksichtigen zu können, werden der Aktivitäts- und Bekleidungsgrad (Bekleidungsisolationswert) verwendet. Der Aktivitätsgrad wird zur Beschreibung des Energieumsatzes eines Menschen verwendet. Bei körperlich anstrengenderem Verhalten besitzt ein Mensch einen höheren Energieumsatz und dementsprechend auch einen höheren Aktivitätsgrad. Gemessen wird dieser entweder in  $\text{W/m}^2$  Körperoberfläche oder in metabolische Äquivalenten (met). Diese Met-Werte geben das Verhältnis des Energieumsatzes eines Menschen bei einer gewissen Tätigkeit im Verhältnis zu dem Energieumsatz bei Ruhe (sitzend) an. Sitzende Bürotätigkeit hat beispielsweise einen Energieumsatz von 1,2 met. Der Bekleidungsisolationswert beschreibt den Einfluss der Kleidung auf das Wohlbefinden des Menschen, gemessen in der Einheit clo. Die Kombination aus Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe hat beispielsweise einen Wert von 1,0 clo. [34]

Zusätzlich zur Betrachtung der gesamten Wärmebilanz eines Menschen können auch lokale Effekte für Unbehagen sorgen. Die in der ÖNORM EN ISO 7730 behandelten Einflüsse umfassen [34]:

- Zugluft
- Vertikaler Lufttemperaturunterschied
- Warme und kalte Fußböden
- Asymmetrie der Strahlungstemperatur
- Luftfeuchte

### 3.3.2 Solltemperaturen

Temperaturgrenzen für das Raumklima lassen sich in vielen Normen finden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Werte. Für verschiedene Szenarien und Anwendungen (z. B. Auslegung Heizung, Energiebedarf Heizen) können unterschiedliche Werte gelten.

Tabelle 4: Soll-Temperaturen im Innenbereich

Regelwerk Nutzung	Anwendung	Wert [°C]
ÖNORM B 8110-5 [23]		
Wohngebäude mit 3 bis 9 NE	Solltemperatur Heizfall	22,0 °C
	Solltemperatur Kühlfall	k. A.
Bürogebäude	Solltemperatur Heizfall	22,0 °C
	Solltemperatur Kühlfall	26,0 °C
OIB Richtlinie 6 [26]		
Büros und Wohnräume	Obergrenze für Nachweis sommerliche Überwärmung,	$1/3 \cdot T_{\text{NAT},13} + 21,8$ °C
	Wert am Standort Lessingsstraße 27 in Graz	29,2 °C
SIA 2024 [29]		
Wohnen MFH	Auslegungswert Heizung	21,0 °C
	Auslegungswert Kühlung	26,0 °C
	Mittlere Raumtemperatur - Jährlicher Klimakältebedarf	25,0 °C
	Mittlere Raumtemperatur - Jährlicher Heizwärmebedarf	22,0 °C
Einzel, Gruppenbüro	Auslegungswert Heizung	21,0 °C
	Auslegungswert Kühlung	26,0 °C
	Mittlere Raumtemperatur - Jährlicher Klimakältebedarf	25,0 °C
	Mittlere Raumtemperatur - Jährlicher Heizwärmebedarf	22,0 °C
ÖNORM EN 16798-1 [6]		
Wohngebäude mit masch. Kühlung	Mindestwert - Heizfall, Kategorie II, 1,2 met, 1,0 clo	20,0 °C
	Höchstwert - Kühlfall, Kategorie II, 1,2 met, 0,5 clo	26,0 °C
Büros mit masch. Kühlung	Mindestwert - Heizfall, Kategorie II, 1,2 met, 1,0 clo	20,0 °C
	Höchstwert - Kühlfall, Kategorie II, 1,2 met, 0,5 clo	26,0 °C
Wohnungen und Büros ohne masch. Kühlung	siehe Abbildung 14	
Arbeitsstättenverordnung (AStV) [28]		
geringe körperliche Belastung (Büro) normalerweise	zulässige Untergrenze Lufttemperatur	19,0 °C
	zulässige Obergrenze Lufttemperatur	25,0 °C
in der warmen Jahreszeit	möglichst einzuhaltende Obergrenze	25,0 °C

Die meisten Vorgaben liegen damit im Bereich von 20 – 22 °C als Untergrenze und 25 – 26 °C als Obergrenze. Die Obergrenze gemäß AStV § 28 für die warme Jahreszeit bezieht sich auf Gebäude mit einer Klima- oder Lüftungsanlage und soll möglichst nicht überschritten werden. Ist dies nicht möglich, sollen sonstige Maßnahmen zum Zweck einer Temperaturabsenkung getroffen werden. Diese umfassen unter anderem auch Nachtlüftung und Sonnenschutz. Ein zwingender Einbau einer Klimaanlage ist hingegen nicht vorgeschrieben. [36]

Die Höchstgrenze für den Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz in der OIB-Richtlinie 6 ist im Gegensatz zu den anderen Werten außentemperatur- und standortabhängig. Für Wohngebäude werden zwei Bedingungen angegeben, von denen eine erfüllt werden muss. Unter Ansatz eines sich täglich periodisch wiederholenden Außenklimas, bei dem die Temperatur um den Tagesmittelwert  $T_{NAT,13}$  schwankt (3.2.3), darf folgende Obergrenze der operativen Temperatur nicht überschritten werden:

$$T_{op,max} = \frac{1}{3} \cdot T_{NAT,13} + 21,8 \text{ °C}$$

Für den Standort des untersuchten Gebäudes mit Standort Graz, Katastralgemeinde St. Leonhard und Seehöhe 357 m.ü.A. beträgt  $T_{NAT,13}$  22,3 °C. [33] Damit folgt für die Anforderung laut OIB-RL 6:

$$T_{op,max} = \frac{1}{3} \cdot 22,3 \text{ °C} + 21,8 \text{ °C} = 29,23 \text{ °C}$$

Für Nichtwohngebäude gibt die Norm einen maximal zulässigen außeninduzierten Kühlbedarf (KB\*) vor. Der außeninduzierte Kühlbedarf unterscheidet sich vom gewöhnlichen Kühlbedarf dadurch, dass bei der Berechnung die inneren Wärmelasten gleich Null gesetzt werden und als Luftwechsel nur die Infiltration mit  $n_x = 0,15$  1/h berücksichtigt wird.

Für den Standort des untersuchten Gebäudes in Graz liegt die Obergrenze gemäß OIB-Richtlinie 6 bei 29,23 °C unter den für den Nachweis vorgeschriebenen äußeren und inneren Randbedingungen. Diese Forderung ist damit wesentlich leichter zu erfüllen als die früheren österreichischen Vorgaben. In der vorherigen Ausgabe der ÖNORM B 8110-3:2012 [37] waren folgende Obergrenzen für die operative Raumtemperatur unter den Randbedingungen des Nachweiseverfahrens vorgeschrieben:

- normal max. 27 °C
- nachts in Schlafräumen (22-6 h) max. 25 °C

Auch die ÖNORM EN 16798-1 gibt im Anhang B Vorschläge für die Raumtemperatur im Sommerfall bei nicht maschinell gekühlten Gebäuden, die von der Außentemperatur abhängen. Der gleitende Mittelwert der Außentemperatur berechnet sich mit einer eigenen Formel aus den Werten der letzten paar vergangenen Tage. Das entsprechende Diagramm ist in Abbildung 14 dargestellt.



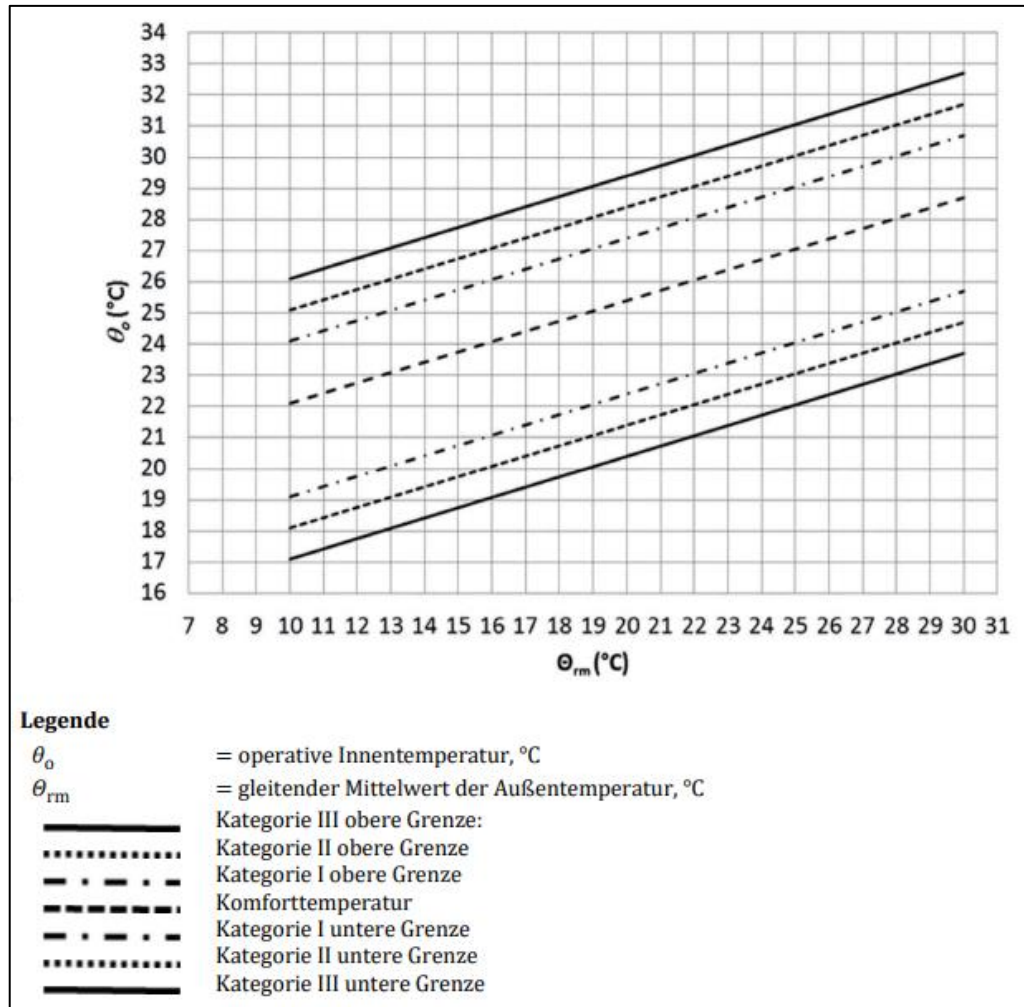


Abbildung 14: Innentemperaturgrenzen für nicht maschinell gekühlte Räume gemäß ÖNORM EN 16798-1 Anhang B [6]

### 3.3.3 Raumlufte

Die Qualität der Luft in den Räumen eines Gebäudes spielt eine erhebliche Rolle für den Komfort der sich dort aufhaltenden Personen. Neben den schon in Kapitel 3.3.1 erwähnten Eigenschaften Lufttemperatur und -feuchtigkeit sind für die Beurteilung der Qualität von Raumlufte noch weitere Parameter relevant. Im Kontext der Belüftung von Räumen, die für den Aufenthalt von Menschen vorgesehen sind, bezieht sich dies auf unerwünschte Stoffe, mit welchen sich Raumlufte anreichern kann. Diese können von Personen in den Räumen stammen, von Materialien an die Luft abgegeben werden oder bei Tätigkeiten bzw. Prozessen (z. B. Kochen) entstehen. Wichtige Stoffe und einige beispielhafte Quellen sind [8, S. 5]:

- Kohlenstoffdioxid-Gehalt: Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt erhöht sich aufgrund der Atmung von Personen.
- Gerüche: Ausdünstungen von Menschen oder abgegeben bei Prozessen (z. B. Kochen)

- Luftfeuchtigkeit: Die Feuchtigkeit in der Luft kann von Menschen selbst abgegeben werden oder auch bei Prozessen entstehen.
- VOC-Gehalt (Volatile Organic Compounds): flüchtige organische Verbindungen

Einer der bedeutendsten Faktoren aus diesen Belastungen ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft. Dieser Parameter wird oft als Kriterium für die Einteilung der Raumluft in verschiedene Qualitätsstufen verwendet. Auch die vor geraumer Zeit postulierte „Pettenkofer-Zahl“ bezieht sich auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt und setzt die Obergrenze auf 1000 ppm CO<sub>2</sub> in der Raumluft. Die ÖNORM EN 16798-1 Anhang B empfiehlt die in Tabelle 5 angeführten Stufen für CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumluft. Die römischen Ziffern I bis IV beziehen sich auf die Kategorien der Innenraumqualität. Durchschnittliche Anforderungen entsprechen der Kategorie II (mittel). [6]

Tabelle 5: Grenzwerte für CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen

Kategorie	Maß an Erwartungen	Auslegungswert der $\Delta\text{CO}_2$ -Konzentration über der Außenluft in Wohnzimmern	CO <sub>2</sub> -Konzentration in Wohnzimmern bei 400 ppm CO <sub>2</sub> in der Außenluft
		ppm	ppm
I	hoch	550	950
II	mittel	800	1200
III	moderat	1350	1750
IV	niedrig	1350	1750

Aufgrund der Bedeutung des CO<sub>2</sub>-Gehalts für die Raumluft kann dieser Wert auch für die Regelung von mechanischen Lüftungsanlagen sowie zur Auslegung dieser verwendet werden. [27]

### 3.4 Luftaustausch

Um die durch das Lüften von Räumen verlorene oder eingebrachte Wärme quantifizieren zu können, ist es zunächst notwendig, die Menge der ausgetauschten Luft zu erfassen. Unterschieden wird zwischen beabsichtigtem Luftaustausch und unkontrollierter aber unvermeidbarer Infiltration. Je nach Zweck und Rahmenbedingungen variieren die Lüftungsraten. So kann es beispielsweise sein, dass zur Energieeinsparung im Winter nur der hygienisch nötige Mindestluftwechsel abgedeckt wird, während bei der Nachtlüftung im Sommer zur Abfuhr von Wärme aus den Innenräumen auch höhere Luftwechsel erwünscht und zweckmäßig sind. Ebenso wird bei Lüftungsanlagen unterschieden zwischen Auslegung (Dimensionierung) und Betrieb des Systems.

#### 3.4.1 Lüftung

Unter Lüftung wird in diesem Abschnitt der durch verschiedene Maßnahmen bewusst hervorgerufene Luftwechsel verstanden. Es stehen mehrere Ansätze zur Bemessung des ausgetauschten Luftvolumens zur Verfügung [11, S. 367]:

- Luftwechselzahlen
- Außenluftstraten
- Grenzwert für Konzentrationen – meist CO<sub>2</sub>

- Heizen oder Kühlen durch Zuluft: Dieser Bemessungsansatz wird mangels Umsetzbarkeit bei reinen Abluftanlagen hier nicht näher behandelt.

Es gibt eine Vielzahl an Normen, die jeweils unterschiedliche Bemessungsansätze und Werte vorgeben. Ohne zusätzliche Informationen zum Gebäude bzw. den Räumen (Größe, Personenbelegung), ist es nicht möglich, die Werte miteinander zu vergleichen. In diesem Abschnitt erfolgt nur eine allgemeine Beschreibung der Vorschriften. Die Anwendung von ausgewählten Werten für ein konkretes Gebäude findet sich in (5.1.3).

Die Angaben für Büro- und Wohnnutzung unterscheiden sich häufig darin, dass bei ersterem nur die Büroräume beschrieben werden und bei letzterem üblicherweise die gesamte Wohneinheit als Ganzes betrachtet wird.

### 3.4.1.1 Darstellung des Luftwechsels

**Luftwechselzahlen** (Formelzeichen:  $n$ ) geben an, wie oft pro Stunde das Luftvolumen eines Raumes ausgetauscht wird – sie besitzen deshalb die Einheit  $1/h$ . [11, S. 367] Der mit Luftwechselzahlen berechnete Luftvolumenstrom hängt folglich nicht von anderen Umständen wie Personenanzahl ab. Zu beachten ist der Zusammenhang zwischen dem berechneten Luftvolumenstrom und der Raumgeometrie. Höhere Räume hätten bei gleicher Luftwechselzahl einen höheren Luftvolumenstrom, obwohl – gleiche Nutzfläche vorausgesetzt – nicht mehr Personen in einem Raum Platz finden. Gerade bei Gründerzeitgebäuden mit ihren typischerweise hohen Räumen kann dieser Umstand ins Gewicht fallen. Manche Angaben erwähnen zusätzlich eine bestimmte Raumhöhe, auf die sich Angaben beziehen. In der ÖNORM B 8110-6-1 wird das energetisch wirksame Luftvolumen z. B. aus der Nettogrundfläche und einer fixen Raumhöhe von 2,6 m berechnet. [24] Die ÖNORM H 12831-1 schreibt hingegen vor, bei Raumhöhen über 3 m die dort angegebenen Luftwechselzahlen um 10 % zu reduzieren. [38] In dieser Arbeit werden Luftwechselzahlen, sofern nicht anders angegeben, mit der „fiktiven“ Raumhöhe von 2,6 m berechnet, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen. Er wird in Anlehnung an die ÖNORM B 8110-6-1 auch „energetisch wirksamer“ Luftwechsel genannt.

**Außenluftvolumenströme** geben die Menge an zuzuführender Außenluft pro Zeiteinheit an, welche die bestehende Raumluft verdünnt und auf diese Weise eine akzeptable Raumluftqualität sicherstellen soll. Sie werden meist auf Personen oder Bodenfläche bezogen und folglich in den Einheiten  $m^3/(h \cdot \text{Person})$  bzw.  $m^3/(h \cdot m^2)$  angegeben; manchmal auch als fixe Werte pro Raum. [11, S. 367] Stehen zusätzliche Angaben wie Raumgeometrie und Nutzfläche pro Person zur Verfügung, können Luftwechselzahlen und Außenluftstraten ineinander umgerechnet und somit verglichen werden. Beispielsweise hat ein Büroraum mit  $30 m^2$  Nutzfläche, einer Raumhöhe von 2,5 m und 2 anwesenden Personen bei einer Außenlufttrate von  $30 m^3/(h \cdot \text{Person})$  eine Luftwechselzahl von  $0,8 1/h$ .

$$n = \frac{30 \frac{m^3}{h \cdot \text{Person}} \cdot 2 \text{ Personen}}{30 m^2 \cdot 2,5 m} = 0,8 \frac{1}{h}$$

**Grenzwerte für Konzentration** können sich auf verschiedene Stoffe beziehen. In gewöhnlichen Aufenthaltsräumen ohne spezielle Quellen für andere relevante Stoffe wie beispielsweise Labore oder Industrieanlagen wird meist die  $CO_2$ -Konzentration in der Luft als Kriterium verwendet. Für die Berechnung des benötigten Luftvolumenstrom basierend auf Stoffkonzentrations-Grenzwerten werden die zulässige Grenzkonzentration, die Emissionsrate des Stoffes und die Konzentration in der Frischluft benötigt.

Dieser Ansatz wird in der ÖNORM EN 16798-1 – Verfahren 2 verwendet [6]:

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v}$$

$Q_h$  erforderlicher Außenluftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$G_h$  Emissionsrate des Stoffes [ $\mu\text{g}/\text{s}$ ]

$C_{h,i}$  Grenzwert für den betrachteten Stoff in der Raumluft [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

$C_{h,o}$  Konzentration des Stoffes in der Zuluft [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

$\varepsilon_v$  Lüftungseffektivität

Die Lüftungseffektivität berücksichtigt dabei, wie gut Zuluft und Raumluft durchmischt werden. Vollständige Durchmischung hat eine Lüftungseffektivität von 1.

### 3.4.1.2 Werte zur Bemessung des Luftwechsels

Literaturwerte für anzustrebende Luftwechselzahlen weisen eine große Bandbreite auf. [11] gibt für Büroräume einen 3- bis 6-fachen Luftwechsel pro Stunde und für Wohnräume 0,5 bis 1 1/h an.

In der **ÖNORM H 6038** [10] wird der Ansatz mit den Grenzwerten für die  $\text{CO}_2$ -Konzentration angewendet. Da der Stoffwechsel des Menschen aktivitätsabhängig ist, erhöht sich bei anstrengenden Tätigkeiten auch die  $\text{CO}_2$ -Emissionsrate. Tabelle 6 zeigt den Zusammenhang zwischen Aktivität,  $\text{CO}_2$ -Abgabe und benötigtem Außenluftvolumenstrom. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Außenluft wurde dabei mit 400 ppm angesetzt.

Tabelle 6: Aktivitätsgrad und  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von Personen [10]

	Einheit	Tätigkeit	
		ruhend	entspanntes Sitzen
Aktivitätsgrad gem. ÖNORM EN ISO 7730	met	0,8	1,0
$\text{CO}_2$ -Abgabe pro Person	$\text{L}/(\text{h} \cdot \text{Person})$	14,4	18,0
AUL-Volumenstrom bei Grenzwert 1000 ppm $\text{CO}_2$	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$	24	30

Die **ÖNORM B 8110-5** gibt die Werte für Luftwechsel in Form von Luftwechselzahlen an. Abhängig von Nutzung und Art bzw. Zweck der Lüftung unterscheiden sich die Werte. Tabelle 7 zeigt die Werte der relevanten Nutzungskategorien. Für Wohngebäude wird nur der hygienisch notwendige Luftwechsel angegeben. Bei Bürogebäuden werden zusätzlich Luftwechselraten für die mechanische Lüftung und für die Nachtlüftung sowie entsprechende Betriebsstunden pro Tag festgelegt. Es ist dabei zu beachten, dass die Werte der ÖNORM B 8110-5 meist für Energiebedarfsberechnungen verwendet werden und nicht notwendigerweise geeignet sind, um Systeme auszulegen. Normen, die sich auf Werte der ÖNORM B 8110-5 beziehen (z. B. ÖNORM H 5057, ÖNORM B 8110-6-1), verwenden sie oft um sogenannte „energetisch wirksame“ Luftwechsel zu berechnen.

Tabelle 7: Luftwechselzahlen für Wohn- und Bürogebäude gemäß ÖNORM B 8110-5 [23]

	Wert	Einheit
<b>Wohngebäude mit 1 bis 2 Nutzungseinheiten</b>		
Hygienisch notwendiger Luftwechsel $n_{L,hyg}$	0,28	1/h
Tägliche Betriebszeit der Nachtlüftung $t_{NL,d}$	8	h/d
<b>Wohngebäude mit 3 bis 9 Nutzungseinheiten</b>		
Hygienisch notwendiger Luftwechsel $n_{L,hyg}$	0,38	1/h
Tägliche Betriebszeit der Nachtlüftung $t_{NL,d}$	8	h/d
<b>Bürogebäude</b>		
Hygienisch notwendiger Luftwechsel $n_{L,hyg}$	1,05	1/h
Luftwechselrate durch mechanische Lüftung $n_{L,mL}$ oder $n_{L,RLT}$	2,00	1/h
Tägliche Betriebszeit der raumlufthechnischen Anlage $t_{RLT,d}$	14	h/d
Luftwechselrate bei Nachtlüftung $n_{L,NL}$	1,50	1/h
Tägliche Betriebszeit der Nachtlüftung $t_{NL,d}$	8	h/d

Die **ÖNORM B 8110-6-1** (Heizwärme- und Kühlbedarf) verwendet diese Regelungen und ergänzt sie. Für die Nachtlüftung im Kühlfall dürfen die Betriebsstunden der Nachtlüftung mit maximal 8 Stunden angesetzt werden. Bei natürlicher Nachtlüftung (Fensterlüftung) darf der erhöhte Luftwechsel von 1,5 1/h nur angesetzt werden, wenn das Gebäude trotz Fensterlüftung gegen Einbruch, Sturm und Tierschäden gesichert ist. Um bei mechanischer Lüftung die Nachtlüftung anrechnen zu können, muss die Anlage eine zeit- oder nutzungsabhängige Steuerung besitzen. Es dürfen auch höhere Werte für den Luftwechsel als 1,5 1/h angewendet werden, wenn die im Lüftungskonzept nachgewiesen wird. [24]

Die **ÖNORM H 5057-1** legt im Anhang A fest, dass bei nicht ausreichender natürlicher Nachtlüftung oder schall- bzw. sicherheitstechnischen Problemen auch bei Wohngebäuden der Nachtlüftung-Luftwechsel einer RLT-Anlage mit 1,5 1/h angesetzt werden darf. Der Hintergrund für die Unterscheidung bei Bürogebäuden in hygienisch notwendigen Luftwechsel und Luftwechsel durch mechanische Lüftung wird ebenfalls in der ÖNORM H 5057-1 ersichtlich. Bei Lüftungsanlagen, die lediglich den hygienisch nötigen Luftvolumenstrom abdecken müssen, wird  $n_{L,hyg}$  verwendet. Bei RLT-Anlagen, die über den hygienisch notwendigen Luftwechsel hinausgehen, weil sie zusätzliche Funktionen wie Heizen und Kühlen abdecken sollen, wird für Konstant-Volumenstrom-Systeme (KVS-Systeme)  $n_{L,RLT}$  angewendet. [39]

Die Schweizer Norm **SIA 2024** gibt die Daten in Form von Außenluft-Volumenströmen pro Person oder bezogen auf die Nettogeschoßfläche. Der Zusammenhang zwischen den beiden Darstellungsformen liegt in der Nettogeschoßfläche pro Person, die ebenfalls angegeben wird. Tabelle 8 fasst die Werte zusammen. Der AUL-Volumenstrom pro Person ist für Büro- und Wohnnutzung gleich. Vorteilhaft bei der Betrachtungsweise pro Person ist die Verknüpfung mit dem Personenbelegungsprofil, das berücksichtigt, wann wie viele Personen anwesend sind.

Bei manchen Kategorien wie z. B. Verkehrsflächen, die nicht für längeren Aufenthalt vorgesehen sind und denen folglich keine Nettofläche für Personen zugewiesen wird, sind in der Norm nur auf  $\text{m}^2$  bezogenen Lüftungsraten angegeben. Für die Nutzungskategorie „Küche, Teeküche“ gibt es zusätzlichen einen prozessbedingten Außenluftvolumenstrom von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , der durch die Nutzung zusätzlich eingebrachte Stoffe und Gerüche abführen soll. [29]

Tabelle 8: Luftwechsel gemäß SIA 2024 [29]

Größe	Einheit	Wohnen MFH	Einzel-, Gruppenbüro	Küche, Teeküche	Verkehrsfläche und Treppenhaus	WC, Bad, Dusche
Außenluft-Volumenstrom pro Person (mit unterstützender Fensterlüftung)	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$	29	29	29	-	-
Hygienebedingter Außenluft-Volumenstrom (pro Nettogeschoßfläche)	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$	0,8	2,1	14,5	0,5	8
Nettogeschoßfläche pro Person	$\text{m}^2/\text{Person}$	35	14	2	-	-
Prozessbedingter Außenluft-Volumenstrom (pro Nettogeschoßfläche)	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$	-	-	10	-	-

Die **ÖNORM B 8110-3** (sommerliche Überwärmung) gibt Standardwerte für Luftwechselraten an. Diese sind als Stundenwerte im Tagesverlauf dargestellt.

Abbildung 15 zeigt die Werte für Wohnnutzung unterschieden nach natürlicher oder mechanischer Lüftung. Die Lüftungsrate bezieht sich auf  $\text{m}^2$  Bezugsfläche (BF). Diese BF entspricht der Nettonutzfläche eines Raumes. Wird eine gesamte Wohnungseinheit betrachtet, ist die BF als 60 % der Wohnnutzfläche definiert. Bei natürlicher Lüftung sind untertags deutliche geringere Lüftungsraten als abends und nachts festgelegt. Für mechanische Lüftung ist ein durchgehender Wert von  $1,411 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$  festgelegt.

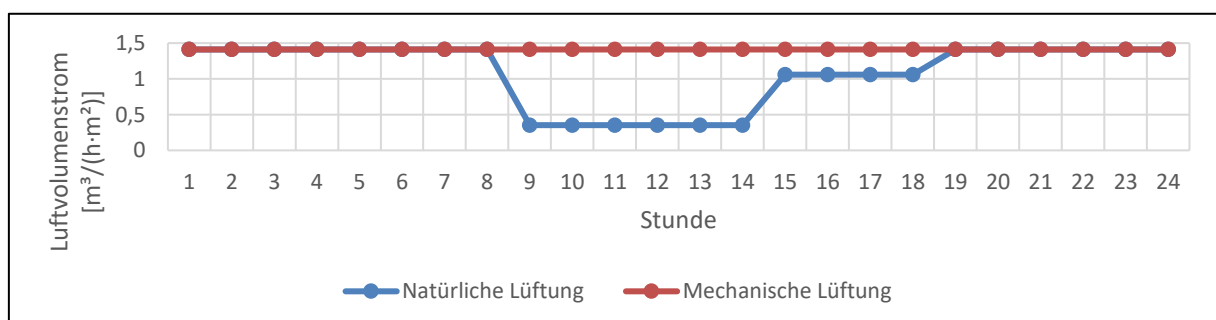


Abbildung 15: Luftvolumenstrom für Wohngebäude im Tagesverlauf gemäß ÖNORM B 8110-3 [25]

Abbildung 16 zeigt die Lüftungswerte für Büronutzung, diesmal bezogen auf Personen. Natürliche und mechanische Lüftungsanlagen haben während der Betriebszeit stets den selben Wert von  $35 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$ . Sie unterscheiden sich nur in der Betriebsdauer, die mechanischer Lüftung von 5:00 bis 22:00 Uhr geht, während sich die natürliche Lüftung mit 8:00 bis 17:00 Uhr nur auf die Zeitspanne mit Anwesenheit von Personen beschränkt.

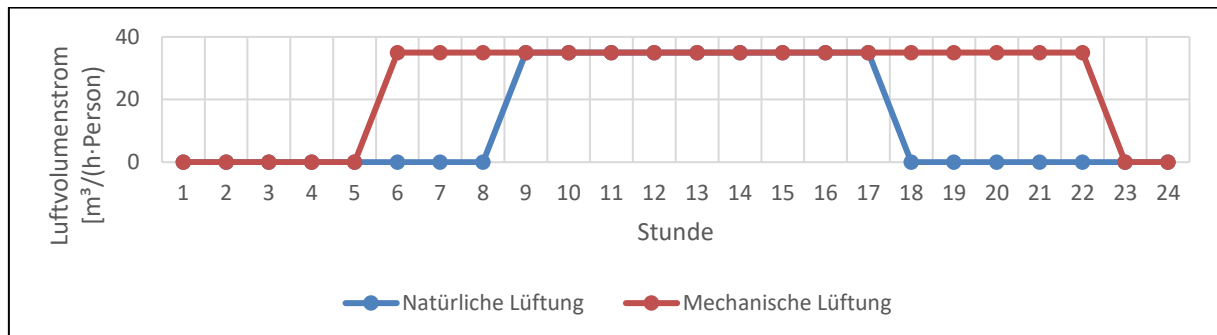


Abbildung 16: Luftvolumenstrom für Bürogebäude im Tagesverlauf gemäß ÖNORM B 8110-3 [25]

Die Norm erlaubt bei mechanischen Lüftungen auch Abweichungen von den Defaultwerten, was z. B. bei Nachtlüftung eintritt. Bei nächtlicher Dauerlüftung sind Gefahren durch Sturm und Einbruch auszuschließen. Ohne zusätzlichen Nachweis wird der Luftwechsel bei RLT-Anlagen aus energieeffizienz- und schallschutztechnischen Gründen auf  $2,5 \text{ 1/h}$  bei Räumen mit und auf  $1,5 \text{ 1/h}$  bei Räumen ohne Personen begrenzt. Der Wärmeeintrag in die Zuluft bei Lüftungsanlagen durch den Zuluftventilator ist zu berücksichtigen, bei reinen Abluftanlagen ist diese Regelung allerdings nicht von Bedeutung. [25]

In der **OIB-Richtlinie 6** werden zusätzliche Angaben zu den Betriebszeiten der Nachtlüftung beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gemacht. In Wohngebäuden dürfen die Fenster von 6:00 bis 22:00 Uhr als geöffnet betrachtet werden, solange die Außentemperatur geringer als innere operative Temperatur ist. Im Zeitraum von 22:00 bis 6:00 Uhr müssen die Fenster als geschlossen angenommen werden – eine Nachtlüftung ist somit für den Nachweis gemäß OIB-RL 6 in Wohngebäuden nicht anrechenbar. In Nichtwohngebäuden dürfen Räume ohne aktive Kühlung mit sturm- und einbruchssicheren Lüftungsöffnungen von 22:00 bis 6:00 Uhr als geöffnet berücksichtigt werden. Hier ist also unter den genannten Voraussetzungen eine Nachtlüftung anrechenbar. [26]

Die **Arbeitsstättenverordnung** schreibt für natürliche Lüftung und weniger als 10 m Raumtiefe einen Mindest-Lüftungsquerschnitt von 2 % der Bodenfläche vor. Mechanische Lüftungsanlagen müssen bei geringer körperlicher Belastung (Büronutzung) einen Außenluftvolumenstrom von  $35 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$  sicherstellen. [28]

Die **ÖNORM EN 16798-1** behandelt die Lüftung von Gebäuden in ausführlicher Weise und stellt dem Anwender dabei mehrere Bemessungsansätze zu Auswahl. Zusätzlich gibt es mehrere Unterscheidungen, wie z. B. Menge der Schadstoffabgabe des Gebäudes, gewünschte Qualität der Raumluft, Tätigkeit der Personen, etc. Dies bietet weitere Wahlmöglichkeiten fügt aber damit auch Komplexität hinzu. In Anhang B sind Standardkriterien und in Anhang C Standardbelegungspläne angegeben, für den Fall, dass keine abweichenden nationalen Regelungen getroffen werden. [6]



Neben dem hygienisch – also für Personenaufenthalt nötigen Luftwechsel – gibt es noch den bauphysikalisch nötigen Luftwechsel zum Feuchteschutz. Dieser soll auch bei Abwesenheit von Personen eingehalten werden, um Schimmelbildung zu vermeiden und gegebenenfalls Emissionen der Baustoffe abzuführen. Im Anhang B der ÖNORM EN 16798-1 0,36 bis 0,54 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>) bei Wohngebäuden und 0,54 m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>) bei Nichtwohngebäuden. [6] Entscheidend dafür, ob eine Lüftungsanlage auch außerhalb der Nutzung zum Feuchteschutz betrieben werden muss, hängt davon ab, ob die natürliche Infiltration ausreicht, um diesen Luftwechsel zu erreichen. [9]

Für Hygieneräumen (Sanitärräume, Küchen) werden in manchen Normen (z. B. ÖNORM H 6036, ÖNORM H 6038, ÖNORM EN 16798-1 Anhang B) Abluftvolumenströme vorgeschrieben. Diese sind üblicherweise nicht auf Personen oder die Grundfläche bezogen sondern werden pro Raum angegeben. Tabelle 9 gibt die Abluftvolumenströme für Hygieneräume gemäß ÖNORM H 6036 an. Der Betriebsluftvolumenstrom ist der bedarfsabhängig erforderliche Luftstrom und der Grundluftvolumenstrom der empfohlene bei dauerhaftem Anlagenbetrieb.

Tabelle 9: Abluftvolumenströme gemäß ÖNORM H 6036 [13]

Raumart	Betriebs- luftvolumenstrom	Grund- luftvolumenstrom
	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]
Bad (auch mit WC)	60	15 <sup>a</sup>
WC	40	10
Küche im Aufenthaltsbereich	60	15 <sup>a</sup>
Küche im Bereich der Kochstelle (Dunstabzugshaube)	200 bis 800	-
a) Ist als Mittelwert über 24 h zu realisieren.		

### 3.4.2 Infiltration

Neben der beabsichtigten Belüftung von Gebäuden tritt stets auch ein unkontrollierter Luftaustausch über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle auf. Auch hier gibt es verschiedene Methoden, um die Menge der ausgetauschten Luft zu quantifizieren. Im Gegensatz zur gezielten Lüftung hängt die Infiltration jedoch stark von der Dichtheit der Gebäudehülle ab. Dies muss vor allem bei Bestandsbauten, für die zur Errichtungszeit noch keine Vorschriften existierten, berücksichtigt werden. Maßnahmen wie z. B. der Austausch von Fenstern oder die Erneuerungen von Dichtungen verändern die diesbezüglichen Eigenschaften eines Gebäudes und erschweren zusätzlich eine Beurteilung. Angaben zu Infiltrationsluftmengen haben meist eine der folgenden Darstellungsformen:

- Luftwechselzahlen [1/h]
- Luftvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h] pro m<sup>2</sup> Gebäudehüllfläche
- Luftvolumenstrom [m<sup>3</sup>/h] pro m<sup>2</sup> Grundfläche

Ein messtechnischer Ansatz, mit dem die Infiltration am konkreten Objekt untersucht werden kann, ist der sogenannte Blower-Door-Test (Differenzdruckverfahren). Das Verfahren ist in der ÖNORM EN ISO 9972 geregelt.



Es wird mithilfe von Ventilatoren eine Druckdifferenz zwischen innen und außen angebracht und die dabei durch Leckagen tretende Luft gemessen. Aus den Ergebnissen kann in weiterer Folge mit empirisch ermittelten Zusammenhängen auf die Infiltrationsrate geschlossen werden. Ein häufig verwendeter Kennwert ist der Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz –  $n_{50}$ . Die ÖNORM H 7500-1 gibt für den Fall, dass keine Messwerte zur Verfügung stehen und die Anforderungen gemäß OIB 6 für Neubauten nicht gelten, folgende Werte für Mehrfamilienhäuser und Nichtwohlfgebäude an [40]:

- sehr dicht (hochabgedichtete Fenster und Türen):  $n_{50} = 2 \text{ 1/h}$
- dicht (Doppelverglasung, normale Abdichtung):  $n_{50} = 4 \text{ 1/h}$
- weniger dicht (Einfachverglasung, keine Abdichtung):  $n_{50} = 6 \text{ 1/h}$

Zum Vergleich gibt die OIB-RL 6 für Neubauten je nach Umständen Werte von 1,5 bis 3 1/h vor. [26]

Die  $n_{50}$ -Werte entsprechen noch nicht dem tatsächlichen Infiltrationswechsel. Dieser hängt unter anderem auch von den Windverhältnissen ab. Die ÖNORM H 7500-1 berücksichtigt dies mit Faktoren für die Abschirmung und einem Höhenkorrekturfaktor für Räume, die auf halber Raumhöhe mehr als zehn Meter über dem Umgebungsniveau liegen. [40]

Die ÖNORM B 8110-6-1 hat einen einfacheren Ansatz, der verschiedenen  $n_{50}$ -Werten eine Infiltrationsluftwechselzahl  $n_{\text{Inf}}$  zuordnet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Infiltrations-Luftwechsel in Abhängigkeit des Blower-Door-Test-Ergebnisses gemäß ÖNORM B 8110-6-1 [24]

$n_{50}$	$n_{\text{Inf}}$
$n_{50} > 1,50 \text{ 1/h}$	0,11 1/h
$0,6 \leq n_{50} \leq 1,50 \text{ 1/h}$	$0,07 \cdot n_{50} \text{ 1/h}$
$n_{50} < 0,6 \text{ 1/h}$	0,04 1/h

Die SIA 2024 gibt folgende Außenluft-Volumenströme bezogen auf  $\text{m}^2$  Nettogeschosßfläche für die Infiltration vor [29]:

- Standard und Zielwert:  $0,15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
- Bestand:  $0,30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

Neben den vereinfachenden Ansätzen von fixen Luftwechseln, die je nach Regelwerk noch etwas nach Windexposition und Qualität der Gebäudehülle differenziert sind, bieten Gebäudesimulationen auch die Möglichkeit, winddruckabhängige Infiltration zu berücksichtigen.

Dafür werden (stündliche) Wetterdaten mit Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Druckbeiwerte (Druckkoeffizienten) benötigt. Die Abschirmung des Gebäudes gegenüber dem Wind aufgrund von umgebender Bebauung kann bei den Winddruckkoeffizienten berücksichtigt werden.

Messwerte für Altbauten lassen sich nur vereinzelt finden und weisen stets einen Schwankungsbereich auf. Bei einem Sanierungsprojekt eines Gründerzeitgebäudes in Wien wurden vor der Sanierung  $n_{50}$ -Werte von 5 bis 8 1/h Stunde für eine Nutzungseinheit gemessen. Der Wert konnte durch Verbesserungsmaßnahmen auf unter 0,6 1/h verringert werden. [41]

Im Zuge eines anderen Forschungsprojektes wurden an einem Wiener Gründerzeitgebäude Werte im Bereich von rund 2 l/h für sanierte und rund 5 l/h für unsanierte Gebäude ermittelt. Es wird dabei allerdings auf hohe Schwankungsbreiten hingewiesen. [42]

### 3.5 Warmwasser

In den Normen werden zur Quantifizierung des Warmwasser- bzw. Warmwasserwärmebedarfs oft Tageswerte angegeben. Die Einheiten und Bezugsgrößen unterscheiden sich dabei. Tabelle 11 fasst einige Werte aus verschiedenen Literaturquellen zusammen.

