

**Dimensionierung und Bewertung der Wärmepumpe am Beispiel  
eines Einfamilienhauses  
unter Berücksichtigung unterschiedlicher energetischer  
Sanierungskonzepte**

Bachelorarbeit

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Life Sciences

Studiengang Umwelttechnik

Erstellt von Karolina Brack



Hamburg, den 27.06.2023

1. Gutachter: Prof. Dr. Timon Kampschulte (HAW Hamburg)
2. Gutachter: Tim Weiershäuser (DGNA)

Diese Bachelorarbeit wurde erstellt und betreut in der Firma DGNA- Deutsche Gesellschaft für nachhaltige Anlagentechnik mbH.

## **Vorwort**

In dieser Bachelorarbeit wird das Thema „Dimensionierung und Bewertung der Wärmepumpe am Beispiel eines Einfamilienhauses unter Berücksichtigung unterschiedlicher energetischer Sanierungskonzepte“ behandelt. Dazu wurden an einem Einfamilienhaus Variantenvergleiche mithilfe von Simulationssoftware durchgeführt, die das Gebäude energetisch bewerten. Diese Bachelorarbeit verfasste ich als Abschlussarbeit meines Studiums in Umwelttechnik von April 2023 bis Juni 2023 an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg im Rahmen meiner Werkstudententätigkeit im Unternehmen „DGNA-Deutsche Gesellschaft für nachhaltige Anlagentechnik“. Ziel dieser Arbeit war, durch Simulationen zu prüfen, in welchem Gebäudezustand sich die Wärmepumpe als Wärmeerzeuger lohnt. Zudem sollte gezeigt werden, mit welchen Berechnungsverfahren die energetische Bewertung von Gebäuden durchgeführt wird. Mithilfe meines Betreuers aus der Firma Tim Weiershäuser wurde das Thema dieser Arbeit entwickelt. Durch sein Fachwissen im Bereich der Gebäudetechnik unterstützte er mich mit vielen interessanten Einblicken in das Thema. Während der Arbeit kam es zu einigen Schwierigkeiten, die Variante 2 mit PVT-Anlagen zu simulieren, da das Firmenprogramm die neuere Technologie nicht simulieren konnte. Mein Betreuer Timon Kampschulte empfiehlt mir die Variante, mit der Simulationsprogramm Polysun von der Hochschule durchzuführen. Zudem leitet er mich an Herrn Professor Dildey weiter, der Fachkenntnisse über das Thema PVT-Systeme hat.

Professor Kampschulte, Professor Dildey und Tim Weiershäuser unterstützten mich stets und gaben mir wertvollen Input und beantworteten meine Fragen, sodass ich meinen Variantenvergleich am Einfamilienhaus erfolgreich durchführen konnte. Ich möchte mich für die Unterstützung und die Anleitung herzlich bedanken.

Ich wünsche viel Freude beim Lesen dieser Bachelorarbeit.

## **Preface**

This bachelor thesis deals with the topic "Dimensioning and evaluation of heat pumps using the example of a single-family house, taking into account different energy-related renovation concepts". For this purpose, comparisons of variants were carried out on a single-family house with the aid of simulation software that evaluates the building in terms of energy. I wrote this bachelor thesis as a final paper for my degree in environmental engineering from April 2023 to June 2023 at the University of Applied Sciences Hamburg as part of my work-study activity at the company "DGNA-Deutsche Gesellschaft für nachhaltige Anlagentechnik". The aim of this work was to check by simulations in which building condition the heat pump is worthwhile as a heat generator. In addition, it was to be shown with which calculation methods the energetic evaluation of buildings is carried out. With the help of my supervisor from the company Tim Weiershäuser the topic of this work was developed. By his specialized knowledge in the area of the building services engineering he supported me with many interesting insights into the topic. During the work there were some difficulties to simulate the variant 2 with PVT systems, because the company program could not simulate the newer technology. My supervisor Timon Kampschulte recommends me to do the variant with the simulation program Polysun from the university. He also refers me to Professor Dildey who has expertise in PVT systems.

Professor Kampschulte, Professor Dildey and Tim Weiershäuser always supported me and gave me valuable input and answered my questions, so that I could successfully perform my variant comparison on the single-family house. I would like to express my sincere gratitude for their support and guidance.

I hope you enjoy reading this bachelor thesis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Elektronischer Anhang</b> .....	IV
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	V
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	VI
<b>Anhang Abbildungsverzeichnis</b> .....	VI
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	VIII
<b>Anhang Tabellenverzeichnis</b> .....	VIII
<b>1 Einleitung</b> .....	1
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	2
2.1 Wärmepumpen .....	2
2.1.1 Luft-Wasser-Wärmepumpen .....	4
2.1.2 Sole/Wasserwärmepumpe mit Erdkollektoren .....	5
2.2 PVT-Kollektoren .....	6
2.3 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 .....	7
2.3.1 Die Norm-Außentemperatur .....	8
2.3.2 Die Norm-Innentemperatur .....	8
2.3.3 Norm-Transmissionswärmeverluste .....	8
2.3.4 Norm-Lüftungswärmeverluste .....	11
2.3.5 Zusätzliche Aufheizleistung .....	12
2.3.6 Norm-Heizlast .....	13
2.4 Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B .....	13
2.4.1 Wärmeleistung .....	14
2.4.2 Durchfluss und Druckabfälle .....	15
2.4.3 Auslegung der Pumpe .....	17
2.5 Jahresarbeitszahl .....	17
2.6 Energetische Bewertung eines Gebäudes .....	20
<b>3 Simulation am Beispielgebäude in 63674 Altenstadt</b> .....	23
3.1 Ist-Zustand des Gebäudes .....	24
3.1.1 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 .....	25
3.1.2 Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B .....	29
3.1.4 Energetische Bewertung .....	35
3.2 Variante 1 .....	36