Tabelle 11: Werte für den Warmwasserbedarf aus verschiedenen Quellen

Nutzungskategorie	Warmwasser-(energie)bedarf	Einheit	Anm.
<b>ÖNORM B 8110-5 [23]</b>			
Wohngebäude mit 1 bis 2 NE	21	Wh/(m <sup>2</sup> ·d)	
Wohngebäude mit 3 bis 9 NE	28	Wh/(m <sup>2</sup> ·d)	
Bürogebäude	9	Wh/(m <sup>2</sup> ·d)	
<b>SIA 2024 [29]</b>			
Wohnen MFH	35	L/(d·Person)	60 °C
Einzel-, Gruppenbüro	3	L/(d·Person)	60 °C
<b>Bohne [11, S. 165]</b>			
Wohngebäude Min.	30	L/(d·Person)	60-65 °C
Wohngebäude Max.	60	L/(d·Person)	60-65 °C
<b>ÖNORM EN 12831-3 (Anhang B) [30]</b>			
Bürogebäude (personenbezogen)	400	Wh/(d·Person)	
Bürogebäude (flächenbezogen)	30	Wh/(m <sup>2</sup> ·d)	
Wohngebäude (einfache Unterkunft)	25 - 60	L/(d·Person)	

Die Werte in Tabelle 11 unterscheiden sich teilweise merklich voneinander. Beispielsweise liegt der flächenbezogene Energiebedarf für Bürogebäude der ÖNORM EN 12831-3 deutlich über dem Wert gemäß ÖNORM B 8110-5.

Auf die zeitliche Verteilung des Warmwasserbedarfs im Zeitverlauf wird dabei nicht immer eingegangen. Vor allem bei Systemen mit Speichern ist jedoch diese vertiefte Betrachtung interessant. Im Gegensatz zu reinen Durchlauferwärmern, für deren Auslegung die maximal nötige Zapfleistung relevant ist, hat bei diesen auch die Charakteristik der Wasserentnahme im Tagesverlauf einen Einfluss. Um die Wechselwirkungen des Systems und seinen Eigenschaften wie Speichergröße, Speicherverlusten und Art der Wassererwärmung einerseits und dem Nutzerverhalten der Warmwasserentnahme andererseits detaillierter modellieren zu können, werden Zapfprofile benötigt. Diese beschreiben eben jenen Verlauf der Wasserentnahme in einem bestimmten Zeitraum wie einem Tag, einer Woche oder auch einem Jahr. Derartige Zapfprofile können synthetisch erstellt oder real gemessen werden.

Ein Ansatz wird in der ÖNORM EN 12831-3 Anhang B gegeben. Abbildung 17 zeigt die relative Verteilung des Trinkwarmwasserbedarfs (Stundenwerte) im Tagesverlauf für Wohngebäude.

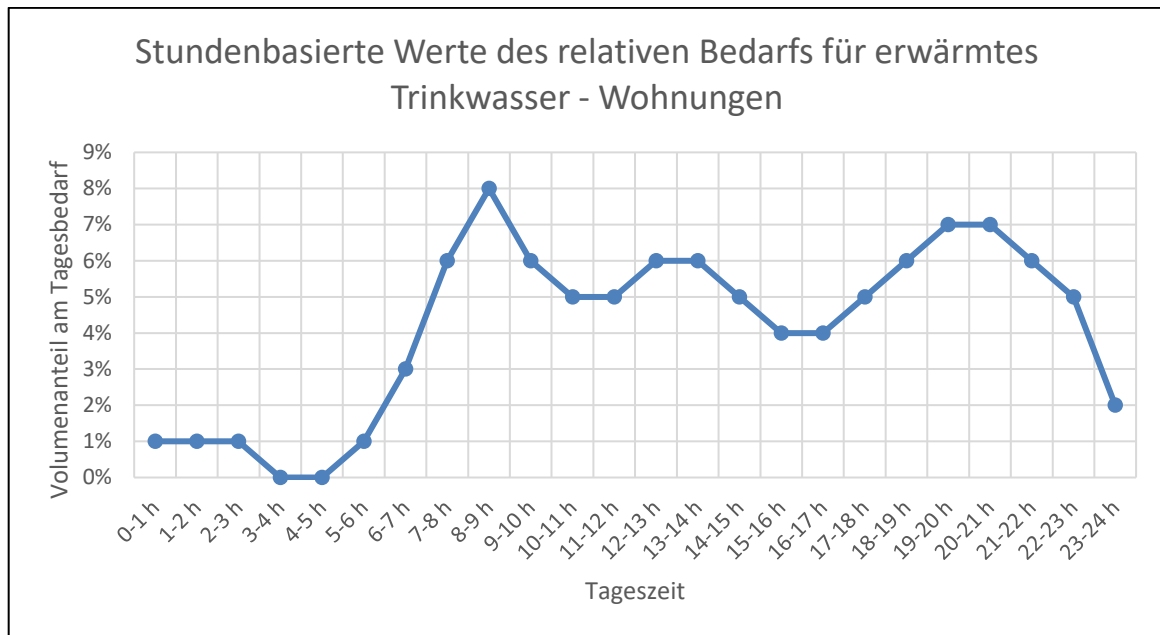


Abbildung 17: Tagesverlauf Warmwasserbedarf aus Anhang B ÖNORM EN 12831-3 [30]

Neben den Angaben von Normen können auch andere Ansätze bei der Erstellung von Zapfprofilen angewendet werden. Das Programm DHWcalc der Universität Kassel kann zeitlich hoch aufgelöste Zeitreihen von Wasserentnahmen erstellen und dabei einige nutzerdefinierte Einflussfaktoren berücksichtigen. [43] Abbildung 18 zeigt mit diesem Programm erstellte Zapfprofile eines Mehrfamilienhauses mit sechs Nutzungseinheiten für zwei Tage und die Summenlinie eines Tages. Im Vergleich zu dem Profil der ÖNORM EN 12831-3 sind deutlich ausgeprägtere Spitzen zu erkennen. Ein Grund für diesen Unterschied sind die verschiedenen Bezugsintervalle. Die ÖNORM EN 12831-3 gibt Stundenwerte an, wodurch die Lastspitzen im Vergleich zu den 10-Minuten-Werten des DHWcalc-Profiles geglättet werden.

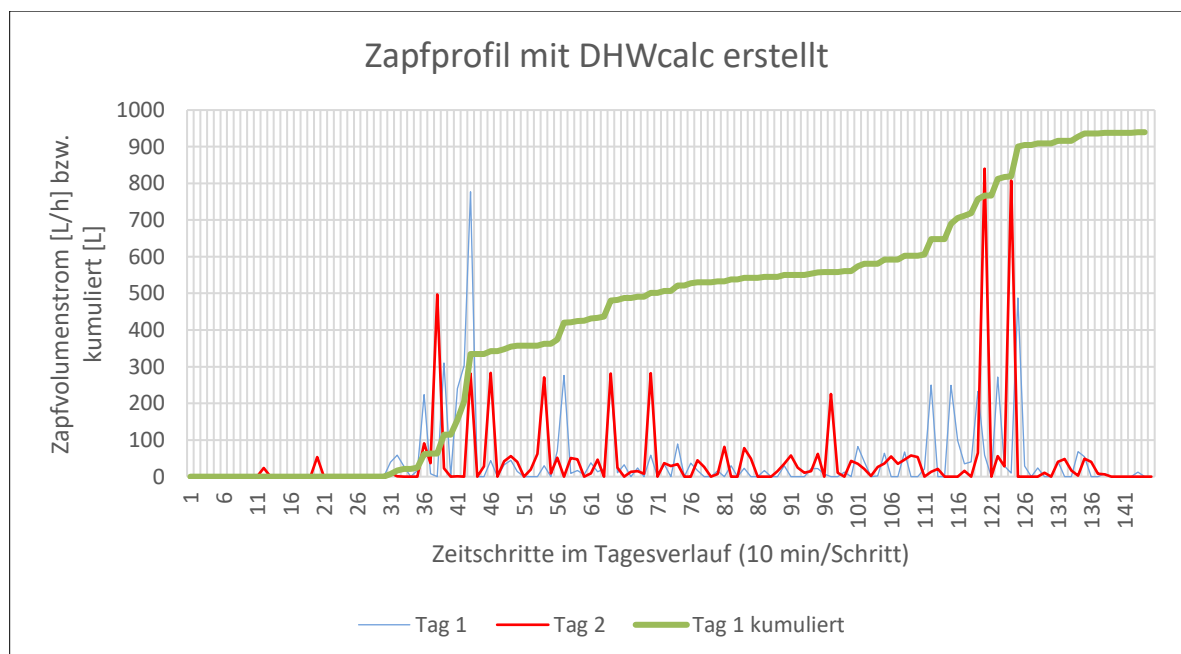


Abbildung 18: Zapfdiagramm eines MFH für zwei Tage

### 3.6 Innere Wärmegewinne

Vorgänge im Inneren von Gebäuden führen zu Wärmegewinnen. Je nach Situation können diese hilfreich sein, weil sie die momentane Heizlast verringern oder auch nachteilig wirken, wenn beispielsweise im Sommer Überwärmung droht.

Weiters hängen die angesetzten Werte oft davon ab, welchem Zweck eine Berechnung dient. Da Systemauslegung stets auf der sicheren Seite liegen sollen, werden hier oftmals günstige Wärmegewinne z. B. bei der Heizlastberechnung auf null gesetzt, während in anderen Situationen wie Kühllastberechnungen ungünstig hohe Werte angewendet werden. Für Energiebedarfsrechnungen werden hingegen keine Extrema benötigt, sondern Werte die durchschnittliche Situationen abbilden.

Häufig wird zwischen Wärme aus Personen und Wärme aus Geräten unterschieden. Die Beleuchtung ist bei den Geräten mitberücksichtigt oder wird eigens behandelt.

Die Angaben in Normen unterscheiden sich nicht nur aufgrund von unterschiedlichen vorgesehenen Verwendungen. Es gibt auch weitere Unterschiede in der Angabe von konkreten Werten. Manche verwenden als Bezugsgrößen die Nutzfläche, andere die Anzahl anwesender Personen. Gewisse Angaben sind detaillierter und geben einen stundenweisen Verlauf über einen Tag, während sich andere auf Durchschnittswerte beschränken. Hier wird ein kompakter Überblick über ausgewählte Normenwerte gegeben ohne Anspruch darauf, alle diesbezüglichen Angaben in Normen abzudecken. Sofern möglich wird versucht die verschiedenen Quellen zu vergleichen. Diese Vergleiche sind allerdings mit Vorbehalt zu betrachten, da sich die Angaben oftmals auf verschiedene Bezugsgrößen beziehen. Auch die Einteilung in verschiedene Raum- bzw. Gebäudenutzungen unterscheidet sich.

#### 3.6.1 Personenwärme

Die Anwesenheit von Personen verursacht innere Wärmegewinne. Für die Beschreibung der Anwesenheit von Nutzern im Tagesverlauf wird auch der Begriff Belegungsprofil verwendet. Die abgegebene Wärmeleistung hängt auch mit der Aktivität von Personen zusammen. Tabelle 12 gibt Energieumsätze in  $\text{W/m}^2$  bezogen auf die Körperoberfläche und in metabolischen Äquivalenten (met) für jene Tätigkeiten an, die in Wohn- und Bürogebäuden zu erwarten sind.

Tabelle 12: Energieumsatz und Wärmeleistung durch Personen bei verschiedenen Tätigkeiten [34]

Aktivität	Energieumsatz		
	$\text{W/m}^2$	met	W/Person
Angelehnt	46	0,80	83
Sitzend, entspannt	58	1,00	104
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	70	1,20	126
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	93	1,60	167
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,00	209
Anmerkung: Annahme wärmeabgebende Oberfläche $1,8 \text{ m}^2/\text{Person}$ [44]			

Die SIA 2024 gibt zur Quantifizierung der Personenwärme Belegungsprofile, Platzbedarf pro Person und sensible Wärmeeintragsleistungen unterschieden nach verschiedenen Raumnutzungen an (Tabelle 13). Die Werte für die Wärmeeintragsleistung pro Person werden nach Heiz- und Kühlfall unterschieden. Die liegen bei Wohn- und Büronutzung im Bereich von sitzender Tätigkeit bis leichter stehender Tätigkeit laut ÖNORM EN ISO 7730. Neben den beiden angeführten Nutzungen „Wohnen Mehrfamilienhaus“ und „Einzel-, Gruppenbüro“ gibt es noch weitere Raumnutzungen. Das Tagesprofil in Abbildung 19 zeigt anschaulich die unterschiedliche zeitliche Verteilung bei Wohn- und Büronutzung. Der Belegungsgrad bezieht sich dabei auf die maximal anwesenden Personen (Vollbelegung) berechnet aus der zur Verfügung stehenden Nutzfläche und dem Platzbedarf pro Person. Neben dem Tagesprofil in gibt die Norm auch ein Jahresprofil an, das allerdings für diese beiden Nutzungen ganzjährig bei 80 % liegt. Für die Nutzungskategorie „Wohnen MFH“ ist anzumerken, dass sich die Werte auf die gesamte Wohneinheit beziehen. Die gesamte beheizte Wohnfläche (Wohnzimmer, Küche, Bad, Flur, Treppen, usw.) wird zusammengefasst betrachtet. Die Kategorie „Einzel- und Gruppenbüro“ bezieht sich hingegen nur auf Büroflächen mit bis zu sechs Arbeitsplätzen; Nebenräume werden eigens erfasst.

Tabelle 13: Wärmeeintrag durch Personen gemäß SIA 2024 [29]

Parameter	Einheit	Wohnen MFH	Einzel-, Gruppenbüro
Nutzungstage pro Jahr	d	365	261
Platzbedarf Netto-GF pro Person	m <sup>2</sup>	35	14
Sensible Wärmeeintragsleistung Personen - Auslegung Kühlung	W	84	84
Sensible Wärmeeintragsleistung Personen - Auslegung Heizung	W	94	94

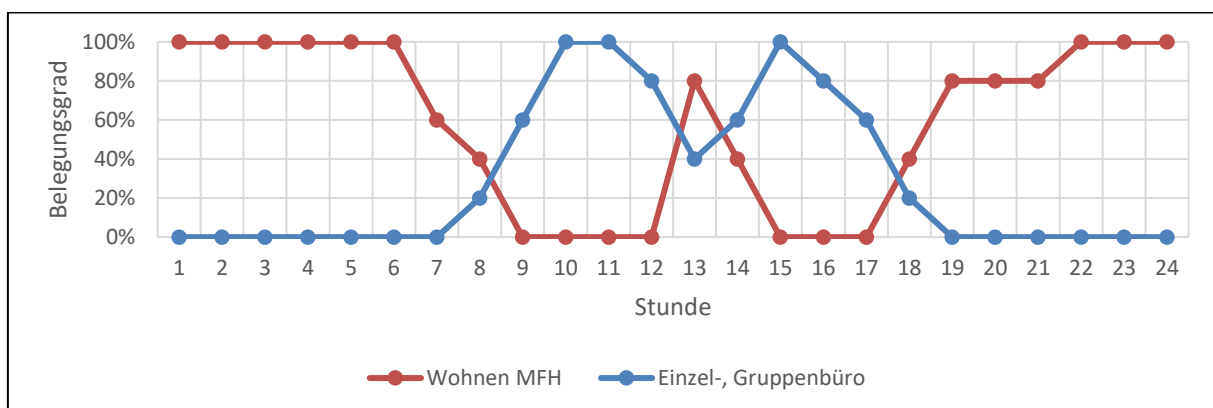


Abbildung 19: Tagesverlauf Belegung Personen für Büro- und Wohnnutzung gemäß SIA 2024 [29]

Die ÖNORM B 8110-5 stellt einen einzelnen auf die Brutto-Geschoßfläche bezogenen Wert für die Wärmeeintragsleistung aus Personen und Geräte zur Verfügung. Gemeinsam mit einem Anteilsfaktor kann daraus der Anteil aus Personenwärme berechnet werden. Für Wohnnutzungen gibt es nur einen Wert für den Heizfall; bei Büronutzung auch einen höheren Wert für den Kühlfall.

Tabelle 14: Personenwärme gemäß ÖNORM B 8110-5 [23]

Wohngebäude mit 3 bis 9 Nutzungseinheiten	Wert	Einheit
innere Wärmegewinne infolge Personen und Geräte im Heizfall	4,06	W/m <sup>2</sup>
Anteil der inneren Wärmegewinne aus Personenwärme	0,36	-
innere Wärmegewinne nur aus Personenwärme	1,46	W/m <sup>2</sup>
<b>Bürogebäude</b>		
innere Wärmegewinne infolge Personen und Geräte im Heizfall	2,95	W/m <sup>2</sup>
innere Wärmegewinne infolge Personen und Geräte im Kühlfall	5,85	W/m <sup>2</sup>
Anteil der inneren Wärmegewinne aus Personenwärme	0,56	-
innere Wärmegewinne nur aus Personen im Heizfall	1,65	W/m <sup>2</sup>
innere Wärmegewinne nur aus Personen im Kühlfall	3,28	W/m <sup>2</sup>

Die ÖNORM B 8110-3 gibt Werte, die bei der Beurteilung der Gefahr von sommerlicher Überwärmung eingesetzt werden. Die inneren Lasten gliedert die Norm in jene aus Personen und jene aus Geräten (inkl. Beleuchtung).

Es werden stundenweise Tagesverläufe für verschiedene Nutzungen angegeben. Diese stellen Standardwerte dar; im Fall von ungünstigeren tatsächlich erwartbaren Lasten sind die realen Werte zu verwenden. Die Angaben gelten für Aufenthaltsräume, während für die verbundenen Gänge keine inneren Lasten anzusetzen sind. In Abbildung 20 werden die Tagesverläufe der inneren Lasten durch Geräte und Personen für die beiden Nutzungen Wohnen und Büro gezeigt. Die Einheit für innere Lasten in Wohngebäuden ist W/m<sup>2</sup> wobei sich die Fläche auf die Bezugsfläche – in diesem Fall die Wohnnutzfläche – bezieht. Bei der Nutzung als Bürogebäude werden die Lasten auf Personen bzw. die Anzahl an Arbeitsplätzen bezogen.

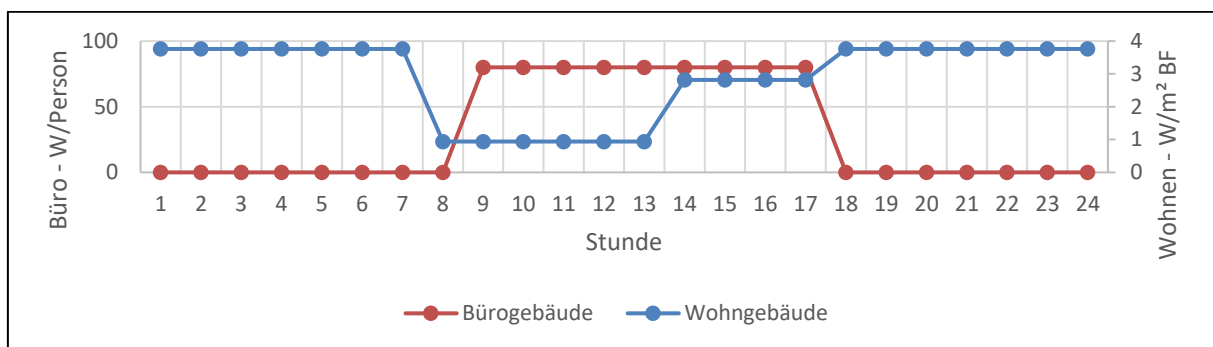


Abbildung 20: Personenwärme im Tagesverlauf gemäß ÖNORM B 8110-3 [25]

Für Büros kann die maximale Belegung auch mithilfe der Arbeitsstättenverordnung ermittelt werden. In Arbeitsräumen müssen für den ersten Arbeitnehmer mindestens 8 m<sup>2</sup> und für jeden weiteren zusätzliche 5 m<sup>2</sup> zur Verfügung stehen. Einschränkend kann weiters die Mindest-Lichteintrittsfläche wirken. 10 % der Bodenfläche eines Raumes muss diese betragen. Ist sie geringer, kann nur ein Teil des Raumes als Arbeitsraum angerechnet werden.

Im Anhang C der ÖNORM EN 16798-1 werden folgende Werte für den Wärmeeintrag durch Personen angegeben [6]:

- Kategorie Wohnhaus: 4,2 W/m<sup>2</sup>
- Kategorie Einzelbüro: 11,8 W/m<sup>2</sup>

Die dazugehörigen Tagesprofile zeigt Abbildung 21.

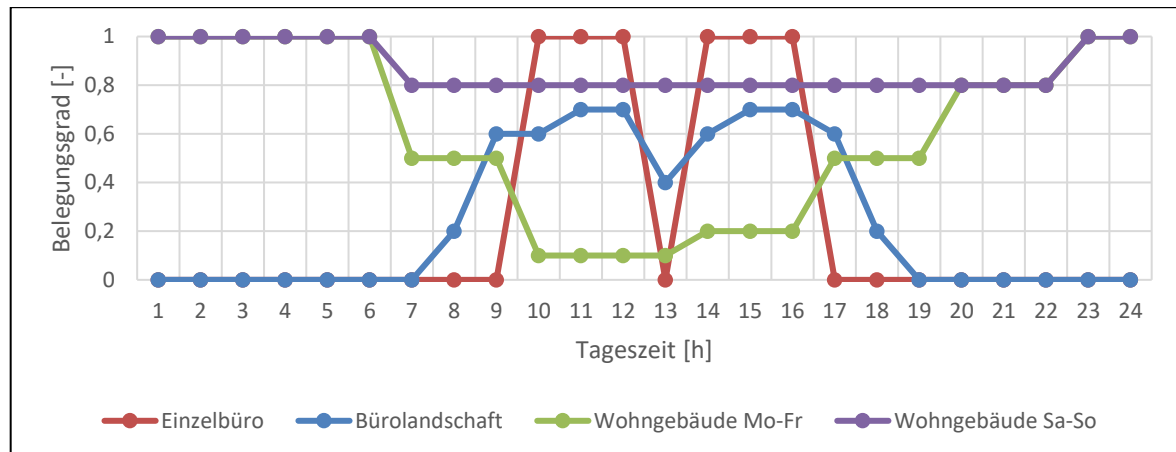


Abbildung 21: Belegungsprofil gemäß ÖNORM EN 16798-1 Anhang C [6]

### 3.6.2 Gerätewärme

Innere Wärmelasten können auch durch Geräte verursacht werden. Haushalts- und Bürogeräte geben ebenso wie die Beleuchtung Wärme ab. Die Beleuchtung wird dabei nicht immer eigens betrachtet, sondern in manchen Regelwerken zu den Geräten gezählt.

Die ÖNORM B 8110-5 gibt die Gerätewärme nach demselben Prinzip wie die Personenwärme an; nur die Werte unterscheiden sich. Die Werte sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Gerätewärme gemäß ÖNORM B 8110-5 [23]

Wohngebäude mit 3 bis 9 Nutzungseinheiten	Wert	Einheit
innere Wärmegewinne infolge Personen und Geräte im Heizfall	4,06	W/m <sup>2</sup>
Anteil der inneren Wärmegewinne aus Gerätewärme	0,64	-
innere Wärmegewinne nur aus Geräten im Heizfall	2,60	W/m <sup>2</sup>
Bürogebäude		
innere Wärmegewinne infolge Personen und Geräte im Heizfall	2,95	W/m <sup>2</sup>
innere Wärmegewinne infolge Personen und Geräte im Kühlfall	5,85	W/m <sup>2</sup>
Anteil der inneren Wärmegewinne aus Gerätewärme	0,44	-
innere Wärmegewinne nur aus Geräten im Heizfall	1,30	W/m <sup>2</sup>
innere Wärmegewinne nur aus Geräten im Kühlfall	2,57	W/m <sup>2</sup>

Aus der ÖNORM B 8110-6-1 (Kap. 8.2) wird ersichtlich, dass bei Wohngebäuden der Wärmeeintrag aus der Beleuchtung schon enthalten ist, bei Nichtwohngebäuden wird hingegen noch der halbe (Heizfall) bzw. ganze (Kühlfall) Beleuchtungsenergiebedarf hinzuaddiert. [24]

Die SIA 2024 unterscheidet in Wärmeeintrag durch Geräte und durch Beleuchtung. Für die Gerätewärme gibt es ein eigenes Tagesprofil (Abbildung 22), das sich vom Personenprofil unterscheidet, und die Wärmeabgabe im Verhältnis zur Volllast angibt. Die Wärmeeintragsleistung der Geräte wird in W/m<sup>2</sup> Nutzfläche angegeben. Für die Beleuchtung gibt es kein eigenes Tagesprofil.

Es werden nur Nutzungsstunden tagsüber (7:00 bis 18:00 Uhr) und nachts (18:00 bis 7:00 Uhr) sowie die Wärmeeintragsleistung in  $\text{W/m}^2$  festgelegt. Die Wärmeeinträge werden in die Kategorien Standard-, Ziel- und Bestandwert eingeteilt. Tabelle 16 fasst die Daten zusammen.

Tabelle 16: Gerätewärme gemäß SIA 2024 [29]

Parameter	Wohnen MFH			Einzel-, Gruppenbüro			Einheit
	Standard	Ziel	Bestand	Standard	Ziel	Bestand	
Geräte							
Wärmeeintragsleistung der Geräte	10,0	5,0	20,0	11,0	6,0	18,0	W/m²
Beleuchtung							
Nutzungsstunden tagsüber (7-18 h)	4			11			h
Nutzungsstunden nachts (18-7 h)	3			0			h
Wärmeeintragsleistung der Beleuchtung	7,7	5,0	11,9	12,5	8,1	15,9	W/m²

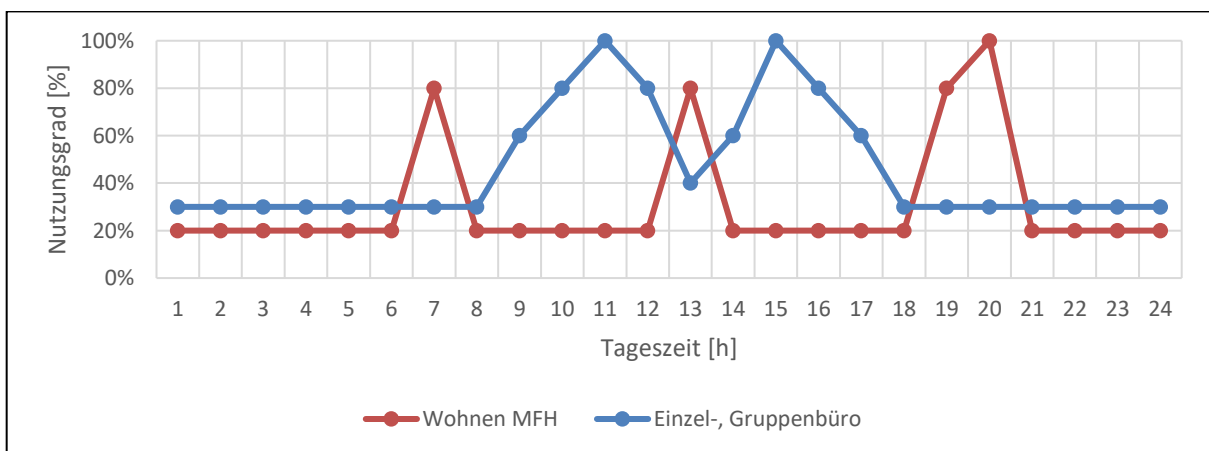


Abbildung 22: Lastprofil Geräte gemäß SIA 2024 [29]

Die ÖNORM B 8110-3 (sommerliche Überwärmung) gibt für auch für Gerätewärme ein Tagesprofil an (Abbildung 23). Bei Wohngebäuden werden die Werte als  $\text{W/m}^2$  Bezugsfläche (BF) und bei Bürogebäuden als  $\text{W/Person}$  (auch als  $\text{W/cap}$  bezeichnet).



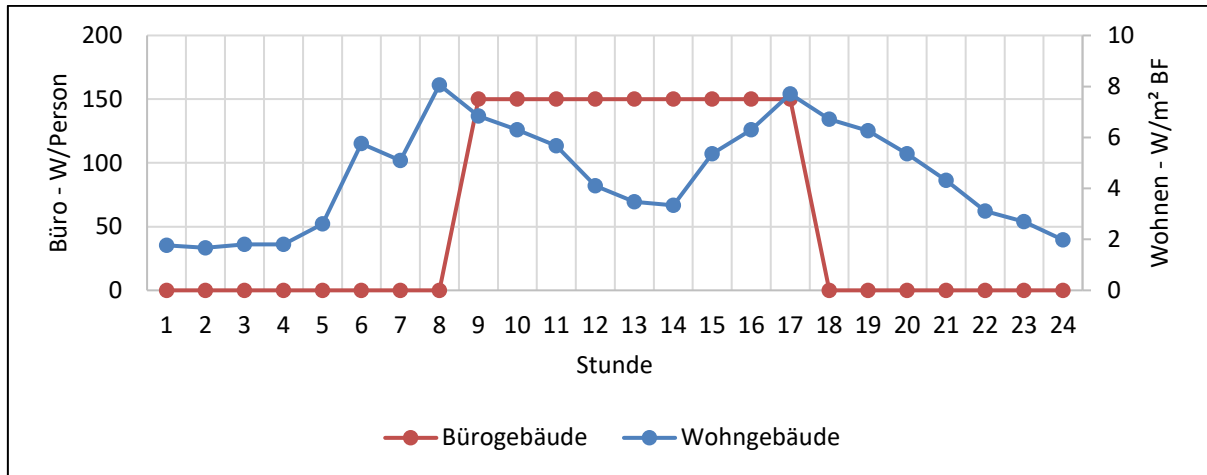


Abbildung 23: Tagesverlauf Gerätewärme gemäß ÖNORM B 8110-3 [25]

Im Anhang C der ÖNORM EN 16798-1 werden folgende Werte für die Abwärme von Geräten empfohlen:

- Kategorien Einzelbüro und Bürolandschaft: 12 W/m<sup>2</sup>
- Kategorie Wohngebäude: 3 W/m<sup>2</sup>

Die dazugehörigen Tagesprofile zeigt Abbildung 24.

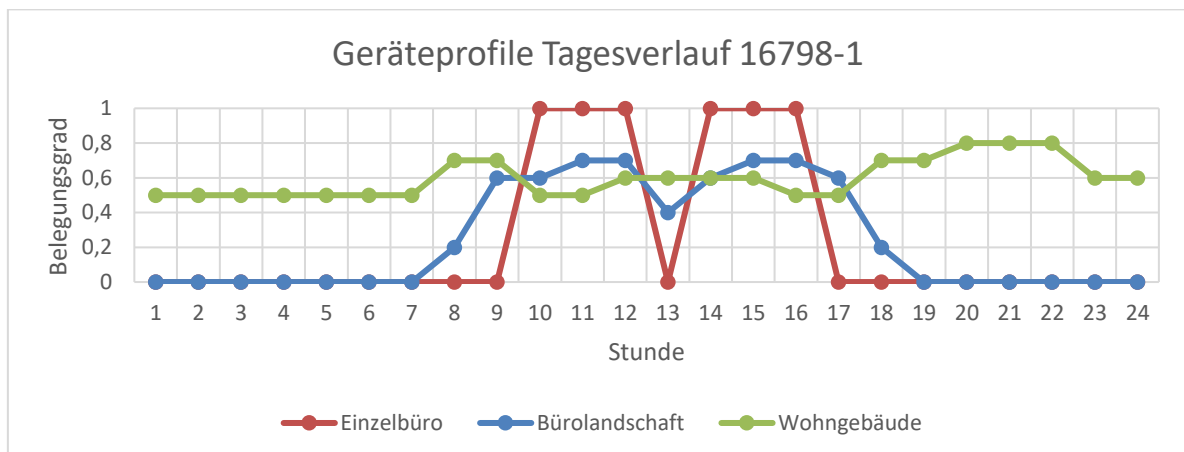


Abbildung 24: Tagesverlauf Gerätewärme gemäß ÖNORM EN 16798-1 Anhang C [6]

## 4 Bestandsgebäude

Für das in dieser Arbeit untersuchte Gründerzeitgebäude werden die relevanten Eigenschaften angegeben und erläutert. Bei einem über 150 Jahre alten Gebäude, das innerhalb seiner Nutzungszeit auch diverse Umnutzungen und kleinere wie größere Eingriffe durchlebt hat, kann es durchaus aufwändig sein, die benötigten Daten mit hoher Sicherheit zu erhalten. Deshalb wird an gegebenen Stellen auch auf Unsicherheiten und Variationsbreiten eingegangen.

### 4.1 Allgemeines

Für das Gebäude wird das Baujahr 1867 angegeben. [45] Es scheint (Stand Jänner 2024) nicht in der Denkmalliste [46] gemäß § 3 DMSG auf, in dem die per Bescheid oder Verordnung unter Denkmalschutz stehenden Objekte aufgeführt sind. Eigentümer des Gebäudes ist die Bundesimmobiliengesellschaft; genutzt wird es überwiegend von der TU Graz.

Das Objekt befindet sich im Grazer Stadtbezirk St. Leonhard (Katastralgemeinde-Nr. 63102) an der Adresse Lessingstraße 27 (L27). Die Seehöhe an dieser Position beträgt ca. 357 m.ü.A. Im Gegensatz zu vielen anderen Gründerzeithäuser grenzt das Gebäude nicht direkt an Nachbarbauten und ist somit freistehend. Abbildung 25 zeigt die Position in einer Kartenansicht und als Orthofoto.



Abbildung 25: Das Gebäude Lessingstraße 27 links farblich (orange) markiert und rechts als Orthofoto [47]

Das Gebäude befindet sich in der Altstadtschutzzzone III, die hauptsächlich die Grazer Gründerzeitviertel umfasst. In Umgebung befinden sich weitere Gründerzeitgebäude (westlich und südlich), das Hauptgebäude der TU Graz (nordwestlich) sowie die jüngeren Gebäude mit den Adressen Lessingstraße 25 und Technikerstraße 4 (westlich). Die beiden letztgenannten Objekte überragen die umgebenden Gebäude. Der Freiraum rund um das Gebäude besteht aus Verkehrsflächen, Parkplätzen und Grünflächen, die teilweise mit niedrigen Bäumen und Sträuchern bewachsen sind.

## 4.2 Gebäudegeometrie

Das Objekt besitzt eine kompakte Kubatur mit einem näherungsweisen rechteckigem Grundriss. Im Erdgeschoss befindet sich mittig ein quer zur Längsseite laufender Durchgang, der an einer Seite offen und am anderen Ende mit einem Holztor versehen ist. In der Mitte des Durchgangs befinden sich gegenüberliegend die beiden Eingangstüren zu den Innenräumen. Die Tür zum südwestlichen Gebäudeteil erschließt dabei nur die Nutzungseinheit 2 im Erdgeschoß; alle anderen sind über das Stiegenhaus im nordöstlichen Teil erreichbar, zu dem die andere Eingangstür führt. Das Gebäude verfügt über ein Kellergeschoß und drei oberirdische Geschosse sowie einen nicht ausgebauten Dachboden. Die oberirdischen Geschosse sind jeweils in zwei Nutzungseinheiten aufgeteilt. Abbildung 26 zeigt die Einteilung und Benennung der Nutzungseinheiten, die in dieser Arbeit verwendet wird.

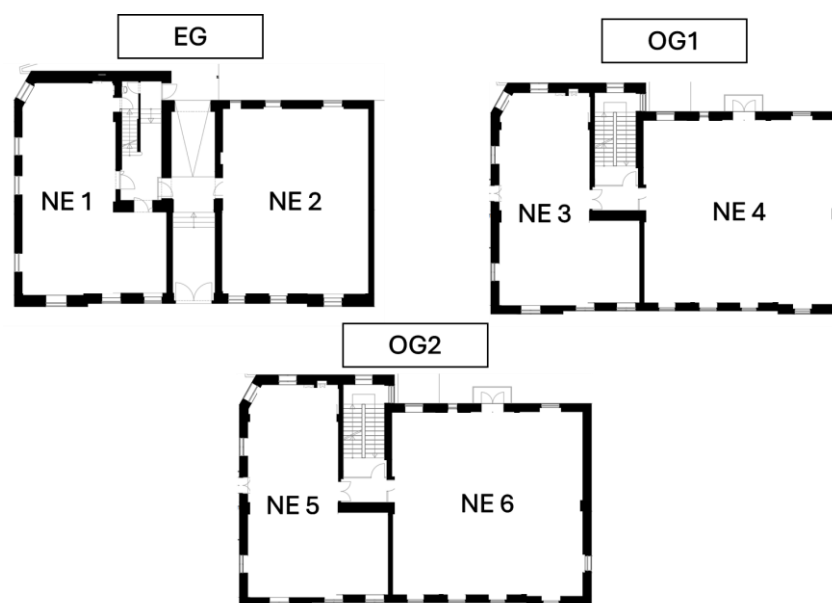


Abbildung 26: Einteilung und Bezeichnung der Nutzungseinheiten

Tabelle 17 gibt die Nutzflächen der einzelnen Nutzungseinheiten an. Das Stiegenhaus ist in diesen Zahlen nicht enthalten. Die hier angegebenen Daten beruhen auf dem erstellten 3D-Gebäudemodell. Das Modell wurde auf Basis von 2D-Plänen der TU Graz in Kombination mit Kontrollmessungen vor Ort erstellt. Die Abweichungen zwischen Bestandsplänen und Messungen waren in einer Größenordnung, die als akzeptabel beurteilt wurde. Die Flächen des Modells weichen teilweise von den in der Datenbank der TU Graz erfassten Raumnutzflächen ab. Bei den meisten Räumen beträgt der relative Unterschied bei den Nutzflächen weniger als 10 %; in Einzelfällen und vor allem bei kleineren Nebenräumen bis zu 20 %. Innerhalb von Nutzungseinheiten gleichen sich diese Unterschiede größtenteils aus. Die Abweichungen zwischen Modell und Datenbank-Werten liegt bei den Summen der Nutzflächen pro Nutzungseinheit bei maximal 4 %.

Tabelle 17: Nutzflächen pro Nutzungseinheit und Geschoß

Nr. NE (Top)	Geschoß	Nutzfläche [m <sup>2</sup> ]	Nutzfläche pro Geschoß [m <sup>2</sup> ]
1	EG	101	212
2	EG	111	
3	OG 1	105	264
4	OG 1	159	
5	OG 2	106	269
6	OG 2	163	
<b>Summe</b>		<b>745</b>	

Die lichte Raumhöhe in den oberirdischen Geschoßen liegt zwischen 3,5 und 3,9 m. Die Geschoßhöhe – hier bezogen von FBOK bis FBOK – liegt in etwa bei ca. 3,9 bis 4,3 m. Das Dach des Gebäudes gleicht näherungsweise einem Walmdach mit einer Dachneigung von ca. 35°. Das direkt an das Gebäude angrenzende Terrain weist keine größeren Sprünge auf. Die FBOK des Erdgeschoßes liegt in etwa 0,80 m über der Umgebung.

### 4.3 Aktuelle Nutzung

Die derzeitige Nutzung des Objekts ist nicht einheitlich. Der Großteil des Gebäudes steht der TU Graz und damit Verbindung stehenden Organisationen und Institutionen zur Verfügung. Nur ein kleiner Teil wird zu Wohnzwecken genutzt. Das Kellergeschoß ist überwiegend als Lagerraum in Verwendung oder leer. Tabelle 18 gibt für alle Nutzungseinheiten die derzeitige Nutzung bzw. den Nutzer an.

Tabelle 18: Nutzung der einzelnen NE

Nr. NE (Top)	Nutzung/Nutzer
1	Seminarräume
2	Institut der TU Graz
3	Zeichensaal
4	Institut der TU Graz
5	Zeichensaal
6	Privatwohnung (gehört nicht zur TU Graz)

Unter Zeichensälen werden an der TU Graz spezielle Studentengemeinschaften verstanden. In den Räumen wird sowohl gemeinsam gelernt als auch Freizeitaktivitäten nachgegangen. Die Nutzung der Räume ist tagsüber meist ähnlich einer Büronutzung. Im Unterschied zur reinen Büronutzung sind allerdings auch abends öfter Personen anwesend. Küchen sind vorhanden und werden regelmäßig genutzt. Institute der TU Graz nutzen Büroräumlichkeiten in den Gebäuden. Die Seminarräume im Erdgeschoß besitzen keine umfangreiche technische Ausstattung und werden im Vergleich zu den Büros unregelmäßiger genutzt. Im zweiten Obergeschoß befindet sich die einzige Wohnung im Gebäude.

Zur tatsächlichen Nutzung liegen keine Messungen und Aufzeichnungen vor. Aufgrund der teilweise unüblichen (v.a. Zeichensäle) und unregelmäßigen (z. B. Seminarräume) Nutzungen lässt sich der wirkliche Einfluss nicht vollständig mit bestehenden Standard-Nutzungsprofilen beschreiben. Auch weitere Einflüsse wie beispielsweise verringerte Anwesenheit in den Büros aufgrund der Möglichkeit von Home Office werden nicht erfasst. Da allerdings der Schwerpunkt der Untersuchungen nicht auf den konkreten, aktuellen Nutzungen des Gebäudes liegt, sondern allgemeinere Fälle der Nutzung als Büro und Wohnraum behandelt werden, sind die tatsächlichen Nutzungsdaten von untergeordneter Bedeutung.