3.2.1	Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 .....	37
3.2.2	Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B .....	38
3.2.3	Jahresarbeitszahl.....	39
3.2.4	Energetische Bewertung.....	41
3.3	Variante 2 .....	42
3.3.1	Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 .....	42
3.3.2	Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B .....	44
3.3.3	Auslegung der PVT-Kollektoren mit SWP .....	45
3.3.4	Energetische Bewertung.....	46
<b>4</b>	<b>Auswertung der Ergebnisse.....</b>	<b>48</b>
4.1	Energetische Auswertung.....	48
4.2	Ökonomische Bewertung .....	50
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
	<b>Eidstaatliche Erklärung.....</b>	<b>XIII</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Norm-Innentemperatur .....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Wasserdichte.....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Primärenergiefaktor <i>fp</i>.....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Unterlagen zum Gebäude .....</b>	<b>XV</b>
	<b>Berechnungen der Normheizlast der anderen beheizten Räume des Gebäudes .....</b>	<b>XIX</b>
	<b>Diagramme für die Berechnung der Erdreich-Transmissionswärmeverluste.....</b>	<b>XXXII</b>
	<b>Wärmedurchlasswiderstand der Bodenbeläge.....</b>	<b>XXXIV</b>
	<b>Unterlagen zum Hydraulischen Abgleich nach Verfahren B- Ist-Zustand.....</b>	<b>XXXV</b>
	<b>Deckungsanteil.....</b>	<b>XXXVI</b>
	<b>Jahresarbeitszahl Ist-Zustand.....</b>	<b>XXXVII</b>
	<b>Bewertung des Gebäudes Ist-Zustand .....</b>	<b>XXXIX</b>
	<b>Variante 1.....</b>	<b>XXXIX</b>
	<b>U-Wert Berechnungen .....</b>	<b>XXXIX</b>
	<b>Auslegung SWP .....</b>	<b>XLII</b>
	<b>Jahresarbeitszahl.....</b>	<b>XLIII</b>
	<b>Energetische Bewertung .....</b>	<b>XLV</b>



<b>Variante 2</b> .....	XLV
<b>U-Werte der sanierten Bauteile</b> .....	XLV
<b>Wichtige Kenndaten zur Simulation aus Polysun</b> .....	XLVI
<b>Ergebnisse der Simulation der Variante 2_ohne Batteriespeicher</b> .....	L
<b>Ergebnisse der Simulation der Variante 2_mit Batteriespeicher</b> .....	LII
<b>Mail von Polysun</b> .....	LIII
<b>Energetische Bewertung</b> .....	LIV
<b>Auswertung</b> .....	LIV

## **Elektronischer Anhang**

Der elektronische Anhang wird auf einem Datenträger der Bachelorarbeit beigelegt. Die vorhandenen Dateien werden hier aufgelistet.

- 1) *Heizlastberechnung\_Ist-Zustand (PDF-Datei)*
- 2) *FBH\_Ist-Zustand (Excel-Datei)*
- 3) *JAZ\_Berechnung (Excel-Datei)*
- 4) *Ist-Zustand\_Energieberater (PDF-Datei)*
- 5) *Ist-Zustand mit neuem HK\_Energieberater (PDF-Datei)*
- 6) *Ist-Zustand mit LWP\_Energieberater (PDF-Datei)*
- 7) *Variante 1\_Energieberater (PDF-Datei)*
- 8) *Polysun\_Variante 2\_Bericht (PDF-Datei)*
- 9) *Polysun\_Variante 2\_Bericht\_mit Batterie (PDF-Datei)*
- 10) *Auswertung (Excel-Datei)*

## **Abkürzungsverzeichnis**

ALD – Außenluftdurchlässe

bwp - Bundesverband Wärmepumpe e.V.

COP – coefficient of performance

EnEV – Energieeinsparverordnung

FBH – Fußbodenheizung

GEG – Gebäudeenergiegesetz

HK – Heizkessel

JAZ – Jahresarbeitszahl

LWP – Luft-Wasser-Wärmepumpen

PVT – Photovoltaik-Thermie

SCOP – Seasonal coefficient of performance

SWP – Sole/Wasser Wärmepumpen

VA – Verlegerabstand

VK - Vorkette

WNA – Wärmenutzanlage

WP – Wärmepumpe

WQA – Wärmequellenanlage

WWP- Wasser-Wasser-Wärmepumpe

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Hauptkomponenten einer Wärmepumpenheizung.....	2
Abbildung 2: Idealisierter Kreisprozess einer Wärmepumpe.....	3
Abbildung 3:a)Aufbau eines PVT-Kollektors von vorne, b von hinten .....	6
Abbildung 4:Beispiel für eine Be- und Entladung a) der Batterie b) des Wärmespeichers .....	7
Abbildung 5:Schwebekörper-Durchflussmesser .....	15
Abbildung 6: Energiefluss von der Primärenergie zu dem Nutzenergiebedarf des Gebäudes .....	20
Abbildung 7: Prinzip der Ermittlung des Heizwärme- und Kühlbedarfs einer Gebäudezone.....	21
Abbildung 8: Grundrisse der Geschosse .....	23
Abbildung 9: Transmissionswärmeverluste der Bauteile im IST-Zustand .....	28
Abbildung 10: Arbeitsbereich einer Pumpe .....	31
Abbildung 11: grafische Auslegung der LWP Logatherm WLW196i-14 IR.....	33
Abbildung 12: schematische Darstellung der Anlagentechnik in Variante 2.....	46
Abbildung 13: Ergebnisse der Energiebilanz der unterschiedlichen Varianten.....	49
Abbildung 14: Ergebnisse der CO <sub>2</sub> -Äquivalente der unterschiedlichen Varianten.....	50
Abbildung 15: Gesamtannuitätenkosten der unterschiedlichen Varianten .....	52

## Anhang Abbildungsverzeichnis

Anhang Abbildung 1: Wasserdichte abhängig von der Temperatur .....	XIV
Anhang Abbildung 2: Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599-1 .....	XIV
Anhang Abbildung 3: Ansichten des Gebäudes .....	XV
Anhang Abbildung 4: Schnitt des Einfamilienhauses .....	XV
Anhang Abbildung 5: Typschild Heizkessel .....	XVI
Anhang Abbildung 6: Datenblatt für die Fußbodenheizung des Gebäudes.....	XVI
Anhang Abbildung 7:Heizkreisverteiler der Fußbodenheizung für EG und Keller .....	XVII
Anhang Abbildung 8: Angaben zur FBH im DG .....	XVII
Anhang Abbildung 9: Angaben zur FBH im EG.....	XVIII
Anhang Abbildung 10: Angaben zur FBH im Keller .....	XVIII
Anhang Abbildung 11: Äquivalenter U-Wert, erdreichberührten Wände als Funktion des U-Wertes der Wand und der Tiefe z unter Erdbodenniveau .....	XXXII

Anhang Abbildung 12: Äquivalenter U-Wert, des Fußbodens als Funktion des Geometrieparameters $B'$ des U-Wertes des Fußbodens und der Tiefe $z$ der Bodenplatte unter Erdbodenniveau .....	XXXIII
Anhang Abbildung 13: Wärmedurchlasswiderstände der Bodenbeläge im Programm Optimus 3D plus .....	XXXIV
Anhang Abbildung 14: Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B- Ist-Zustand .....	XXXVI
Anhang Abbildung 15: Deckungsanteil der Wärmepumpe .....	XXXVI
Anhang Abbildung 16: Datenblatt der Buderus Logatherm WLW196i-6-14 IR.....	XXXVII
Anhang Abbildung 17: Ergebnis der Jahresarbeitszahl- Ist-Zustand .....	XXXVIII
Anhang Abbildung 18: Transmissionswärmebedarf des Ist-Zustands .....	XXXIX
Anhang Abbildung 19: Dach- Ist-Zustand .....	XXXIX
Anhang Abbildung 20: Dach saniert .....	XL
Anhang Abbildung 21: Innenwand gegen unbeheizt saniert .....	XL
Anhang Abbildung 22: Kellerdecke gegen unbeheizt Ist-Zustand.....	XL
Anhang Abbildung 23: Kellerdecke gegen unbeheizt saniert .....	XLI
Anhang Abbildung 24: Transmissionswärmeverluste der Bauteile Variante 1 .....	XLI
Anhang Abbildung 25: Bestimmung der Entzugsleistung .....	XLII
Anhang Abbildung 26: Bodentyp des Standortes Altenstadt in Hessen.....	XLII
Anhang Abbildung 27: wichtige Kenndaten der SWP Buderus WSW196i.2-16 TP50 .....	XLIII
Anhang Abbildung 28: Ergebnis der Jahresarbeitszahlberechnung-Variante 1.....	XLIV
Anhang Abbildung 29: Berechnung des Transmissionswärmebedarfs für Variante 1.....	XLV
Anhang Abbildung 30: Außenwand Ist-Zustand .....	XLV
Anhang Abbildung 31: Außenwand saniert .....	XLVI
Anhang Abbildung 32: Wichtige Kenndaten der EcoTouch 5014.5 Ai.....	XLVI
Anhang Abbildung 33: Wichtige Einstellungen der PVT-Kollektoren .....	XLVII
Anhang Abbildung 34: Wichtige Einstelldaten des Gebäudes .....	XLVII
Anhang Abbildung 35: Wichtige Einstellwerte der FBH .....	XLVIII
Anhang Abbildung 36: Wichtige Kenndaten des Kombispeichers Solus II 1050 L.....	XLVIII
Anhang Abbildung 37: Wichtige Einstellwerte des Verbraucherprofiles .....	XLIX
Anhang Abbildung 38: Wichtige Kenndaten des Stromnetzes.....	XLIX
Anhang Abbildung 39: wichtige Kenndaten des Batteriespeichers.....	L
Anhang Abbildung 40: komprimierte Ergebnisdarstellung der Variante 2.....	LI
Anhang Abbildung 41: komprimierte Ergebnisdarstellung der Variante 2_ mit Batteriespeicher .....	LIII
Anhang Abbildung 42: Mail von Andreas Wolf.....	LIII

Anhang Abbildung 43: Berechnung des Transmissionswärmebedarf-Variante 2 .....	LIV
---	-----

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Gebäudedaten des Einfamilienhauses.....	24
Tabelle 2: die beheizte Räume des Beispielgebäudes und die wichtigsten Daten zur Berechnung der Raum-Heizlast.....	24
Tabelle 3: U-Werte der Bauteile- IST-Zustand.....	25
Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnungen der beheizten Räume des Beispielgebäudes.....	28
Tabelle 5: Berechnungsergebnisse des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B -IST-Zustand .....	30
Tabelle 6: Ergebnisse der Energiebilanz des Ist-Zustand mit dem alten HK .....	36
Tabelle 7: Ergebnisse der Energiebilanz des Ist-Zustand mit dem neuen HK.....	36
Tabelle 8: Ergebnisse der Energiebilanz des Ist-Zustand mit der LWP.....	36
Tabelle 9: Bewertung des Gebäudes entsprechend der GEG-Anforderung .....	36
Tabelle 10: Veränderte U-Werte der sanierten Bauteile.....	37
Tabelle 11: Ergebnisse der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831-Variante 1.....	38
Tabelle 12: Berechnungsergebnisse für den hydraulischen Abgleich-Variante 1 .....	38
Tabelle 13: Ergebnisse der Energiebilanz der Variante 1 .....	42
Tabelle 14: Bewertung des Gebäudes entsprechend der GEG-Anforderung- Variante 1 .....	42
Tabelle 15: U-Werte der Variante 2 .....	43
Tabelle 16: Ergebnisse der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831-Variante 2 .....	43
Tabelle 17: Berechnungsergebnisse des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B- Variante 2.....	44
Tabelle 18: Werte für die Auslegung der Kollektorfläche .....	45
Tabelle 19: Ergebnisse der Variante 2_ ohne und mit Batterie.....	47
Tabelle 20: Bewertung des Gebäudes entsprechend der GEG-Anforderung-Variante 2.....	47

## **Anhang Tabellenverzeichnis**

Anhang Tabelle 1: Norm-Innentemperaturen nach DIN EN 12831, Beiblatt 1 .....	XIV
Anhang Tabelle 2: CO2-Emissionsfaktoren für die Auswertung der Varianten.....	LIV
Anhang Tabelle 3: Ergebnisse der kapitalgebundenen Kosten der unterschiedlichen Varianten .....	LIV
Anhang Tabelle 4: Ergebnis der betriebsgebundenen Kosten der Varianten.....	LIV
Anhang Tabelle 5: Ergebnis der verbrauchsgebundenen Kosten der Varianten .....	LV

# 1 Einleitung

In der heutigen Zeit ist das Thema Energiesparen von großer Wichtigkeit, denn der Klimawandel schreitet immer weiter voran. Einer der größten Emittenten ist der Gebäudesektor. Unter den Sektor fallen „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ und die „Privaten Haushalte“ (Umwelt Bundesamt 2022). Durch diese entstehen in Deutschland rund 30 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das sind 35 Prozent des Endenergieverbrauches. Die Wohngebäude, die vor 1977 (erste Wärmeschutzverordnung) erbaut worden sind, emittieren 80 Prozent dieses CO<sub>2</sub> (Beucker o.J.). Um Energie in Bestandsgebäuden einzusparen, müssen diese energetisch saniert werden. Dazu zählt die Sanierung der Gebäudehülle und/oder der Austausch der bestehenden Heizungsanlage, da diese im Gebäude am meisten Energie verbrauchen und somit die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen (Umwelt Bundesamt 2022).

Rund 21 Prozent aller Heizungen in Deutschland sind auf dem neusten Stand der Technik und Nutzen für die Raumheizung und den Warmwasserbedarf erneuerbare Energien. Heizungsanlagen, die mit Öl und Gas betrieben werden, liegen in Deutschland bei über 80 Prozent (bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V. o.J.). Dies soll sich mit dem neuen Gebäudeenergiegesetz, welches zu Beginn 2024 beschlossen wird, ändern. Das Gesetz wird unter anderem vorschreiben, dass beim Austausch von Heizungsanlagen, diese mit mindestens 65 % erneuerbaren Energien betrieben werden (Die Bundesregierung 2023). Eine Möglichkeit, um diese Förderung erreichen zu können, wäre der Einbau einer Wärmepumpenanlage. Zum Heizen beziehen Wärmepumpen dreiviertel ihrer Energie aus der Umwelt, damit wird das Klima geschont und CO<sub>2</sub> eingespart (bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V. o.J.). Die Effizienz der Wärmepumpe im Bestandsgebäude hängt von der Qualität der Gebäudehülle, dem Standort und den installierten Wärmeübergabesystemen ab, dies stellte die Studie „WPsmart im Bestandsgebäude“ des Fraunhofer-Instituts fest. Die Studie befasst sich dabei mit 56 Wärmepumpen in Bestandsgebäuden, die einen unterschiedlich sanierten Gebäudezustand und Baujahr aufweisen. Ziel der Studie war es zu zeigen, dass Wärmepumpen auch in Bestandsgebäuden funktionieren, auch wenn diese von den verschiedenen Voraussetzungen des Gebäudes abhängen (Günther et al. 2020).