## **4.4 Gebäudesubstanz**

Eine umfassende Aufnahme eines alten Gebäudes inklusive der Untersuchung von detaillierten Materialparametern wäre ein bedeutender Aufwand. Die Standardisierung und Normierung von bautechnischen und bauphysikalischen Eigenschaften der verwendeten Bauelemente und Materialien war zur Errichtungszeit nicht so weit fortgeschritten wie heute. Zusätzlich sind die Bauteile im Laufe der Zeit Einflüssen ausgesetzt, die sich nur schwer und mit hohem Aufwand quantifizieren lassen. Die Informationen zur Gebäudesubstanz, die in dieser Arbeit verwendet werden, stammen deshalb überwiegend aus einfachen, nicht-zerstörenden Aufnahmen bzw. Besichtigungen vor Ort sowie von diversen Literaturquellen.

### **4.4.1 Bauteile und Baustoffe**

Zu den Bauteilen zählen sowohl die flächigen, raumbildenden Bestandteile wie Wände und Decken sowie auch Einbauteile wie Fenster und Türen.

#### **4.4.1.1 Baustoffe**

Das Hauptmaterial der Wände, innen und außen, ist Vollziegelmauerwerk mit Normalmörtel. Die Oberflächen bestehen aus Putzmörtel. Verschiedene Literaturwerte wurden herangezogen, um die Materialeigenschaften des Mauerwerks zu erhalten. Aufgrund des großen Anteils des Ziegelmauerwerks an den Bauteilen – insbesondere auch den Außenbauteilen – wird dieses detaillierter betrachtet als andere Baustoffe. Eine Übersicht der verschiedenen Werte für Mauerwerk zeigt Tabelle 19. Die Eigenschaften des Mauerwerks setzen sich aus jenen der Mauersteine und des Mörtels zusammen. Effekte, die nicht berücksichtigt werden, sind Änderungen der Baustoffeigenschaften aufgrund einer möglichen Durchfeuchtung, deren Auftreten vor allem im Keller- und Sockelbereich wahrscheinlich ist.

Tabelle 19: Materialdaten Mauerwerk

Bezeichnung	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	Wärmespeicherkapazität	Quelle
	[kg/m³]	[W/(m·K)]	[kJ/(kg·K)]	
Mauerziegel				
Altbauziegel Dresden ZE	1657	0,574	0,907	Masea [48]
Altbauziegel Dresden ZK	1734	0,656	0,919	Masea [48]
Altbauziegel Dresden ZM	1720	0,642	0,917	Masea [48]
Messergebnis Nachbargebäude (M09)	1726	0,576	-	Hafellner [49]
Mauermörtel				
Kalkmauermörtel (KMM)	1600	0,780	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Mauerwerk berechnet				
Altbauziegel Dresden ZE + KMM	1647	0,611	-	berechnet
Altbauziegel Dresden ZK + KMM	1710	0,678	-	berechnet
Altbauziegel Dresden ZM + KMM	1698	0,667	-	berechnet
Messergebnis Nachbargebäude (M09) + KMM	1704	0,613	-	berechnet
Mauerwerk Literatur				
Mauerziegel voll + Normalmauermörtel (1)	1500	0,660	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Mauerziegel voll + Normalmauermörtel (2)	1600	0,690	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Energieausweis L27	-	0,700	-	EAW [45]

Die berechneten Werte für Mauerwerk wurden aus den Daten der verschiedenen Ziegel zusammen mit dem Kalkmauermörtel berechnet. Dabei wurde ein Fugenanteil von 18 % angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk liegt damit in einem Bereich von 0,611 bis 0,690 W/(m·K). Zur Veranschaulichung der Auswirkungen: Bei einer Außenwand mit 80 cm Gesamtstärke (davon 4 cm Putz, 76 cm Mauerwerk) liegt der U-Wert unter Ansatz der minimalen und maximalen Wärmeleitfähigkeit bei 0,68 bis 0,76 W/(m<sup>2</sup>·K).

Die für das Simulationsmodell verwendeten Materialien sind mitsamt den relevanten Materialeigenschaften in Tabelle 20 angegeben. Für die meisten Werte wurde auf die ÖNORM B 8110-7 zurückgegriffen.

Tabelle 20: Materialdaten verwendeter Baustoffe

Bezeichnung	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	Wärmespeicherkapazität	Quelle
	[kg/m³]	[W/(m·K)]	[kJ/(kg·K)]	
Mauerwerk	1600	0,69	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Kalkputz	1600	0,700	0,85	Masea [48]
Nutzholz Fichte/Tanne	475	0,120	1,60	ÖN B 8110-7 [50]
Normalbeton ohne Bewehrung	2000	1,350	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Dämmung erdberührender Fußboden	100	0,038	1,03	ÖN B 8110-7 [50]
Zellulose Einblasdämmung	36	0,041	1,60	ÖN B 8110-7 [50]
Parkett	675	0,160	1,60	ÖN B 8110-7 [50]
Schüttung	1800	0,700	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Ziegelpflaster	1700	0,700	1,00	ÖN B 8110-7 [50]
Tondachziegel	2000	1,000	1,00	ÖN B 8110-7 [50]

#### 4.4.1.2 Bauteile

##### Wände

Die Mauern bestehen überwiegend aus Vollziegelmauerwerk mit Wandstärken von ca. 35 bis 110 cm. Nach oben hin nimmt die Stärke üblicherweise ab. Die Wände sind innen und außen verputzt. Zur Vereinfachung wird bei allen Wänden beidseitig eine Putzdicke von 2 cm angenommen und es wird nicht weiter zwischen verschiedenen Putzarten differenziert. Die U-Werte variieren mit der Wandstärke und liegen bei den Außenwänden ungefähr in einem Bereich von 1,2 W/(m²·K) für Wandstärke 50 cm bis 0,6 W/(m²·K) für Wandstärke 100 cm.

##### Decken

Die Deckenaufbauten sind nicht im Detail bekannt. Im 2020 erstellten Energieausweise des Gebäudes wurden sie ebenfalls nur sehr vereinfacht abgebildet. Deshalb wird in diesem Bereich verstärkt auf Annahmen zurückgegriffen.

Die Decke über dem Kellergeschoß (KG – EG) wird durch ein Ziegelgewölbe gebildet. Darüber befindet sich eine Schüttung mitsamt dem Fußbodenaufbau. Die Deckenhöhe ist aufgrund des Gewölbes uneinheitlich, wird aber vereinfacht mit 0,5 m angenommen. Es ist keine Dämmung vorhanden. Der U-Wert beträgt in etwa 1,0 W/(m²·K).

Die Zwischendecken innerhalb des beheizten Gebäudevolumens (EG – OG1 und OG1 – OG2) werden durch Doppelbaumdecken gebildet. Die Unterseite ist verputzt. Der Fußbodenaufbau besteht vereinfacht aus einer Schüttung und Parkettboden. Die Decken haben ungefähr eine Gesamtdicke von 0,45 m.

Im Bereich über der Durchfahrt grenzt die Decke an die Außenluft. In diesem Bereich ist die Konstruktion ähnlich der Kellerdecke – ein ungedämmtes Gewölbe mit Schüttung. Der U-Wert liegt bei ca. 1,0 W/(m²·K).



Die Decke zum Dachraum (OG2 – DG) besteht ebenfalls aus einer Dippelbaumdecke mit einer Ziegellage. Im Herbst 2023 wurde die Decke an der Oberseite gedämmt. Dazu wurde in die Zwischenräume einer Holzkonstruktion Zellulosedämmung eingeblasen. Der U-Wert liegt bei ca.  $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  im Vergleich zu ca.  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  vor Einbringung der Dämmung.

## Dach

Das Dach selbst ist ein einfaches, ungedämmtes Sparrendach mit Ziegeleindeckung. Der Dachraum besitzt Öffnungen die einen Luftaustausch zwischen Umgebung und Dachraum zulassen.

### 4.4.1.3 Fenster und Türen

Die Fenster des Gebäudes unterscheiden sich in Größe und Bauform. Der Großteil ist in Form von historischen Kastenfenstern ausgeführt. Sie bestehen aus zwei Ebenen mit jeweils einer Scheibe und einem Scheibenzwischenraum von ca. 25 cm. Kleinere Fenster in Bad und WC sind Einfachfenster. Im Stiegenhaus sind Einfachfenster mit 2-Scheiben-Verglasung verbaut. Die Fensterrahmen bestehen in allen Fällen aus Holz. Die Kastenfenster haben aufgrund der vielen Unterteilungen (Sprossen usw.) einen hohen Rahmenanteil bzw. geringen Glasflächenanteil. Die Werte für den Glasflächenanteil liegen bei ca. 60 % der Fensterfläche.

Im Energieausweis des Bestandgebäudes findet sich der Hinweis auf erneuerte Dichtungen der Kastenfenster. [45]

Wärmetechnische Kennwerte für Fenster können für Verglasung und Rahmen getrennt oder gemeinsam als U-Wert des gesamten Fensters angegeben werden. Für historische Kastenfenster finden sich in der Literatur überwiegende Fenster-U-Werte. Für die Verwendung im Simulationsprogramm ist eine Auftrennung in Rahmen- und Verglasungswert nötig. Da eine Auftrennung in Rahmen und Verglasung nicht ohne weiteres möglich ist bzw. bei Kastenfenstern der Rahmen-U-Wert nicht einfach zu definieren ist, wird der Fenster-U-Wert vereinfacht für Rahmen- und Verglasungs-U-Wert eingesetzt. Die U-Werte der Fenster und die Gesamtenergiedurchlassgrade werden in Tabelle 21 angegeben.

Tabelle 21: Wärmetechnische Kennwerte Fenster [51]

Bauart Fenster	U-Wert Fenster	Gesamtenergiedurchlassgrad
	$[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$	$[-]$
Kastenfenster	2,2	0,65
Einfachfenster 1-Scheiben-Verglasung	4,6	0,75
Einfachfenster 2-Scheiben-Verglasung	2,5	0,65

Die meisten Fenster besitzen eine Oberlichte. Nur die Fensterflügel darunter lassen sich öffnen. Bei freier Lüftung (Fensterlüftung) beträgt der Öffnungsquerschnitt somit nur ca. 55 % der gesamten Fensterfläche. Für das Gebäudemodell wurden Fenster mit ähnlichen Abmessungen zu einem Fenstertyp zusammengefasst. An den beiden Schmalseiten des Gebäudes befinden sich teilweise Blindfenster (Scheinfenster). Von außen betrachtet sind nur die dauerhaft geschlossen Holz-Fensterläden zu sehen.



In den Eingangsbereichen, die den Durchgang im Erdgeschoß mit dem Stiegenhaus bzw. mit der Nutzungseinheit 2 verbinden, sind moderne Türen verbaut. Ebenso sind die Zugänge, die vom Stiegenhaus zu den weiteren Nutzungseinheiten führen, mit neueren Türen ausgestattet. Im ersten und zweiten Obergeschoss trennt eine nachträglich errichtete Glas-Metallrahmenkonstruktion einen kleinen Vorraum vom übrigen Treppenhaus ab. Diese Türen besitzen Einscheibenverglasungen; es wird für sie U-Wert von  $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angesetzt. [45] Von diesem Vorraum aus führen alte Holztüren zu den jeweiligen Nutzungseinheiten.

Die Fenster des Gebäudes verfügen über keinen einheitlichen Sonnenschutz. Einige Fenster verfügen über innenliegende vollflächige Holzläden. Diese erlauben es nur, das Fenster zur Hälfte oder ganz zu verdunkeln und ermöglichen keinen an die Lichtverhältnisse angepassten Sonnenschutz. Wenige Fenster sind mit Lamellenjalousien im Scheibenzwischenraum der Kastenfenster ausgerüstet und einige mit innenliegenden Vorhängen. Ein aus Sicht des sommerlichen Wärmeschutzes besonders wirkungsvoller außenliegender Sonnenschutz ist nicht vorhanden. Eine Nachrüstung eines solchen stellt einen Eingriff in das Erscheinungsbild des Gebäudes dar und muss deshalb den entsprechenden Auflagen entsprechen.

#### **4.4.2 Gebäudetechnik**

Das Gebäude Lessingstraße 27 verfügt derzeit über eine Anbindung an das Fernwärmenetz der Stadt Graz. Die Übergabestation befindet sich nicht im Gebäude selbst, sondern im Nachbargebäude (Technikerstraße 4). Von dort aus werden mit einer eigenen Leitung die Adressen Mandellstraße 9 bis 15 sowie Lessingstraße 27 versorgt. Es gibt keinen eigenen Wärmemengenzähler für das untersuchte Gebäude und folglich auch keine expliziten Verbrauchswerte.

Die Wärmeabgabe an die Räume erfolgt über klassische Radiatoren mit Einzelraumregelung durch Thermostatventile. Die Systemtemperaturen (VL/RL) betragen  $70/55 \text{ °C}$ . [45]

Das Warmwasser der von der TU Graz genutzten Räume (Nutzungseinheiten 1 bis 5) wird lokal durch elektrische Kleinspeicher bereitgestellt. Pro Nutzungseinheit ist üblicherweise ein Kleinspeicher in der Küche bzw. Teeküche vorhanden. Die WCs werden nur mit Kaltwasser versorgt.

## 5 Gebäudetechnikkonzept

In diesem Abschnitt wird das Konzept für die Nachrüstung einer Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung durch eine Wärmepumpe in einem Gründerzeithaus beschrieben. Das Konzept umfasst dabei alle benötigten Komponenten der Lüftung, der Wärmerückgewinnung, Heizung und Warmwasser sowie die Hauptwärmequelle, welche in diesem Fall Fernwärme ist. Unterschiedliche Ansätze bei der Ausführung von einzelnen Bestandteilen des Systems sowie verschiedene Produkte von Hersteller würden zu einer großen Anzahl an im Detail verschiedenen Varianten führen. In Rahmen dieser Arbeit wird die Vielfalt und Komplexität deshalb begrenzt, indem meist nur eine von mehreren Entscheidungsmöglichkeiten angewendet wird. Es wird gegebenenfalls auf Alternativen hingewiesen.

Der Detaillierungsgrad der Konzepte soll dabei ausreichend hoch sein, um die entworfene Anlage mit den relevanten Eigenschaften in ein Simulationsmodell implementieren zu können und in weiterer Folge eine Kostenschätzung erstellen zu können. Es wird keine Ausführungs- oder Detailplanung erstellt.

Aufgrund der deutlichen Unterschiede bei Lüftung und Warmwasserversorgung werden zwei verschiedene Nutzungen „Wohnen“ und „Büro“ unterschieden. Real könnten auch beide Nutzungsarten gleichzeitig in einem Gebäude auftreten. Vereinfachend werden aber nur die beiden einheitlichen Nutzungen behandelt. Alle Bestandteile, bei denen nicht auf die unterschiedlichen Nutzungen hingewiesen wird, sind für beide Varianten gleich.

### 5.1 Lüftung

Den umfangreichsten Teil des Anlagenentwurfs macht die Lüftungsanlage aus. Es wird der gesamte Ablauf der Luftführung vom Einstromen durch die Gebäudehülle bis zur Abführung der Fortluft behandelt.

#### 5.1.1 Allgemeines

Das System ist ein reines Abluftsystem, bei dem nur die aus den Räumen stammende Abluft über eine mechanisches Lüftungsanlage abtransportiert wird. Um die Wärme mithilfe einer Wärmepumpe zurückzugewinnen zu können, wird ein Lüftungssystem benötigt, das möglichst die gesamte Abluftmenge zentral an einem Ort zusammenführt. Deshalb wird eine zentrale Abluftanlage verwendet. Andere Methoden wie beispielsweise dezentrale Pendellüfter mit Wärmespeichern oder auch kleinere Lüftungseinheiten mit integrierter Wärmerückgewinnung, die jeweils eine Nutzungseinheit versorgen, werden nicht betrachtet.

Die Anlage erschließt die Nutzungseinheiten über zwei vertikale Sammelschächte, die im Keller zusammengeführt werden. Ein Zentralventilator sorgt für die nötige Luftförderung. Alternativen dazu wären einerseits Einzelschächte je Zone, die allerdings einen höheren Platzbedarf und höhere Investitionskosten bedeuten sowie andererseits Einzelventilatoren, die in jeder Nutzungseinheit angebracht sind. Der von den Aufenthaltsbereichen weiter entfernte Zentralventilator hat den Vorteil, dass er keine Schallemissionen direkt in den Zonen verursacht. [11, S. 353]

Als Aufstellungsort für die Zentrale der Abluftanlage wird der Keller gewählt. Dieser ist derzeit kaum genutzt und bietet ausreichend Platz. Die Zusammenführung der Wärmerückgewinnung, des Wärmespeichers und der Fernwärme ist im Untergeschoss an einer Stelle möglich, ohne lange Verbindungsleitungen zwischen örtlich verteilten Komponenten zu benötigen. Die Fortluft muss, will sie nicht durch das gesamte Gebäude bis zum Dach geführt werden und dabei merklich Platz beanspruchen, seitlich neben dem Gebäude ins Freie geführt werden. Beim konkreten Objekt kommen dafür freie Flächen neben dem Gebäude in Frage. Das Schema der Anlage ist in Abbildung 27 abgebildet. Ein Frischwassermodule ist nur bei der Anlage des Wohnungsgebäudes vorhanden.

Es wäre auch möglich, die Wärmepumpe sowie den Abluftventilator im Dachraum unterzubringen und das Heißwasser zum Speicher im Keller zu leiten oder nur den Abluftventilator im Dachraum zu platzieren und die Wärme mit einem zwischengeschalteten Solekreislauf zur Wärmepumpe im Keller zu übertragen. Bei beiden Varianten entstünden durch die zusätzlichen Kreisläufe weitere Übertragungs- und Transportverluste sowie zusätzliche Installationen. Das Abführen der Fortluft würde sich bei diesen Varianten übers Dach einfacher gestalten. Zu beachten ist dabei, das Fortluftauslässe im Dachbereich unter Umständen durch Vorgaben aus dem Denkmal- und Ortsbildschutz erschwert werden.

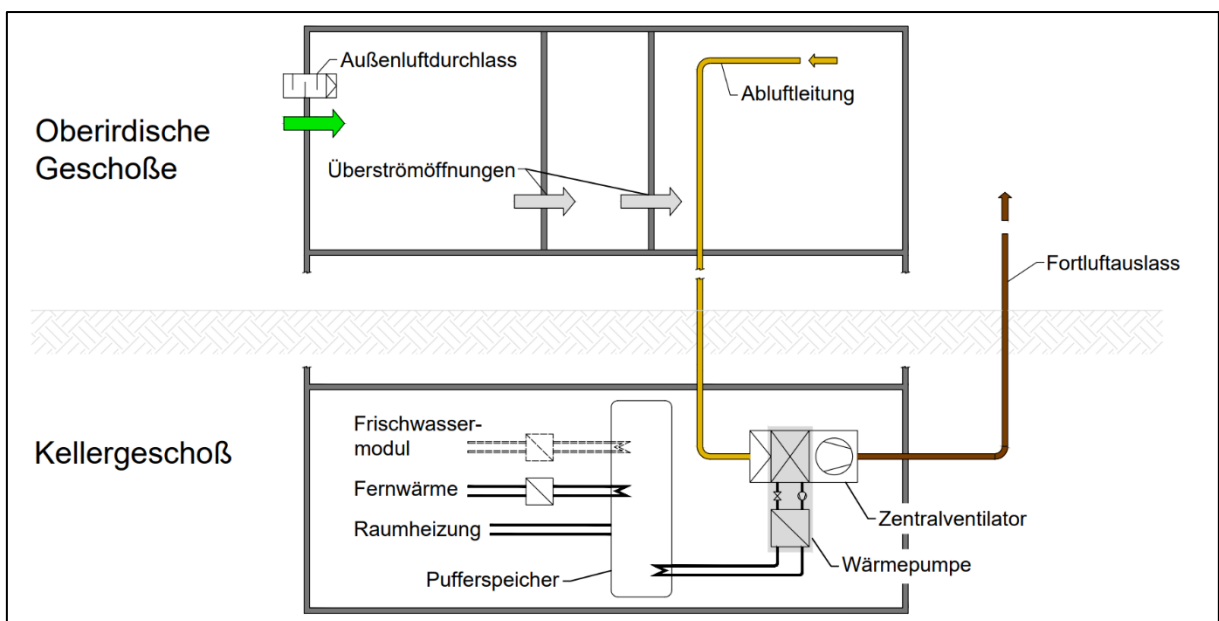


Abbildung 27: Anlagenschema

### 5.1.2 Zonierung

Nicht alle Räume einer Nutzungseinheit grenzen an eine Außenwand und können durch diese mit Außenluft versorgt werden. Diese Räume müssen folglich über angrenzende Zonen mit nachströmender Luft versorgt werden. Zusätzlich soll zum Zweck der Energieeinsparung die Abluft aus manchen Zonen die neue Luft einer angrenzenden Zone werden – genannt Überstromluft. Durch diese Wiederverwendung der Luft kann auch der Installationsaufwand an Luftleitungen reduziert werden, da nun nicht mehr jeder Raum über eigene Abluftleitungen erschlossen werden muss, sondern nur noch jene in der Abluftzone.

Wesentliche Punkte, die es dabei zu beachten gibt, sind:

- Die Überströmluft muss von ausreichender Qualität sein, um noch in anderen Zonen ihre Lüftungsfunktion erfüllen zu können.
- Es muss sichergestellt sein, dass die Luft in ausreichendem Maß ohne unzumutbare Begleiterscheinungen von einer Zone in eine andere überströmen kann. Zu hohe Widerstände am Übergang könnten beispielsweise zu unerwünscht großen Druckunterschieden zwischen, oder zu verminderten Luftwechselraten in den abströmenden Zonen führen. Auch sollen hohe Luftgeschwindigkeiten vermieden werden.
- Die Überströmung soll nicht dazu führen, dass belastete Luft aus beispielsweise Sanitärräumen oder Küchen in andere Räume übertragen wird. Dies muss bei der Zonierung der Räume und dem Entwurf der beabsichtigten Strömungspfade berücksichtigt werden.

Die Räume werden in einem ersten Schritt in Zu-, Überström- und Abluftzonen eingeteilt. Anschließend werden die nötigen Luftvolumenströme festgelegt.

Die Einteilung in die verschiedenen Zonen wird hier beispielhaft am 1. Obergeschoß gezeigt. Prinzipiell ist die Aufteilung in allen Geschoßen ähnlich: In allen oberirdischen Geschoßen wird die Aufteilung je Nutzungseinheit – also je Gebäudehälfte – vorgenommen. Die Sanitär- und Küchenräume liegen in den Geschoßen übereinander. Im Erdgeschoß wird ein Teil der Grundfläche für die Durchfahrt beansprucht. Grundsätzlich erfolgt die Zonierung bei Wohnungslüftungen nach der Nutzung von Räumen wie in Tabelle 22 angegeben.

Tabelle 22: Zuordnung der Nutzung zur jeweiligen Lüftungszone [10]

Lüftungszone	Nutzung
Zuluftraum	Schlaf-, Kinder-, Arbeits-, Wohn-, Gäste- und Esszimmer
Abluftraum	Küche, Bad, WC, Abstellraum
Überströmraum	Gang, Vorraum, Stiege

Dieses Prinzip der Überströmung – auch Mehrfachnutzung der Luft oder Kaskadenprinzip genannt – ist in den meisten Normen wie der ÖNORM H 6038 nur für Wohngebäude und dort auch meist nur im Zusammenhang mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung festgelegt. In den beiden Normen ÖNORM EN 16798-1 und -3 finden sich lediglich am Rande Anmerkungen. Hier soll dieses Prinzip allerdings auch im Rahmen der Büronutzung angewendet werden. Als wesentlichstes Kriterium gilt dabei, dass in den Büroräumen eine ausreichende Luftqualität sichergestellt wird.

Bei der Zonierung wird zwischen Büro- und Wohnnutzung unterschieden. Die grundsätzlichen Aufteilungen ähneln sich. Bei der Wohnnutzung ist der Bereich der Abluftzonen etwas größer, weil zusätzliche Flächen für Badezimmer benötigt werden. Abbildung 28 zeigt die Zonierung beispielhaft am 1. Obergeschoß für die Wohnnutzung und Abbildung 29 für die Büronutzung.



Abbildung 28: Zonierung Wohnnutzung 1. Obergeschoß

In beiden Nutzungseinheiten dient der Flur als Überströmzone. Aufgrund der Lage der Räume in den Ecken des Gebäudes links und rechts haben diese teilweise keine direkte Verbindung zur Überströmzone und entlüften deshalb erst in benachbarte Aufenthaltsräume und diese anschließend in den Flur. In der ÖNORM H 6038 wird dies auch als „erweiterte Mehrfachnutzung der Luft“ bezeichnet. Die Pfeile in der Abbildung sollen nur symbolisch die Luftströmungspfade hervorheben, sie stellen noch keine genaue Positionierung von Lüftungskomponenten dar. Die roten Linien heben die Grenzen von Nutzungseinheiten hervor. Das Stiegenhaus selbst ist dabei nicht an das Abluftsystem angebunden; die Belüftung erfolgt hier natürlich durch Fenster- und Türöffnungen sowie Infiltration. Im Bereich der Eingänge von der Stiege zu den Nutzungseinheiten gibt es einen kleinen Vorraum, der ebenfalls nicht explizit an die Lüftungsanlage angebunden ist. Die nachträglich eingebaute Abtrennung des Stiegenhauses, welche diesen Vorraum abschließt, ist aufgrund der modernen Tür luftdichter als die älteren Wohnungseingangstüren. Dies verringert den Luftaustausch zwischen Nutzungseinheiten und Stiegenhaus. Bei zu großer Druckdifferenz zwischen den beiden Einheiten selbst könnte es allerdings zu unerwünschtem Luftstrom zwischen den beiden über den Vorraum kommen. Das muss bei der Auslegung der Lüftungsanlage beachtet und gegebenenfalls durch Maßnahmen unterbunden werden. Auch ein Austausch der Türen durch neue und luftdichtere Produkte kann dabei in Betracht gezogen werden.



Abbildung 29: Lüftungszonen Büronutzung im 1. Obergeschoß

### 5.1.3 Luftvolumenströme

Bevor mit der Dimensionierung von Komponenten der Lüftungsanlage begonnen werden kann, müssen die Luftwechsel in den Räumlichkeiten vorgeschrieben werden. Hier gibt es deutliche Unterschied zwischen Büro- und Wohnnutzung. Verschiedene Ansätze der Bemessung von Luftwechseln wurden in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Hier wird nun eine Auswahl der Werte auf das konkrete Projekt angewendet. Die Bemessung werden für Wohn- und Büronutzung getrennt durchgeführt.

#### 5.1.3.1 Büronutzung

Luftwechselzahlen sind ein sehr grober Ansatz, was sich auch in der großen Bandbreite der Werte widerspiegelt. Es wird deshalb ein personenbezogener Ansatz angewendet. Dabei stellt sich zu Beginn die Frage nach der Belegungsdichte der Büroräume. Für Arbeitsplätze gibt es die Vorgabe der Arbeitsstättenverordnung. Die Anzahl an Personen wird anhand der Netto-Grundfläche und der Lichteintrittsflächen für alle Arbeitsräume getrennt berechnet und auf volle Arbeitsplätze abgerundet.

Weiters sind auch die Belegungszahlen gemäß SIA 2024 (Kategorie Einzel-, Gruppenbüro) berechnet mit 14 m<sup>2</sup>/Person und aus dem Angang C der ÖNORM EN 16798-1 mit 10 m<sup>2</sup>/Person angegeben (ungerundet).

Aus dieser Norm wurde die Kategorie Einzelbüro verwendet, auch wenn einige Räume von mehreren Personen belegt sind. Die ÖNORM EN 16798-1 unterscheidet nur zwischen Einzelbüro und Bürolandschaft, wobei ersteres die Nutzung in diesem Projekt besser beschreibt. Die Luftvolumenströme gemäß AStVO wurden mit den vorgeschriebenen  $35 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$  berechnet. Die Werte gemäß SIA 2024 mit  $29 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$ . Aus der ÖNORM EN 16798-1 wurde der Ansatz des Verfahren 2 gewählt, der  $25,2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$  ansetzt. Tabelle 23 gibt einen Überblick über die Summen an Luftvolumenströmen je Nutzungseinheit sowie die Belegungszahlen bei Büronutzung, berechnet nach verschiedenen Regelwerken.

Tabelle 23: Belegung und Luftvolumenströme pro Nutzungseinheit bei Büronutzung

Nr. NE	Nutz- fläche Büros	AStVO		SIA 2024		ÖN EN 16798-1 Anhang B	
		Belegung	AUL- Volumen- strom	Belegung	AUL- Volumen- strom	Belegung Einzelbüro	AUL-Volumen- strom Einzelbüro
Nr.	[m <sup>2</sup> ]	[Pers.]	[m <sup>3</sup> /h]	[Pers.]	[m <sup>3</sup> /h]	[Pers.]	[m <sup>3</sup> /h]
1	74	12	420	5,4	153	7,5	186
2	82	12	420	5,9	171	8,2	207
3	78	13	455	5,6	161	7,8	196
4	121	18	630	8,6	250	12,1	304
5	79	12	420	5,7	164	7,9	200
6	124	18	630	8,8	256	12,4	312
<b>Σ</b>	<b>559</b>	<b>85</b>	<b>2975</b>	<b>39,9</b>	<b>1155</b>	<b>55,9</b>	<b>1405</b>

Die Vorgaben der AStVO sind deutlich höher als die der beiden anderen Ansätze. Der Grund dafür liegt in der höheren Belegung und dem höheren personenbezogenen Luftvolumenstrom. Ob diese Luftvolumenströme mit einer Abluftanlage mit Außenluftdurchlässen noch erreichbar sind, ist fragwürdig (siehe 5.1.4). Es wird deshalb im Projekt der Ansatz gemäß ÖNORM EN 16798-1 verwendet. Dieser Ansatz lässt folglich nur eine geringere Belegung zu bzw. muss gegebenenfalls die Lüftung durch die Abluftanlage mit Fensterlüftung kombiniert werden (Hybridlüftung).

### 5.1.3.2 Wohnnutzung

Auch für die Wohnnutzung wurde für den Außenluftvolumenstrom ein personenbezogener Ansatz angewendet. Mit der Belegungsdichte von  $28,3 \text{ m}^2/\text{Person}$  aus Anhang C der ÖNORM EN 16798-1 wurde die Personenanzahl für alle Nutzungseinheiten ermittelt. Diese wird ungerundet verwendet. Mit dieser Personenanzahl wird pro Wohneinheit der Außenluftvolumenstrom bei Belegung ermittelt. Dafür wird ein Luftvolumenstrom von  $25,2 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Person})$  verwendet. Neben dem Außenluftvolumenstrom gibt es vorgeschriebene Abluftvolumenströme in den Hygieneräumen (Küche und Sanitärräume). Die ÖNORM H 6036 unterscheidet dabei in Betriebs- und Grundluftvolumenstrom. Der Betriebsluftvolumenstrom wird während der Nutzung eines Hygieneraumes gefordert. Der niedrigere Grundluftvolumenstrom ist eine Empfehlung zur Mindestlüftung bei Dauerbetrieb, um bauphysikalischen und hygienischen Anforderungen gerecht zu werden. Für die Auslegung der Anlage wird der Betriebsluftvolumenstrom verwendet.

Er setzt sich zusammen aus 60 m<sup>3</sup>/h für das Bad, 40 m<sup>3</sup>/h für das WC und 60 m<sup>3</sup>/h für den Aufenthaltsbereich in der Küche. Der Dunstabzug mit sehr hohen momentanen Volumenströmen (200 bis 800 m<sup>3</sup>/h) wird nicht durch das Abluftsystem abgedeckt. Der Dunstabzug ist deshalb komplett getrennt vom Lüftungssystem. In Summe ergibt das im Betriebszustand einen Luftvolumenstrom von 160 m<sup>3</sup>/h je Nutzungseinheit. [13]

Bei Abwesenheit der Nutzer muss mindestens ein Luftvolumenstrom von 0,36 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) eingehalten werden. [6] Die Ergebnisse der Bemessung sind in Tabelle 24 angeführt.

Tabelle 24: Luftvolumenströme Wohnnutzung

NE (Top)	Personen	Auslegungs- Außenluftvolumenstrom	Auslegungs- Abluftvolumenstrom
Quelle	ÖNORM EN 16798-1	ÖNORM EN 16798-1	ÖNORM H 6036
Nr.	[Personen]	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]
1	3,6	90	160
2	3,9	99	160
3	3,7	94	160
4	5,6	141	160
5	3,8	95	160
6	5,8	145	160
<b>Summe</b>	<b>26,3</b>	<b>663</b>	<b>960</b>

Für die Dimensionierung der Anlage wird der höhere Wert herangezogen, welcher in diesem Fall durch die vorgeschriebenen Abluftvolumenströme verursacht wird (Auslegungs-Abluftvolumenstrom). Für die Energiesimulationen liegt der Luftvolumenstrom (Auslegungs-Außenluftvolumenstrom) für den hygienischen Luftwechsel hingegen bei dem Ansatz gemäß ÖNORM EN 16798-1, da die Hygieneräume nicht durchgehend benutzt werden. Rechnet man den Außenluftvolumenstrom um in eine Luftwechselzahl unter Anwendung der gesamten Nutzfläche einer Wohneinheit und einer fiktiven Raumhöhe von 2,6 m, ergibt sich ein Wert von 0,34 1/h.

Da bei einer Abluftanlage mit Überströmung, wie sie hier geplant wurde, keine raumweise Regelung durch die Anlage selbst möglich ist, kann es sein, dass sich abhängig vom Aufenthalt der Personen geringe Luftvolumenströme einstellen. Sollten sich beispielsweise mehrere Personen eines Haushalts in einer Zone versammeln, ist der Luftvolumenstrom in diesem Raum unter Umständen zu gering. Die Nutzer können durch zusätzliche Fensterlüftung und das Öffnen bzw. Schließen von Innentüren Einfluss auf die Durchströmung der einzelnen Räume nehmen.

#### 5.1.4 Außenluftdurchlässe

Die Außenluftdurchlässe (auch Außenbauteil-Durchlässe, in weiterer Folge mit „ALD“ abgekürzt) lassen Außenluft durch die Gebäudehülle ins Innere strömen. Nachdem es bei reinen Abluftanlagen keine mechanisch geförderte Zuluft gibt, dienen diese Elemente der Versorgung mit frischer Luft (bei geschlossenen Fenstern).

Hier werden ausschließlich passive Durchlässe behandelt, was bedeutet, dass sich die Luftströmung nur aufgrund von Druckunterschieden zwischen außen und innen einstellt und es keine ventilatorgestützte Förderung in den ALD gibt.



## Bauformen von ALD

ALD gibt es in verschiedenen Bauformen und mit unterschiedlichen Zusatzfunktionen. Sie können in den Fensterrahmen und Rollladenkästen integriert, Fensterlaibungen seitlich sowie oben und unten oder auch in Außenwänden eingebaut werden. Neben den verschiedenen Montageformen gibt es noch weitere optionale Zusatzfunktionen. Durch Schalldämmmaßnahmen wie beispielweise Kulissen in zylinderförmigen Wanddurchlässen, können höhere Anforderung an den Schallschutz erfüllt werden. Auch Rückströmsicherungen, Staubfilter und Insektenschutzgitter können integriert werden (Hersteller sind z. B. Fa. Aereco [52], Fa. inVenter [53] oder Fa. Ventomaxx).

Die Gegebenheiten von historischen Gebäuden schränken die Auswahlmöglichkeiten an passenden ALD ein. Die Anforderungen zum Zweck des Erhalts des Erscheinungsbildes lassen nur geringe sichtbare Veränderungen der Fassade zu.

Die Bauarten von ALD mit dem geringsten Einfluss sind entweder in den Fensterrahmen selbst oder in der Fensterlaibung integriert. Die meisten der am Markt verfügbaren Fenster-ALD sind allerdings für Einfachfenster und nicht für in Gründerzeitgebäuden häufig anzutreffende Kastenfenster gedacht. Auch das in dieser Arbeit behandelten Gründerzeitgebäude Lessingstraße 27 besitzt bis auf wenige Ausnahmen Kastenfenster (Abbildung 30). In Aufenthaltsräumen, die als Zulufräume bevorzugt werden befinden sich ausschließlich Kastenfenster. Darüber hinaus besitzen Gründerzeitgebäude oft große Wandstärken, die durch das Element überbrückt werden müssen.



Abbildung 30: Kastenfenster im Erdgeschoß der Lessingstraße 27

Abbildung 31 zeigt Einbauformen von Außenluftdurchlässen der Firma Ventomaxx, die sich in das äußere Erscheinungsbild gut einfügen und von außen kaum auffallen.

Alle vier gezeigten Ausführungen werden im Bereich des Fensters verbaut; je nach Variante seitlich (a), in der Brüstung (b, d) oder im Sturzbereich (c).

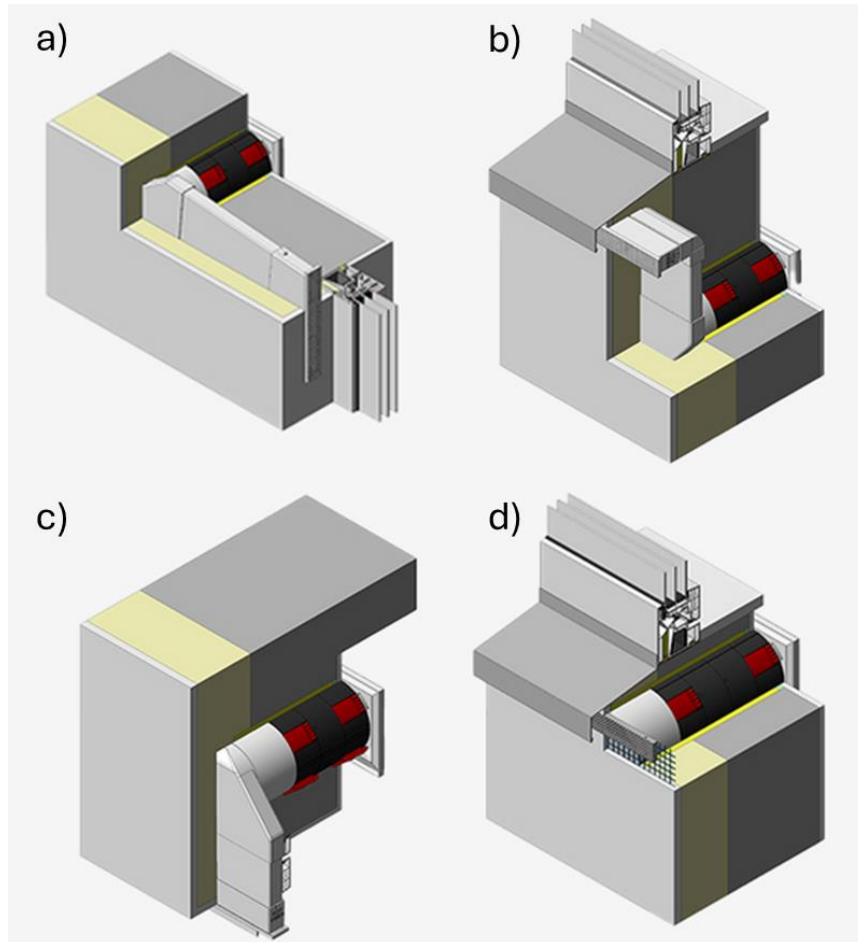


Abbildung 31: Verschiedene Einbauformen von ALD des Herstellers Ventomaxx [54]

Schwieriger gestalten kann sich hingegen der Einbau der Elemente mit abgewinkelten Flachkanälen. In diesem Hinblick ist Variante (d) einfacher umzusetzen.

### Positionierung und Behaglichkeit

Die Positionierung von ALD hängt von der Bauform ab. Modelle wie die in Abbildung 31 gezeigten erlauben eine gewisse Flexibilität der Position des inneren Auslasses. Durch die höhere Flexibilität, lässt sich bei der Festlegung der genauen Einlassposition mehr Rücksicht auf die Vermeidung von unerwünschten Zugerscheinungen nehmen.

Die kalte Außenluft kann durch Positionierung hinter einem Heizkörper, die sich typischerweise und auch beim untersuchten Gebäude unter dem Fenster befinden, vorgewärmt werden. [55, S. 236] Die Ausführung (b) in Abbildung 31 würde dies ermöglichen. Weitere Empfehlungen zur Positionierung sind in Abbildung 32 abgebildet. Diesen zufolge ist vor allem ein tangentialer, also parallel zur Wandfläche verlaufender Luftstrahl, einem senkrecht zur Wand stehenden vorzuziehen. [56, S. 89]

Es sei hier noch angemerkt, dass die Untersuchung der lokalen thermischen Behaglichkeit (bspw. Zugluft aufgrund von ALD) kein Bestandteil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen ist.

Ebenso werden bauphysikalische Auswirkungen auf angrenzende Bauteile aufgrund der Luftströmung durch ALD und durch Infiltration (z. B. lokale Abkühlung der Wände) nicht behandelt.