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird an einem Bestandsgebäude die Wärmepumpe unter unterschiedlichen Sanierungskonzepten betrachtet. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die die Basis für die Berechnungen und für die unterschiedlichen Anlagensysteme der Varianten sind. Anhand der theoretischen Grundlagen wird an dem Beispielbestandsgebäude eine Simulation durchgeführt. Zuerst wird der IST-Zustand des Gebäudes, unsaniert und mit einem bestehenden Öl-Kessel dargestellt. Anschließend wird der unsanierte IST-Zustand mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ausgestattet. In Variante 1 wird ein Teil der Gebäudehülle saniert, als Wärmeerzeuger wird eine Sole-Wasser-Wärmepumpe eingebaut. In Variante 2 wird das Gebäude fast vollständig energetisch saniert, zudem wird eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaisch-thermischen- Kollektoren (PVT) gekoppelt.

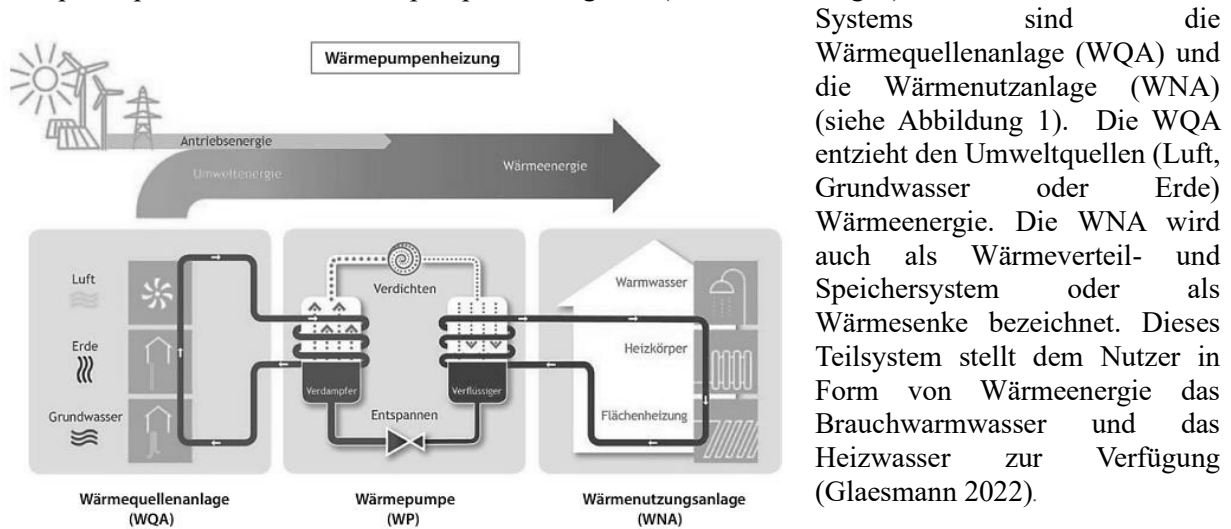
Die Simulationen am Beispielgebäude werden mit den Programmen der Firma Hottgenroth und Polysun durchgeführt. Für jede Variante wird eine Heizlastberechnung nach DIN 12831, ein hydraulischer Abgleich nach Verfahren B und eine Jahreswärmebedarfsberechnung nach DIN 18599 durchgeführt. Zudem werden am IST-Zustand die Berechnungen beispielhaft schrittweise erläutert. Die Ergebnisse der Simulation der unterschiedlichen Varianten werden miteinander verglichen. Zum Schluss wird die Ausarbeitung zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben.

## 2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Anlagentechniken und die Berechnungsverfahren, die in den unterschiedlichen Varianten am Beispielgebäude verwendet werden, beschrieben.

### 2.1 Wärmepumpen

Wärmepumpen (WP) können Gebäude heizen und kühlen. Beim Heizen werden die tiefen Temperaturen aus der Umweltwärme auf eine höhere Temperatur gebracht. Die WP stellt eine der drei Hauptkomponenten einer Wärmepumpenheizung dar (siehe Abbildung 1). Weitere Bestandteile des Systems sind die



Systems sind die Wärmequellenanlage (WQA) und die Wärmenutzungsanlage (WNA) (siehe Abbildung 1). Die WQA entzieht den Umweltquellen (Luft, Grundwasser oder Erde) Wärmeenergie. Die WNA wird auch als Wärmeverteilsystem oder als Wärmesenke bezeichnet. Dieses Teilsystem stellt dem Nutzer in Form von Wärmeenergie das Brauchwarmwasser und das Heizwasser zur Verfügung (Glaesmann 2022).

Abbildung 1: Darstellung der Hauptkomponenten einer Wärmepumpenheizung (Glaesmann 2022)

Diese Arbeit betrachtet nur den Vorgang des Heizens eines Gebäudes und die Erwärmung des Warmwassers mit einer Wärmepumpe. Die Wärmepumpe gliedert sich in vier Bestandteile, den Verdichter (auch Kompressor genannt), den Verdampfer, den Verflüssiger (auch Kondensator genannt) und dem Expansionsventil (auch Drossel bezeichnet), (Glaesmann 2022).

In der WP wird ein Gas verwendet, welches im Kreis der Reihe nach die vier Hauptkomponenten durchläuft. Das verwendete Gas in der Wärmepumpe wird als Kältemittel bezeichnet (Glaesmann 2022). Das Funktionsprinzip der WP basiert auf einem linksdrehenden Kreisprozess, dem Kraftwärmeprozess, in dem mechanische Arbeit investiert werden muss, um thermische Energie bereitstellen zu können (Beckmann 2020).

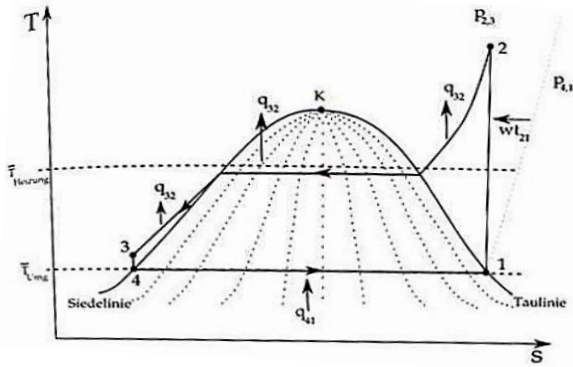


Abbildung 2: Idealisierter Kreisprozess einer Wärmepumpe (Beckmann 2020)

In Abbildung 2 wird der idealisierte Kreisprozess einer WP dargestellt. Zuerst wird im Prozessschritt 1 zu 2 der Druck im Verdichter mithilfe einer Pumpe, die durch elektrische Energie angetrieben wird, erhöht. Das Kältemittel wird somit mechanisch verdichtet, wodurch Wasserdampf entsteht. Der Druck und die Temperatur steigen, die Entropie bleibt dabei konstant. Dieser Prozessschritt wird in der Thermodynamik als isentrope Verdichtung bezeichnet (Beckmann 2020), (Glaesmann 2022). Im Prozessschritt 2 zu 3 wird die Wärmeenergie, die im Prozessschritt 1 zu 2 entstanden ist, mithilfe eines Wärmetauschers isobar an ein Heizmedium z.B. Wasser übergeben. Die Abgabe der Wärme an das WNA stellt den Hochdruckbereich dar, hier ist eine hohe Temperatur und ein hoher Druck charakteristisch.

Während des Prozesses der Wärmeabgabe sinkt die Temperatur bis zur Taulinie. Ab diesem Punkt verflüssigt sich das Kältemittel. Die Aggregatzustandsänderung des Kältemittels von gasförmig zu flüssig beschreibt die vollständige Kondensation. Wird der Punkt an der Siedelinie erreicht, erfolgt eine latente Wärmeabgabe. Die Wärmeabgabe erfolgt bis zum Punkt 3 der Abbildung 2 (Beckmann 2020), (Glaesmann 2022). Im letzten Prozessschritt von 3 zu 4 entspannt sich das Kältemittel mithilfe des Expansionsventils, welches den Druck absenkt. Das Expansionsventil und der Verdichter bilden im Kreislauf einen Übergang, an dem sich der Druck ändert. Im Prozessschritt 4 zu 1 wird die Umweltwärme von einem Wärmetauscher an den Verdampfer übergeben. Dort verdampft das Kältemittel. Dieser Prozessbereich wird auch als Niederdruckbereich definiert, weil hierbei die Wärmeenergie mit niedrigem Druck und konstanter Temperaturen aufgenommen wird. Nachdem das Kältemittel sich vollständig ausgedehnt und verflüssigt hat, beginnt der Kreislauf von vorne (Glaesmann 2022), (Beckmann 2020).

Die Wärmepumpenanlage kann in unterschiedlichen Weisen betrieben werden, diese ist von dem Wärmeversorgungs-konzept abhängig. Eine der Betriebsweisen ist der monovalente Betrieb. Hier übernimmt ausschließlich die Wärmepumpe die gesamte Wärmeversorgung. Sie wird so ausgelegt, dass sie den maximalen Heizwärmebedarf und den Trinkwarmwasserbedarf über das gesamte Jahr decken kann. Zusätzlich wird bei dem monovalenten Betrieb ein Pufferspeicher für die Heizung und das Warmwasser dimensioniert, dabei muss berücksichtigt werden, dass es für die Wärmepumpen in der Regel vom Energieversorger Sperrzeiten gibt. Wodurch der Pufferspeicher größer dimensioniert werden sollte. Das hat den Vorteil, dass der Verdichter weniger takten muss, dadurch kann sich die Laufzeit der WP und die Lebensdauer des Verdichters erhöhen. Der monovalente Betrieb hat den Nachteil, dass bei einem Ausfall der Wärmepumpenanlage keine alternative Wärmeversorgung zur Verfügung steht (Bollin 2016).



Eine weitere Betriebsweise der Wärmepumpenanlage ist der bivalente Betrieb. Hier deckt die Wärmepumpe nur einen Teil des Wärmebedarfs, der weitere Teil wird durch einen anderen Energieträger (z.B. Öl) gedeckt. Die Kombination zwischen der Wärmepumpe und dem anderen Energieträger kann in folgenden Betriebsweisen unterschieden werden: bivalent-parallel oder bivalent-alternativ. Die Wärmepumpe liefert bis zu einer bestimmten unteren Außentemperatur den gesamten Wärmebedarf. Wird diese Außentemperatur unterschritten, kann eine Zusatzheizung zugeschaltet (Parallelbetrieb) werden oder die Zusatzheizung übernimmt eigenständig den kompletten Betrieb (alternativer Betrieb). Diese Betriebsweise hat den Vorteil, dass die Zusatzheizung die Wärmeversorgung aufrechterhalten kann, wenn die Wärmepumpe ausfällt (Bollin 2016).

Die letzte Betriebsweise ist der monoenergetische Betrieb. Hier wird zur Wärmepumpe eine elektrische Zusatzheizung (z.B. Elektroheizstab) eingeschaltet, dieser deckt die Spitzenlasten bei sehr tiefen Temperaturen ab. Die elektrische Zusatzheizung wird zugeschaltet, wenn der Bivalenzpunkt erreicht ist (Bollin 2016). Der Bivalenzpunkt ist der Schalterpunkt, an dem die festgelegte Außentemperatur (z.B. 5°C) erreicht wird. Hier schaltet die Wärmepumpe ab und die Zusatzheizung, ob elektrisch oder andere Energieträger, springt an (Burkhardt et al. 2011).

### 2.1.1 Luft-Wasser-Wärmepumpen

Die Wärmequelle einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWP) ist die Außenluft, diese hat im Gegenteil zu den Wärmequellen Sole und Wasser einige Nachteile. Die Außenluft hat eine niedrigere Wärmekapazität als Wasser oder das Erdreich, wodurch die Wärmetauscherübertragungsflächen im Verdampfer, die Lüftungskanäle und der Ventilator größer dimensioniert werden müssen. Dadurch kann die entsprechende Wärmemenge zum Heizen erreicht werden. Zudem unterliegt die Außenluft, über das Jahr gesehen, Temperaturschwankungen. Das heißt, bei niedrigeren Temperaturen sinkt die Leistung der Wärmepumpe, bei höheren Temperaturen steigt die Leistung. Dies kann zur Folge haben, dass die Leistung der LWP während der kältesten Tage im Jahr nicht ausreicht. Meistens wird dann ein monoenergetisches oder ein bivalentes System eingesetzt (siehe Abschnitt 2.1). Einen Vorteil der Wärmequelle Luft zu den Wärmequellen Sole und Wasser ist, dass sie nicht erst mit großem technischen Aufwand erschlossen werden muss (Glaesmann 2022).