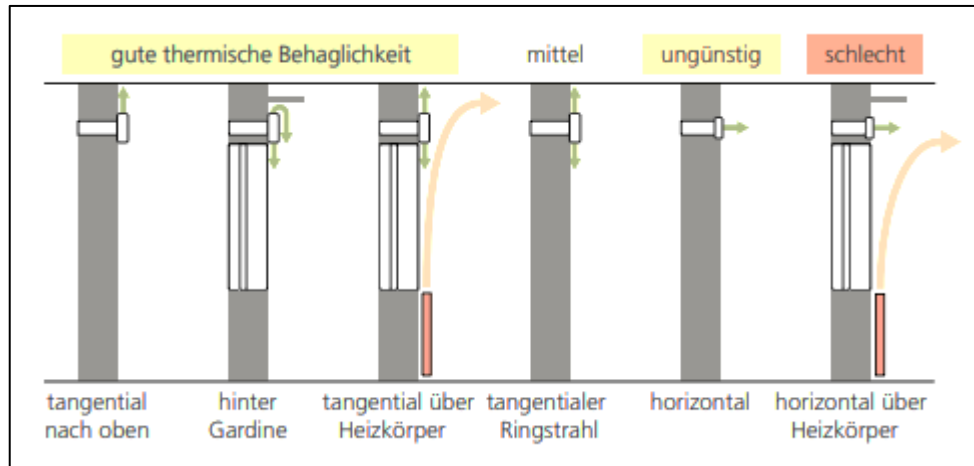


Abbildung 32: Empfehlungen zur Positionierung von Außenluftdurchlässen aus Sicht der Behaglichkeit [56, S. 89]

### Dimensionierung der ALD

Bei passiven ALD hängt der Luftvolumenstrom von der Druckdifferenz zwischen innen und außen ab. Darüber hinaus können spezielle Regelungssysteme den Volumenstrom beeinflussen. Produkte einiger Hersteller besitzen eine feuchtegesteuerte Anpassung der Öffnung; andere bieten Begrenzungsfunktionen, durch die hohe Windgeschwindigkeiten im Außenbereich und damit hohe Druckunterschiede den Volumenstrom nicht zu stark ansteigen lassen sollen. [52] Zubehörteile wie Wetterschutzhauben, Filter oder Insektenschutzgitter sowie verschiedene Montagevarianten haben zusätzlich einen Einfluss auf die auftretenden Luftströme.

Für die Auslegungsdruckdifferenz findet sich in der DIN 1946-6 der Hinweis auf 8 Pa [9, S. 48] für die Nennlüftung. Die Begrenzung dient dazu, Strömungsgeräusche und zu hohe Bedienkräfte bei Türen (gegen außen) zu vermeiden. Die Infiltration wird bei dieser Auslegung hier vernachlässigt, d. h. der gesamte Luftstrom wird rechnerisch durch die ALD abgedeckt. Der erzielbare Luftvolumenstrom pro ALD bei dieser Druckdifferenz liegt bei den Produkten der Firma Ventomaxx bei höchstens 50 m<sup>3</sup>/h. [57] Die maximale Anzahl an Arbeitsplätzen, die für einen Raum in dem Gebäude laut Arbeitsstättenverordnung zulässig ist, liegt bei 6 Personen und damit der Soll-Außenluftvolumenstrom bei 210 m<sup>3</sup>/h. Dazu wären fünf Durchlässe erforderlich. Ob derart viele Durchlässe platziert werden können und aus Sicht der lokalen Behaglichkeit noch zulässig sind ist fragwürdig. Beim Ansatz gemäß ÖNORM EN 16798-1 liegt das Maximum bei 3,4 Personen und 85 m<sup>3</sup>/h, wozu zwei ALD ausreichen. Bei Nutzung als Wohnraum lässt sich der nötige Luftvolumenstrom mit ein bis zwei ALD pro Raum erreichen. Die Fa. Ventomaxx gibt auch ein Referenzprojekt an, bei denen ALD in einem Gebäude aus dem Zeitraum der Jahrhundertwende nachgerüstet wurde. [58]

### 5.1.5 Überströmung

Überströmung dient dem Luftaustausch zwischen einzelnen Lüftungszonen innerhalb eines Gebäudes. Die Luft muss auch bei geschlossenen Innentüren zwischen den verschiedenen Zuluft-, Überström- und Abluftzonen strömen können. Wieder gibt es die Unterscheidung in aktive und passive Bauteile.

Passive Bauteile funktionieren nur aufgrund der Druckdifferenzen zwischen Räumen, während aktive Elemente mithilfe von Ventilatoren die gewünschte Luftbewegung erzeugen. Verschiedene Einbauformen und spezielle Ausführungen können Zusatzfunktionen erfüllen. Folgende Optionen stehen bei der Umsetzung prinzipiell zur Verfügung [59]:

- Luftspalt unter Türblättern bzw. Kürzen von Türblättern
- Fugen zwischen Türzarge und Laibung
- Überströmdurchlässe in Türblättern
- Überströmdurchlässe in Wänden und Decken

Schlitze unter Türblättern sind einfach zu realisieren, haben aber den Nachteil des deutlich schlechteren Schallschutzes. Spezielle Elemente in Wänden oder Türen können je nach Ausführung einen höheren Schallschutz gewährleisten. Zusätzlich können Überströmdurchlässe (in weiterer Folge mit „ÜLD“ abgekürzt) auch mit Brandschutzvorrichtungen und Rückschlagklappen ausgestattet werden.

Als Obergrenze für Druckdifferenzen bzw. Strömungsgeschwindigkeit bei Überströmöffnungen werden Werte von 1,5 Pa bzw. 1,5 m/s [9, S. 49] angegeben. Geringere Werte führen zu wirksameren Lüftungssystemen. Der Einfluss durch das Öffnen und Schließen der Innentüren auf die Luftströmpfade nimmt bei geringeren Druckverlusten (geringeren Strömungswiderständen) ab. Die DIN 1946-6 gibt folgende Formel zur Dimensionierung der Öffnungsfläche von Überströmöffnungen an [9, S. 48]:

$$A_{\text{ÜLD}} \geq f_{\text{ÜLD}} \cdot \frac{q_{v,\text{ÜLD}}}{\Delta p_{\text{ÜLD}}^{0,5}} - k_{\text{Dichtung}}$$

$A_{\text{ÜLD}}$	freie Mindestfläche des Überström-Luftdurchlasses [cm <sup>2</sup> ]
$f_{\text{ÜLD}}$	Faktor zu Auslegung = 3,1 [-]
$q_{v,\text{ÜLD}}$	Auslegungswert des Luftvolumenstroms [m <sup>3</sup> /h]
$\Delta p_{\text{ÜLD}}$	Druckabfall am Überström-Luftdurchlass [Pa] (maximal 1,5 Pa)
$k_{\text{Dichtung}}$	Korrekturwert [cm <sup>2</sup> ] zur Berücksichtigung, ob die Tür mit einer Dichtung versehen ist ( $k_{\text{Dichtung}} = 0$ cm <sup>2</sup> ) oder keine Dichtung hat ( $k_{\text{Dichtung}} = 25$ cm <sup>2</sup> )

Bei Innentüren mit 100 cm Breite und keiner Dichtung wird demnach eine freie Mindestfläche von 101 cm<sup>2</sup> benötigt, um einen Luftvolumenstrom von 50 m<sup>3</sup>/h bei einer Druckdifferenz von 1,5 Pa zu erreichen. Dies entspricht ca. einem Luftspalt von 1 cm an der Türunterseite. Bei einer Türbreite von 80 cm wären es schon ca. 1,3 cm Luftspalt.

### 5.1.6 Abluftleitungen

Die Abluftleitungen nehmen die verbrauchte Luft in den Abluftzonen auf und fördern sie durch Lüftungskanäle zur Zentrale.

Die wesentlichen Bestandteile sind neben den Leitungen selbst die Ablufteinlässe, Regelungselemente, Brandschutzeinrichtungen, Schalldämpfer und Rückschlagklappen. Abluftdurchlässe dienen dem Eintritt der Raumluft in die Luftkanäle der Lüftungsanlage. Im Gegensatz zu Zuluftdurchlässen, die Zuluft aus den Lüftungsrohren in den Raum einbringen, ist die Position und Gestaltung der Abluftdurchlässe in Bezug auf die Behaglichkeit weniger kritisch. Positioniert werden Abluftdurchlässe üblicherweise in Deckennähe. [60]

Rückschlagklappen dienen der Vermeidung von unerwünschten Luftströmungen in Anlagen. Ist beispielsweise bei Einzellüfter-Systemen ein Lüfter nicht in Betrieb, könnte die Abluft in andere Zonen strömen. Um dies zu vermeiden, werden nötigenfalls Rückschlagklappen eingebaut, die in diesem Fall dicht schließen. [8, S. 18]

Im Falle eines Brandes muss durch technische Maßnahmen sichergestellt werden, dass raumlufttechnische Anlagen nicht zur Verbreitung von Rauch und Feuer im Gebäude beitragen. Brandschutzklappen sorgen für einen Abschluss eines Teils des Luftleitungsnetzes an der Grenze von Brandschutzabschnitten. [8, S. 38]

Luftleitungen dienen der Förderung von Luft in einem Lüftungssystem. In einem Abluftsystem transportieren sie die verbrauchte Raumluft zum Lüftungsgerät. Die gängigsten Arten sind runde Rohre (üblicherweise Wickelfalzrohre) und rechteckige Kanäle aus Blech. Luftkanäle benötigen im Vergleich mit anderen gebäudetechnischen Gewerken nicht nur mehr Platz, sie verursachen auch einen beträchtlichen Anteil (ca. die Hälfte) an den Investitionskosten einer klassischen Lüftungsanlage [11, S. 400]. Die Verringerung der Menge an Luftleitungen und damit verbundene Einsparungen bei Platzbedarf und Investitionskosten ist ein wesentlicher Hintergedanke des Ansatzes einer reinen Abluftanlage.

Lüftungsanlagen verursachen betriebsbedingte Geräusche. Um diese zu reduzieren, können Schalldämpfer eingesetzt werden. Üblicherweise sind Schalldämpfer ein Bestandteil von Lüftungszentralen, um die dort entstehenden Geräusche auf dem Weg zu den Räumen abzumindern. Zusätzlich kann bei Durchdringungen in Wänden und Decken die ursprüngliche Schalldämmung zwischen aneinandergrenzenden Räumen beeinträchtigt sein. In diesen Fällen werden bei Bedarf Telefonieschalldämpfer eingesetzt, die diese Übertragung zwischen Räumen reduzieren. [8, S. 51]

Die Kanalquerschnitte werden entsprechend den Volumenströmen und der Luftgeschwindigkeit in Kanälen dimensioniert. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten verringern sich die Dimensionen der Luftleitungen und damit deren Platzbedarf; es entstehen allerdings auch höhere Druckverluste- und Energieverluste im System. Diese steigen quadratisch mit der Luftgeschwindigkeit an. Es ist folglich ein Abwägen zwischen höheren Investitionskosten und niedrigeren Betriebskosten und umgekehrt. Übliche Werte für Luftgeschwindigkeiten unterscheiden sich je nach Quelle:

Tabelle 25: Verschiedene Angaben zur Luftgeschwindigkeit in Kanälen

Quelle	Verwendung	Luftgeschwindigkeit [m/s]
ÖNORM H 6036 [13]	Sammelleitungen bei Betriebsvolumenstrom	6
ÖNORM H 6038 [10]	-	3,5
Bohne [11]	Niederdruck-Anlagen	4 bis 10
Pech [8]	-	5 bis 10

Für die Dimensionierung der Anlagen werden einheitlich 4 m/s Luftgeschwindigkeit angesetzt.

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Abluftkanäle (gelb) zum Zentralventilator im Kellergeschoß und den Fortluftstrang (braun) samt Fortluftturm in einer 3D-Ansicht. Die hohen Raumhöhen erleichtern die Platzierung der Lüftungsanlage.

Die Durchmesser der vertikalen Lüftungsleitungen betragen in den Obergeschossen im Fall der Büronutzung ca. 250 mm und im Fall der Wohnnutzung ca. 150 mm. Diese Leitungen können aus optischen Gründen sowie zur Verringerung der Schallübertragung in die Wohneinheiten noch mit einer Verkleidung umgeben werden. Daraus ergibt sich der Verlust an Nutzflächen im Grundriss der einzelnen Einheiten.

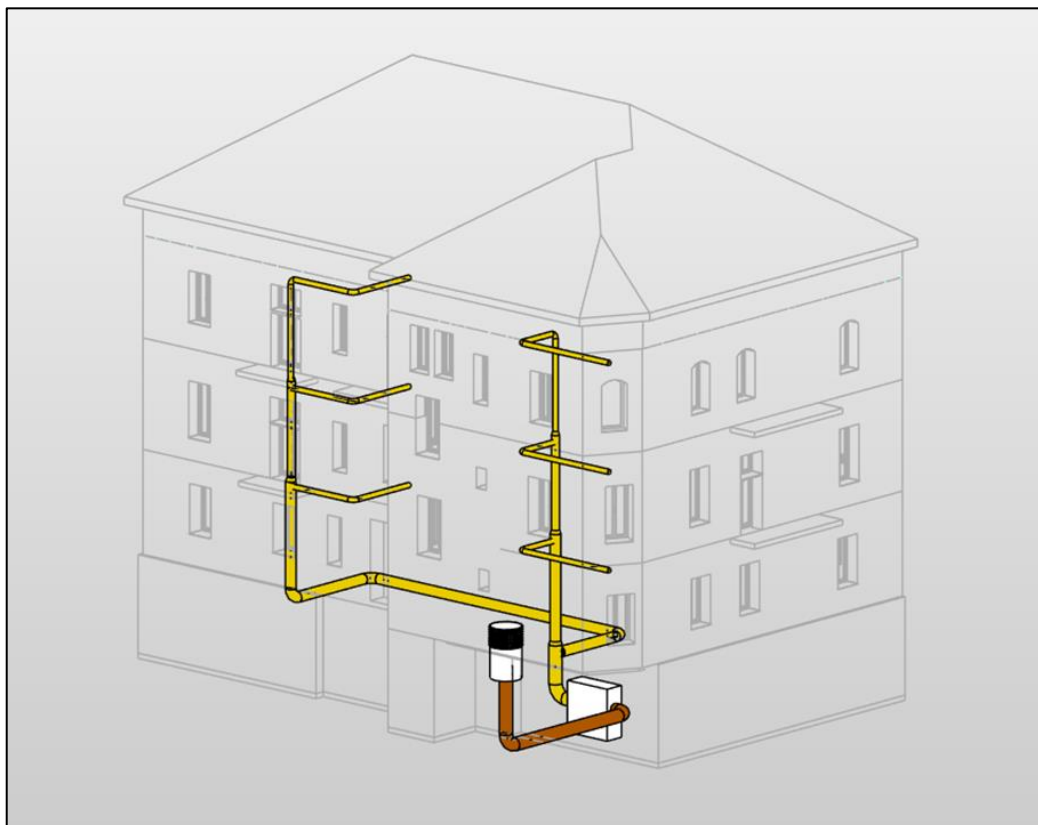


Abbildung 33: Verlauf der Abluft- und Fortluftkanäle

### 5.1.7 Druckverlust und pneumatischer Abgleich

Um den Ventilator einer Lüftungsanlage auslegen zu können, wird neben der Fördermenge (dem Luftvolumenstrom) die Druckdifferenz benötigt, die der Ventilator aufbringen muss. Leitungen, Formteile und Einbauteile führen aufgrund von Reibung zu Druckverlusten im System. Der ungünstigste Strompfad eines verzweigten Netzes ist maßgeblich für die Auslegung des Ventilators. [8, S. 81]

Für die Auslegung eines Abluftsystems werden neben den Druckverlusten im Leitungsnetz auch die Druckdifferenzen der ALD und Überströmöffnungen benötigt. Der ungünstigste Weg – jener mit den höchsten Druckverlusten – ist in diesem System jener, der die Nutzungseinheit 6 versorgt. Tabelle 26 gibt die Druckverlustberechnung in einer zusammengefassten Form an. Für die Werte aus Rohrreibung und Einbauteilen wurde auf Angaben aus [8] zurückgegriffen.

Tabelle 26: Zusammengefasste Druckverluste für beide Systeme

Bestandteil System	Druckverlust	
	Wohnen	Büro
	[Pa]	[Pa]
Außenluftdurchlässe	8	8
Überströmung	3	3
Abluftgitter	30	30
Rohrreibung	11	15
Rohrformteile	56	56
Schalldämpfer	30	30
Brandschutzklappen	10	10
Zentrale	180	180
Fortluftstrang	30	30
<b>Summe</b>	<b>362</b>	<b>366</b>

### Volumenstromregler und Regulierklappen

Bei Zentralventilator-Systemen erzeugt ein einzelner Ventilator die benötigte Druckdifferenz für das ganze Rohrnetz. Nun verursachen allerdings verschiedene Wege im Lüftungskanalnetz von der Zentrale bis zum Luftauslass in den Raum auch verschiedene Druckverluste. Dies würde in weiterer Folge dazu führen, dass sich bei Wegen mit geringerem Druckverlust (geringerer Widerstand) höhere Volumenströme einstellen als bei jenen mit höheren Druckverlusten. Diese Volumenströme stimmen also nicht notwendigerweise mit den berechneten Soll-Volumenströmen überein.

Gelöst wird dieses Problem durch Bauteile, die den Widerstand in bestimmten Abschnitten des Kanalnetzes verändern und damit für den gewünschten Volumenstrom sorgen. Diese Bauteile können entweder Drosselklappen (Regulierklappen) oder Volumenstromregler sein. Regulierklappen bringen einen zusätzlichen Druckverlust für alle in Strömungsrichtung dahinterliegenden Bereiche ein. Sie werden bei der Errichtung bzw. Änderung der Lüftungsanlage eingestellt und ändern ihre Stellung im Betrieb nicht. Ermittelt wird der nötige, zusätzlich aufzubringende Widerstand bei der Kanalnetzberechnung. Der Vorgang des Angleichens der Druckverluste wird im Bereich der Lüftungsanlagen auch als pneumatischer (umgangssprachlich auch „hydraulischer“) Abgleich bezeichnet.



Volumenstromregler bewirken hingegen einen konstanten Volumenstrom unabhängig vom anliegenden Druck (innerhalb gewisser Grenzen). Es gibt selbsttätige Regler, die nur durch den Druck im Rohrsystem betätigt werden und mit Stellmotoren betriebene Varianten. [8, S. 38]

Werden im Lüftungssystem nur Konstant-Volumenstromregler (KV-System) eingesetzt, kann die Luftmenge für unterschiedliche Teilstränge nicht unabhängig voneinander verändert werden. Sollen die Strömungsverhältnisse in einzelnen Teilbereichen des Lüftungsnetzes individuell verändert werden können, sind variable Regelgeräte (VV-System) einzusetzen. Diese Bauteile besitzen Messvorrichtungen und ansteuerbare Stellglieder, die innerhalb eines gewissen Regelbereiches Änderungen im Betrieb zulassen. Somit ist es möglich einzelne Nutzungseinheiten mit dem Auslegungs-Luftstrom zu versorgen, während unbesetzte Zonen nur den Mindes-Luftvolumenstrom erhalten.

### 5.1.8 Zentralventilator

#### Auslegung

Ventilatoren sorgen bei mechanischen Lüftungssystemen für die Luftbewegung. Diese Luftbewegung entsteht durch Druckunterschiede im Rohrnetz. Der Ventilator wandelt mechanische Energie in Strömungsenergie um und erzeugt dabei einen Unter- oder Überdruck. Die Gesamtdruckdifferenz, die der Ventilator aufbringen muss, wurde bei der Druckverlustberechnung ermittelt und beträgt 360 Pa. Gemeinsam mit dem Gesamtvolumenstrom ergibt sich die aerodynamische Leistung des Ventilators. [61]

$$P_{aerodyn} = \dot{V} \cdot \Delta p_t$$

$P_{aerodyn}$  ... aerodynamische Leistung [W]

$\dot{V}$  ... Luftvolumenstrom [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta p_t$  ... Gesamtdruckdifferenz [Pa]

Mit dem Gesamtwirkungsgrad, der Verluste von Motor, Übertragung und aufgrund von Luftreibungen sowie Luftverwirbelungen berücksichtigt, kann der elektrische Leistungsbedarf ermittelt werden. Der Gesamtwirkungsgrad hängt von der Bauform des Ventilators sowie den Eigenschaften des Motors ab. Typische Werte für einen Radialventilator liegen bei 0,4 bis 0,8. [8]

$$P_{el} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{\eta_t}$$

$P_{el}$  ... elektrische Leistung [W]

$\eta_t$  ... Gesamtwirkungsgrad [-]

Für das entworfenen Systeme sind die erforderlichen Ventilatorleistungen in Tabelle 27 angegeben.



Tabelle 27: Ermittlung der Ventilator-Antriebsleistungen

Größe	Wohnen	Büro	Einheit
$\dot{V}$	960	1406	[m³/h]
$\Delta p_{\text{ges}}$	360	360	[Pa]
$P_{\text{aerodyn}}$	960	1406	[W]
$\eta_t$	0,7	0,7	[-]
$P_{\text{el}}$	1371	2008	[W]

### 5.1.9 Fortluft

Für die Abführung der Fortluft bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten: Die Luft nach der Wärmepumpe wird vertikal durch das Gebäude nach oben über das Dach geführt oder zu einem Auslass neben dem Gebäude. Die Fortluft durch das gesamte Gebäude nach oben zu führen würde einerseits zusätzlichen Verlust an Nutzfläche im Gebäude bedeuten und andererseits einen Dachaufsatz erfordern, der sich unter Umständen nicht mit dem Ortsbildschutz vereinen lässt. Für das Gebäude wird deshalb eine unterirdische Fortluftleitung eingeplant, die von der Zentrale im Keller zu einem Fortluftauslass im Innenhof oder neben dem Gebäude führt.

### 5.1.10 Regelung und Betriebsstrategien der Lüftung

Allgemein unterscheidet die ÖNORM EN 16798-3 bei Lüftungsanlagen folgende Regelungsarten [27]:

- IDA – C1: Die Anlage läuft konstant.
- IDA – C2: Manuelle Regelung durch die Nutzer
- IDA – C2: Zeitabhängige Regelung
- IDA – C4: Belegungsabhängige Regelung: Die Anlage läuft, wenn Personen anwesend sind. Als Belegungssensoren können beispielsweise Infrarotsensoren verwendet werden oder die Anlage wird gemeinsam mit dem Lichtschalter aktiviert.
- IDA – C5: Bedarfsabhängige Regelung anhand der Anzahl der Personen
- IDA – C6: Bedarfsabhängige Regelung mithilfe von Gassensoren. Sensoren messen Konzentrationen relevanter Stoffe wie z. B. CO<sub>2</sub> oder die Luftfeuchtigkeit in der Raumluft und die Anlage verwendet diese Informationen zur Regelung des Luftstroms.

Aufgrund der Bauweise der Anlage kann eine Regelung der Anlage nur auf Ebene der Nutzungseinheiten, nicht aber individuell für jeden Raum einer Nutzungseinheit erfolgen. Es bietet sich an, bei der thermischen Gebäudesimulation, mehrere verschiedene Lüftungsstrategien zu simulieren und ihre Auswirkungen auf den Energiebedarf zu vergleichen. Da in dieser Arbeit die Belegung des Gebäudes durch die Belegungsprofile eindeutig vorherbestimmt ist, entspricht die Simulation einer belegungsabhängigen Regelung quasi einer zeitabhängigen Regelung. Um den Unterschied zwischen belegungsbasierter und zeitbasierter Regelung zu untersuchen wären andere Ansätze für die Belegung nötig (z. B. agentenbasierte Modellierung), die hier nicht angewendet werden. Es werden folgende Bestriebsarten für das Gebäude untersucht:

- Wohnnutzung
  1. Lüftungsstrategie 1: Ein einstufiger, konstanter Betrieb mit dem Auslegungs-Außenluftvolumenstrom von 660 m<sup>3</sup>/h für das gesamte Gebäude
  2. Lüftungsstrategie 2: Der Luftvolumenstrom ist abhängig von der Belegung. Es wird das Personenprofil der ÖNORM EN 16798-1 Anhang C verwendet und damit der Auslegungs-Außenluftvolumenstrom skaliert.
  3. Lüftungsstrategie 3: Es gibt zwei Lüftungsstufen. Von 19:00 bis 7:00 Uhr herrscht der 1,45-fache Auslegungs-Luftvolumenstrom von 960 m<sup>3</sup>/h (entspricht dem maximal möglichen Luftvolumenstrom des Systems), von 7:00 bis 19:00 Uhr der 0,55-fache mit 360 m<sup>3</sup>/h. Im Mittel über den Tag ergibt sich dabei der gleiche Luftvolumenstrom wie bei Strategie 1.
- Bürogebäude:
  1. Lüftungsstrategie 1: Eine zweistufige Lüftung von 7:00 bis 19:00 Uhr. Außerhalb der Belegungszeit ist die Anlage außer Betrieb. Diese Variante simuliert eine Zeitregelung.
  2. Lüftungsstrategie 2: Eine mehrstufige, belegungsabhängige Regelung, die sich am Personenprofil aus der ÖNORM EN 16798-1 für Büros orientiert. Der tatsächliche Luftvolumenstrom im Verhältnis zum Auslegungsstrom entspricht dem aktuellen Belegungsgrad des Gebäudes. Dies entspricht einer bedarfsbasierten Regelung.
  3. Lüftungsstrategie 3: Erhöhter 1,45-facher Luftwechsel im Zeitraum von 19:00 bis 7:00 Uhr und verringerter 0,55-facher Luftwechsel von 7:00 bis 19:00 Uhr

Für die Mindestlüftung zu Nichtbelegungszeiten wird bei beiden Nutzungsarten angenommen, dass die natürliche Infiltration ausreicht. Sollte aufgrund einer sehr dichten Gebäudehülle die Mindestlüftung nicht mehr durch natürliche Infiltration gewährleistet werden können, lässt sich die Abluftanlage auch zu diesem Zweck nutzen. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die Lüftungsstufen im Verhältnis zum Auslegungswert für die verschiedenen zeit- und bedarfsbasierten Lüftungsstrategien im Tagesverlauf.

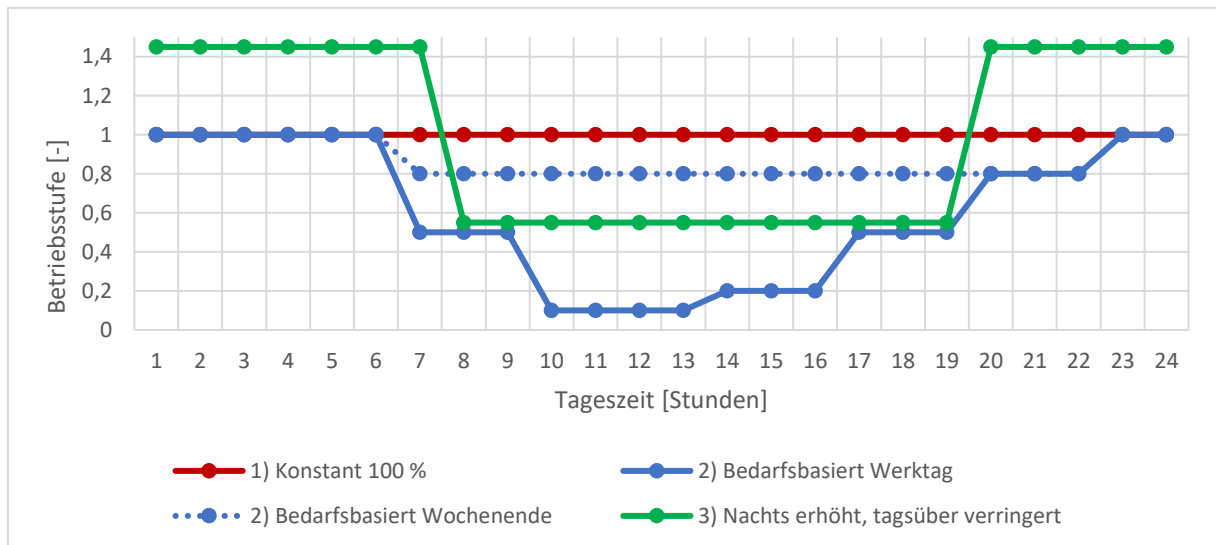


Abbildung 34: Lüftungsstrategien Wohnnutzung

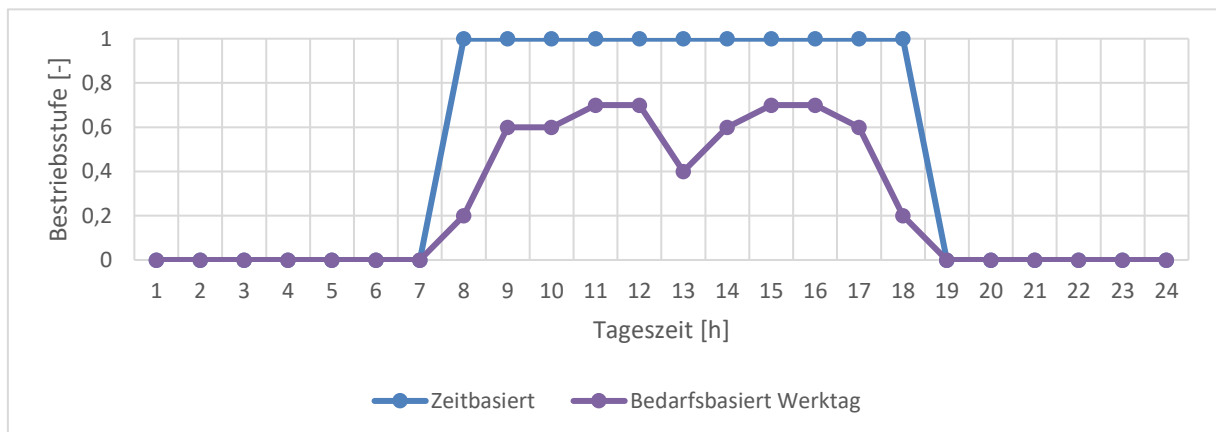


Abbildung 35: Lüftungsstrategien Büronutzung

Während der Heizperiode ist sinnvoll, den Luftvolumenstrom so niedrig wie aus hygienischer Sicht zulässig und dadurch Lüftungswärmeverluste gering zu halten. Im Sommer kann hingegen durchaus ein höherer Luftwechsel angebracht sein, um im Zuge der Nachtlüftung Wärme aus den Räumen abzuführen.

Die Lüftung soll dabei allerdings nur dann mit erhöhtem Luftwechsel betrieben werden, wenn die Außenlufttemperatur unter der Raumlufttemperatur liegt, da ansonsten der Raum erwärmt wird. Weiters darf die Raumtemperatur in kühlen Sommernächten nicht zu weit absinken. Die Regelung der Lüftung im Sommer muss folglich nicht nur zeitabhängig sein, sondern auch Außen- und Raumtemperatur berücksichtigen, wenn die Kühlwirkung der Nachtlüftung möglichst geschickt ausgenutzt werden soll.

## 5.2 Abluftwärmepumpe

### Abschätzung der Leistung der Wärmepumpe

Um einen Eindruck davon zu erhalten, welche Wärmemengen in etwa zurückgewonnen werden können, wird hier die Wärmemenge in der Abluft überschlagsmäßig abgeschätzt.

Verluste werden nicht berücksichtigt und die Temperatur- sowie Feuchteabhängigkeit von Stoffwerten werden vernachlässigt.

Der sensible Wärmemengenstrom, den Luft beim Abkühlen abgibt, lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \cdot \Delta\vartheta$$

$\dot{Q}$  Wärmeleistung [kW]

$\dot{V}$  Luftvolumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

$\rho_L$  Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>] – bei 20 °C ca. 1,2 kg/m<sup>3</sup>

$c_{p,L}$  spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) der Luft [kJ/kg·K] – trockene Luft ca. 1,01 kJ/kg·K

$\Delta\vartheta$  ... Temperaturdifferenz [K]

Bei einer Innentemperatur von 20 °C und einer Fortlufttemperatur nach der Wärmepumpe von angenommenen 5 °C erhält man eine Temperaturdifferenz von 15 K.

Damit lässt sich die aus der Abluft (Wärmequelle) entzogene Wärmeleistung berechnen (Umgebungswärme). Um die Heizleistung der Wärmepumpe zu erhalten, muss noch der Anteil der elektrischen Leistung berücksichtigt werden.

$$\Phi_c = \Phi_U \cdot \frac{COP}{COP - 1}$$

$COP$  ... Coefficient of Performance [-]

$\Phi_c$  ... Kondensatorleistung (Heizleistung) [kW]

$\Phi_U$  ... entzogene Wärmeleistung (Umweltwärme) [kW] entspricht  $\dot{Q}$

Mit einem für den COP, der hier mit 3,5 (Direktverdampfer [62]) angesetzt wird, können nun die Heizleistungen für Büro- und Wohnnutzung bei Auslegungs-Luftvolumenstrom berechnet werden.

Tabelle 28: Abschätzung Heizleistung Wärmepumpe

	Wohnen	Büro	
Auslegung-Volumenstrom	662	1406	[m <sup>3</sup> /h]
Auslegung-Volumenstrom	0,184	0,390	[m <sup>3</sup> /s]
Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$	15	15	[K]
COP	3,5	3,5	[-]
Entzogene Umweltwärme $\Phi_U$	3,3	7,1	[kW]
Heizleistung $\Phi_c$	4,7	9,9	[kW]

Tabelle 28 zeigt die Ergebnisse der Abschätzung. Die Heizleistungen von 4,7 kW bei Wohnnutzung bzw. 9,9 kW bei Büronutzung können in etwa bei voller Belegung des Gebäudes durch die Wärmerückgewinnung aus Abluft erreicht werden.

### 5.3 Warmwasseraufbereitung und Heizung

Die vorhandenen Heizkörper und Verteilleitungen werden weiter benutzt. Auch der Anschluss an das Fernwärmenetz bleibt als Hauptwärmequelle bestehen.

Um die mithilfe der Wärmepumpe zurückgewonnene Wärme speichern zu können, wird ein Pufferspeicher verwendet.

Im Fall der Wohnnutzung wird anstelle der lokalen Elektrowarmwasserspeicher in den Nutzungseinheiten eine zentrale Warmwasserbereitung eingesetzt. Das Warmwasser wird im Kellergeschoß durch eine Frischwasserstation (Frischwassermodule) am Pufferspeicher erwärmt und anschließend in die Wohnungen verteilt (Frischwassersystem). Es wird somit kein Trinkwarmwasser gespeichert; es gibt nur den Heißwasser-Pufferspeicher, der das Trinkwasser im Durchlauf erwärmt. Der Pufferspeicher hat eine maximale Temperatur von 70 °C, um das Trinkwarmwasser im Durchlauf auf 60 °C erwärmen zu können. [63] Weil das für die Simulationen verwendete Wärmepumpenmodell allerdings nur ein Temperaturniveau von maximal 65 °C erreichen kann, muss auch im Sommer Fernwärme eingesetzt werden, um die etwas höhere, geforderte Speichertemperatur zu erzielen. Der Einsatz einer Frischwasserstation vermeidet das lange Speichern von erwärmtem Trinkwasser und ist damit aus hygienischer Sicht vorteilhaft. [8, S. 108] Die Abwärme kann somit sowohl zur Unterstützung der Raumheizung als auch zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden. Um in den Wohnungen auch bei größerem zeitlichem Abstand zwischen Zapfungen rasch warmes Wasser zur Verfügung zu haben, wird ein Zirkulationssystem zur Temperaturhaltung eingeplant. Die Trinkwasserleitungen werden zur Verringerung der Wärmeverluste gedämmt.

Für die Nutzung als Bürogebäude werden wie bisher Elektro-Kleinspeicher bzw. lokale Durchlauferhitzer verwendet. Der Pufferspeicher und die Abluftwärme können in diesem Fall nur während des Heizbetriebs zur Unterstützung der Raumheizung eingesetzt werden.

## 6 Simulationen und Ergebnisse

Die Simulationen dienen dazu, das Verhalten des Gebäudes inklusive des Gebäudetechniksystems in Hinblick auf folgende Schwerpunkte zu ermitteln:

- Das allgemeine Lüftungsverhalten und Besonderheiten, die bei einer Abluftanlage auftreten.
- Der Einfluss auf die Behaglichkeit in Situationen, in denen die Gefahr sommerlicher Überwärmung besteht.
- Die energetische Betrachtung, bei der Wärmeverluste und -rückgewinnung im Vordergrund stehen. Die Ergebnisse hiervon werden auch bei der wirtschaftlichen Bewertung herangezogen.

Bei den letzten beiden Punkten werden das Bestandsgebäude und die Nachrüstungsvariante Abluftanlage miteinander verglichen, um Unterschiede erkennen zu können.

### 6.1 Modellbildung und Vereinfachungen

Für das zu untersuchende Gebäude wurde ein Simulationsmodell erstellt. Dabei kommen die in den Kapiteln 3 (Nutzung und Klima), 4 (Gebäude) und 5 (Gebäudetechnikkonzept Abluftanlage) behandelten Eingangsdaten zur Anwendung, die das Gebäude selbst und einwirkende Einflüsse aus Nutzung und Umgebung beschreiben. Bei einer derartigen Fülle an verschiedenen Angaben, werden nur ausgewählte Werte verwendet. Welche konkret für bestimmte Simulationen angewendet werden, wird an den entsprechenden Stellen angegeben. Es wird dabei auch auf getroffene Vereinfachungen eingegangen.

Verwendet wird das Programm IDA ICE (5.0) der EQUA Simulation AB. Die Software erlaubt es, multizonale und dynamische Gebäudesimulationen durchzuführen. [64] Zusammengefasst wurden bei der Modellierung folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Umgebung: Für die Verschattung durch die Umgebung wurden vertikale Flächen mit Höhen aus dem GIS Steiermark eingefügt. Die wenigen, nicht weit auskragenden Balkone wurden ebenso wie die Bepflanzung weggelassen.
- Zonen: In den oberirdischen Geschoßen (EG, OG1, OG2) wurden alle Räume als eine eigene Zone modelliert. Das Stiegenhaus wurde vereinfacht jeweils als eigene Zone in jedem Geschoß modelliert. Im Keller wurden mehrere Räume zu einer Zone zusammengefasst. Der Dachraum wurde als eigene Zone modelliert, die Lüftungsöffnungen im Kniestock enthält. Das angewendete Zonenmodell berücksichtigt keine vertikale Schichtung der Luft mit verschiedenen Temperaturen.
- Geometrie: Vor- und Rücksprünge, Ausfachungen in Wänden sowie Dickensprünge wurden vereinfacht. Die Änderungen wurden so durchgeführt, dass die Einflüsse auf die Nutzfläche der Räume gering bleiben. Abgehängte Decken befinden sich nur in einem kleinen Teil des Gebäudes; sie wurden vernachlässigt.
- Wärmebrücken: Da die verwendeten Literaturwerte für Wärmebrücken die Außenmaße als Definition der Gebäudehülle verwenden, wurde dieser Ansatz auch in den Modellen verwendet. Die Psi-Werte der Wärmebrücken stammen aus [65].

- Fensterlüftung: Für die Simulation des Bestandgebäudes ist die Berücksichtigung der natürlichen Fensterlüftung erforderlich. Die reale Fensterlüftung hängt stark vom tatsächlichen Verhalten der Nutzer ab und ist nicht einfach in einem Simulationsmodell zu erfassen. IDA ICE ermöglicht es auch detaillierte Regeln für die Fensteröffnung (z. B. in Abhängigkeit der Raumtemperatur oder der CO<sub>2</sub>-Konzentration) festzulegen. Diese Ansätze können allerdings sehr zeitaufwändig in der Simulation sein. Vereinfachend wird deshalb mit Norm- und Literaturwerten für den Luftwechsel gearbeitet. Um die Luft in die Zonen einbringen und abführen zu können wird eine fiktive Lüftungsanlage im Modell eingefügt, welche die Zu- und Abluft jedoch in keiner Weise verändert (d.h. keine Erwärmung, Kühlung oder Wärmerückgewinnung).
- Es wird angenommen, dass die Nutzer bei dem Gebäude mit Abluftanlage nur wenig bis gar nicht zusätzlich durch das Öffnen von Fenstern lüften.
- Die Regelung der Wärmepumpe und das Wärmepumpenmodell sind Großteils die Standard-Objekte von IDA ICE. Das Wärmepumpenmodell mit der Bezeichnung A2W\_HP\_VS\_MODEL („air to water heat pump variable speed“) hat als Betriebspunkt, auf den sich die Angaben (z. B. COP, Nenn-Heizleistung) beziehen eine Luft Eintrittstemperatur von 7 °C und erwärmt das Wasser auf der Kondensatorseite von 40 °C (Eintritt) auf 45 °C (Austritt). In diesem Betriebspunkt hat es einen COP von 4.
- Es ist nicht auszuschließen, dass mit Optimierung der Wärmepumpe und der Regelung bessere Ergebnisse erzielbar sind. Die Erstellung von eigenen Wärmepumpenmodellen inkl. Implementierung sowie eine Optimierung der Regelung sowie Anlagenkomponenten sind nicht Bestandteil der Arbeit.
- Der Wärmespeicher ist ein Schichtspeicher mit einem Volumen von 1000 Litern, was den Standardeinstellungen im Programm entspricht.

## 6.2 Aufbau der Simulationsreihen

Durch die Betrachtung der beiden Fälle Büro- und Wohnnutzung sowie durch den Vergleich von Bestand (Fensterlüftung) mit der nachgerüsteten Abluftanlage inklusive Abluftwärmepumpe ergeben sich vier Kombinationen:

- Wohnnutzung Bestand (Fensterlüftung) – „WB“
- Wohnnutzung Abluftanlage – „WABL“
- Büronutzung Bestand (Fensterlüftung) – „BB“
- Büronutzung Abluftanlage – „BABL“

Für jede dieser vier Grundkombinationen werden Simulationen durchgeführt. Um zu untersuchen, wie sich die Ergebnisse ändern, wenn Eingangsgrößen variiert werden, wird für jede dieser Grundkombinationen ein Ausgangspunkt benötigt. Ausgehend von diesem Ausgangspunkt wird im Normalfall (falls nicht anders erwähnt) ein Eingangsparameter in mehreren Schritten verändert, während alle anderen gleich bleiben. Das jeweilige Ausgangsmodell wird hier in weiterer Folge auch als „Basismodell“ bezeichnet. Es gibt also folglich vier Basismodelle (WB, WABL, BB, BABL) – für jede der oben aufgezählten Grundkombinationen eines. Aufgrund der Vielzahl an Eingangsdaten, wie sie bei einer

dynamischen Gebäudesimulation auftreten, wird die Anzahl der variierten Parameter begrenzt. Welche Parameter das jeweilige Basismodell besitzt und welche Parameter in bestimmten Simulationsreihen verändert werden, wird in den entsprechenden Abschnitten erwähnt.