Die LWP kann außerhalb oder innerhalb des Gebäudes aufgestellt werden. Bei der Außenaufstellung wird die erwärmte Luft durch im Boden verlegte gedämmte Röhre in das Gebäudeinnere geführt. Wird die LWP innen aufgestellt, werden die Kanäle, die die Außenluft zur Wärmepumpe befördern, gedämmt (Wietschel et al. 2015). Bei der LWP wird die Außenluft durch Ventilatoren angesaugt und die vorhandene Wärme wird an das Kältemittel im Verdampfer übergeben. Im Verdichter wird es, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, mithilfe von Druck verdichtet. Der Kreislauf wird, wie in Abschnitt 2.1 erläutert, durchlaufen. Der Luftdurchsatz und die Drehzahl des Ventilators bestimmen die Entzugsleistung des Verdampfers. Zudem entsteht durch die Abkühlung der Luft im Verdampfer Kondensatwasser, dieses wird durch den Kondensatablauf fachgerecht abgeführt (Glaesmann 2022).

Ein weiteres Problem ist die Vereisung des Verdampfers, dieses kann schon bei einer Außentemperatur von 7 bis 8 °C auftreten, da sich die Luft im Verdampfer meistens um ca. 8 Kelvin abkühlt. Damit liegt die Temperatur um den Gefrierpunkt. Durch die Vereisung wird die Luftgeschwindigkeit und der

Luftdurchsatz im Verdampfer beeinflusst, das mindert die Effizienz der LWP und kann zu Geräuschbildungen führen. In den heutigen Anlagen ist ein automatischer Abtauvorgang implementiert. Im Kältemittelkreislauf der LWP ist ein 4-Weg-Umschaltventil verbaut, welches ermöglicht den Kreislauf umgekehrt zu durchlaufen. Die gespeicherte Wärmeenergie in der Wärmesenke wird an den Verdampfer gegeben, wodurch dieser abtauen kann. Durch diesen Umkehrprozess wird der Verdampfer zum Verflüssiger und der Verflüssiger zum Verdampfer. Für den Abtauprozess wird eine große Heizwasserfläche (z.B. Pufferspeicher oder Flächenheizung), zusätzliche Hilfsenergie für den Verdichter und zusätzlich Energie zum Aufheizen benötigt (Glaesmann 2022).

### 2.1.2 Sole/Wasserwärmepumpe mit Erdkollektoren

In dieser Arbeit wird ausschließlich die Sole/Wasser Wärmepumpen (SWP) mit Erdkollektoren behandelt, da diese im Gegenteil zur Erdsonde, mit weniger baulichen Aufwand verbunden ist. Erdkollektoren gehören zu den Geothermieanlagen und zählen zu den geschlossenen Systemen. Geschlossene Systeme weisen ein zirkulierendes Fluid auf, welches ein Wärmeträger darstellt. In den Erdkollektoren ist dies die Sole, sie dient als Wärmeträger, die die Wärmeenergie an den Verdampfer abgibt. Die abgekühlte Sole läuft dann mithilfe der Sole-Umwälzpumpe wieder zurück durch den Erdkollektor, wo sie wieder Wärmeenergie aufnehmen kann (Glaesmann 2022).

Die SWP mit den Erdkollektoren nutzt die Oberfläche des Erdreiches als Wärmequelle. Die Wärmeenergie entsteht durch Sonneneinstrahlungen, Tauwasser oder Regen, welches in das Erdreich gelangt. Somit darf die Fläche über dem Erdkollektor nicht bebaut oder versiegelt werden. Zudem muss dafür gesorgt werden, dass sich nach der Heizperiode die abgekühlte Erdfläche wieder regenerieren kann. Die PE-Rohre des Erdkollektors werden frostfrei, waagrecht, in bestimmten Abständen schlangen- oder schneckenförmig verlegt. Je länger die Rohre des Erdkollektors sind, desto mehr Wärme kann die Sole aufnehmen. Die Rohre liegen dabei in einer Tiefe von ca. 1,2 bis 1,5 Metern unter der Erde. Der Verlegerabstand zwischen zwei Rohren muss bei 0,3 bis 0,8 Meter liegen. Zu anderen Versorgungsleitungen sollte ein Abstand von 0,7 Metern gewählt werden und zum Nachbargrundstück muss ein Abstand von 1,0 Metern bestehen. In dieser Tiefe tauchen Temperaturschwankungen von circa 6 Kelvin auf. Dennoch ist die Temperatur für eine WP über das Jahr gesehen ausreichend stabil (Glaesmann 2022).

Die Größe des Erdkollektors werden von der Beschaffenheit des Bodens und der Einstrahlungsenergie bestimmt. Weist ein Boden viel Wasser und mineralische Bestandteile auf, so ist die Wärmeleitfähigkeit und die Speicherfähigkeit des Bodens umso besser. Zudem gibt die Beschaffenheit des Bodens Aufschluss darüber, was die spezifische Entzugsleistung pro Fläche ist. In den meisten Fällen liegt diese zwischen 10 und 35 W/m<sup>2</sup>. Damit die SWP mit Erdkollektoren wirtschaftlich arbeiten kann, dürfen die Rohrlänge nicht über 100 Meter lang sein. Zudem müssen alle Rohrlängen gleich groß sein, um gleiche Druckverluste und damit auch identische Durchströmungsbedingungen zu schaffen. Damit werden hohe und unverhältnismäßige Leistungen der Pumpe vermieden (Glaesmann 2022).

Eine Genehmigungspflicht für Erdkollektoren besteht nicht. Sie müssen nur bei dem zuständigen Energieversorgungsunternehmen und bei der „Unteren Wasserbehörde“ angegeben werden (Glaesmann 2022).

## 2.2 PVT-Kollektoren

Die Photovoltaik-Thermie-Kollektoren (kurz PVT-Kollektoren) erzeugen sowohl elektrische Energie als auch Wärme auf einer gemeinsamen Fläche. Beide Energiearten können im Wärmepumpensystem verarbeitet werden. Der Vorteil für die Wärmepumpe ist die erhöhte Ausbeute der Exergie. PVT-Kollektoren werden auch als Hydridkollektoren bezeichnet, den sie nutzen sowohl die Strahlung als auch die Umgebungsluft.

Auf der Vorderseite des PVT-Kollektors befindet sich der herkömmliche PV-Teil. Die Rückseite ist nicht isoliert, auf ihr befinden sich Plattenlamellen aus Aluminium, die als Luft-Wärmetauscher fungieren (Siegemund 2021). Zudem befinden sich auf der Rückseite noch ein Sammler- und ein Verteilerrohr, die durch einen Mäander miteinander verbunden sind. Diese Rohre sind aus Kupfer (siehe Abbildung 3). In das Verteilerrohr strömt die kalte Sole ein. Die Sole durchströmt dabei den Mäander, erwärmt sich mithilfe des Lamellen-Luft-Wärmetauschers und fließt dann erwärmt in das Sammlerrohr zurück (siehe Abbildung 3), (Siegemund 2021). Die Lamellen-Luft-Wärmetauscher sind senkrecht zu den Kupferrohren angeordnet, sie liegen auf dem PV-Teil auf und bilden den thermisch leitende Kontakt. Der Lamellen-Wärmetauscher hat einen bestimmten Abstand zum PV-Modul, um eine bessere Zirkulation der Umgebungsluft zu gewährleisten (Leibfried et al. 2017). Diese Konstruktion ermöglicht den höchstmöglichen elektrischen Ertrag, zudem bietet dieser Aufbau die Möglichkeit Niedertemperatur-Energie aus der Luft zu verwenden und für die Wärmepumpe als Quelle (durch die erwärmte Sole) zur Verfügung zu stellen. Tagsüber arbeiten die PVT wie herkömmliche Flachkollektoren. Bei Dunkelheit oder bei schwacher Strahlung wird mithilfe eines Ventilators Luft angesaugt und zu dem Luft-Flüssigkeits-Wärmetauscher auf der Rückseite geführt (Dildey 2022/2023).

Ein solcher PVT-Kollektor (genannt Solink) wurde mit Consolar, Triple Solar und einigen Wärmepumpenherstellern entwickelt und im April 2018 auf den Markt gebracht. Die Solink PVT-Kollektoren bieten auf einer Fläche von  $2 \text{ m}^2$  und einem auf der Unterseite vorhandenen Luft-Wärmetauscher (Oberfläche =  $20 \text{ m}^2$ ) eine hohe Leistungsaufnahme der Außenluft. Die Abwärme des darüberliegenden PV-Moduls wird zur Erwärmung der Sole verwendet (Müller et al. o.J.). Der Vorteil dieses PVT-Modells ist die vollständige Deckung des jährlichen Wärme- und Warmwasserbedarfs eines Einfamilienhauses (Dildey 2022/2023).

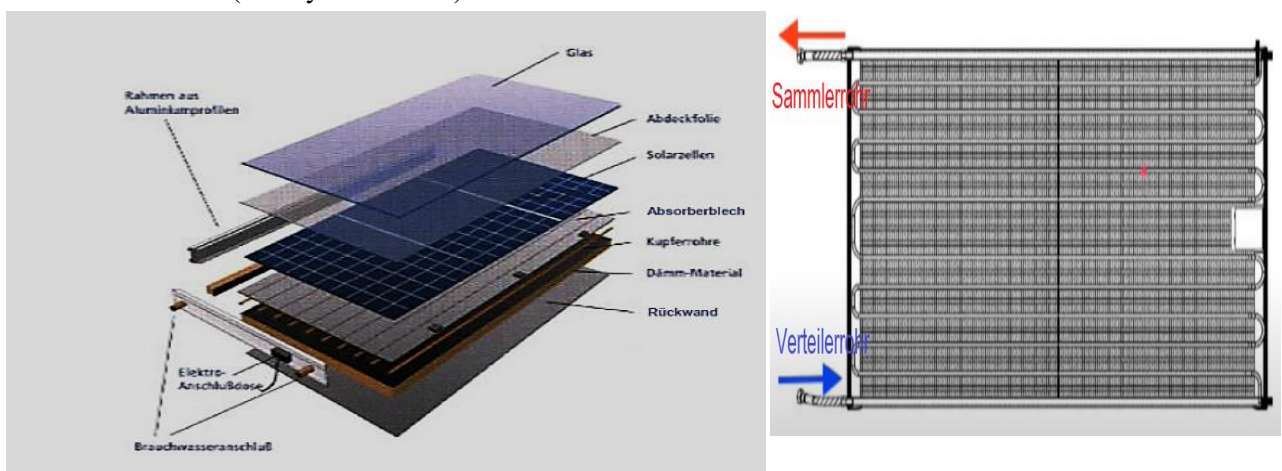


Abbildung 3: a) Aufbau eines PVT-Kollektors von vorne, b) von hinten (Consolar Solare Energiesysteme GmbH), (Kramer 2020)

## Funktionsweise

Im Folgenden wird die Funktionsweise der Solink PVT-Kollektoren für einen kalten Wintertag an einem Einfamilienhaus erläutert. Morgens an einem kalten Wintertag scheint die Sonne. Die PVT-Kollektoren erzeugen Wärme und Strom und stellen diesen der WP und dem Wechselrichter zur Verfügung. Zur Mittagszeit wird für das Gebäude keine Heizwärme benötigt. Somit kann die WP in dieser Zeit den Wärmespeicher beladen (siehe Abbildung 4b). Wenn der Wärmespeicher vollständig geladen ist, stoppt die WP. Die PVT-Kollektoren produzieren weiterhin Strom. Wird der Strom in der Zeit nicht im Haushalt verbraucht, kann er für die Beladung eines Batteriespeichers oder einer Elektro-Auto-Ladestation verwendet werden (siehe Abbildung 4a). Überschüssiger Strom aus den Kollektoren wird ins öffentliche Netz eingespeist (siehe Abbildung 4a). Am Abend wird für das Gebäude Strom und Wärme benötigt. Da zu dieser Zeit die Sonne nicht scheint, wird der Heizwärmebedarf aus dem voll beladenen Wärmespeicher und der Strombedarf durch die geladene Batterie gedeckt (siehe Abbildung 4). Ist kein Batteriespeicher vorhanden, wird der Strom aus dem öffentlichen Netz verwendet. Wenn der Wärmespeicher entladen ist, läuft die WP an. Durch den Luftwärmetauscher auf der Unterseite der PVT-Kollektoren wird der Heizwärmebedarf gedeckt. Der Strombedarf für die WP und für das Gebäude wird nach dem Entladen der Batterie durch das öffentliche Netz sichergestellt (Consolar Solare Energiesysteme GmbH 2018).