## 6.3 Plausibilitätskontrolle des Modells

Zuerst werden Simulationsergebnisse für das erstellte Modell des Bestandsgebäudes mit Daten aus anderen Quellen verglichen, um Unterschiede aufzuzeigen und zu überprüfen, ob sich die Werte in einer plausiblen Größenordnung befinden. Als Vergleich dient hier das Basismodell Büro Bestand (BB), da die tatsächliche Nutzung überwiegend einer Büronutzung ähnelt. Der Energiebedarf für Warmwasserbereitung ist nicht enthalten.

### 6.3.1 Vergleich des Simulationsmodells mit dem Energieausweis

Für das Gebäude wurde im Jahr 2020 ein Energieausweis erstellt. Dieser besitzt im Vergleich zu einem dynamischen Mehrzonenmodell mehrere deutliche Vereinfachungen. Diese betreffen vor allem das Außenklima, die inneren Wärmegewinne, die Gebäudegeometrie, unbeheizte Zonen und Wärmebrücken sowie das allgemeine Rechenverfahren für das ein quasi-statisches Monatsmittelwertverfahren angewendet wird. [24] Gleicht man die Eingangsdaten im dynamischen Simulationsmodell an die Annahmen im Energieausweis an, nähern sich die Simulationsergebnisse den Werten des Energieausweises an. Abbildung 36 vergleicht die Wärmeverluste (nur die Verluste ohne innere und solare Gewinne; nicht zu verwechseln mit dem Heizwärmebedarf) aus dem Energieausweis mit den Ergebnissen aus IDA ICE Simulationen. Das Basismodell Büros Bestand (BB) weist deutlich geringere Wärmeverluste durch Transmission und durch Lüftung auf. Passt man allerdings das Außenklima, die Wärmebrückenwerte und den Luftwechsel an die Eingabewerte des Energieausweises an, nähern sich die Ergebnisse des derart angepassten IDA ICE Modells an die Ergebnisse des Energieausweises an. Der deutliche Unterschied bei den Lüftungswärmeverlusten erklärt sich neben dem kälteren Außenklima beim Energieausweis auch durch den deutlich höheren Luftvolumenstrom. Für den Energieausweis wurde eine Luftwechselzahl von 1,8 1/h zur Nutzungszeit angesetzt, während die aktuelle ÖNORM B 8110-5 für diesen Fall 1,05 1/h vorschreibt. [23, S. 11] Darüber wirkt sich hier die vereinfachte Ermittlung der Geometrie beim Energieausweis aus, da die tatsächliche Nutzfläche der Nutzungseinheiten bzw. Büroräume geringer als die im Energieausweis angesetzte Fläche ist. Für den Energieausweis werden vereinfacht 80 % der Bruttogrundfläche als Bezugsfläche angesetzt.



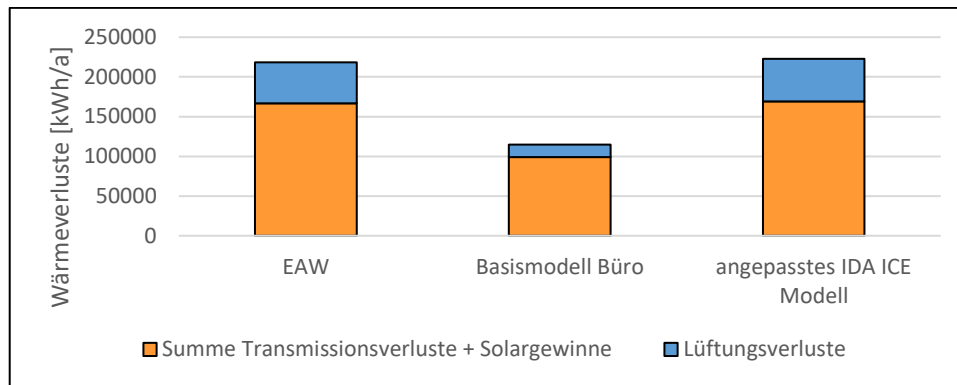


Abbildung 36: Vergleich der Wärmeverluste aus dem Energieausweis mit zwei verschiedenen Simulationsergebnissen für das IDA ICE Modell

### 6.3.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Verbrauchsdaten

Der Vergleich mit realen Verbrauchsdaten ist bei dem betrachteten Gebäude nicht ohne weiteres möglich, da kein eigener Wärmemengenzähler vorhanden ist. Die Substation für die Fernwärmeversorgung inklusive Zähler befindet sich in der Technikerstraße 4 (ebenfalls Teil der TU Graz) und versorgt neben der Lessingstraße 27 noch vier weitere Gebäude in der Mandellstraße (Nr. 9, 11, 13, 15). Für die genannten Gebäude ist jedoch ein Energieausweis vorhanden. Es wird deshalb der Ansatz verfolgt, den Verbrauch im Zeitraum von Ende März 2023 bis Ende März 2024 im Verhältnis der rechnerischen Heizenergiebedarfswerte der einzelnen Gebäude aufzuteilen. An der Gesamtsumme des rechnerischen Heizenergiebedarfs abzüglich des Warmwasserwärmebedarfs aller an die Substation angeschlossenen Gebäude von 689229 kWh/a hat die Lessingstraße 27 mit 168845 kWh/a einen Anteil von 24 %. Der Vergleich der Zählerstände Ende März 2023 und 2024 liefert für diesen Zeitraum einen Wärmebedarf von 261000 kWh. Diese Zahl ist deutlich geringer als der rechnerische Gesamtwert, den man aus den Energieausweisen erhält. Der Anteil der Lessingstraße 27 (in weiterer Folge mit „L27“ abgekürzt) beträgt gemäß dieses Ansatzes 63939 kWh für den genannten Zeitraum. Vergleicht man den Heizenergiebedarf (ohne Warmwasserwärmebedarf) laut Energieausweis für L27 von 168845 kWh/a mit dem ermittelten Verbrauch, liegt dieser bei nur 38 % des berechneten Wertes. Anzumerken ist hierbei, dass die Dämmung der Decke zwischen dem 2. Obergeschoß und dem Dachraum noch nicht im Energieausweis berücksichtigt ist, weil sie erst im Herbst 2023 angebracht wurde. Im betrachteten Messzeitraum ist sie hingegen schon enthalten. Dies ist jedoch keine (alleinige) Erklärung für die hohe Differenz der Werte.

Zum Vergleich werden den näherungsweise ermittelten Verbrauchsdaten Simulationsergebnisse gegenübergestellt. Es wurde dabei abweichend von der realen Nutzung für das gesamte Gebäude eine Büronutzung angesetzt gemäß den Werten aus der ÖNORM EN 16798-1 Anhang C angesetzt. Für die Lüftung wurden Werte der ÖNORM EN 16798 – 1 Anhang B Verfahren 2 angesetzt. Bei Belegung im Zeitraum von 8 bis 19 Uhr beträgt der Luftvolumenstrom konstant 1406 m<sup>3</sup>/h für das gesamte Gebäude. Während Nichtbelegungszeiten liegt er bei 0 m<sup>3</sup>/h. Über den Zeitraum eines Jahres betrachtet liegt der durchschnittliche Luftvolumenstrom bei 461 m<sup>3</sup>/h. Als Außenklima wird der IWEC2 Wetterdatensatz von ASHRAE verwendet, der in der Software implementiert ist.

Mit diesen Randbedingungen erhält man aus einer IDA ICE Simulation für den Energiebedarf eines Jahres einen Wert von 107600 kWh für das Basismodell Büro Bestand (BB). Wert liegt 68 % über dem anteilmäßigen, gemessenen Verbrauch für das Gebäude L27.

Zahlreiche Daten, die auf Annahmen sowie Literaturwerten beruhen, fließen in das Modell ein und bringen somit Unsicherheiten mit sich. Das Ausmaß der möglichen Ursachen für die Abweichungen ist folglich groß. Hier werden deshalb nur folgende ausgewählte Inputs verändert, um ihren Einfluss auf das Simulationsergebnis zu zeigen:

- Außenklima
- Innenklima
- Lüftung

Die Eingangsdaten werden verändert und der Einfluss auf den Jahres-Heizenergiebedarf wird beobachtet. Als Bezugswert dient dabei stets der anteilmäßig ermittelte Verbrauchswert von 63939 kWh.

Ausgehend vom Basismodell wird in einem ersten Schritt anstelle des Testreferenzjahres Messdaten einer Wetterstation in Graz verwendet. Die nächstgelegene Messtation von Geosphere Austria (vormals ZAMG) liegt unweit des Gebäudestandorts und befindet sich bei der Universität Graz. Die Daten dieser Messstation weisen allerdings Lücken im Betrachtungszeitraum auf, weshalb auf die Messtation im Grazer Ortsteil Strassgang ausgewichen wird. Diese liegt ca. 3,8 km vom Gebäude L27 entfernt (Luftlinie) und befindet sich beinahe auf selber Seehöhe. Nicht alle Daten sind in derselben Form verfügbar wie sie für die Simulationsprogramm benötigt werden weshalb sie zuvor angepasst wurden. Mit diesem Wetterdatensatz erhält man einen Energiebedarf von 96750 kWh pro Jahr. Dieser Wert liegt 51 % über dem Bezugswert. Eine Verringerung der benötigten Heizenergie lässt auf ein (in der Heizperiode) wärmeres Jahr schließen. In Abbildung 37 werden die Monatsmitteltemperaturen der drei verwendeten Datensätze verglichen. Der Zeitraum von März 2023 bis März 2024 war milder als das Testreferenzjahr (IWE2) und passt damit zur Schlussfolgerung aus dem verringerten Heizenergiebedarf. Die Mitteltemperaturen, die dem Energieausweis zugrunde liegen, liegen bis auf eine Ausnahme (Jänner) stets unter den anderen Werten. Zu beachten ist dabei, dass in Abbildung 37 die Monate Jänner bis März 2024 vor die Monate April bis Dezember 2023 gereiht wurden, um eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten.

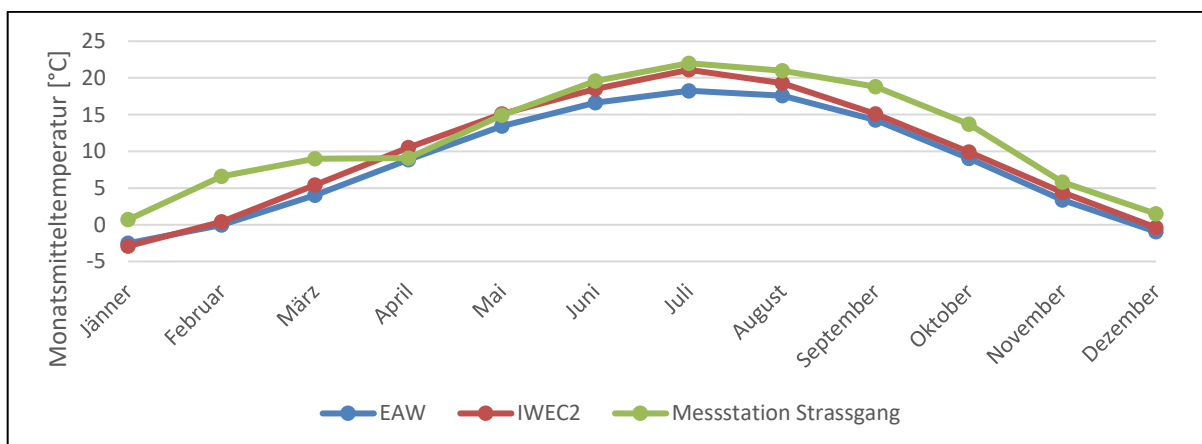


Abbildung 37: Monatsmitteltemperaturen für die drei verschiedenen Wetterdatensätze

Als nächstes wird zusätzlich zum angepassten Außenklima die Soll-Raumtemperatur von 22 °C (aktueller Normwert) auf 20 °C (alter Normwert) verringert. Durch diesen Schritt verringert sich das Simulationsergebnis auf 87962 kWh pro Jahr. Der Wert liegt 29 % über dem Bezugswert.

In einem letzten Schritt wird der Luftvolumenstrom zu Belegungszeiten auf 703 m<sup>3</sup>/h halbiert. Dies bewirkt eine Verringerung des Wärmebedarfs auf 77339 kWh pro Jahr und liegt damit 21 % über dem Bezugswert.

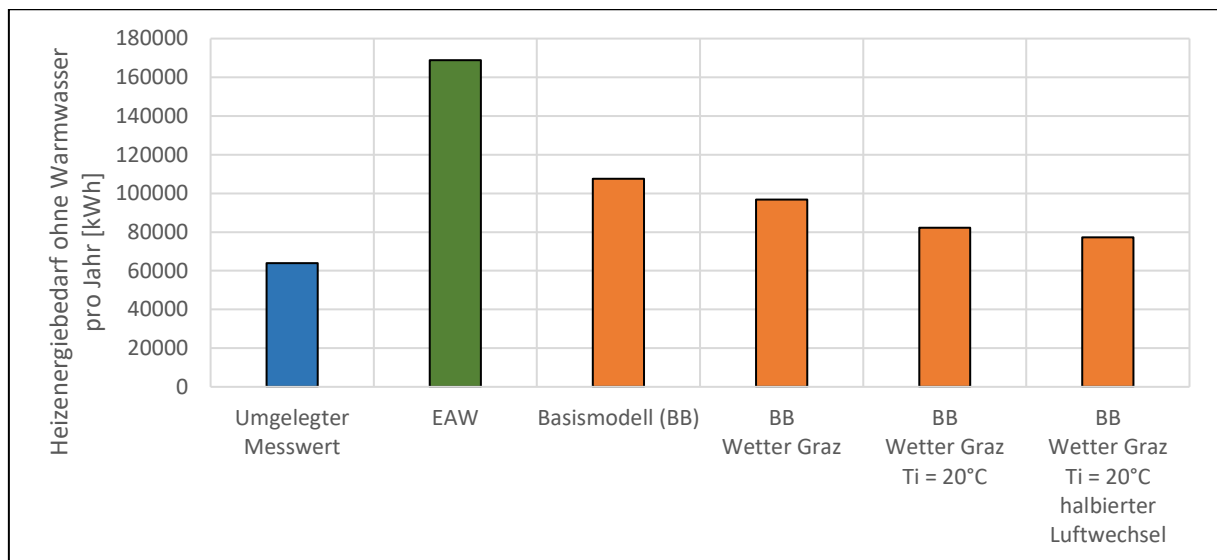


Abbildung 38: Vergleich der Ergebnisse für den Heizenergiebedarf mit dem umgelegten, gemessenen Verbrauchswert

Um die tatsächlichen Ursachen für die Abweichungen festzustellen, wären zusätzliche Daten nötig, die jedoch nicht vorliegen. Es wird allerdings durch die gezeigten, schrittweisen Variationen der Eingangsdaten verdeutlicht, welchen Einfluss ausgewählte Modelleingaben haben.

Für die weiteren Simulationen wird überwiegend auf Norm- und Literaturdaten zurückgegriffen und nicht auf die hier erwähnten veränderten Eingangsdaten.

## 6.4 Allgemeines Verhalten der Abluftanlage

Bevor die Auswirkungen der Anlage hinsichtlich sommerlicher Überwärmung und Energieeinsparung behandelt werden, soll kurz auf ein paar wesentliche Besonderheiten einer Abluftanlage hingewiesen werden. Es wird hier nicht weiter in Büro- oder Wohnnutzung unterschieden, da die gezeigten Eigenschaften prinzipiell für beide Nutzungen gelten, wenn auch in unterschiedlich starkem Ausmaß.

### 6.4.1 Einfluss der Strömungswiderstände auf den Luftstrom

Da ein Abluftsystem keine ausgeglichene Lüftung darstellt, bei der Zu- und Abluftvolumenstrom sich in jedem Raum ausgleichen, entsteht in den Räumen durch das Absaugen der Abluft ein Unterdruck. Diese Druckdifferenzen zwischen außen und innen sowie zwischen den verschiedenen Lüftungszonen (Außenluft, Überströmluft, Abluft) sind die treibende Kraft hinter den Luftströmen.

Dem stehen die Strömungswiderstände an Zonengrenzen gegenüber, beispielsweise durch ALD oder Überströmelemente verursacht. Wie hoch der Luftvolumenstrom auf einem Strömungspfad ist, hängt folglich von den im Weg liegenden Widerständen ab. [66]

Das Öffnen und Schließen von Fenstern und Innentüren beeinflusst den an diesen Bauteilen auftretenden Strömungswiderstand erheblich. Das führt dazu, dass abhängig von der Öffnungsposition von Fenstern und Türen manche Räume besser und andere schlechter durchlüftet werden. Die Lüftung aufgrund der Abluftanlage wird dadurch also weniger wirksam.

Um diesen Effekt zu verdeutlichen, wurden für Nutzungseinheit 3 beispielhaft zwei verschiedene Szenarien simuliert. Es wird die Nutzungseinheit 3 in OG1 betrachtet. Im Raum 1OG 10 befindet sich eine Person, die CO<sub>2</sub> emittiert. In Szenario a) sind alle Fenster und Innentüren geschlossen; der Raum verfügt über einen ALD. Der Luftaustausch erfolgt über ALD, Infiltration und die Abluftanlage. Dieser Raum hat in der Nutzungseinheit den ungünstigsten Strömungsweg mit den höchsten Widerständen, weshalb er schlechter durchlüftet wird als die anderen Räume. In Szenario b) wird das Fenster (Ziffer 1 in Abbildung 39) gekippt und die Innentür (Ziffer 2 in Abbildung 39) leicht geöffnet. Dadurch reduziert sich der Widerstand auf dem Pfad durch Raum 1OG 10. Dieser wird in der Folge besser als zuvor durchlüftet, was zu einer niedrigeren CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum führt. Fenster und Tür sind dabei nur leicht geöffnet, damit der Luftaustausch in Raum 1OG 10 nicht komplett über das Fenster stattfindet, sondern die Abluft nach wie vor über die Anlage abgesaugt wird und Luft durch das Fenster nur herein- und nicht hinausströmt. Wäre das Fenster zu weit geöffnet würde der CO<sub>2</sub>-Gehalt alleine deshalb niedriger werden, weil dem Raum nahezu komplett über das offene Fenster Luft zu- und abgeführt wird.

Dieser Vergleich zeigt einerseits die Relevanz einer guten Abstimmung der Strömungswiderstände an Luftdurchlässen in der Gebäudehülle und innerhalb der Nutzungseinheit aufeinander für die Durchlüftung in verschiedenen Räumen. Zur besseren Durchlüftung könnte man im oben betrachteten Raum größere bzw. mehr ALD und/oder Überströmöffnungen einsetzen. Andererseits beeinflusst das Öffnen von Bauteilen wie Fenstern und Türen das Verhalten ebenfalls.

Es stellt sich also die Frage, wie groß der Nutzen einer aufwändigen Feinabstimmung der einzelnen Komponenten bei realer Nutzung tatsächlich ist.

Umfangreiche Untersuchungen zu dieser Thematik wurden im Schweizer Forschungsprojekt ENABL gemacht [67].

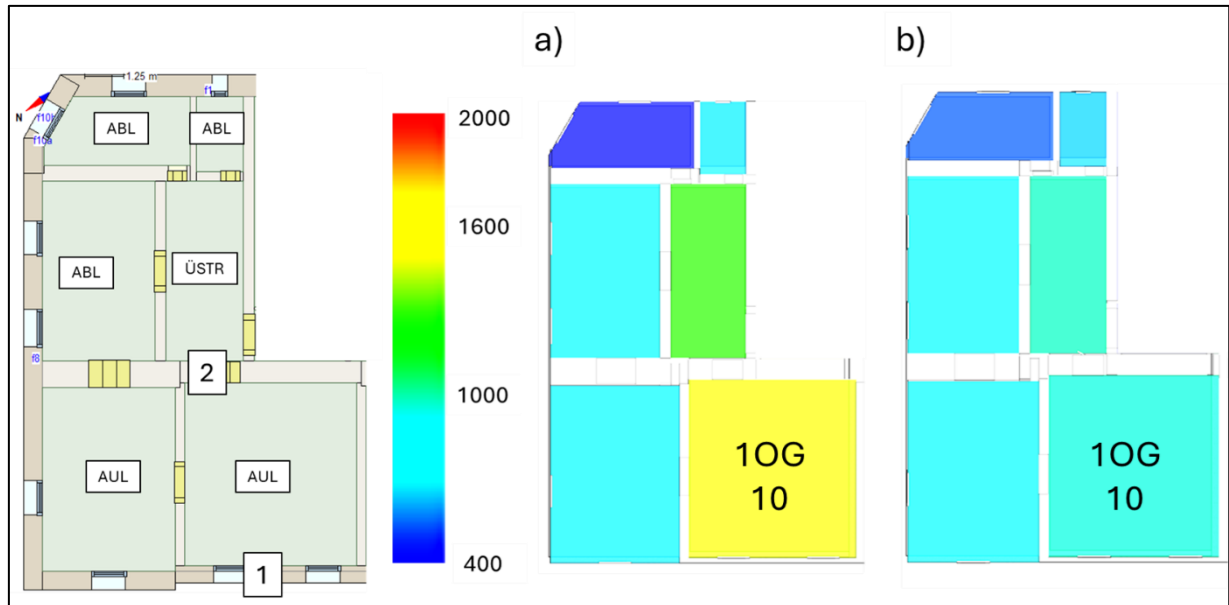


Abbildung 39: CO<sub>2</sub>-Konzentration in NE3 für die zwei simulierten Szenarien

#### 6.4.2 Einfluss der Luftdichtheit der Gebäudehülle

Der durch das Abluftsystem aufgebaute Unterdruck, lässt Luft auch auf ungeplanten Wegen in das Gebäude einströmen. Der Nachteil dieser unkontrollierten Eintrittswege ist, dass ihr Ausmaß für verschiedene Räume ungleichmäßig und schwer abschätzbar ist. Darüber hinaus kann die Luft aus unerwünschten Bereichen wie beispielsweise anderen Nutzungseinheiten nachströmen. [56, S. 80] Die Luftdichtheit ist also nicht nur gegenüber dem Außenbereich, sondern auch zwischen verschiedenen Bereichen innerhalb des Gebäudes relevant.

Auf die Effektivität des Lüftungssystems wirkt sich insbesondere die Luftdichtheit in den Ablufträumen aus. Je durchlässiger die Außenbauteile dieser Zonen sind, desto mehr Außenluft tritt in diesen Zonen ein und wird gleich wieder abgesaugt. Die Durchströmung der anderen Lüftungszonen verringert sich dementsprechend.

Abbildung 40 zeigt den Vergleich von zwei unterschiedlichen Varianten für die Nutzungseinheit 3. In Variante a) ist die Luftdurchlässigkeit mit einem Luftwechsel von 8 1/h bei 50 Pa Druckdifferenz hoch und es haben alle Räume der Nutzungseinheit die gleiche äquivalente Leakage-Fläche bezogen auf ihre Außenfläche. Bei Variante b) besitzen die drei Ablufträume bessere (also geringere Werte) für die Leakage-Flächen. In Variante a) strömt ein bedeutender Anteil der in den Ablufträumen abgesaugten Abluft durch Leckagen von außen in den Raum. Die Folge sind niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den Ablufträumen und eine schlechtere Durchlüftung der Außenlufträume. Durch das Abdichten der Ablufträume strömt in Variante b) nun weniger Außenluft in die Ablufträume und stattdessen mehr Überströmluft aus anderen Räumen. Dies verbessert die Durchlüftung der Außenlufträume.

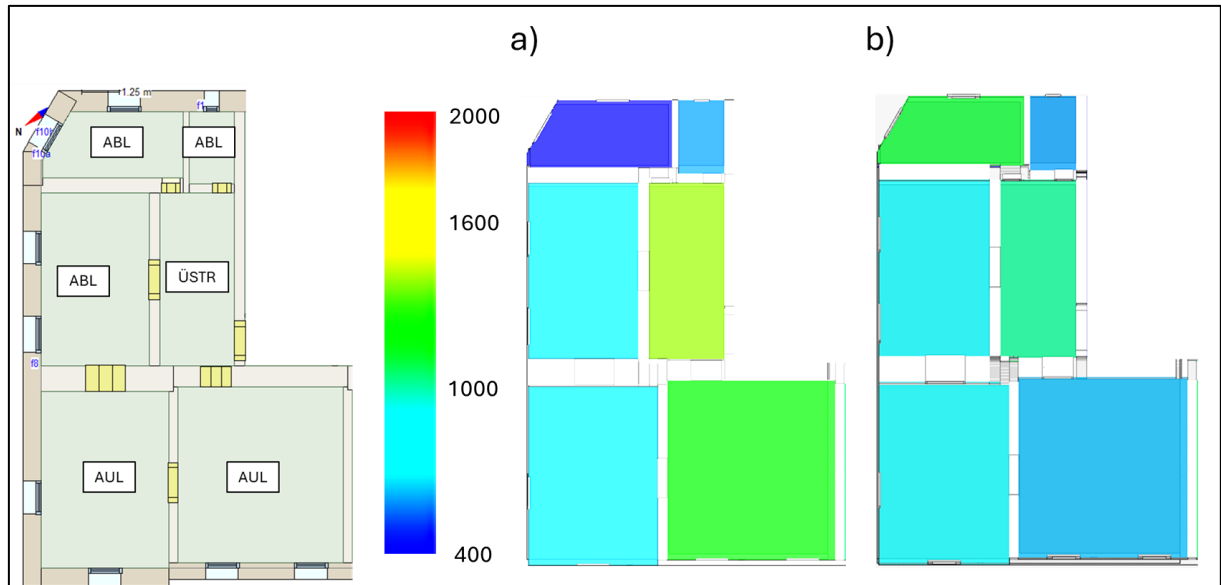


Abbildung 40: Einfluss der Luftdichtheit der Gebäudehülle auf die Durchlüftung der Räume

Eine höhere Luftdichtheit der Ablufträume verbessert folglich die Wirksamkeit der Anlage ohne den Abluftvolumenstrom zu erhöhen. Wie die konkreten Verhältnisse bei einem Bestandsgebäude aussehen, lässt sich ohne Vor-Ort-Messungen schwer einschätzen. Das untersuchte Gebäude verfügt über Kastenfenster mit nachträglich ergänzten Dichtungen. [68] hat in einem Projekt die Dichtheit von Altbau-Fenstern vor und nach einer Sanierung gemessen. Darunter befinden sich auch zwei Kastenfenster. Diese konnten durch ergänzte Dichtungen deutlich verbessert werden. Eine weitere Arbeit [42] hat sich mit der Sanierung von Gründerzeitgebäuden in Hinblick auf Luftdichtheit befasst. Es wurde bei unsanierten Gebäuden ein mittlerer  $n_{50}$ -Wert von 5,6 1/h ermittelt; wobei darauf hingewiesen wird, dass die Ergebnisse großen Streuungen unterliegen. Durch Sanierungen konnten in jener Arbeit Werte von 2,01 1/h erreicht werden.

Die großen Streuungen der Werte gemeinsam mit dem relevanten Einfluss auf die Lüftungseffektivität, machen eine Untersuchung der tatsächlichen Bedingungen vor einer Umsetzung einer Lüftungsanlage ratsam. Gegebenenfalls sind Verbesserungen durch Maßnahmen zur Erhöhung der Luftdichtigkeit erforderlich. In der weiteren Arbeit wird mit einem  $n_{50}$ -Wert von 5 1/h für das gesamte Gebäude angesetzt. Die Auswirkungen höherer und niedrigerer Werte auf den Energiebedarf werden im Kapitel 6.6.1.2 beschrieben.

### 6.4.3 Regelbarkeit und Feinabstimmung

Da bei der entworfenen Anlage Luft nur in den Abluftzonen abgesaugt wird und nicht in allen Räumen ist für die Aufenthaltsräume (Außenluftzone) keine raumindividuelle Regelung möglich. Für den Fall einer hohen Personenkonzentration in einem Raum, muss in diesen zur Intensivlüftung auf das Öffnen von Fenstern zurückgegriffen werden, was bei dem entworfenen Konzept ohne weiteres möglich ist. Dadurch kann allerdings Wärme mit der Luft durch das Fenster entweichen und folglich nicht rückgewonnen werden.

Gewisse Außenluft-Räume im Gebäude werden schlechter durchlüftet als andere. Sie erreichen teilweise nicht die in der Dimensionierung zugewiesenen Außenluftvolumenströme und haben folglich höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen als erwünscht, wohingegen andere Räume dafür einen etwas höheren Luftvolumenstrom besitzen und ein Teil der Wirksamkeit verloren geht, weil in Ablufträumen unbeabsichtigt Außenluft angesaugt wird. Das trifft vor allem auf die Räume zu, die nicht direkt an eine Überström- oder Abluftzone grenzen zu. Praxisuntersuchungen in einer Schweizer Forschungsarbeit ergaben, dass der projektierte Außenluftvolumenstrom häufig nicht erreicht wird. [69]

Die Feinabstimmung der einzelnen Überström- und Außenluftdurchlässe sowie der Ablufteinlässe und Rohrnetz-Widerstände in den verschiedenen Ablufträumen ist keine einfache Aufgabe, die durch Unsicherheiten bei der Luftdichtheit zusätzlich erschwert wird. Da der Fokus der Arbeit bei der Untersuchung des Einflusses auf sommerliche Überwärmung und Energiebedarfs liegt, wurde auf eine detaillierte Feinabstimmung der Überströmöffnungen verzichtet. Der für die energetische Beurteilung relevante Luftwechsel innerhalb einer Nutzungseinheit wird erreicht und auch bei der sommerlichen Überwärmung wird der Auslegung-Luftvolumenstrom im untersuchten Raum sichergestellt.

Eine Alternative, um Abluftvolumenströme in Aufenthaltsräumen besser kontrollieren zu können, wäre es, sie direkt an das Rohrnetz anzubinden. Das erhöht allerdings die Leitungslängen und damit den Installationsaufwand. Weiters muss dabei vermieden werden, dass durch ungünstige Druckverhältnisse in einer Nutzungseinheit belastete Luft aus Hygieneräumen in andere Bereiche strömt.

## 6.5 Untersuchung des Einflusses auf sommerliche Überwärmung

Es wird mit Simulationen untersucht, wie sich eine Abluftanlage zur Nachtlüftung eignet. Als Außenklima wird das der ÖNORM B 8010-3 (sommerliche Überwärmung – Kapitel 3.2.3) verwendet. Die Werte für innere Gewinne stammen abweichend vom Norm-Nachweis überwiegend aus der ÖNORM EN 16798-1 Anhang C (werktags); es sind dieselben Einstellungen wie bei den Energiesimulationen. Als Sonnenschutzeinrichtung dienen außenliegende Jalousien mit einem, die den Gesamtenergiedurchlassgrad auf 14 % des vorherigen Wertes reduzieren. Wie bereits erwähnt, ist dieser Sonnenschutz beim Bestandsgebäude derzeit nicht vorhanden, er müsste nachgerüstet werden. Der Begriff Szenario beschreibt hier eine konkrete Variante der Nutzung von Maßnahmen wie Fensterlüftung, Abluftanlage und Verschattung. Sonnenschutz wird nicht in jedem Simulations-Szenario eingesetzt, sondern nur, wenn es explizit erwähnt wird. Dadurch kann die Auswirkung der Abluftanlage mit jener des Sonnenschutzes verglichen.

Die Betrachtung erfolgt am ungünstigsten Raum. Darunter wird in diesem Fall jener Raum verstanden, der im Gebäude die höchste operative Temperatur erreicht. Er befindet sich im 2. Obergeschoß und hat die Raumnummer 904. Er besitzt zwei Fenster mit den Orientierungen Südwest und Nordwest. Da dieser Raum sich in einer Ecke befindet und ungünstige Strömungspfade aufweist, besteht die Gefahr, dass er schlechter durchlüftet wird als andere Räume der Nutzungseinheit. Es wurde in den Simulationen zur sommerlichen Überwärmung deshalb sichergestellt, dass der Auslegungs-Außenluftvolumenstrom in diesem Raum erreicht wird, damit die Wirkung der Abluftanlage nicht durch eine schlechte Durchlüftung im betrachteten Raum verringert wird.

Das Gebäude hat insgesamt nur wenige Richtung Süden orientierte Fenster, was sich bei sommerlicher Überwärmung als günstig erweist. Die Raumtemperaturen von Gebäuden



mit anderer Orientierung können deshalb bei ansonsten gleichen Randbedingungen merklich höher sein als bei den hier angeführten Ergebnissen.

### 6.5.1 Wohnnutzung

Um den Einfluss der Nachtlüftung auf die Raumtemperaturen zu ermitteln, wurden verschiedenen Szenarien simuliert. Anschließend wurde der Tagesverlauf der operativen Raumtemperatur in einem Raum verglichen. Folgende Szenarien wurden für das Wohngebäude simuliert:

1. Fensterlüftung: Solange die Außenlufttemperatur niedriger als die Raumtemperatur ist, sind die Fenster geöffnet. Für das Gebäude und das angesetzte Außenklima verläuft dieser Zeitraum von 21:30 bis 8:30 Uhr.
2. Eingeschränkte Fensterlüftung: In diesem Szenario wird angenommen, dass die Nutzer die Fenster nachts nicht durchgehend geöffnet lassen möchten, z.B. aufgrund von Außenlärm. Es wird deshalb abends von 21:30 bis 22:00 Uhr und morgens von 6:00 bis 8:30 Uhr gelüftet. Außerhalb dieser Zeit sind die Fenster geschlossen.
3. Eingeschränkte Fensterlüftung mit Abluftanlage: Zusätzlich zur Fensterlüftung im vorherigen Szenario 2 wird im Zeitraum von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr die Abluftanlage mit einem erhöhten Abluftvolumenstrom von 960 m<sup>3</sup>/h betrieben.
4. Eingeschränkte Fensterlüftung mit Sonnenschutz: Das Lüftungsverhalten der eingeschränkten Fensterlüftung (2.) wird mit dem Einsatz von außenliegenden Jalousien kombiniert. Die Betätigung des Sonnenschutzes erfolgt, sobald die Intensität der Sonneneinstrahlung auf das Fenster einen Wert von 100 W/m<sup>2</sup> überschreitet.

Lt. OIB 6 dürfen die Fenster so lange als geöffnet betrachtet werden, bis die Außentemperatur die Innentemperatur übersteigt – also solange durch die Lüftung Wärme abgeführt werden kann und nicht eingebracht wird. Da dies bei allen vier Szenarien aufgrund der verschiedenen Temperaturverläufe zu etwas anderen Lüftungszeiten führen würde, wurde vereinfachend ein einheitliches Zeitfenster verwendet. Die Zeiten passen damit auch besser zur Anwesenheit von Bewohnern an einem Werktag. Denn es kann nur gelüftet werden, wenn Bewohner anwesend sind. Würde man das Lüftungsverhalten optimieren, wäre das Temperaturniveau bei Szenario 2 bis 4 generell niedriger.

Allgemein gilt für das untersuchte Gebäude, dass in höheren Geschoßen höhere Raumtemperaturen herrschen. Für den ungünstigsten Aufenthaltsraum – jener mit der höchsten Raumtemperatur im Tagesverlauf – (Nr. 904 im OG2) werden die Ergebnisse der vier Szenarien in Abbildung 41 verglichen. In keinem Szenario wird die Grenze der Raumtemperatur gemäß OIB 6 (29,23 °C für den Standort) überschritten. Die Fensterlüftung von 21:30 bis 8:30 Uhr führt zu den niedrigsten Raumtemperaturen. Wird nur noch von 21:30 bis 22:00 Uhr und 6:00 bis 8:30 Uhr gelüftet, erhöhen sich die Raumtemperaturen auf 26,6 °C für den Tagesmittelwert und 27,8 °C für das Maximum. Der Temperaturverlauf für reduzierte Fensterlüftung mit Betrieb der Abluftanlage (Szenario 3) verläuft in großen Teilen ähnlich wie der ohne Abluftanlage allerdings auf niedrigerem Temperaturniveau. In der Zeit von 22:00 bis 6:00 Uhr ist die Verringerung der Raumtemperatur durch den von der Abluftanlage erzwungenen Luftaustausch ersichtlich.



Der Tagesmittelwert der operativen Raumtemperatur wird durch die Abluftanlage um rund 0,9 K reduziert; das Tagesmaximum um 0,8 K. Die Variante mit Sonnenschutz verringert die Raumtemperaturen stärker als der Einsatz der Abluftanlage.

Der Anstieg der Temperatur im Zeitraum von 9:00 bis 18:00 Uhr fällt durch die geringeren Strahlungsgewinne deutlich schwächer aus. Der Tagesmittelwert der Raumtemperatur wird im Vergleich zu Szenario 2 um 1,8 K verringert; das Tagesmaximum sogar um 2,4 K.

Die geringe Auswirkung der Abluftanlage lässt sich dadurch erklären, dass die Abluftanlage im betrachteten Raum für einen deutlich geringeren Luftwechsel sorgt als die Fensterlüftung. Das Lüftungssystem bewirkt im Raum einen Luftstrom der kühlen Außenluft von rund 42 m<sup>3</sup>/h, wohingegen die Fensterlüftung für Werte im Bereich von rund 720 bis 1080 m<sup>3</sup>/h sorgt. Dementsprechend verhält sich auch die durch den Luftstrom verursachte Wärmeabfuhr. Abhängig von der Außen- und Raumtemperatur betragen die Stundenmittelwerte bei der Abluftanlage rund 130 bis 200 W und rund 2400 W bei der Fensterlüftung.

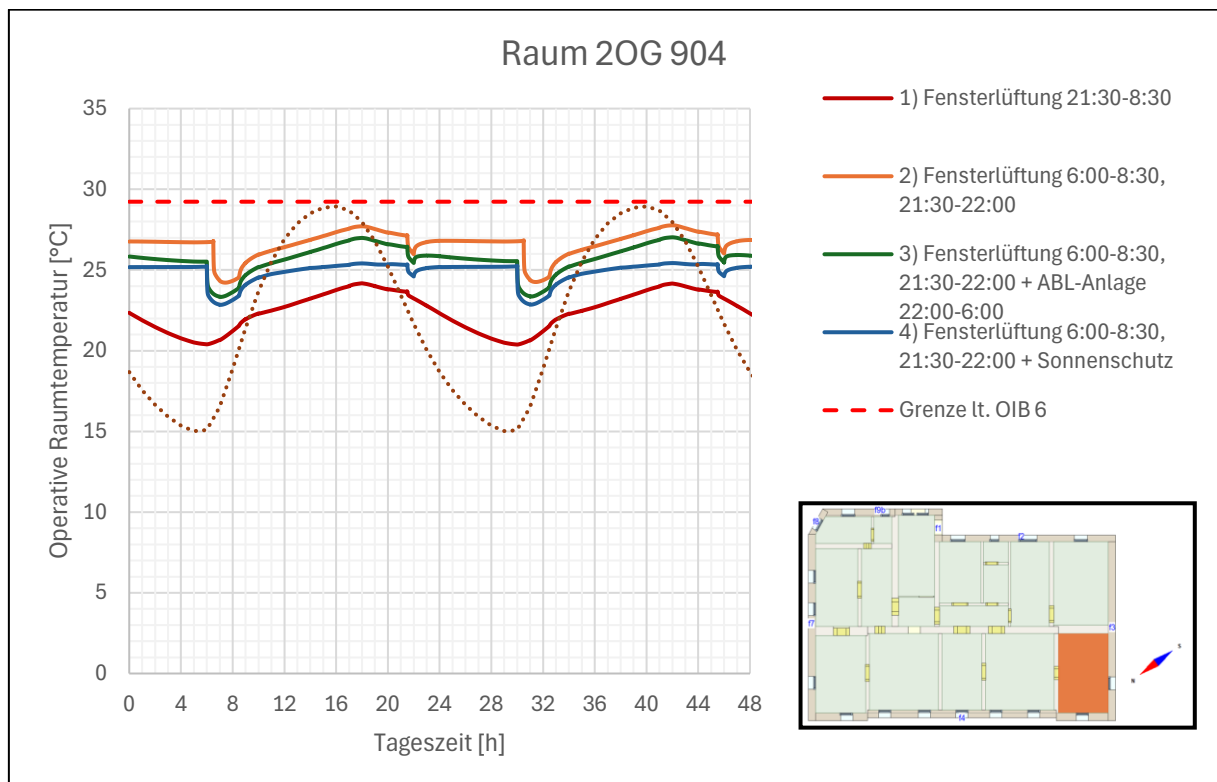


Abbildung 41: Operative Raumtemperatur für Raum 2OG 904; der Raum ist im Grundriss farblich markiert

### 6.5.2 Büronutzung

Für die Nutzung als Bürogebäude wurden ebenfalls verschiedene Szenarien simuliert:

1. Fensterlüftung: Die Fenster werden von 21:30 bis 8:30 Uhr geöffnet. Während das Gebäude belegt ist (8:00 bis 19:00 Uhr) wird regelmäßig stoßgelüftet, um den hygienischen Luftwechsel sicherzustellen.

2. Eingeschränkte Fensterlüftung: Die Fenster werden nur morgens von 6:00 bis 10:00 Uhr und nachmittags von 18:30 bis 19:00 Uhr geöffnet. Dies ist der Zeitraum, in dem die Außenluft kühler ist als die Raumluft und in dem noch Personen anwesend sind, die die Fenster bedienen.

Der Zeitraum, in dem die Außenluft kühler als die Raumluft ist, wurde für den betrachteten Raum in Simulationen iterativ ermittelt, um mögliche, aber simulationstechnisch aufwändige Regelungen für die Fensteröffnung zu vermeiden. Auch hier gilt, dass während das Gebäude belegt ist, (8:00 bis 19:00 Uhr) regelmäßig stoßgelüftet wird, um den hygienischen Luftwechsel sicherzustellen. Nachts bleiben die Fenster zum Einbruchs- und Sturmschutz geschlossen.

3. Eingeschränkte Fensterlüftung mit Abluftanlage: Die eingeschränkte Fensterlüftung wird durch die Abluftanlage ergänzt, durchgehend mit einem Abluftvolumenstrom von 1430 m<sup>3</sup>/h betrieben wird. Die Anlage übernimmt somit Nachtlüftung und den hygienischen Luftwechsel bei Belegung. Im betrachteten Raum bewirkt die Anlage einen Luftvolumenstrom von rund 64 m<sup>3</sup>/h.
4. Eingeschränkte Fensterlüftung mit Sonnenschutz: Die eingeschränkte Fensterlüftung aus Szenario 2 wird mit einem außenliegenden Sonnenschutz ergänzt, der bei einer Strahlungsintensität von mehr als 100 W/m<sup>2</sup> angewendet wird.
5. Kombination aus Szenario 3 und 4: Fensterlüftung morgens und abends, Abluftanlage durchgehend betrieben und Sonnenschutz

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Simulationen, dargestellt in Form der operativen Raumtemperatur für den ungünstigsten Aufenthaltsraum (Nr. 904 im 2. OG). Die durchgehende Nachtlüftung mit geöffneten Fenstern führt zu den niedrigsten Temperaturen. Die kleinen Spitzen tagsüber werden durch das Stoßlüften verursacht. Diese tatsächliche Umsetzung dieser Variante ist jedoch aus Gründen des Einbruchs- und Sturmschutzes nicht ohne aufwändige Zusatzmaßnahmen machbar. Szenario 2 führt zu deutlich höheren Raumtemperaturen. Das Maximum der operativen Raumtemperatur liegt bei 27,4 °C. Man erkennt denn schnellen Temperaturabfall von rund 3 K während der morgendlichen Lüftungsphase. Die Lüftung am Nachmittag führt kaum zu einer Wärmeabfuhr, da zu dieser Uhrzeit die Temperatur der Außenluft fast gleich hoch ist wie die Raumtemperatur. Der zusätzliche Einsatz der Abluftanlage in Szenario 3 führt in den Nachstunden zwar Wärme ab und verringert dadurch die Raumtemperatur, der Effekt ist allerdings mit rund 0,8 K Differenz um 6:00 Uhr (vor Fensteröffnung) gering. Auch hier liegt der Grund im deutlich niedrigeren Luftvolumenstrom von rund 64 m<sup>3</sup>/h bei der Abluftanlage gegenüber rund 700 bis 2100 m<sup>3</sup>/h bei der Fensterlüftung am Morgen. Die Differenz zur Variante ohne Abluftanlage verschwindet während der morgendlichen Lüftung fast vollständig. Das Tagesmaximum wird um 0,4 K verringert. Einen stärkeren Einfluss hat der Einsatz des Sonnenschutzes in Szenario 4. Durch den verringerten solaren Wärmeeintrag steigt die Raumtemperatur während der Belegungszeit weniger stark an und erreicht ein Maximum von 25,95 °C. Der Tagesmittelwert wird um 1 K, das Maximum um 1,5 K reduziert. Besonders deutlich ist der Temperaturunterschied tagsüber – der Effekt des Sonnenschutzes fällt mit der Belegungszeit zusammen. Szenario 5, das Abluftanlage und Sonnenschutz kombiniert, führt zu einer maximalen operativen Raumtemperatur von 25,65 °C.

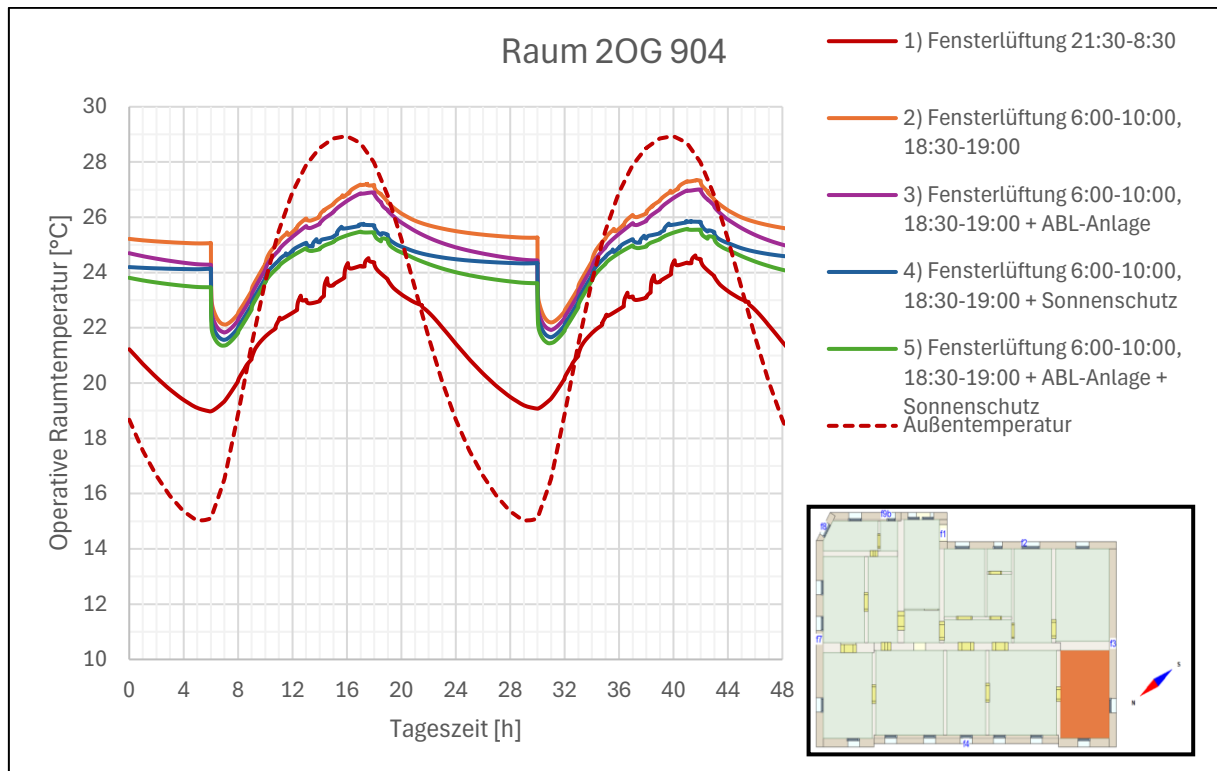


Abbildung 42: Ergebnisse für die operative Raumtemperatur für Raum OG2 904 bei Büronutzung

Der Einsatz der Abluftanlage hat auf die operative Raumtemperatur einen geringen Einfluss. Geschickte Fensterlüftung und ein effektiver Sonnenschutz führen zu besseren Ergebnissen.

## 6.6 Energetische Betrachtung

Die Untersuchung des Energiebedarfs des Gebäudes mit und ohne Abluftanlage gestaltet sich umfangreicher. Es werden getrennt für Wohn- und Büronutzung die wesentlichen Bestandteile des Heizenergiebedarfs betrachtet. Für möglicherweise kritische Eingangsgrößen wird der Einfluss ihrer Variation auf die Ergebnisse untersucht. Schließlich werden die Ergebnisse für das Bestandsgebäude (in weiterer Folge „Bestand“) und die Nachrüstung mit der entworfenen Abluftanlage (in weiterer Folge „Abluftanlage“) miteinander verglichen.

### 6.6.1 Wohnnutzung

Eine Besonderheit bei der Nutzung als Wohngebäude ist der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung. Derzeit werden aufgrund der überwiegenden Büronutzung des Bestandsgebäudes L27 nur lokale elektrisch beheizte Kleinwasserspeicher genutzt. Im Gegensatz dazu wird zur besseren Vergleichbarkeit bei beiden Varianten (Bestand und Abluftanlage) des Wohngebäudes eine zentrale Warmwasserbereitung mit Fernwärme als Wärmequelle angesetzt. Das Gebäude wurde vor der Nutzung durch die TU Graz bereits als Wohngebäude genutzt. Die Annahme einer Wohnnutzung ist damit nicht realitätsfern.

Die wichtigsten Eingangsdaten für beide Basismodelle (WB und WABL) sind:

- Außenklima: IWEK2 Flughafen Graz Thalerhof
- Soll-Raumtemperatur Heizperiode: 22 °C
- Gesamte Personenanzahl: 26 Personen
- Belegungsprofile und Nutzerprofile: aus ÖNORM EN 16798-1 Anhang C und für Warmwasser-Zapfprofil aus ÖNORM EN 12813-3
- Warmwasserbedarf: 40 Liter/Person und Tag
- Luftwechsel: 662 m<sup>3</sup>/h (184 L/s) für das gesamte Gebäude, entspricht einer effektiven Luftwechselzahl von  $n = 0,34$  1/h bezogen auf die gesamte Wohnnutzfläche mit einer fiktiven Raumhöhe von 2,6 m. Das Lüftungsprofil über den Tag verteilt ist konstant.
- Sonnenschutz: Die Fenster werden bei starker Sonneneinstrahlung (mehr als 100 W/m<sup>2</sup>) mit innenliegenden Jalousien verschattet.

#### 6.6.1.1 Wohnnutzung im Bestandsgebäude

Für das Bestandsgebäude bei Wohnnutzung beträgt der Heizenergiebedarf für die genannten Eingangsdaten rund 140000 kWh/a. Davon entfallen rund 24300 kWh/a auf die Warmwasserbereitung, womit diese einen Anteil von 17 % am Heizenergiebedarf des Gebäudes hat. In Abbildung 43 wird dies grafisch dargestellt. Das Bestandsgebäude hat als einzige Quelle für die benötigte Wärmeenergie die Fernwärme; es ergibt sich daher ein Fernwärme-Energiebedarf von rund 140000 kWh/a. Auf die hier beschriebenen Daten wird später bei der ökonomischen Betrachtung zurückgegriffen.

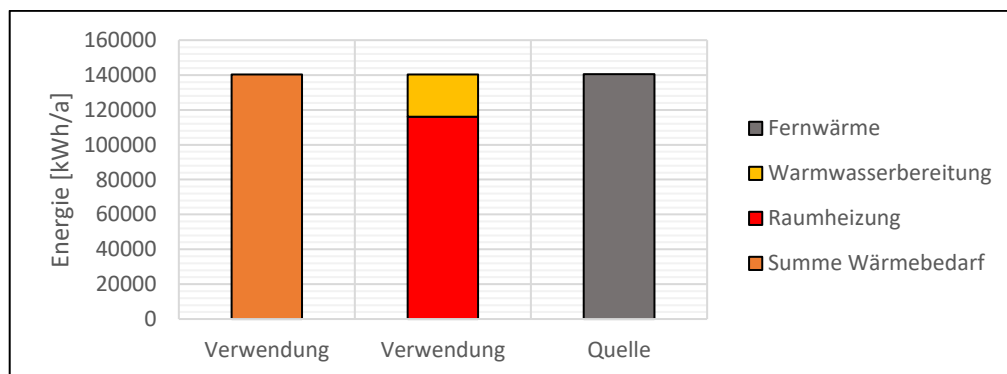


Abbildung 43: Gegenüberstellung von Quellen und Verwendung der benötigten Energiemengen pro Jahr

Die Fensterlüftung wurde wie bereits erwähnt mithilfe einer fiktiven Lüftungsanlage nachgebildet, da eine Modellierung der Fensteröffnungen durch Nutzer für das Gebäude zu rechenintensiv ist. Der Strombedarf für diese fiktive Lüftungsanlage wurde herausgerechnet.

#### Variation Luftwechsel

Um den Einfluss des Luftwechsels und des Warmwasserbedarfs pro Person und Tag auf die Endergebnisse zu ermitteln, wurden diese Parameter ausgehend vom Basismodell nach oben und unten variiert.

Der Anteil der Lüftungswärmeverluste an den gesamten Wärmeverlusten beträgt rund ein Fünftel. Zuerst wurde der Luftwechsel 25 % nach unten und 25 % nach oben variiert. Damit ergeben sich eine Bandbreite von energetisch wirksamen Luftwechselzahlen von 0,225 bis 0,425 1/h. Abbildung 44 zeigt die Auswirkung der Änderung auf bestimmte Ergebnisse. Die Ergebnisse der Varianten wurden normiert, indem sie auf die entsprechenden Ergebnisse des Basismodells bezogen wurden – sie stellen somit einen Index dar, bei dem das Basismodell stets bei 1,00 liegt. Dieses ist in der Grafik mit einem grauen Balken hervorgehoben. Für beide betrachteten Ergebnisse liegt eine positive Korrelation vor. Die Lüftungswärmeverluste ändern sich relativ fast im selben Ausmaß wie die Luftwechselzahlen und reichen von 77 % bis 123 % des Basiswerts. Der Einfluss auf den Fernwärmebedarf (entspricht hier auch dem Gesamtwärmebedarf) ist hingegen geringer – dieser Wert ändert sich um 4 % nach unten bzw. nach oben.

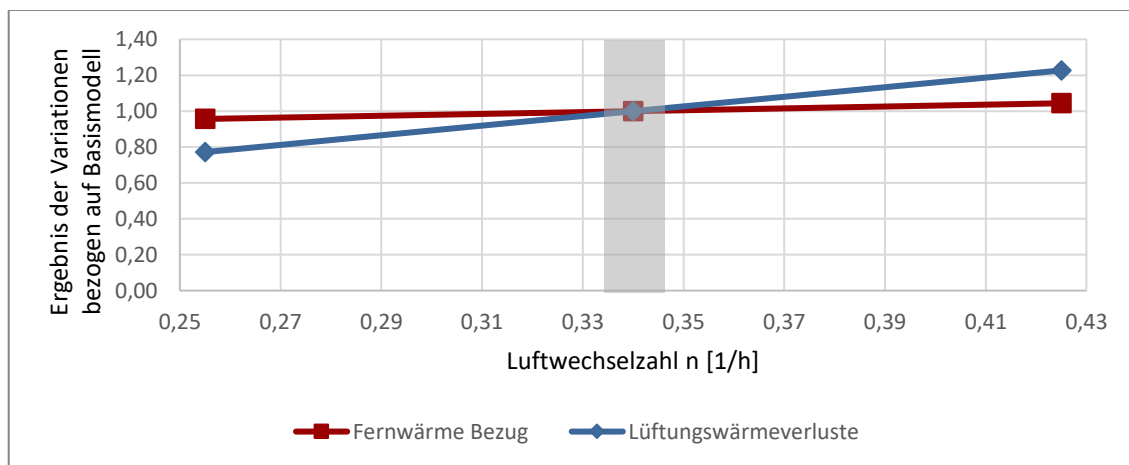


Abbildung 44: Variation ausgewählter Ergebnisse bei Änderung des Luftwechsels

### Variation Warmwasserbedarf

Als nächstes wird ausgehend vom Basismodell (WB) der Warmwasserbedarf in Litern pro Person und Tag verändert. Die Werte der einzelnen Schritte betragen 0, 20, 30, 40 und 50 L/(Person·d), wobei der Wert von 40 L/(Person·d) für das Basismodell steht. Abbildung 45 zeigt die Auswirkungen der Änderungen. Der Fernwärmebedarf des Gebäudes verringert und erhöht sich wie zu erwarten. Wird gar kein Warmwasser benötigt, sinkt der Fernwärmebedarf auf 83 % des Basismodell-Wertes (WB); es bleibt nur der Wärmebedarf der Raumheizung übrig.

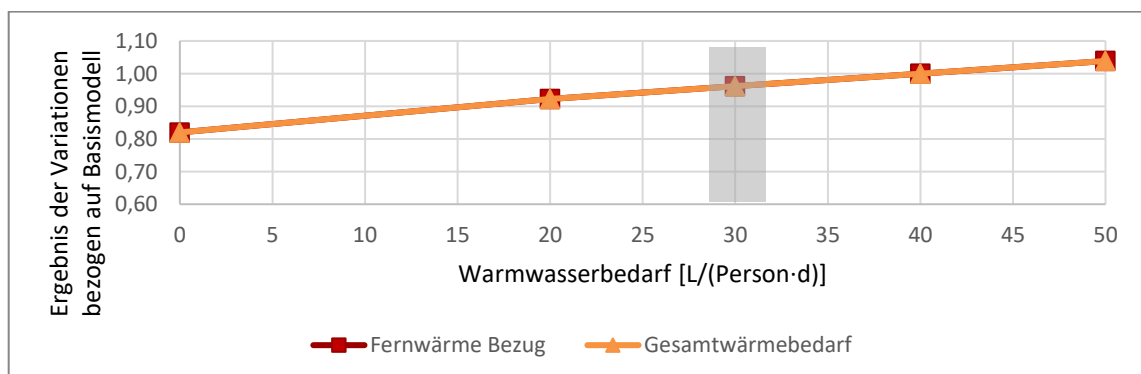


Abbildung 45: Variation ausgewählter Ergebnisse bei Änderung des Warmwasserbedarfs

### 6.6.1.2 Wohnnutzung im Gebäude mit Abluftanlage

Das für das Basismodell (WABL) verwendete Wärmepumpenmodell ist eine drehzahlgeregelte Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Direktverdampfer. Es wurde mit einer Nennleistung (Heizleistung, Wärmeabgabe) der Wärmepumpe von 2 kW bei den Prüfbedingungen von 7 °C Eintrittstemperatur der Luft und einer Erwärmung des Wassers von 40 auf 45 °C erstellt. Das Temperaturniveau bei einer Verwendung als Abluftwärmepumpe liegt jedoch durchgehend bei 20 °C oder mehr, was im Betrieb zu einer durchschnittlichen jährlichen Wärmeleistung von 3,5 kW mit einem maximalen Monatsmittelwert von 4,1 kW aufgrund der günstigeren Temperaturverhältnisse führt. Die Energiesimulation liefern für den Heizenergiebedarf Werte von rund 139400 kWh/a, davon 24400 kWh/a für Warmwasserbereitung. Abbildung 46 zeigt die Quellen und die Verwendung der Wärmeenergie schrittweise aufgeschlüsselt. Die Wärmeabgabe der Wärmepumpe deckt mit rund 30700 kWh/a 22 % des Gesamtwärmebedarfs. Davon stammen rund 22500 kWh/a aus der der Abluft entzogenen Wärme und rund 8200 kWh/a aus der elektrischen Antriebsenergie der Wärmepumpe, was eine Jahresarbeitszahl von 3,74 ergibt. Das minimale Monatsmittel der Fortlufttemperatur beträgt 9,6 °C. Der Zentralventilator der Abluftanlage benötigt pro Jahr rund 1075 kWh Strom. 109400 kWh/a beträgt der Bezug an Fernwärme. Differenzen in den Summen ergeben sich aufgrund von geringen Verlusten, die auch teilweise wieder genutzt werden (z. B. wirkt ein Teil der Wärmeverluste der Warmwasserleitung unterstützend bei der Raumheizung).

Im Winter arbeitet die Wärmepumpe bei Temperaturen von rund 5,5 °C auf der Verdampferseite und rund 53 °C auf der Kondensatorseite. Im Sommer erhöhen sich beide Werte. Die Verdampfungstemperatur steigt auf rund 17 °C und die Kondensationstemperatur auf rund 61 °C. Höhere Verdampfungstemperaturen wirken sich positiv, höhere Kondensationstemperaturen negativ auf die Effizienz der Wärmepumpe aus. Für diese Wärmepumpengröße gleichen sich die Effekte übers Jahr betrachtet teilweise aus. Der COP schwankt dadurch die meiste Zeit im Jahr zwischen Werten von 3,5 bis 4,3.

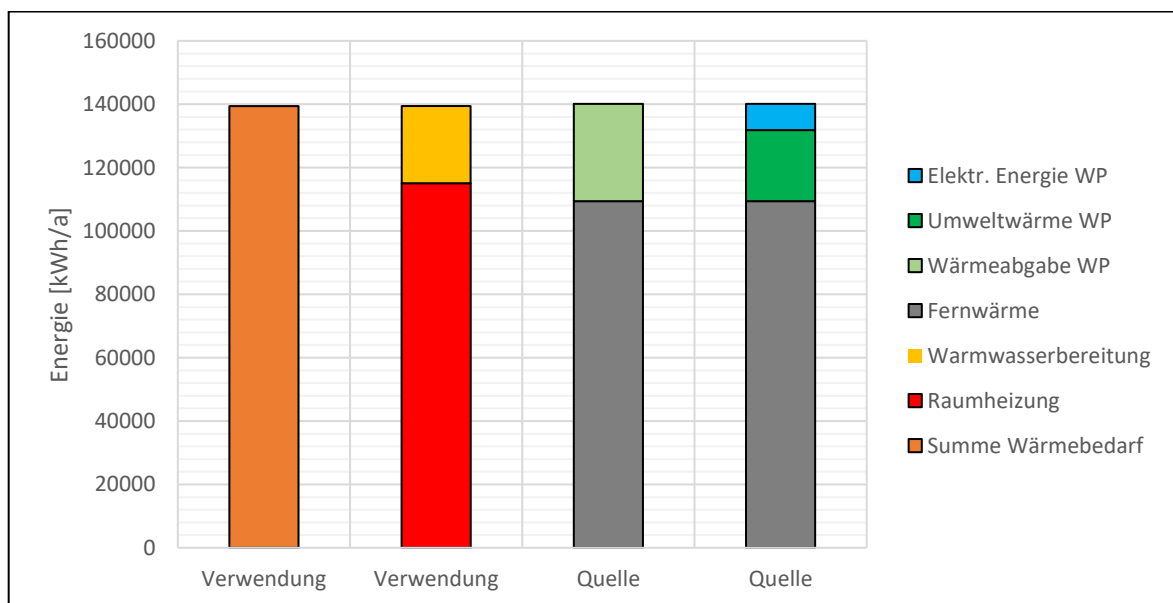


Abbildung 46: Gegenüberstellung von Quellen und Verwendung der Energie beim Wohngebäude mit Abluftanlage

## Variation der Wärmepumpengröße

Auch für dieses Modell gibt es mehrere Simulationsreihen, die schrittweise einen Eingangswert ausgehend vom Basismodell variieren. Als erstes wurde die Nennleistung der Wärmepumpe variiert. Tabelle 29 zeigt eine Übersicht der einzelnen Stufen der Simulationsreihe mit den Ergebnissen für die tatsächliche Heizleistung der Wärmepumpe, die außer bei einer Nennleistung von 10 kW stets deutlich über der Nennleistung bei Prüfbedingungen liegen.

Tabelle 29: Stufen der Variation der Wärmepumpen-Leistung

<b>Input: Nennleistung (Heizleistung) bei Prüfbedingungen [kW]</b>	0,5	1	2	3	4	5	6	10
<b>Ergebnis: Heizleistung Jahresdurchschnitt [kW]</b>	1,2	2,2	3,5	4,5	5,4	6,1	6,7	8,6
<b>Ergebnis: Heizleistung max. Monatsmittel [kW]</b>	1,3	2,3	4,1	5,6	7,0	8,1	9,1	12,7

Abbildung 47 zeigt die (indexbasierte) Auswirkung der Änderung der Nennleistung im Verhältnis zum Basismodell (grauer Balken). Der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe steigt mit höheren Nennleistungen stärker an als ihre Wärmeabgabe. Dementsprechend sinkt die JAZ, die umso höher ist, je kleiner die Wärmepumpe dimensioniert wurde. Der Fernwärmebedarf sinkt mit zunehmender Wärmepumpenleistung. Die Fortlufttemperatur verringert sich bei höheren Wärmepumpenleistungen stark. Bei 10 kW Nennleistung liegt das niedrigste Monatsmittel bei -9,2 °C. Der Bedarf an Fernwärme sinkt mit größerem Wärmepumpenanteil.

Die Wärmepumpen mit 0,5 und 10 kW Nennleistung stellen hier Extrembeispiele dar. Bei 10 kW sind die Fortlufttemperaturen so gering, dass Eisbildung und Frost in den Fortluftleitungen zu erwarten ist. Dadurch wären Abtauphasen nötig.

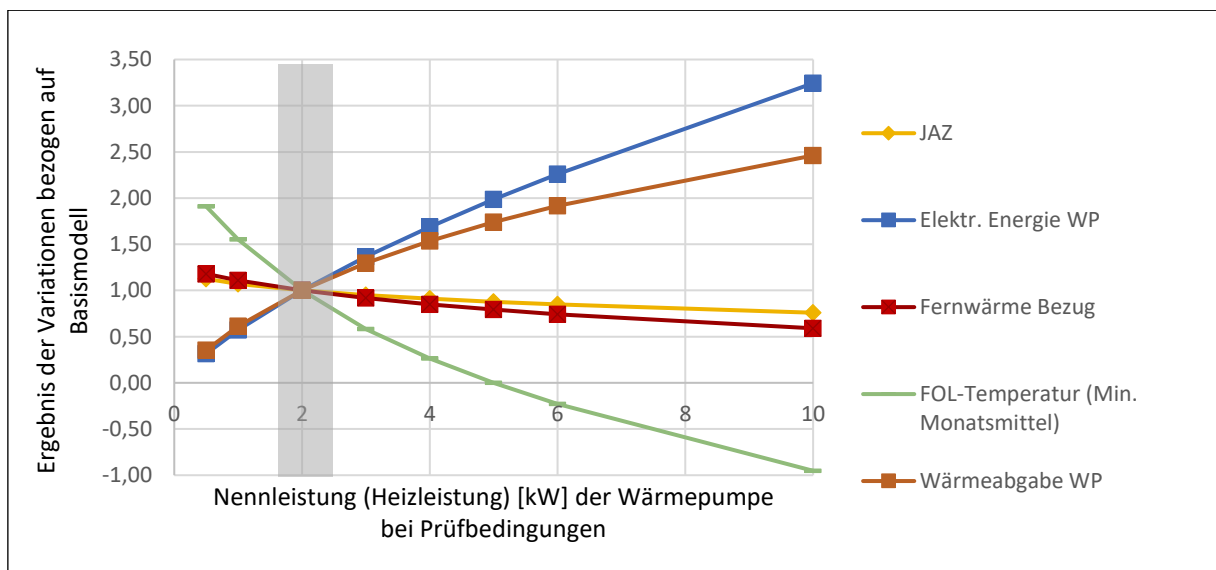


Abbildung 47: Änderung ausgewählter Ergebnisse bei Variation der Wärmepumpenleistung

## Variation des Abluftvolumenstroms

In der nächsten Simulationsreihe wird der Einfluss von höheren und niedrigeren Abluftvolumenströmen auf ausgewählte Ergebnisse betrachtet. Wie beim Bestandgebäude wird ausgehend vom Basismodell-Wert von 660 m<sup>3</sup>/h, was einer effektiven Luftwechselzahl von 0,34 1/h entspricht, um 25 % nach unten auf 0,255 1/h, um 25 % nach oben auf 0,425 1/h und 45 % nach oben auf 0,493 1/h variiert.

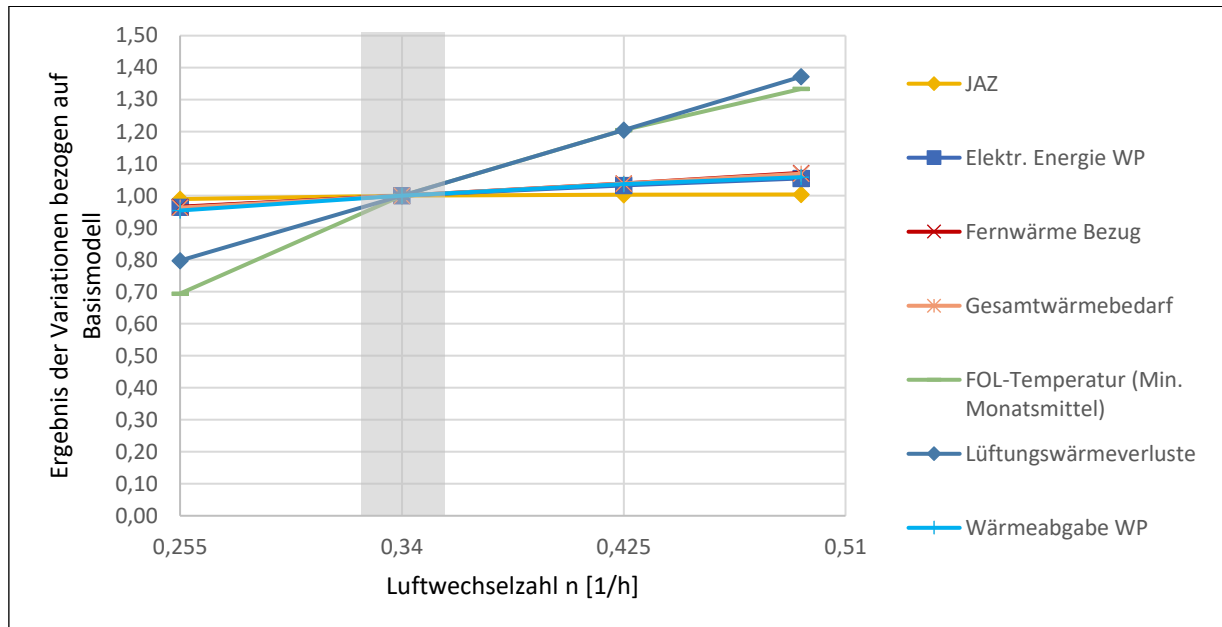


Abbildung 48: Änderung ausgewählter Ergebnisse bei Variation der Luftwechselzahl (bzw. des Abluftvolumenstroms)

Abbildung 48 zeigt die Auswirkungen des variierten Luftvolumenstroms (bzw. der Luftwechselzahl). Die Änderung hat leichte Auswirkungen auf den Strombedarf der Wärmepumpe (96 % | 100 % | 103 % | 105 %), den Gesamtwärmebedarf (96 % | 100 % | 104 % | 107 %) und den Fernwärmebedarf (96 % | 100 % | 104 % | 107 %). Die Jahresarbeitszahl erhöht sich nur geringfügig bei höherem Abluftvolumenstrom. Grund dafür ist das höhere Temperaturniveau beim Verdampfer. Dies macht sich auch bei der Fortlufttemperatur bemerkbar. Die Lüftungswärmeverluste steigen erwartungsgemäß deutlich an. Die Änderungen sind relativ betrachtet (80 % | 100 % | 121 % | 137 %) fast so hoch wie die relative Änderung des Luftvolumenstroms. Die der Abluft entzogene Wärme steigt mit zunehmendem Abluftvolumenstrom an. Der höhere Fernwärmebedarf zeigt allerdings, dass der erhöhte Lüftungswärmeverlust nicht gänzlich durch die höhere Wärmerückgewinnung ausgeglichen wird. Führt man die gleiche Variation mit einer deutlich größeren Wärmepumpe durch, dann kann der Fernwärmebedarf bei zunehmendem Luftvolumenstrom auch sinken. Die Wärmepumpe gewinnt dann im Jahresmittel mehr Wärme aus der Abluft als beim Erwärmen der kalten Außenluft aufgewendet wurde.

## Variation der Infiltration bzw. der Luftdichtheit der Gebäudehülle

Als nächster Eingangsparameter wurde die Luftdichtheit der gesamten Gebäudehülle variiert. Die Werte für die Infiltrations-Luftwechselzahl bei 50 Pa Druckdifferenz ( $n_{50}$  [1/h]) wurde in den drei Stufen von 2, 5 (Basismodell) und 8 1/h verändert. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse ist dabei gering.



Der Gesamtwärmebedarf und der Fernwärmebedarf ändert sich im Bereich von – 1 % bis + 1 %. Die Luftdichtheit der Gebäudehülle wirkt sich stärker auf die Lüftungseffektivität (siehe Abschnitt 6.4.2) als auf die Energieverhältnisse aus. Würde man jedoch aufgrund von schlechter Durchlüftung mancher Aufenthaltsräume den Luftvolumenstrom erhöhen, hat dies sehr wohl einen Einfluss auf den Wärmebedarf wie im vorherigen Absatz beschrieben.

### Variation der Lüftungsstrategie

Es wurden für das Modell drei verschiedenen Lüftungsstrategien untersucht:

1. Konstant: Einstellung beim Basismodell; konstanter Abluftvolumenstrom mit 660 m<sup>3</sup>/h
2. Personenprofil: Reduktion des Luftwechsel untertags entsprechend dem Personenprofil aus der ÖNORM EN 16798-1 Anhang C; bei Vollbelegung beträgt der Abluftvolumenstrom 660 m<sup>3</sup>/h für das gesamte Gebäude
3. Zweistufig: Erhöhter 1,45-facher Luftwechsel (960 m<sup>3</sup>/h) von 19:00 bis 7:00 Uhr und reduzierter 0,55-facher Luftwechsel (360 m<sup>3</sup>/h) von 7:00 bis 19:00 Uhr

Bei Variante 2 (Personenprofil) beträgt der mittlere Abluftvolumenstrom 450 m<sup>3</sup>/h, während er bei Variante 3 (zweistufig) im Mittel mit 660 m<sup>3</sup>/h ebenso hoch wie bei Variante 1 (konstant) ist. Abbildung 49 zeigt die Auswirkungen der Änderung der Lüftungsstrategie auf einige Ergebnisgrößen. Variante 2 führt zur Verringerung von Lüftungswärmeverlusten, ebenso wie zu geringeren Energiebedarf und -abgabe der Wärmepumpe. Variante 3 führt zu höheren Lüftungs- und Gesamtwärmeverlusten. Die Wärmeabgabe der Wärmepumpe verringert sich, während der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe fast gleich bleibt, was zu einer geringeren JAZ führt. Der Fernwärmebedarf ändert sich kaum.

Unter den angesetzten Randbedingungen erweist sich Variante 2 als vorteilhaft. Der Fernwärmebedarf steigt nur geringfügig, während sich der Strombedarf der Wärmepumpe und auch jener des Abluftventilators deutlich verringert.

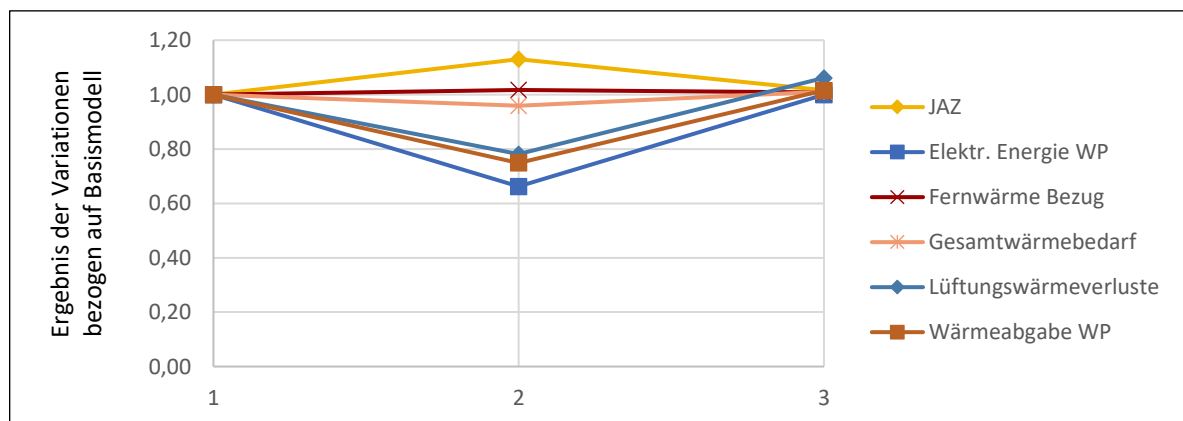


Abbildung 49: Auswirkungen der verschiedenen Lüftungsstrategien auf ausgewählte Ergebnisse

### Variation des Warmwasserbedarfs

Neben dem nutzbaren Potential zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft, das vor allem durch den Abluftvolumenstrom und -temperatur bestimmt wird, hat auch die Verbrauchsseite entscheidenden Einfluss auf das Gesamtsystem.

In den Sommermonaten dominiert der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung gegenüber dem für Raumheizung. Es wird deshalb der Warmwasserbedarf in Litern pro Person und Tag variiert, um die Zusammenhänge zu verdeutlichen. Der Eingangswert wird in den Schritten 0, 20, 30, 40 (Basismodell WABL), 50 L/(Person·d) geändert. Abbildung 50 zeigt Auswirkungen der Änderung. Bei höherem Warmwasserbedarf erhöht sich die Wärmeabgabe der Wärmepumpe stärker als der Strombedarf der Wärmepumpe steigt. Es verbessert sich somit auch die JAZ.

Je höher der Anteil des Warmwasserenergiebedarfs am gesamten Heizenergiebedarf ist, desto besser schneidet das System ab. Die Wärmepumpe kann dann auch im Sommer genutzt werden, um einen Teil des Energiebedarfs zu decken. Die Möglichkeit der Wärmenutzung zur Warmwasserbereitung bei der zentralen Trinkwarmwasserbereitung ist also vorteilhaft.

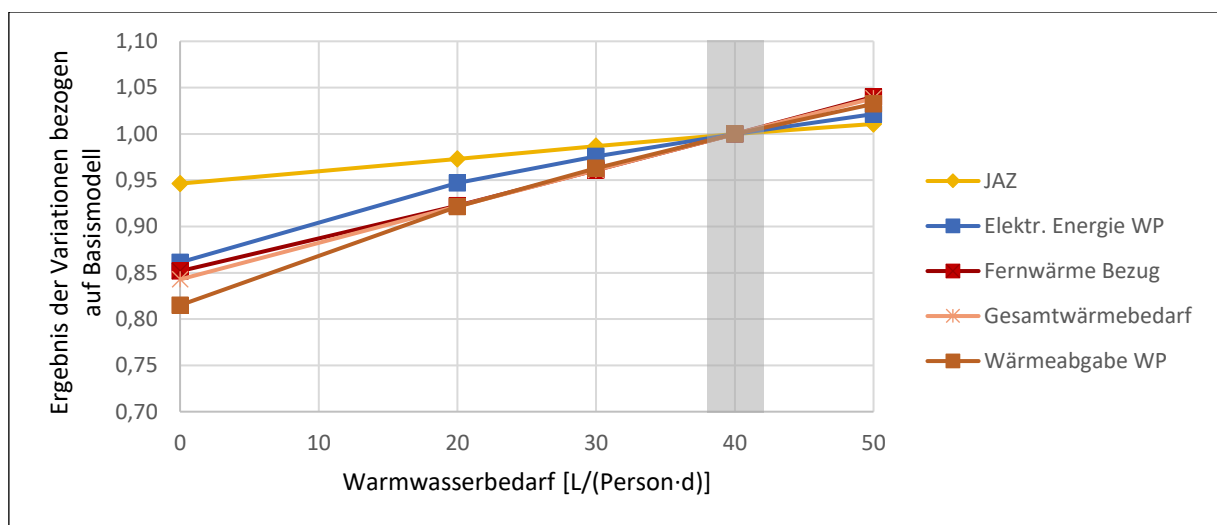


Abbildung 50: Änderung ausgewählter Ergebnisse bei Variation des Warmwasserbedarfs

### 6.6.1.3 Vergleich von Bestand und Abluftanlage für das Wohngebäude

Zusammenfassend für die Nutzung als Wohngebäude werden die Ergebnisse für Bestand und Abluftanlage verglichen. Neben den beiden Basismodellen (Bestand WB und Abluftanlage WABL), ist zusätzlich eine Variante der Abluftanlage mit 6 kW Nennleistung bei Prüfbedingungen (gegenüber 2 kW beim Basismodell) enthalten. Der Jahresmittelwert für die Wärmepumpenleistung (Heizleistung) liegt bei 3,5 kW bzw. 6,7 kW. Die 6-kW-Wärmepumpe wurde als plausible Größe gewählt, da die Fortlufttemperatur noch in einem Bereich von rund 0 °C liegen. Würde sie geringer wie beispielsweise bei der 10-kW-Wärmepumpe, wären vermehrt Abtaumaßnahmen nötig.

Abbildung 51 stellt die Energiemengen grafisch dar und schlüsselt sie schrittweise in einzelne Teilmengen auf. Bei der Abluftanlage mit 2 kW Nennleistung kann die Wärmepumpe 22 % des Gesamtwärmebedarfs decken; bei der Anlage mit 6 kW Nennleistung 42 %. Die JAZ verschlechtert sich dabei allerdings von 3,74 auf 3,17, was bedeutet, dass bei der größeren Wärmepumpe ein höherer Anteil der Wärmeabgabemenge aus der eingesetzten elektrischen Energie stammt. Die Wahl der Wärmepumpengröße ist einer der wichtigsten, da einflussreichsten, Anlagenparameter.

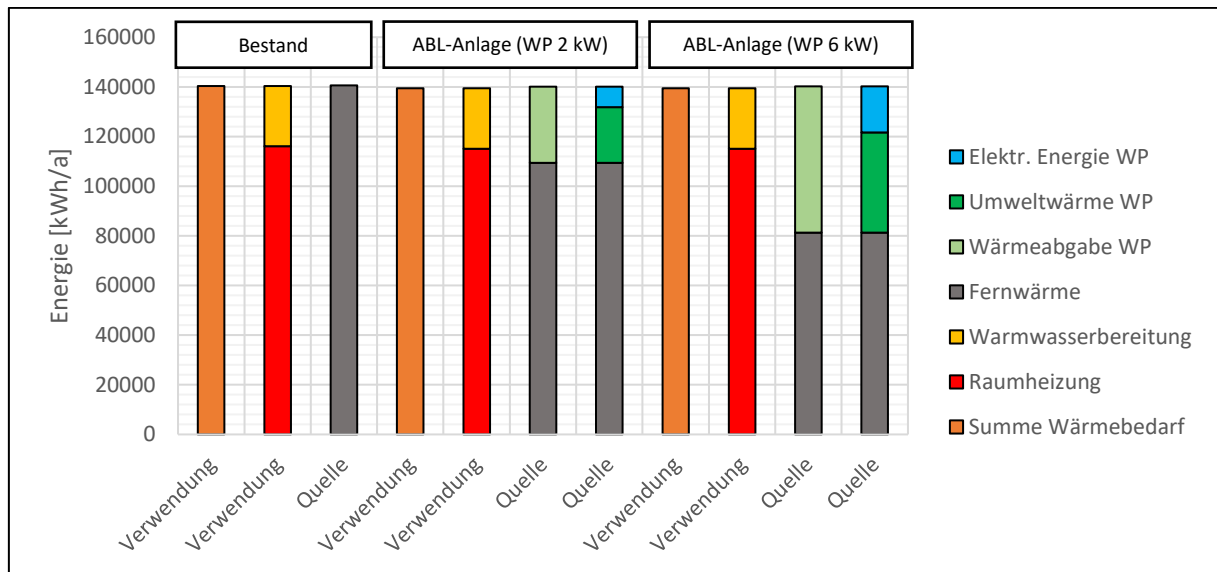


Abbildung 51: Gegenüberstellung der Energiemengen für Bestand und Abluftanlage

## 6.6.2 Büronutzung

Für die Büronutzung wird ähnlich vorgegangen wie zuvor bei der Nutzung als Wohngebäude. Die wesentlichen Eigenschaften der beiden Basismodelle für Bestand (BB) und Gebäude mit Abluftanlage (BABL) sind:

- Keine zentrale Warmwasserbereitung. Das Warmwasser wird in beiden Varianten durch lokale Elektrokleinspeicher zur Verfügung gestellt. Der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung ist somit unabhängig vom Abluft- und Heizungssystem. Er ist folglich kein Bestandteil der Modelle.
- Außenklima: IWE2 Flughafen Graz Thalerhof
- Soll-Raumtemperatur Heizperiode: 22 °C
- Gesamte Personenanzahl: 56 Personen
- Belegungsprofil: aus ÖNORM EN 16798-1 Anhang C
- Luftwechsel: 1404 m<sup>3</sup>/h (390 L/s) für das gesamte Gebäude während der Belegungszeit von 8:00 bis 19:00 Uhr, entspricht einer effektiven Luftwechselzahl von  $n = 1.1/h$  bezogen auf die Nutzfläche der Büroräume mit einer fiktiven Raumhöhe von 2,6 m. Außerhalb der Nutzungszeit ist die Abluftanlage abgeschaltet.
- Sonnenschutz: Die Fenster werden bei starker Sonneneinstrahlung (mehr als 100 W/m<sup>2</sup>) mit innenliegenden Jalousien verschattet.

### 6.6.2.1 Büronutzung im Bestandsgebäude

Der Wärmebedarf für das Bürogebäude beträgt rund 108000 kWh/a für die Raumheizung. Er wird vollständig durch Fernwärme gedeckt. Die Lüftungswärmeverluste haben daran mit rund 17000 kWh/a einen Anteil von 13 %.

### Variation des Luftwechsels

Die Variation des Luftwechsels ausgehend vom Basiswert von 1 1/h auf 0,75 1/h und 1,25 1/h zur Belegungszeit hat relativ geringe Auswirkungen auf den gesamten Energiebedarf. Der Unterschied beträgt  $\pm 3\%$ .

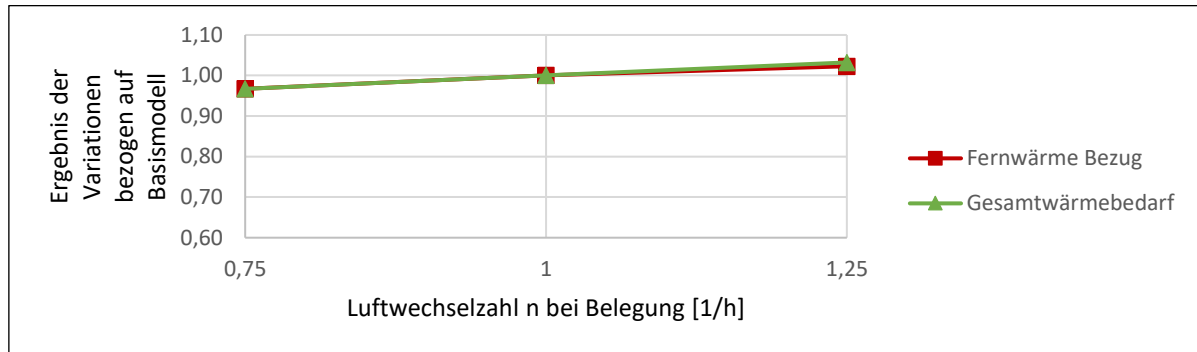


Abbildung 52: Auswirkung der Variation des Luftwechsels auf den Wärmebedarf

#### 6.6.2.2 Büronutzung im Gebäude mit Abluftanlage

Das Basismodell für das Bürogebäude mit Abluftanlage hat eine Wärmepumpe mit 10 kW Nennleistung (Heizleistung) unter Prüfbedingungen. Der Gesamtwärmebedarf des Gebäudes beträgt rund 108200 kWh/a. Davon werden rund 25300 kWh/a durch die Wärmepumpe gedeckt werden, was einem Anteil von 23 % entspricht. Die JAZ beträgt dabei 3,09. Das Minimum der Fortlufttemperatur (Stundenmittel) liegt bei  $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

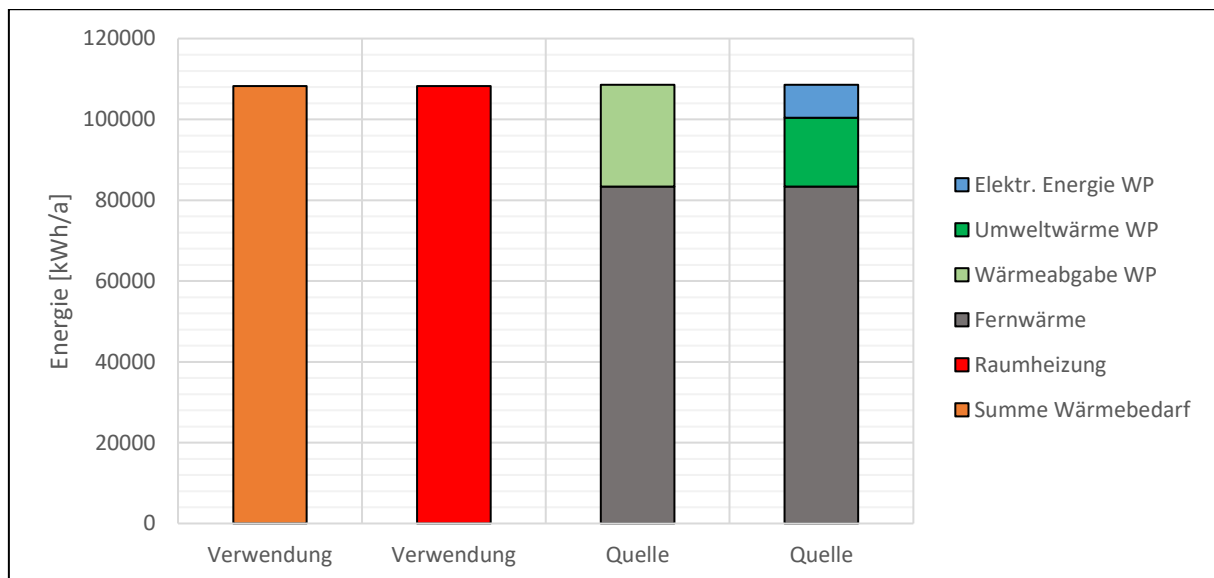


Abbildung 53: Übersicht Energiemengen für das Bürogebäude mit Abluftanlage

Die Lüftungswärmeverluste betragen rund 18500 kWh/a. Die niedrigeren Lüftungswärmeverluste im Vergleich zur Wohnnutzung erklären sich durch die geringere Nutzungszeit. So ist trotz des höheren Luftwechsels zur Belegungszeit der mittlere jährliche Abluftvolumenstrom mit 460 m<sup>3</sup>/h geringer als bei der Wohnnutzung mit 660 m<sup>3</sup>/h.

### Variation der Wärmepumpengröße

Die Ergebnisse für die Variation der Wärmepumpen-Nennleistung in den Stufen 8, 10 (Basismodell) und 12 kW zeigt Abbildung 54. Wie zu erwarten, verringert sich bei steigender Nennleistung die JAZ aufgrund der niedrigeren Temperatur beim Verdampfer. Strombedarf und Wärmeabgabe steigen mit zunehmender Wärmepumpengröße.

Folglich verringert sich der Bedarf an Fernwärme (104 % | 100 % | 97 %). Die FOL-Temperatur sinkt bei größeren Wärmepumpen.

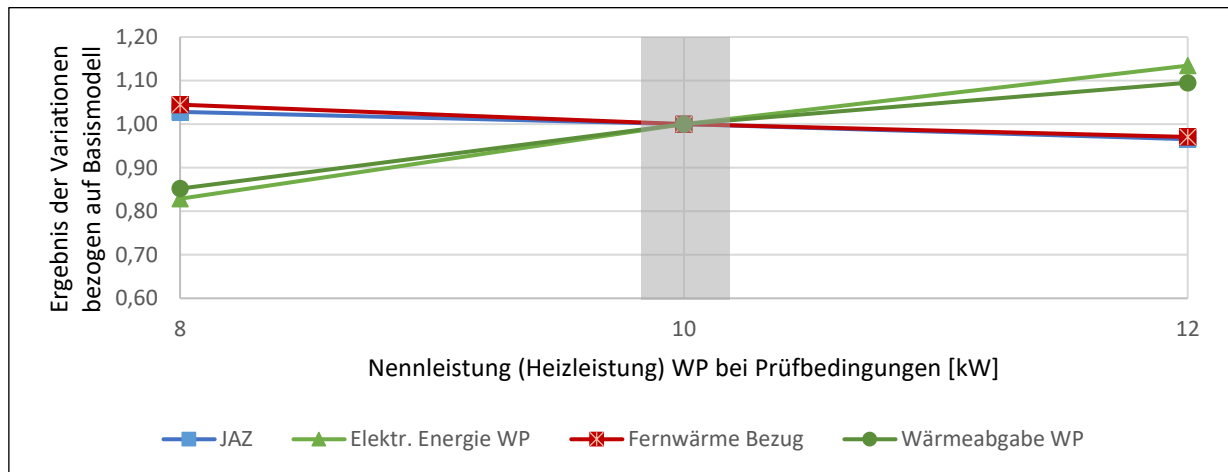


Abbildung 54: Auswirkung der Variation der Wärmepumpen-Nennleistung

### Variation des Abluftvolumenstroms

Der Abluftvolumenstrom wird ausgehend vom Basiswert um - 25 % und + 25 % verändert. Abbildung 55 stellt die Auswirkungen grafisch dar. Die JAZ verbessert sich geringfügig (98 % | 100 % | 101 %), weil sich das Temperaturniveau auf der Verdampferseite erhöht. Die Fortlufttemperatur steigt dadurch ebenfalls. Der elektrische Energiebedarf und erhöhen sich bei steigendem Abluftvolumenstrom ebenfalls geringfügig. Der steigende Fernwärmebedarf (-/+ 2 %) zeigt, dass der höhere Lüftungswärmeverlust nicht vollständig durch die höhere Wärmeabgabe der Wärmepumpe kompensiert wird.

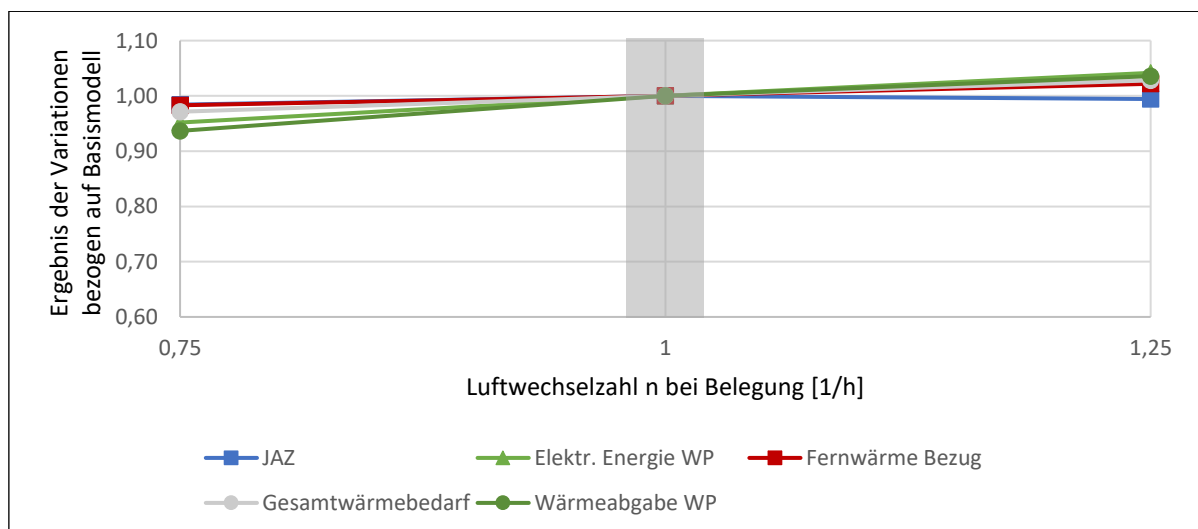


Abbildung 55: Auswirkung der Variation des Abluftvolumenstroms

## Variation der Lüftungs- und Betriebsstrategie

Es werden verschiedene Lüftungsstrategien simuliert:

1. Zweistufig: Voller Abluftvolumenstrom von 8:00 bis 19: Uhr; außerhalb dieser Zeit ist die Anlage außer Betrieb
2. Wie 1. aber im Zeitraum mit geringem oder keinem Heizwärmebedarf (1.5. bis 15.9.) wird die Wärmepumpe abgeschaltet. Die restliche Abluftanlage läuft weiterhin.
3. Bedarfsabhängig: Reduktion gemäß dem Personenprofil für Büros aus der ÖNORM EN 16798-1 Anhang C
4. Konstant: Als zusätzliche Variante wird eine konstanter Abluftvolumenstrom, der auch außerhalb der Belegungszeiten und auch am Wochenende beibehalten wird, angewendet. Diese Variante wirkt kontraintuitiv. Der Hintergedanke ist, mit der Wärmepumpe außerhalb der Belegungszeit mehr Wärme aus der Abluft zu erhalten als zur Erwärmung der nachströmenden Außenluft durch die Raumheizung aufgewendet wird.

Die Ergebnisse der Variationen sind in Abbildung 56 dargestellt. Erwartungsgemäß verringert sich bei der bedarfsgesteuerten Lüftung der Gesamtwärmebedarf. Er sinkt auf 95 % des Basismodell-Werts (BABL). Der Strombedarf der Wärmepumpe und ihre Wärmeabgabe verringern sich deutlich mit rund - 50 %. Die JAZ beträgt 3,5.

Bei der konstanten Lüftung erhöht sich der Gesamtwärmebedarf auf rund 139000 kWh/a (+ 28 % zum Basismodell BABL). Der Strombedarf der Wärmepumpe und ihre Wärmeabgabe verdreifachen sich. Die JAZ für diesen Fall beträgt nur mehr 2,98.

Der Fernwärmebezug verringert sich auf 78 % des Basismodells (BABL). Diese Lüftungsstrategie erweist sich in dieser Form als nicht brauchbar. Wenn die Wärmepumpe nur dann außerhalb der Nutzung betrieben wird, wenn die Außenlufttemperatur höher als die Fortlufttemperatur nach der Wärmepumpe ist, könnte sich die Effizienz dieser Strategie verbessern. Es wird dann beispielsweise kalte Außenluft in den Räumen durch die Raumheizung von + 10 °C auf + 22 °C erwärmt und durch die Wärmepumpe von + 22 °C auf 0 °C abgekühlt. Beachtet werden muss allerdings, dass auch der Zentralventilator bei dieser Variante mehr elektrische Energie benötigt. Eine weitere Optimierung dieser Lüftungsstrategie wurde nicht verfolgt.

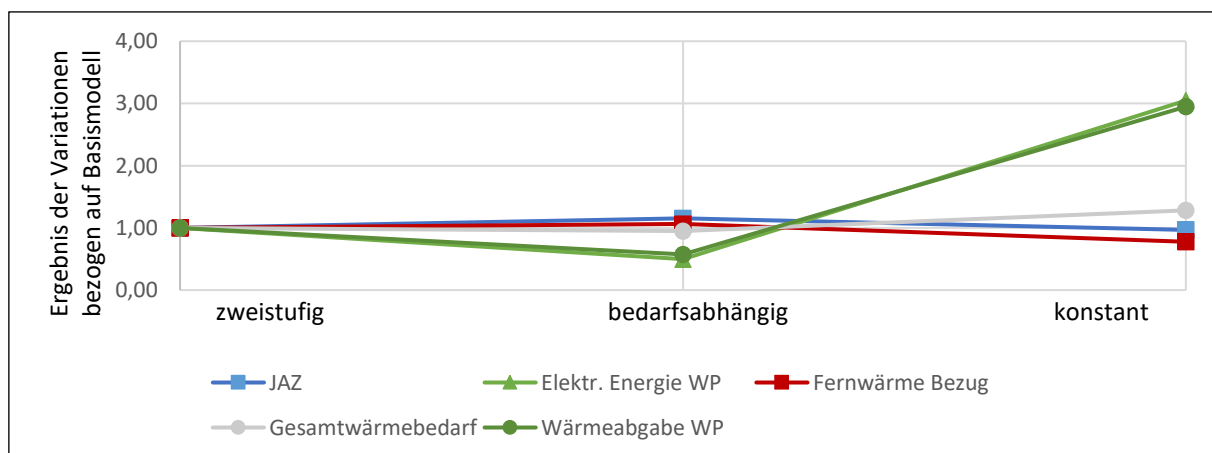


Abbildung 56: Auswirkungen der verschiedenen Lüftungsstrategien

## 6.7 Wirtschaftliche Betrachtung

Abschließend wird für beide Nutzungen – Wohnen und Büro – eine wirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Als Methode wird dabei die statische Amortisationsrechnung angewandt. Die Kosten der Anlage aus der Kostenschätzung werden mit den Einsparungen im Bereich Energie bilanziert. Grundlage für die Vergleiche sind zunächst die jeweiligen Basismodelle (z. B. wird Wohnen Bestand WB mit Wohnen Abluftanlage WABL verglichen). Ausgewählte Eingangsparameter werden anschließend variiert, um die Auswirkungen auf die statische Amortisationszeit bewerten zu können.

### 6.7.1 Kosten

Die Anlagenkosten („Investitionskosten“) und Energiepreise bilden neben den Ergebnissen der Energiesimulationen die Grundlage der Amortisationsrechnung.

#### 6.7.1.1 Schätzung der Anlagenkosten

Die Kostenschätzung für die Anlagenkosten basieren auf den in Kap. 5 ausgelegten Anlagenkomponenten und den Kosten gemäß BKI Kostenplaner [70], angepasst an den Baupreisindex 2023 und die Region Steiermark. Alle Werte enthalten bereits 20 % Umsatzsteuer.

Es wird für die bessere Vergleichbarkeit angenommen, dass bei einem Wohngebäude schon eine zentrale Warmwasserbereitung existiert, welche allerdings angepasst werden muss. Das Trinkwasser-Verteilungsnetz und allfällige weitere Bestandteile wie Zirkulationssysteme zur Temperaturhaltung werden als bereits vorhanden betrachtet.

Tabelle 30: Kostenschätzung für die Abluftanlage

Positionen	Kosten [€]	
	Wohnen	Büro
Außenluftdurchlässe	6429	13867
Abluftleitungen inkl. Zubehör	13965	15378
Ventilator	3688	3688
Wärmepumpe	20101	20101
Pufferspeicher	4141	4141
Umrüstung Warmwasser	5658	0
<b>Summe</b>	<b>53983</b>	<b>57175</b>

Tabelle 30 fasst die Kosten der einzelnen Bestandteile in Gruppen zusammen. Bei den Gesamtkosten sind Büro und Wohnen ähnlich hoch.

Während beim Wohngebäude mehr für die Umrüstung der Warmwasserbereitung aufzuwenden ist, hat das Bürogebäude höhere Kosten bei den ALD, von denen es mehr und größere benötigt, und bei den Abluftleitungen aufgrund der größeren Rohrdurchmesser. Das Wohngebäude verfügt 10 Stk. ALD DN 110 und 9 Stk. ALD DN 160; das Bürogebäude über 29 Stk. ALD DN 160. In den Kosten für die Abluftleitungen sind die Rohre samt Formteilen sowie Abluftgitter, Regeleinrichtungen, Brandschutzklappen und Schalldämpfer enthalten. Die Kosten für die Umrüstung der Warmwasserversorgung beim Wohngebäude enthält die Frischwasserstation. Wartungs- und Inbetriebnahmekosten werden vernachlässigt; ebenso wie die Kosten für möglicherweise nötige Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtheit.

### 6.7.1.2 Energiekosten

Die Basismodelle für Wohnnutzung und Büronutzung werden untereinander verglichen. Folgende Preise werden für Strom und Fernwärme angesetzt:

- Fernwärme jährliche Fixkosten aufgrund des Jahresleistungspreises und des Messpreises: 1082,40 €/Jahr [71]
- Fernwärme leistungsabhängig: 0,192 €/kWh [71]
- Strom Gesamtpreis: 0,30 €/kWh [72]

Für die Ermittlung des Strompreises wurde der Tarifikalkulator von E-Control (Stand Mai 2024, Standort Graz) verwendet, der alle Bestandteile des Gesamtpreises berücksichtigt. Die Spannweite für verschiedene Tarife reicht von rund 0,17-0,42 €/kWh.

Die angegebenen Preise für Energie sind die Ausgangswerte (100 %). Ausgehend von diesen werden die Preise nach oben und unten variiert.

Der Strombedarf des Gebäudes bezieht sich nur auf die Werte für Abluftventilator, Wärmepumpe und Hilfsenergie, die z. B. für Umwälzpumpen benötigt wird.

## 6.7.2 Amortisationsrechnung Wohngebäude

In einem ersten Schritt wird die statische Amortisationsrechnung für das Wohngebäude (Basismodelle WB und WABL) beschrieben. Anschließend werden Eingangsparameter variiert und die Auswirkungen beobachtet.

### 6.7.2.1 Vergleich der Basismodelle für das Wohngebäude

Die statische Amortisationsrechnung ist Tabelle 31 dargestellt. Bei Anlagenkosten von rund 54000 € und einer jährlichen Einsparung von rund 3500 € beträgt die statische Amortisationszeit 15,6 Jahre.



Tabelle 31: Statische Amortisationsrechnung für das Wohngebäude

Position	Einheit	Wert	
		Abluftanlage	Bestand
Investition			
Anlagenkosten	€	53982,73	
Laufende Kosten			
Fernwärmebedarf	kWh/a	109382	140529,60
Fernwärme Fixkosten	€/a	1082,40	1082,40
Fernwärme Preis leistungsabhängig	€/kWh	0,192	0,192
Fernwärmekosten	€/a	22083,74	28064,08
Strombedarf	kWh/a	11754,10	3348,70
Strompreis	€/kWh	0,30	0,30
Stromkosten	€/a	3526,23	1004,61
Summe Energiekosten	€/a	25609,97	29068,69
Einsparung Abluftanlage gegenüber Bestand			
Einsparung Energiekosten	€/a	3458,72	
Statische Amortisationszeit			
Statische Amortisationszeit	a	15,6	

### 6.7.2.2 Einflüsse auf die Amortisation beim Wohngebäude

Im Rahmen dieser Untersuchung werden Eingangsparameter einzeln und zum Teil auch gleichzeitig variiert, um die Auswirkung auf eine Ergebnisgröße – hier die statische Amortisationszeit – zu beobachten.

#### Variation der Wärmepumpengröße

Um den Einfluss der Nennleistung der Abluftwärmepumpe zu ermitteln, werden die Ergebnisse aus den Energie-Simulationen verwendet.

Es werden dabei verschiedene Varianten des Gebäudes mit Abluftanlage (WABL) mit stets demselben Bestandsgebäude (Basismodell WB) verglichen. Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse bei Variation der Wärmepumpenleistung und gleichzeitiger Variation von Anlagenkosten, Strompreis und Fernwärmepreis. Die Variation dieser drei Größen erfolgt dabei ausgehend vom Ausgangswert (100 %) nach oben und unten für eine Größe (z. B. Strompreis), während die anderen beiden Werte (z. B. Anlagenkosten und Fernwärmepreis) beim Ausgangswert festgehalten werden. Die Ausgangswerte entsprechen den in Abschnitt 6.7.2.1 angegebenen Kosten bzw. Preisen. Die Variationen werden für sieben verschiedene Wärmepumpenleistungen gezeigt. Das Basismodell WABL liegt bei 2 kW Nennleistung und wird durch einen schwarzen Balken dargestellt. Man erkennt dabei aus der Grafik, dass höhere Wärmepumpenleistungen (zumindest im simulierten Bereich) zu geringeren Amortisationszeiten führen. Die einzige Ausnahme tritt bei 10 kW Nennleistung und sehr niedrigen Fernwärmepreisen auf. Die Fortlufttemperaturen bei 10 kW Nennleistung sind mit rund -10 °C (niedrigstes Stundenmittel) allerdings bereits sehr niedrig, weshalb keine höhere Wärmepumpenleistung mehr verwendet wurde.

Ein Einschränkung dieser Untersuchung ist, dass keine verschiedenen Kosten für verschiedene Wärmepumpengrößen betrachtet wurden. Die BKI Kostenkennwerte haben keine detaillierte Abstufung nach Leistungen, weshalb alle Wärmepumpen in die Gruppe 0 bis 15 kW fallen. Es muss also angemerkt werden, dass die Aussagen hier nur gelten, wenn verschieden Große Wärmepumpen (im Bereich von 1 bis 10 kW) sich in den Kosten kaum unterscheiden.

Die Größe der Wärmepumpe hat unter den getroffenen Annahmen einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Die schlechtere Effizienz (geringere JAZ) bei größeren Anlagen kann dabei in Kauf genommen werden, da die höhere Energie- und Kosteneinsparung im Betrieb auch in diesen Fällen überwiegt.

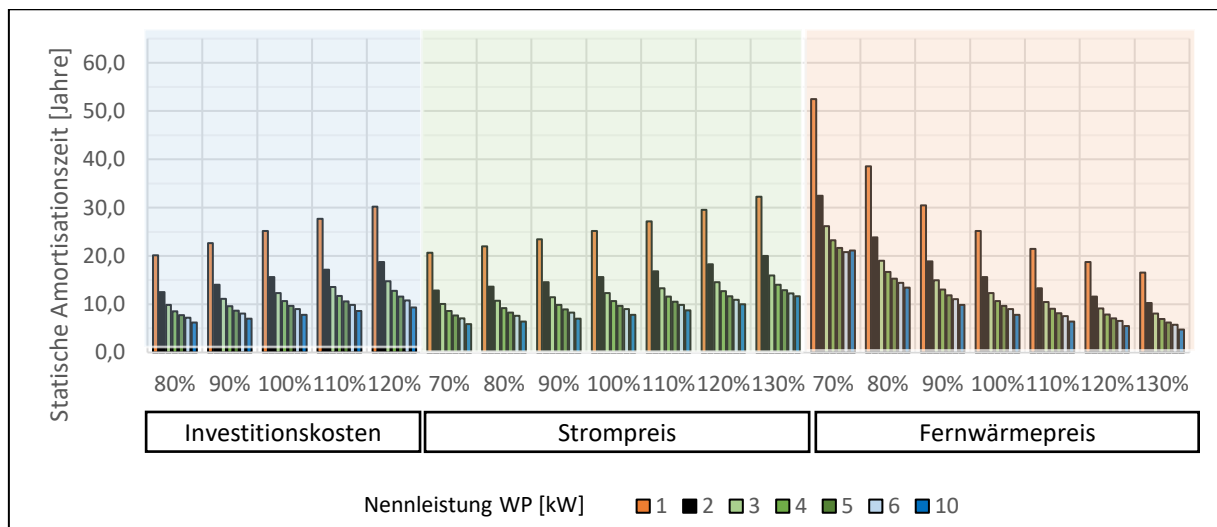


Abbildung 57: Auswirkung der Variation der Wärmepumpenleistung auf die Amortisationszeit

Die untersuchte Variation der Anlagen- und Energiekosten zeigt für die meisten Fälle eine Amortisationszeit von unter 20 Jahren, was der geschätzten Anlagenlebensdauer entspricht [73]. Weiters erkennt man, dass zwischen Amortisationszeit und Anlagenkosten sowie Strompreis eine positive, beim Fernwärmepreis eine negative Korrelation herrscht. Sollen die Fortlufttemperaturen nicht geringer als rund 0°C werden, liegt die Obergrenze für die Nennleistung der verwendeten Wärmepumpe bei 5 bis 6 kW Nennleistung. Für 6 kW Nennleistung liegt die Amortisationszeit bei rund 9 Jahren.

### Variation des Warmwasserbedarfs

Als zweiter Parameter wird der tägliche Warmwasserbedarf in Litern pro Person und Tag betrachtet. Da dieser Eingangswert beide Gebäude (Abluftanlage und Bestand) betrifft, werden hier stets die Ergebnisse für Varianten mit demselben Warmwasserbedarf verglichen – also z. B. 20 Liter pro Person und Tag beim Gebäude mit Abluftanlage mit 20 L/Person und Tag beim Bestandsgebäude.

Abbildung 58 zeigt, dass sich die Anlage schneller amortisiert, wenn der Warmwasserbedarf generell (also in beiden verglichenen Gebäuden) höher liegt. Dies lässt sich durch die bessere Nutzung der Abluftwärmepumpe in den Sommermonaten erklären. Der Spannweite im Ausgangspunkt der Variation (100 %) reicht von 17,4 Jahre bei 20 L/(Person·d) bis 14,9 Jahre bei 50 L/(Person·d).

Eine zentrale Warmwasserbereitung hilft aufgrund der Verwendungsmöglichkeit der Wärme im Sommer, die Anlage besser auszunutzen.

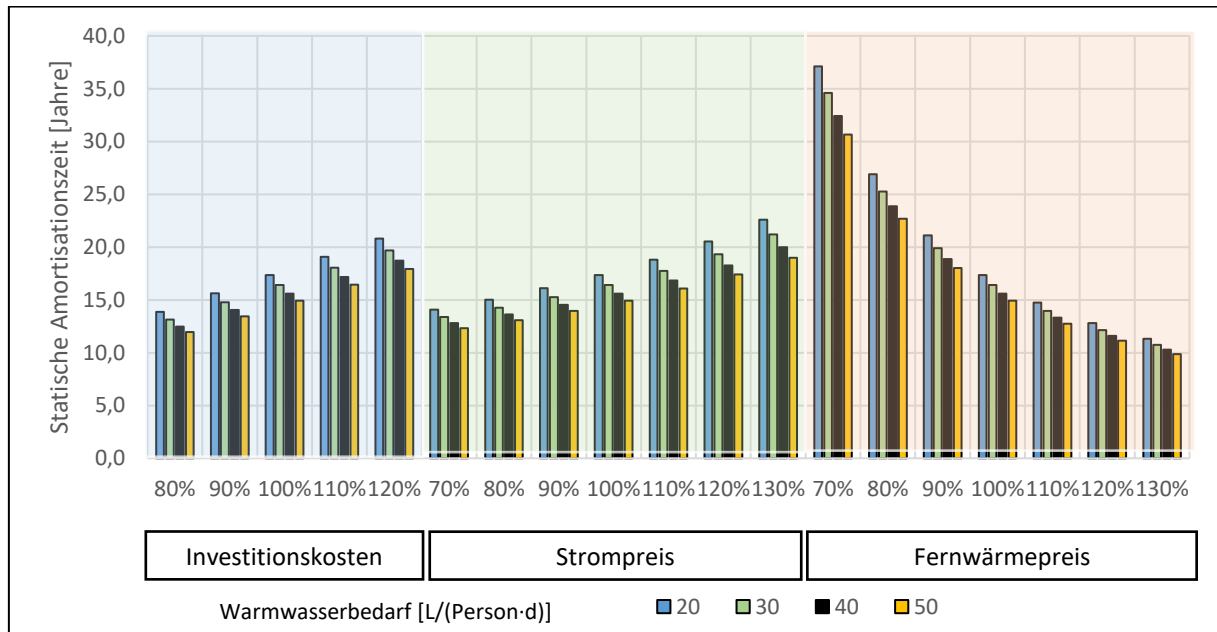


Abbildung 58: Auswirkung der Variation des Warmwasserbedarfs auf die Amortisationszeit

### 6.7.3 Amortisationsrechnung Bürogebäude

Es wird hier nach demselben Prinzip wie beim Wohngebäude vorgegangen.

#### 6.7.3.1 Vergleich der Basismodelle für das Bürogebäude

Die statische Amortisation für die Basismodelle der Bürogebäude ist in Tabelle 32: Statische Amortisationsrechnung für die Basismodelle Bürogebäude aufgeführt. Bei Investitionskosten von rund 57200 € und einer jährlichen Ersparnis von 2200 € liegt die statische Amortisationszeit bei 26 Jahren.

Die Gründe für die geringere Einsparung und die daraus folgende längere Amortisationszeit liegen in der fehlenden Verwendbarkeit der Wärme außerhalb der Heizperiode und in den im Mittel geringeren Lüftungswärmeverlusten des Bürogebäudes.

Da die Wärmepumpe zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft dient, führen geringe Lüftungswärmeverluste zu einem geringeren Einsparungspotential. Würde man den Abluftvolumenstrom erhöhen, gelangt man einerseits bald an die Grenze der durch die ALD zuführbaren Luft und erhöht andererseits den Strombedarf des Ventilators.

Tabelle 32: Statische Amortisationsrechnung für die Basismodelle Bürogebäude

Position	Einheit	Wert	
		Abluftanlage	Bestand
Investition			
Anlagenkosten Anlage	€	57175,27	
Laufende Kosten			
Fernwärmebedarf	kWh/a	83367,60	107600,50
Fernwärme Fixkosten	€/a	1082,40	1082,40
Fernwärme Preis leistungsabhängig	€/kWh	0,192	0,192
Fernwärmekosten	€/a	17088,98	21741,70
Strombedarf	kWh/a	10573,80	2399,40
Strompreis	€/kWh	0,30	0,30
Stromkosten	€/a	3172,14	719,82
Summe Energiekosten	€/a	20261,12	22461,52
Einsparung durch die Abluftanlage gegenüber dem Bestand			
Einsparung Energiekosten	€/a	2200,40	
Statische Amortisationszeit			
Statische Amortisationszeit	a	26,0	

### 6.7.3.2 Einfluss der Wärmepumpenleistung auf die Amortisation beim Bürogebäude

Für das Bürogebäude wird die Nennleistung der Wärmepumpe variiert und die Auswirkung auf die Amortisationszeit beobachtet. Die Daten stammen aus den Energie-Simulationen in Kapitel 6.6.2.

Abbildung 59 zeigt die Auswirkung von verschiedenen Wärmepumpen-Nennleistungen und verschiedenen Anlagenkosten sowie Energiepreisen. Eine höhere Wärmepumpenleistung führt auch hier zu geringeren Amortisationszeiten. Die Amortisationszeiten sind generell höher als bei der Wohngebäude-Anlage. Nur wenige Kombinationen liegen unter der geschätzten Anlagenlebensdauer von 20 Jahren. [73]

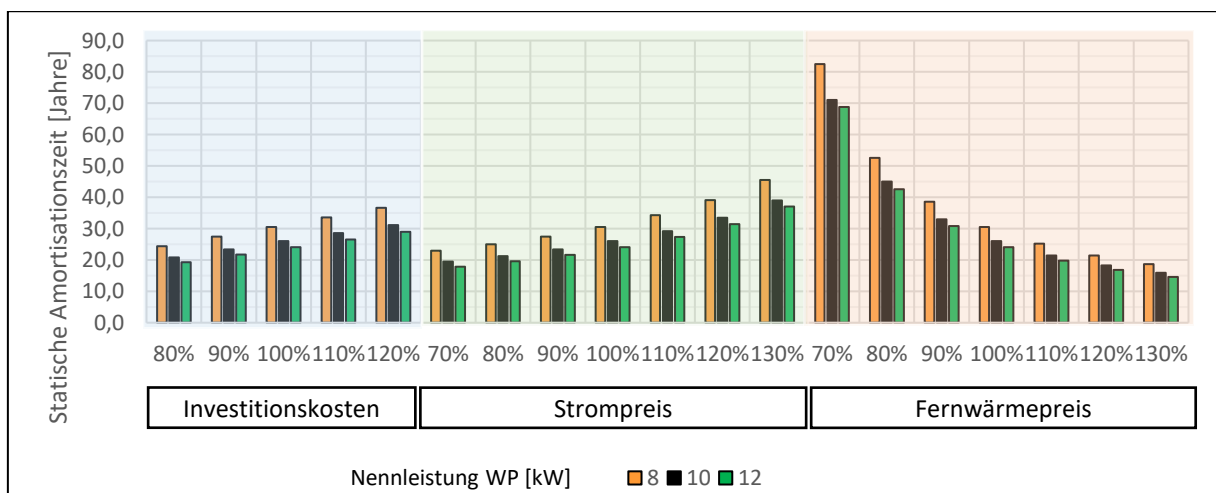


Abbildung 59: Ergebnisse bei Variation der Kosten und der Wärmepumpenleistung für das Bürogebäude

Auch für das Bürogebäude hat die Dimensionierung der Wärmepumpe einen signifikanten Einfluss auf die Amortisationszeit. Bei 8 kW Nennleistung liegt sie bei 30,5 Jahren, bei 12 kW bei rund 24 Jahren. Die Werte liegen allerdings generell deutlich höher als bei der Wohngebäude-Anlage. Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Nutzen der Anlage im Bürogebäude niedrig.

## 7 Diskussion und Ausblick

Abschließend werden die durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse zusammengefasst sowie diskutiert und es wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

### 7.1 Zusammenfassung

Für das Grazer Gründerzeitgebäude „Lessingstraße 27“ wurde eine komplette Abluftanlage mit einer Abluftwärmepumpe zur Wärmerückgewinnung entworfen, modelliert und simuliert. Es wurden zwei verschiedene Nutzungen – als Bürogebäude und als Wohnhaus – betrachtet, jeweils mit einer eigenen Anlage. Die Funktion des Systems ist dabei stets folgende: Durch den Unterdruck, den das Lüftungssystem erzeugt, strömt Außenluft durch passive (ohne eigene Ventilatoren ausgestattete) Außenbauteil-Luftdurchlässe (ALD) in die Aufenthaltsräume. Innerhalb einer Nutzungseinheit führen Druckunterschiede zu einer Überströmung der verbrauchten Luft in Überströmzonen (Flur) und anschließend weiter zu den Abluftzonen (Küche und Sanitärräume). Dort befinden sich Abluftleitungen, die für einen Abtransport der Luft sorgen. Dieses Prinzip der Überströmung wird auch als „Kaskadenprinzip“ oder „Mehrfachnutzung der Luft“ bezeichnet. Es verringert die Leitungslängen innerhalb einer Nutzungseinheit, da nicht alle Räume eigens in das Lüftungssystem eingebunden werden müssen. Die Abluft gelangt zur Lüftungszentrale im Kellergeschoß. Dort befindet sich ein zentraler Ventilator und die Abluftwärmepumpe. Nach der Wärmerückgewinnung wird die Luft neben dem Gebäude über einen Fortluftturm in Freie geführt.

Der Unterschied der beiden Systeme (Büro- und Wohnungsanlage) liegt einerseits in der Dimensionierung der Anlage – das Lüftungssystem im Bürogebäude muss auf höhere Luftvolumenströme ausgelegt sein – und andererseits in der Nutzung der durch die Wärmepumpe zurückgewonnen Wärme. Im Bürogebäude lässt sich diese nur zur Unterstützung der Raumheizung einsetzen. Außerhalb der Heizperiode bleibt die Abluftwärmepumpe ungenutzt. Beim Wohngebäude hat die Wärme hingegen dank der gebäudezentralen Trinkwarmwasserbereitung eine weitere Verwendungsmöglichkeit neben der Unterstützung der Raumheizung.

Für diese zwei Anwendungsszenarien wurden Simulationen mit verschiedenen Schwerpunkten durchgeführt. Simulationen, um das allgemeine Systemverhalten und Besonderheiten einer Abluftanlage zu analysieren, Untersuchungen des Einflusses auf die sommerliche Überwärmung und Simulationen zur energetischen Bewertung der Anlage. Es zeigt sich, dass die Auslegung einer reinen Abluftanlage empfindlich auf die Luftdichtigkeitsverhältnisse und Strömungswiderstände reagiert, was eine Feinabstimmung der einzelnen Komponenten, mit denen man die Strömungsverhältnisse innerhalb einer Nutzungseinheit beeinflussen kann (ALD, Überströmöffnungen und Abluftleitungen) zu keiner einfachen Aufgabe macht.

Der Einfluss des Systems auf sommerliche Überwärmung durch den Einsatz zur Nachtlüftung ist gering. Als Vergleichsbasis diente dabei für die Wohnnutzung eine morgendliche (6:00 bis 8:30 Uhr) und abendliche (21:30 bis 22:00) Fensterlüftung. Diese führt zu einer mittleren operativen Raumtemperatur von 26,6 °C und einem Maximum von 27,8 °C. Bei Nutzung der Abluftanlage wurde diese Fensterlüftung beibehalten und im Zeitraum von 22:00 bis 6:00 Uhr durch den Betrieb der mechanischen Lüftung ergänzt. Unter den angesetzten Randbedingung für die Nutzung und dem periodischen synthetischen Außenklima der ÖNORM B 8110-3 wurde für den maßgebenden Raum (ungünstigster Raum – höchste operative Raumtemperatur im Tagesverlauf) eine Verringerung des Tagesmittelwertes der operativen Raumtemperatur von 0,9 K ermittelt und eine Verringerung des Tagesmaximums um 0,8 K. Die alternative Maßnahme, Verschattung durch effektiven Sonnenschutz, wurde ebenfalls ergänzend zum beschriebenen Fensterlüftungsmuster untersucht (ohne Betrieb der Abluftanlage). Der Tagesmittelwert der Raumtemperatur verringerte sich dadurch bei Wohnnutzung um 1,8 K, das Tagesmaximum sogar um 2,4 K. Die Spitzentemperatur, welche bei den anderen Varianten vor allem durch den solaren Wärmeeintrag verursacht wurde, konnte durch den Sonnenschutz effektiv gesenkt werden. Bei der Nutzung als Bürogebäude wurden ähnliche Maßnahmen angewendet. Die Zeitfenster unterscheiden sich allerdings. Als Basis für den Vergleich dient eine morgendliche (6:00 bis 10:00 Uhr) und eine abendliche (18:30 bis 19:00) Fensterlüftung. Mit dieser wird eine mittlere operative Raumtemperatur von 25,4 °C und ein Maximum von 27,4 °C erreicht. Der Einsatz der Abluftanlage ergänzt diese Fensterlüftung. Die mittlere Raumtemperatur und das Maximum verringern sich dadurch um rund 0,4 K. Wird anstelle der Abluftanlage ein Sonnenschutz eingesetzt, sinkt die mittlere Raumtemperatur um rund 1 K und das Maximum um 1,5 K.

Die Untersuchungen der Auswirkungen auf den Energiebedarf wurden ebenfalls wieder für Büro- und Wohnnutzung getrennt betrachtet. Das Modell des Wohngebäudes liefert für den Heizenergiebedarf rund 140000 kWh/a, wovon etwa 17 % auf die Warmwasserbereitung und der Rest auf die Raumheizung entfallen. Im Bestand wird der gesamte Bedarf durch Fernwärme gedeckt.

Beim Modell mit Abluftanlage und Wärmepumpe liegen die Werte für den Bedarf ähnlich hoch und auch die Anteile von Raumheizung und Warmwasserwärmebedarf ähneln sich. Je nach Dimensionierung der Wärmepumpe (hier 2 bis 6 kW Nennleistung bei Prüfbedingungen) können rund 20 % bis 40 % des Heizenergiebedarfs durch die Wärmepumpe gedeckt werden und dementsprechend den Fernwärmebedarf reduzieren. Bei höheren Wärmepumpen-Leistungen verringert sich die Effizienz, beurteilt anhand der Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie liegt für die bei 3,74 (bei 2 kW Nennleistung) bzw. 3,17 (bei 6 kW Nennleistung). Einige Eingangsparameter wurden variiert, um deren Einfluss auf die Ergebnisse beurteilen zu können. Die Wärmepumpengröße, die Betriebsstrategie der Lüftung, die Höhe des Luftvolumenstroms der Abluftanlage und der Warmwasserbedarf haben dabei einen relevanten Einfluss. Nur gering beeinflusst werden die Ergebnisse für den Energiebedarf bei Variation der Luftdichtheit der Gebäudehülle.

Mit dem Modell des Bürogebäudes wurde ein Heizenergiebedarf ohne Warmwasserwärmebedarf von rund 108000 kWh/a ermittelt. Die eingesetzte Abluftwärmepumpe mit 10 kW Nennleistung bei Prüfbedingungen kann rund 23 % des Energiebedarfs decken und erreicht dabei eine JAZ von 3,09. Relevanten Einfluss auf die Ergebnisse haben wiederum die Wärmepumpengröße, die Betriebsstrategie und die Höhe des Luftvolumenstroms.

Der Warmwasserbedarf wird in diesem Fall durch Elektrokleinspeicher gedeckt und hat deshalb keinen Einfluss auf das untersuchte Abluftsystem.

Auf Basis der Energie-Simulationen wurde eine statische Amortisationsrechnung für Wohn- und Bürogebäude-Anlage durchgeführt. Die Investitionskosten der Anlage bei Wohnnutzung belaufen sich auf rund 54000 €. Mit einer jährlichen Einsparung bei den Energiekosten von 3460 € beträgt die statische Amortisationszeit rund 15,6 Jahre für die Wärmepumpe mit 2 kW Nennleistung. Bei größeren Wärmepumpen verkürzt sich diese, z. B. auf rund 9 Jahre bei 6 kW Nennleistung. Erwartungsgemäß erhöht sich die Amortisationszeit mit steigenden Anlagenkosten und Strompreisen und sie sinkt bei höheren Fernwärmepreisen. Auch der Warmwasserwärmebedarf hat Einfluss auf die Amortisation. Steigt dieser, sinkt die Amortisationszeit.

Bei Bürogebäuden liegen die geschätzten Investitionskosten bei rund 57000 €. Bei Einsparungen von 2200 €/a beträgt die statische Amortisationszeit rund 24 bis 31 Jahren (bei Wärmepumpen-Nennleistungen von 12 bzw. 8 kW). Die Zusammenhänge bezüglich Wärmepumpengröße, Investitionskosten und Energiepreisen sind ähnlich wie bei der Wohnungsanlage.

## **7.2 Schlussfolgerungen und Fazit**

### **Forschungsfrage 1: Randbedingungen**

Die Randbedingungen aus Nutzung, Klima und Gebäude wurden im Kapitel 2 behandelt. Das reale Nutzerverhalten kann allerdings davon abweichen, was ein Grund für Unsicherheiten und Unterschiede zwischen Modell und Realität sein kann.

### **Forschungsfrage 2: Entwurf der Anlage**

Der Anlagenentwurf wird in Kapitel 5 behandelt. Das System einer reinen Abluftanlage mit Mehrfachnutzung der Luft wirft einige Herausforderungen bei der Luftführung in den Räumen auf. Das beginnt bei den Außenluftdurchlässen, an die vielseitige Anforderungen aus Denkmalschutz, Behaglichkeit, Schallschutz, Bauphysik und Strömungsverhalten gestellt werden. Die Belüftung eines Bürogebäudes bei hoher Belegung stößt dabei an die Grenzen des Abluftsystems. Es würden einige ALD pro Raum benötigt, um den erforderlichen Luftvolumenstrom zu erreichen. Ob unter diesen Umständen die lokale thermische Behaglichkeit durch kalte Zugluft beeinträchtigt wird oder nicht ist fragwürdig, kann allerdings mit den durchgeführten Untersuchungsmethoden nicht beantwortet werden. Weiters kann die Luftführung innerhalb einer Nutzungseinheit Probleme bereiten. Selbst wenn die Strömungswiderstände von Außenluft- und Überströmdurchlässen gut aufeinander abgestimmt wurden, ändern sich die Strömungsverhältnisse sobald Nutzer Fenster und Türen bedienen. Zusätzlich bleibt die Luftdichtheit der Gebäudehülle als Unbekannte, die, auch wenn ihre Auswirkung auf den Heizenergiebedarf bei Einsatz einer Abluftanlage gering ist, deutlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Lüftungsanlage hat. Um eine Abluftanlage auf ein konkretes Gebäude abstimmen zu können bzw. um zu beurteilen, ob die Luftdichtheit ausreicht oder zusätzliche Maßnahmen begleitend zur Installation einer Anlage erforderlich sind, werden Messungen am jeweiligen Gebäude benötigt.



### **Forschungsfrage 3: Sommerliche Überwärmung**

Der Effekt einer Abluftanlage auf die Raumtemperaturen im Sommer ist bei Büro- und Wohnnutzung gering. Eine zeitlich geschickte Lüftung durch das Öffnen von Fenstern in Kombination mit einer wirksamen Verschattung führen zu niedrigeren Raumtemperaturen. Zusätzlich muss beachtet werden, dass nur ein besonders ungünstiger Raum detailliert betrachtet wurde. Die Temperaturen in den meisten anderen Aufenthaltsräumen, insbesondere im Erdgeschoß, sind merkbar niedriger. Eine Anlage allein zur Nachtkühlung zu installieren, wäre ein unverhältnismäßiger Aufwand. Betrachtet man nur die sommerliche Überwärmung als Kriterium, ist eine effektive Verschattung die bessere Wahl. Sollte eine Abluftanlage (auch) aus anderen Gründen (z. B. Energieeinsparung) installiert werden, kann sie jedoch einen kleinen, positiven Beitrag zur Vermeidung von Überwärmung leisten.

### **Forschungsfrage 4: Energie, Verluste und Rückgewinnung**

Der Einsatz der Abluftwärmepumpe zur Rückgewinnung von Wärme kann durchaus einen beträchtlichen Teil der Heizenergiebedarfs decken. In einem Wohnungsgebäude mit zentraler Warmwasserbereitung kann das System auch im Sommer helfen, Wärme aus anderen Energiequellen zu ersetzen. Die Möglichkeit, ganzjährig eine Verwendung für die Wärme zu haben ist für ein derartiges System förderlich. Bei Einsatz in Bürogebäuden, wo dieser Verwendungszweck in den Sommermonaten wegen dem geringen Heizenergiebedarf nicht gegeben ist, verringert sich der Nutzen der Abluftwärmepumpe. Verschiedene Lüftungsstrategien haben einen signifikanten Einfluss auf den Energiebedarf der Anlage und des Gebäudes. Eine bedarfsgerechte oder abgestufte Regelung ist einem einstufigen, konstanten Betrieb vorzuziehen.

### **Forschungsfrage 5: Wirtschaftlichkeit**

Mit den geschätzten Anlagenkosten und angenommenen Energiepreisen ist eine Amortisation der Wohngebäude-Lüftungsanlage in einem Bereich von rund 9 bis 16 Jahren möglich. Aus der wirtschaftlichen Betrachtungsweise sind (in der untersuchten Bandbreite) größere Wärmepumpen geeigneter. Sie verursachen stets rund ein Drittel der Investitionskosten, während sich die Einsparung mit zunehmender Größe erhöht, auch wenn sich die Effizienz (Jahresarbeitszahl) verschlechtert. Bei Strompreisen, die rund das 1,5-fache des Fernwärmepreises betragen und einer JAZ von 3, kann man zu den gleichen Kosten entweder eine Kilowattstunde Fernwärme beziehen oder zwei Kilowattstunden über die Wärmepumpe erhalten. In einem Bürogebäude schneidet das System mit einer ermittelten Amortisationszeit von 24 bis 31 Jahren deutlich ungünstiger ab. Setzt man als Lebensdauer einer Anlage rund 20 Jahre an, amortisiert sich die Anlage in einem Wohngebäude innerhalb dieser Zeitspanne, die Bürogebäude-Lüftungsanlage hingegen nicht.

Die Preise für Strom und Fernwärme stellen entscheidende Einflussfaktoren bei der wirtschaftlichen Betrachtung dar und bei den Schwankungen, denen Energiepreise unterliegen, auch eine Quelle für Unsicherheit. Die entworfene Anlage amortisiert sich früher, wenn Strompreise niedrig und Fernwärmepreise höher sind. Sollten sich die beiden Preise in die genannten Richtungen entwickeln, würde dass die Amortisationszeit deutlich verkürzen, bei gegenteiliger Entwicklung allerdings deutlich verlängern. Zusätzliche nötige Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtheit können die Wirtschaftlichkeit der Anlage verschlechtern. Ohne konkrete Messungen an einem Objekt sind die nötigen Maßnahmen und die damit verbunden Kosten kaum einschätzbar.



## 7.3 Ausblick

Verbesserungen bei der Anlage durch Optimierung der Wärmepumpe auf den Einsatzbereich und eine verbesserte Regelung, könnten relevante Effizienzsteigerungen bewirken. Es muss beachtet werden, dass bei diesem System stets ein Zusammenspiel mehrerer Komponenten für Raumheizung, Warmwasserbereitung und Lüftung herrscht. Gemeinsam mit Speichern und den Wärmeerzeugern Abluftwärmepumpe und Fernwärme (im allgemeinen Fall können auch andere Wärmequellen vorhanden sein) stellt dies ein komplexes System dar, was eine globale Optimierung und Abstimmung aller Bestandteile aufeinander und auf die Randbedingungen zu einem anspruchsvollen Problem macht. Zusätzlich gibt es neben der entworfenen und simulierten Anlage eine Vielzahl weiterer Varianten. Es kann durchaus sein, dass sich alternative Ansätze für eine Abluftanlage wie beispielsweise Kleinanlagen pro Nutzungseinheit als bessere Lösung erweisen. Da diese Arbeit nur die natürliche Fensterlüftung mit einer Abluftanlage inklusive Abluftwärmepumpe vergleicht, kann keine Aussage über gänzlich andere Lüftungssysteme gemacht werden. Wie groß die Unterschiede bei Installation und Betrieb von beispielsweise einer Zu- und Abluftanlage mit Wärmetauscher sind und wie groß der Nutzen dieser Anlage zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung ist, kann mit den gemachten Untersuchungen nicht beurteilt werden.

Eine ökologische Bewertung der Anlage könnte den Nutzen aus Sicht der Nachhaltigkeit bewerten.

Ebenso sind Verbesserungen im Simulationsmodell möglich. Besonders das Wärmepumpenmodell und die zugehörige Regelung sind hier entscheidend. Als schwer in einem Modell abzubildende Unsicherheit bleibt vor allem das Nutzerverhalten. Im Fall von Lüftungssystem und offenbaren Fenstern bezieht sich das ganz besonders auf die Bedienung von Fenstern. Die Erstellung eines Modells zu Beschreibung von realitätsnahem Nutzerverhalten, das auch im speziellen Fall einer Abluftanlage gültig ist, und gleichzeitig in Simulationsmodellen implementiert werden kann, ist ein bedeutender Aufwand. Der in dieser Arbeit angewendete Ansatz macht den Simulations- und Rechenaufwand beherrschbarer, muss dabei allerdings auf vereinfachte Modellierung des Lüftungsverhaltens von Personen zurückgreifen. Das führt zu der Einschränkung, dass abweichendes Nutzerverhalten zu zusätzlichen Lüftungswärmeverlusten führen kann und das Gebäude mit Abluftanlage dadurch insgesamt weniger energieeffizient wird. Diese Unsicherheit besteht generell bei der Modellierung von natürlicher wie auch mechanischer Lüftung und ist kein alleiniges Problem von Abluftanlagen.

Verfeinerte Auslegungsmethoden könnten dabei helfen, bessere Übereinstimmung zwischen der geplanten und tatsächlichen Durchlüftung zu erreichen. Eine experimentelle Umsetzung samt detailliertem Monitoring könnte dazu und zum tatsächlichen Nutzerverhalten und dem daraus folgenden Einfluss auf die Lüftungseffektivität sowie auf den Energiebedarf neue Erkenntnisse liefern.

Abschließend kann aufgrund der Erkenntnisse der Arbeit festgehalten werden, dass die Nachrüstung einer Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung mittels Wärmepumpe in Gründerzeitgebäuden einen Ansatz darstellt, der energetische Verbesserungen im Vergleich zur natürlichen Fensterlüftung erbringt. Eine weitergehende Verfolgung dieser technischen Lösung mit Fokus auf ungeklärte Detailfragen und Unsicherheiten, Validierungen in Praxisuntersuchungen sowie eine Optimierung von Komponenten und Auslegung erscheint gerechtfertigt.

## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Literaturverzeichnis

- [1] „Modulare Lösungen zur Integration von Kühlung in Gebäude der Gründerzeit (COOL-KIT),“ [Online]. Abrufbar: <https://greenenergylab.at/projects/cool-kit>. [Zugriff am 31 05 2024].
- [2] J. Rammerstorfer, W. Hüttler, M. Kreml, M. Havel, F. Oettl, K. Sammer, H. Schöberl und P. Wegerer, „Gründerzeit mit Zukunft Dokumentation und Monitoring von vier Demonstrationsgebäuden,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2018.
- [3] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2. erweiterte Auflage Hrsg., Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2015.
- [4] Magistrat Graz - Stadtvermessung, „Schutzzonen Graz,“ [Online]. Abrufbar: <https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?project=schutzzonen&client=core>. [Zugriff am 10 11 2023].
- [5] *Grazer Altstadterhaltungsgesetz*, 2008.
- [6] Austrian Standards International, *ÖNORM EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden Lüftung von Gebäuden Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, Wien, 2019.
- [7] Austrian Standards International, *ÖNORM H 6010: Pläne der Gebäudetechnik - Pläne und deren Inhalte in den einzelnen Projektphasen der Gewerke Heizungs-, Kälte-, Lüftungs-, Sanitär-, Mess-, Steuer- und Regeltechnik*, Wien, 2015.
- [8] A. Pech und K. Jens, *Baukonstruktionen Band 16: Lüftung und Sanitär*, Wien: Springer, 2006.
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 1946-6 Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*, 2019.
- [10] Austrian Standards International, *ÖNORM H 6038: Lüftungstechnische Anlagen - Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Wohnungen mit Wärmerückgewinnung*, Wien, 2020.

- [11] D. Bohne, Technischer Ausbau von Gebäuden, 11. Auflage Hrsg., Weisbaden: Springer Vieweg Wiesbaden, 2018.
- [12] T. Sefker, „Dezentrale RLT-Anlagen,“ in *Raumklimatechnik - Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik*, 16. Auflage Hrsg., Bd. 2, Berlin, Springer, 2008.
- [13] Austrian Standards International, *ÖNORM H 6036: Lüftungstechnische Anlagen — Bedarfsabhängige Lüftung von Wohnungen oder einzelner Wohnbereiche*, Wien, 2020.
- [14] V. Crastan und M. Höckel, „Die Wärmepumpe,“ in *Elektrische Energieversorgung 2*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2022.
- [15] N. Glaesmann, Wärmepumpenheizungen: Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023.
- [16] Viessmann Deutschland GmbH, *Planungshandbuch Wärmepumpen*, Allendorf (Eder): Viessmann Werke, Allendorf (Eder), 2011.
- [17] EnergieAgentur.NRW, „Wärmepumpen-Marktplatz NRW - Plaunungsleitfaden Wärmepumpen,“ EnergieAgentur.NRW, Düsseldorf, 2012.
- [18] NIBE Energy Systems, „Installateurhandbuch Abluftwärmepumpe NIBE F750 Emaille,“ Markaryd, 2019.
- [19] Maico Elektroapparate-Fabrik GmbH, „Raumluft-System aeronom AWP 200,“ [Online]. Abrufbar: <https://www.maico-ventilatoren.com/produkte/p/abluf-warmepumpen-awp-g5836/awp-200-p6705>. [Zugriff am 17 04 2024].
- [20] LIMODOR Lüftungstechnik AG, „Wärmepumpe Installations- und Bedienungsanleitung,“ Appenzell, 2023.
- [21] IV Produkt Ltd, „EcoHeater - A range of highly-efficient extract air handling units with integrated heat pumps for use in apartment buildings,“ Växjö, 2023.
- [22] Aereco GmbH, „AWN-Lüftungssysteme - Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung aus bedarfsgeführten Abluftsystemen,“ Hofheim-Wallau, 2024.
- [23] Austrian Standards International, *ÖNORM B 8110-5: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile*, Wien, 2019.
- [24] Austrian Standards International, *ÖNORM B 8110-6-1: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6-1: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf*, Wien, 2019.

- [25] Austrian Standards International, *ÖNORM B 8110-3: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Ermittlung der operativen Temperatur im Sommerfall (Parameter zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung)*, Wien, 2020.
- [26] Österreichisches Institut für Bautechnik, *OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz*, Wien, 2023.
- [27] Austrian Standards International, *ÖNORM EN 16798-3: Energetische Bewertung von Gebäuden — Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden — Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4)*, Wien, 2017.
- [28] *Arbeitsstättenverordnung*, 2017.
- [29] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, *SIA 2024: Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*, Zürich, 2021.
- [30] Austrian Standards International, *ÖNORM EN 12831-3: Energetische Bewertung von Gebäuden — Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 3: Dimensionierung von Trinkwassererwärmungsanlagen und Bedarfsbestimmung, Modul M8-2, M8-3*, Wien, 2018.
- [31] J. Masuch, „Berechnungen,“ in *Raumklimatechnik - Band 4: Physik des Gebäudes*, Berlin, Springer Vieweg, 2013.
- [32] Österreichisches Institut für Bautechnik, „EXCEL-Tool zur Berechnung der Normaußentemperatur,“ 09 2008. [Online]. Abrufbar: <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien/richtlinien/2023/oib-richtlinie-6-nat-excel>. [Zugriff am 30 11 2023].
- [33] Österreichisches Institut für Bautechnik, „EXCEL-Tool zur Berechnung der Außentemperatur mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen,“ 10 2009. [Online]. Abrufbar: <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien/richtlinien/2023/oib-richtlinie-6-nat-t13-excel>. [Zugriff am 30 11 2023].
- [34] Austrian Standards International, *ÖNORM EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, Wien, 2006.
- [35] A. Pech und C. Pöhn, *Baukonstruktionen Band 1: Bauphysik*, 2. Auflage Hrsg., Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2018.
- [36] Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft - Sektion Arbeitsrecht und Zentral-Arbeitsinspektorat, „Raumklima und Lüftung in Arbeitsräumen,“ [Online]. Abrufbar: [https://www.arbeitsinspektion.gv.at/Arbeitsstaetten-\\_Arbeitsplaetze/Arbeitsraeume/Raumklima\\_in\\_Arbeitsraeumen.html](https://www.arbeitsinspektion.gv.at/Arbeitsstaetten-_Arbeitsplaetze/Arbeitsraeume/Raumklima_in_Arbeitsraeumen.html). [Zugriff am 30 01 2024].

- [37] Austrian Standards Institute, *ÖNORM B 8110-3:2012 - Wärmeschutz im Hochbau - Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung*, Wien: Austrian Standards Institute, 2012.
- [38] Austrian Standards International, *ÖNORM H 12381-1: Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*, Wien, 2018.
- [39] Austrian Standards International, *ÖNORM H 5057-1: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Teil 1: Raumluftheizenergiebedarf für Wohn- und Nichtwohngebäude*, Wien, 2019.
- [40] Austrian Standards Institute, *ÖNORM H 7500-1: Heizungssysteme in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast für Gebäude mit einem mittleren U-Wert  $\geq 0,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$* , Wien, 2015.
- [41] H. Schöberl, J. Schleger und A. Kronberger, „Sanierung Gründerzeitgebäude Eberlgasse auf Passivhausstandard,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2014.
- [42] S. Schmoliner, „Luftdichtes Sanieren am Stand der Technik, im Wiener Gründerzeithausbestand,“ Wien, 2023.
- [43] U. Jordan und K. Vajen, *Handbuch DHWcalc*, Version 2.02b Hrsg., Kassel: Universität Kassel - Institut für Thermische Energietechnik, 2017.
- [44] A. Dentel und U. Dietrich, „Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden,“ [Online]. Abrufbar: [https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation\\_Thermische\\_Behaglichkeit.pdf](https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf). [Zugriff am 10 01 2024].
- [45] Grazer Energieagentur, *Energieausweis Lesingstraße 27*, Graz, 2020.
- [46] Bundesdenkmalamt, „Denkmalliste gemäß § 3 DMSG,“ 05 06 2023. [Online]. Abrufbar: [https://www.bda.gv.at/dam/jcr:0ab1dc9a-a59e-454c-a397-2c68b91ceeb5/\\_Steiermark\\_DML\\_2023.pdf](https://www.bda.gv.at/dam/jcr:0ab1dc9a-a59e-454c-a397-2c68b91ceeb5/_Steiermark_DML_2023.pdf). [Zugriff am 20 01 2024].
- [47] „GIS Steiermark,“ [Online]. Abrufbar: <http://www.gis.steiermark.at/>. [Zugriff am 07 02 2024].
- [48] Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, „Masea geprüfte Datenbank,“ [Online]. Abrufbar: [https://www.masea-ensan.com/?utm\\_source=baulinks&utm\\_campaign=baulinks](https://www.masea-ensan.com/?utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks). [Zugriff am 15 10 2023].
- [49] H. Hafellner, *Instationäres, hygrothermisches Verhalten von erdnahen Bauteilanschlüssen insbesondere mit Innendämmung*, Graz, 2021.

- [50] Austrian Standards Institute, *ÖNORM B 8110-7 - Wärmeschutz im Hochbau — Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte*, Wien, 2013.
- [51] K. Frey und J. Haas, *Handbuch für Energieberater*, Graz: Forschungsgesellschaft Joanneum, 1989.
- [52] Aereco GmbH, „FEUCHTEGEFÜHRTE AUSSENBAUTEIL-LUFTDURCHLÄSSE,“ 2023. [Online]. Abrufbar: [https://www.aereco.de/wp-content/uploads/2019/10/CAT700GM\\_ALD\\_2024\\_20240202.pdf](https://www.aereco.de/wp-content/uploads/2019/10/CAT700GM_ALD_2024_20240202.pdf). [Zugriff am 02 02 2024].
- [53] inVENTer GmbH, „Außenluftdurchlass statt Lüftung mit Wärmerückgewinnung?,“ [Online]. Abrufbar: <https://www.inventer.de/wissen/dezentrale-wohnraumluftung/aussenluftdurchlass-statt-lueftung-mit-warmerueckgewinnung/>. [Zugriff am 27 05 2024].
- [54] „Passive Aussenwanluftdurchlässe & Zwischenwandlüfter,“ Ventomaxx, [Online]. Abrufbar: <https://www.ventomaxx.de/dezentrale-lueftung-produktuebersicht/passive-schalldaemmluefter-aussenluftdurchlaesse/>. [Zugriff am 02 02 2024].
- [55] G. Lauckner und J. Krimmling, *Raum- und Gebäudeautomation für Architekten und Ingenieure*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- [56] H. Huber, *Wohnungslüftung - Planung, Ausführung, Betrieb*, Zürich: Faktor Verlag, 2021.
- [57] Ventomaxx GmbH, „SDL 125-2SD LAW | Z108,“ [Online]. Abrufbar: [https://www.ventomaxx.de/wp-content/uploads/2021/05/DB\\_AC-SMART-Baureihe\\_V21.03.pdf](https://www.ventomaxx.de/wp-content/uploads/2021/05/DB_AC-SMART-Baureihe_V21.03.pdf). [Zugriff am 14 03 2024].
- [58] Ventomaxx GmbH, „BONIFATIUS am Nockherberg | Ventomaxx,“ [Online]. Abrufbar: <https://www.ventomaxx.de/referenzen/bonifatius-am-nockherberg/>. [Zugriff am 20 05 2024].
- [59] komfortlüftung.at, „komfortlüftung.at,“ 15 2 2014. [Online]. Abrufbar: <https://www.komfortlüftung.at/fileadmin//userdaten/dokumente/komfortlueftung-at-info-nr-18-luftdurchlaesse-v-2-0.pdf>. [Zugriff am 13 02 2024].
- [60] F. Klaus, „Bauelemente raumlufttechnischer Anlagen,“ in *Raumklimatechnik - Band 2: Raumluf- und Raumkühltechnik*, Berlin, 2008.
- [61] T. Rákóczy und K. Fitzner, „Bauelemente raumlufttechnischer Anlagen,“ in *Raumklimatechnik - Band 2: Raumluf- und Raumkühltechnik*, Berlin, Springer, 2008.

- [62] IV Produkt Ltd, „EcoHeater Home Concept, brochure,“ [Online]. Abrufbar: [https://ivprodukt.docfactory.com/#!/doc/topic:EcoHeater\\_Home\\_Concept\\_broschyr](https://ivprodukt.docfactory.com/#!/doc/topic:EcoHeater_Home_Concept_broschyr). [Zugriff am 30 03 2024].
- [63] Gebr. Tuxhorn GmbH & Co. KG, „Auswahlhilfe einer Frischwasserstation,“ [Online]. Abrufbar: <https://www.tuxhorn.de/wp-content/uploads/2022/05/Auswahl-Frischwasserstationen.pdf>. [Zugriff am 29 03 2024].
- [64] EQUA Solutions AG, „IDA ICE - Simulation Software | EQUA,“ [Online]. Abrufbar: <https://www.equa.se/de/ida-ice>. [Zugriff am 13 05 2024].
- [65] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, „ANHANG A 2: WÄRMEBRÜCKENKATALOG - ARBEITSPAKET 5: INNENDÄMMSYSTEME,“ Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2013.
- [66] C. Zürchner und T. Frank, „Luftströmungen durch Fugen und Öffnungen in der Bauphysik,“ vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2021. [Online]. Abrufbar: <https://enbau-online.ch/bauphysik/4-2-luftstroemungen-durch-fugen-und-oeffnungen/>. [Zugriff am 03 05 2024].
- [67] V. Dorer, A. Pfeiffer, P. Hartmann, A. Schatz, J. Wydler, P. Gröbly und U. Fischer, „Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL),“ Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2002.
- [68] B. Wehle, C. Geyer und A. M. Hernandez, „Schall- und Luftdichtheit von Fenstern in der Renovation,“ 10. HolzBauSpezial Bauphysik & Gebäudetechnik 2019, 2019.
- [69] H. Huber, C. Stünzi, C. Sibold und D.-S. Kunz, „ABLEG - Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung,“ Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [70] BKI GmbH Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, *BKI Kostenplaner 2024*, Stuttgart, 2023.
- [71] Energie Graz GmbH & Co KG, „Downloads Fernwärme,“ 1 10 2023. [Online]. Abrufbar: [https://www.energie-graz.at/media/wysiwyg/Fernwaerme/downloads/Fernwaerme\\_preisblatt.pdf](https://www.energie-graz.at/media/wysiwyg/Fernwaerme/downloads/Fernwaerme_preisblatt.pdf). [Zugriff am 20 04 2024].
- [72] Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft, „Tarifkalkulator - Tarifrechner - E-Control,“ [Online]. Abrufbar: [https://www.e-control.at/tarifkalkulator#](https://www.e-control.at/tarifkalkulator#/)/. [Zugriff am 15 05 2024].
- [73] CREDIT SUISSE (Schweiz) AG, „Die durchschnittliche Lebensdauer von Bauteilen,“ Zürich, 2017.



## 8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele für den optischen Einfluss von Geräten auf das Erscheinungsbild .....	1
Abbildung 2: Grazer Altstadtsschutzzonen und Lage des untersuchten Gebäudes in der Lessingstraße 27 (roter Marker) [4].....	4
Abbildung 3: Einteilung der Lüftungsanlagen in natürliche, mechanische und kombinierte Systeme .....	7
Abbildung 4: Beispiel für Mehrfachnutzung der Luft [10] .....	8
Abbildung 5: Varianten von Abluftsystemen mit dezentralen Einzelventilatoren (a) und Zentralventilatoren (b) [13, S. 8, 10].....	9
Abbildung 6: Prinzipschaltbild einer Kompressionswärmepumpe [14, S. 411].....	10
Abbildung 7: Log-p-h-Diagramm des idealisierten (ABCD) und realen (AB*C*D*) Kreisprozessen [14, S. 412].....	11
Abbildung 8: Vereinfachtes Energieflussdiagramm Wärmepumpe .....	12
Abbildung 9: Zusammenhang der Leistungszahl und der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer- und Kondensatorseite einer konkreten Wärmepumpe [16, S. 20]..	13
Abbildung 10: Arbeitsprinzip einer Fixed-Speed-Wärmepumpe und einer leistungsgeregelten Wärmepumpe [15, S. 106].....	15
Abbildung 11: Außentemperatur Flughafen Graz IWE2 (2021) von AHRAE .....	20
Abbildung 12: Außentemperaturverlauf für den normgerechten Nachweis der sommerlichen Überwärmung.....	21
Abbildung 13: Zusammenhang PMV und PPD [35, S. 6] .....	23
Abbildung 14: Innentemperaturgrenzen für nicht maschinell gekühlte Räume gemäß ÖNORM EN 16798-1 Anhang B [6].....	26
Abbildung 15: Luftvolumenstrom für Wohngebäude im Tagesverlauf gemäß ÖNORM B 8110-3 [25] .....	31
Abbildung 16: Luftvolumenstrom für Bürogebäude im Tagesverlauf gemäß ÖNORM B 8110-3 [25] .....	32
Abbildung 17: Tagesverlauf Warmwasserbedarf aus Anhang B ÖNORM EN 12831-3 [30] .	36
Abbildung 18: Zapfdiagramm eines MFH für zwei Tage .....	36
Abbildung 19: Tagesverlauf Belegung Personen für Büro- und Wohnnutzung gemäß SIA 2024 [29] .....	38
Abbildung 20: Personenwärme im Tagesverlauf gemäß ÖNORM B 8110-3 [25] .....	39
Abbildung 21: Belegungsprofil gemäß ÖNORM EN 16798-1 Anhang C [6].....	40
Abbildung 22: Lastprofil Geräte gemäß SIA 2024 [29] .....	41
Abbildung 23: Tagesverlauf Gerätewärme gemäß ÖNORM B 8110-3 [25] .....	42
Abbildung 24: Tagesverlauf Gerätewärme gemäß ÖNORM EN 16798-1 Anhang C [6] .....	42
Abbildung 25: Das Gebäude Lessingstraße 27 links farblich (orange) markiert und rechts als Orthofoto [47].....	43
Abbildung 26: Einteilung und Bezeichnung der Nutzungseinheiten .....	44
Abbildung 27: Anlagenschema .....	52
Abbildung 28: Zonierung Wohnnutzung 1. Obergeschoß .....	54
Abbildung 29: Lüftungszonen Büronutzung im 1. Obergeschoß.....	55
Abbildung 30: Kastenfenster im Erdgeschoß der Lessingstraße 27 .....	58
Abbildung 31: Verschiedene Einbauformen von ALD des Herstellers Ventomaxx [54].....	59
Abbildung 32: Empfehlungen zur Positionierung von Außenluftdurchlässen aus Sicht der Behaglichkeit [56, S. 89] .....	60
Abbildung 33: Verlauf der Abluft- und Fortluftkanäle .....	63
Abbildung 34: Lüftungsstrategien Wohnnutzung .....	68
Abbildung 35: Lüftungsstrategien Büronutzung.....	68
Abbildung 36: Vergleich der Wärmeverluste aus dem Energieausweis mit zwei verschiedenen Simulationsergebnissen für das IDA ICE Modell .....	74
Abbildung 37: Monatsmitteltemperaturen für die drei verschiedenen Wetterdatensätze.....	75



Abbildung 38: Vergleich der Ergebnisse für den Heizenergiebedarf mit dem umgelegten, gemessenen Verbrauchswert .....	76
Abbildung 39: CO <sub>2</sub> -Konzentration in NE3 für die zwei simulierten Szenarien .....	78
Abbildung 40: Einfluss der Luftdichtheit der Gebäudehülle auf die Durchlüftung der Räume .....	79
Abbildung 41: Operative Raumtemperatur für Raum 2OG 904; der Raum ist im Grundriss farblich markiert .....	82
Abbildung 42: Ergebnisse für die operative Raumtemperatur für Raum OG2 904 bei Büronutzung .....	84
Abbildung 43: Gegenüberstellung von Quellen und Verwendung der benötigten Energiemengen pro Jahr .....	85
Abbildung 44: Variation ausgewählter Ergebnisse bei Änderung des Luftwechsels .....	86
Abbildung 45: Variation ausgewählter Ergebnisse bei Änderung des Warmwasserbedarfs .....	86
Abbildung 46: Gegenüberstellung von Quellen und Verwendung der Energie beim Wohngebäude mit Abluftanlage .....	87
Abbildung 47: Änderung ausgewählter Ergebnisse bei Variation der Wärmepumpenleistung .....	88
Abbildung 48: Änderung ausgewählter Ergebnisse bei Variation der Luftwechselzahl (bzw. des Abluftvolumenstroms) .....	89
Abbildung 49: Auswirkungen der verschiedenen Lüftungsstrategien auf ausgewählte Ergebnisse .....	90
Abbildung 50: Änderung ausgewählter Ergebnisse bei Variation des Warmwasserbedarfs .....	91
Abbildung 51: Gegenüberstellung der Energiemengen für Bestand und Abluftanlage .....	92
Abbildung 52: Auswirkung der Variation des Luftwechsels auf den Wärmebedarf .....	93
Abbildung 53: Übersicht Energiemengen für das Bürogebäude mit Abluftanlage .....	93
Abbildung 54: Auswirkung der Variation der Wärmepumpen-Nennleistung .....	94
Abbildung 55: Auswirkung der Variation des Abluftvolumenstroms .....	94
Abbildung 56: Auswirkungen der verschiedenen Lüftungsstrategien .....	95
Abbildung 57: Auswirkung der Variation der Wärmepumpenleistung auf die Amortisationszeit .....	99
Abbildung 58: Auswirkung der Variation des Warmwasserbedarfs auf die Amortisationszeit .....	100
Abbildung 59: Ergebnisse bei Variation der Kosten und der Wärmepumpenleistung für das Bürogebäude .....	101

### 8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definitionen der wichtigsten Luftarten in der Gebäudetechnik .....	6
Tabelle 2: Typische Werte für JAZ von verschiedenen Wärmepumpen [11, S. 251] .....	13
Tabelle 3: Vergleich einiger Abluftwärmepumpen .....	16
Tabelle 4: Soll-Temperaturen im Innenbereich .....	24
Tabelle 5: Grenzwerte für CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in Innenräumen .....	27
Tabelle 6: Aktivitätsgrad und CO <sub>2</sub> -Ausstoß von Personen [10] .....	29
Tabelle 7: Luftwechselzahlen für Wohn- und Bürogebäude gemäß ÖNORM B 8110-5 [23] .....	30
Tabelle 8: Luftwechsel gemäß SIA 2024 [29] .....	31
Tabelle 9: Abluftvolumenströme gemäß ÖNORM H 6036 [13] .....	33
Tabelle 10: Infiltrations-Luftwechsel in Abhängigkeit des Blower-Door-Test-Ergebnisses gemäß ÖNORM B 8110-6-1 [24] .....	34
Tabelle 11: Werte für den Warmwasserbedarf aus verschiedenen Quellen .....	35
Tabelle 12: Energieumsatz und Wärmeleistung durch Personen bei verschiedenen Tätigkeiten [34] .....	37
Tabelle 13: Wärmeeintrag durch Personen gemäß SIA 2024 [29] .....	38
Tabelle 14: Personenwärme gemäß ÖNORM B 8110-5 [23] .....	39
Tabelle 15: Gerätewärme gemäß ÖNORM B 8110-5 [23] .....	40

Tabelle 16: Gerätewärme gemäß SIA 2024 [29] .....	41
Tabelle 17: Nutzflächen pro Nutzungseinheit und Geschoß.....	45
Tabelle 18: Nutzung der einzelnen NE.....	45
Tabelle 19: Materialdaten Mauerwerk .....	47
Tabelle 20: Materialdaten verwendeter Baustoffe .....	48
Tabelle 21: Wärmetechnische Kennwerte Fenster [51].....	49
Tabelle 22: Zuordnung der Nutzung zur jeweiligen Lüftungszone [10] .....	53
Tabelle 23: Belegung und Luftvolumenströme pro Nutzungseinheit bei Büronutzung .....	56
Tabelle 24: Luftvolumenströme Wohnnutzung .....	57
Tabelle 25: Verschiedene Angaben zur Luftgeschwindigkeit in Kanälen .....	63
Tabelle 26: Zusammengefasste Durchverluste für beide Systeme .....	64
Tabelle 27: Ermittlung der Ventilator-Antriebsleistungen .....	66
Tabelle 28: Abschätzung Heizleistung Wärmepumpe .....	69
Tabelle 29: Stufen der Variation der Wärmepumpen-Leistung .....	88
Tabelle 30: Kostenschätzung für die Abluftanlage .....	96
Tabelle 31: Statische Amortisationsrechnung für das Wohngebäude.....	98
Tabelle 32: Statische Amortisationsrechnung für die Basismodelle Bürogebäude .....	101