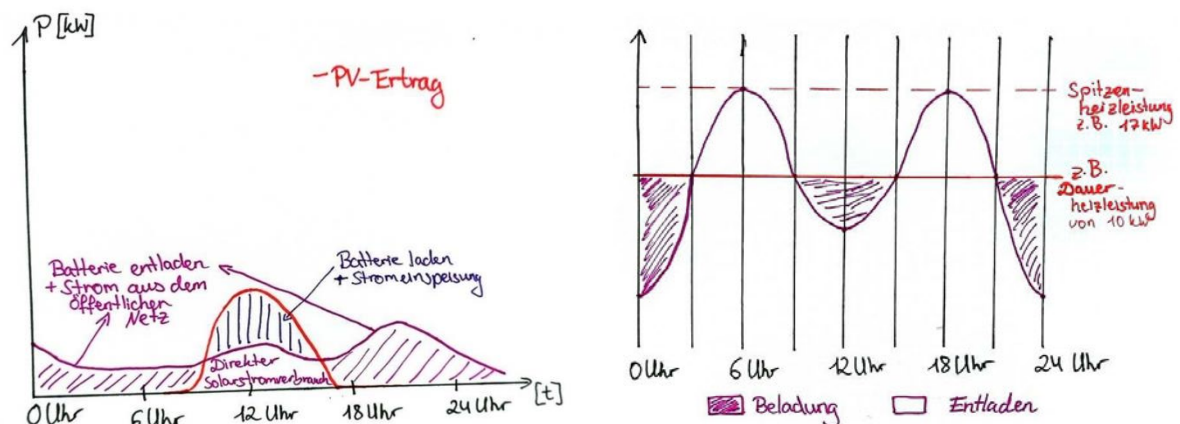


Abbildung 4: Beispiel für eine Be- und Entladung a) der Batterie b) des Wärmespeichers (eigene Darstellung)

## 2.3 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831

Im folgenden Kapitel wird die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 erläutert. Dabei werden einzelne Rechenschritte aus der Norm beschrieben.

Das Verfahren der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 ist die Grundlage zur Bestimmung der Leistung des Wärmeerzeugers und der Leistungen der Heizflächen in den beheizten Räumen. Die Normheizlast gibt Aufschluss über die Wärmeleistung, die eine Heizungsanlage unter bestimmten Norm-Außentemperaturen erreichen muss, um die Norm-Innentemperaturen in den beheizten Räumen erreichen zu können. Abhängig ist die Heizlast von dem Standort, den resultierenden Innentemperaturen der Räume, dem Wärmeschutz und der Luftdichtheit des Gebäudes. Die zugeführte Wärmeleistung des Wärmeerzeugers muss die Wärmeverluste des Gebäudes decken. Die Wärmeverluste entstehen zum

einen durch die Außenhülle des Gebäudes (= Transmissionswärmeverluste) und durch die natürliche Lüftung zur Deckung des Frischluftgehaltes in einem Gebäude (= Lüftungswärmeverluste) (Burkhardt et al. 2011).

### 2.3.1 Die Norm-Außentemperatur

Die Norm-Außentemperatur  $\theta_e$  ist standortabhängig und ist in DIN EN 12831 Beiblatt 1 festgelegt. Die Außentemperatur ist die niedrigste Temperatur einer Kälteperiode, die mindestens zehn Tage hintereinander in einem Zeitraum von zwanzig Jahren aufgetreten ist. Somit ist die Betrachtung der Heizlast eines Gebäudes ein Zeitpunkt. Mit der Norm-Außentemperatur werden die Wärmeverluste an die äußere Umgebung berechnet. Für die Berechnung der Wärmeverluste an das Erdreich wird die Norm-Außentemperatur des Jahresmittels  $\theta_{e,m}$  verwendet, diese sind in der Tabelle 1 der DIN EN 12831 aufgeführt (Europa Lehrmittel 2018). Die Normaußentemperatur wird wie folgt berechnet:

$$\theta_e = \theta'_e + \Delta\theta_e$$

Mit dem Außentemperaturkorrekturfaktor  $\Delta\theta_e$ , der von der Zeitkonstante  $\tau$  abhängig ist, kann die Außentemperatur  $\theta'_e$  um bis zu 4 K angehoben werden (Europa Lehrmittel 2018). Die Zeitkonstante  $\tau$  ist von dem Wärmeverlustkoeffizient  $H_{Abs}$  und von der wirksamen Speicherfähigkeit  $c_{wirk}$  abhängig. Es gilt, je besser die Wärmedämmung (= kleiner Wärmeverlustkoeffizient) und je höher die Wärmespeicherfähigkeit, desto größer der Außentemperaturkorrekturfaktor.

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes kann mit der DIN/TS EN 12831-1, Tabelle 9, bestimmt werden. Es wird unterschieden zwischen Gebäuden mit leichter Gebäudemasse und mit mittlerer/schwerer Gebäudemasse. Leichtbauweisen, wie Leichtbauwände, Leichtbaudächer, abgehängte Decken und/oder aufgeständerte Böden gehören zu Gebäuden mit einer leichten Gebäudemasse. Zur mittleren/schweren Gebäudemasse gehören vorwiegend Massivbauten, wie Betondecken/-dächer und Beton-/Sandstein-/Ziegelwände (DIN/TS DIN/TS 12831-1).

### 2.3.2 Die Norm-Innentemperatur

Die Norm-Innentemperaturen  $\theta_{int}$  sind abhängig von dem Verwendungszweck des Raumes und wurden in der DIN/TS EN 12831-1, Tabelle 32, festgelegt (siehe Anhang Tabelle 1). Die Innentemperatur können auch benutzerdefiniert schriftlich zwischen dem Planer und dem Bauherrn vereinbart werden, wenn z.B. niedrigere oder höhere Temperatur für die Räume gewünscht sind (Burkhardt et al. 2011).

### 2.3.3 Norm-Transmissionswärmeverluste

Die Transmissionwärmeverluste eines Raumes entstehen an den einzelnen Bauteilen der äußeren Gebäudehülle und an den einzelnen Bauteilen zwischen den unterschiedlich beheizten und unbeheizten Nebenräumen. Die Summe dieser Bauteile ergeben die Transmissionswärmeverluste eines Raumes

(Burkhardt et al. 2011), (Europa Lehrmittel 2018). Mit folgender Formel aus der DIN EN 12831 lassen sich die Norm-Transmissionswärmeverluste eines Raumes berechnen:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad [1]$$

Die Formel setzt sich aus folgenden Faktoren zusammen:

- $H_{T,ie}$ : Transmissions-Wärmeverlustkoeffizient zwischen einem beheizten Raum „i“ und der äußeren Umgebung „e“ in W/K
- $H_{T,iue}$ : Transmissions-Wärmeverlustkoeffizient eines beheizten Raumes „i“ an die äußere Umgebung „e“ durch einen unbeheizten Nachbarraum „u“ in W/K
- $H_{T,ig}$ : Transmissions-Wärmeverlustkoeffizient eines beheizten Raumes „i“ an das Erdreich „g“ in W/K
- $H_{T,ij}$ : Transmissions-Wärmeverlustkoeffizient eines beheizten Raumes „i“ an einem beheizten Nachbarraum „j“ in W/K
- $\vartheta_{int,i}$ : Die Innentemperatur des beheizten Raumes in °C
- $\vartheta_e$ : Die Norm-Außentemperatur in °C

Die Transmission-Wärmeverluste an die Umgebung werden mit folgender Formel berechnet:

$$H_{T,ie} = \sum_k (A_k \cdot (U_k + \Delta U_{WB})) \quad [2]$$

- $A_k$ : Fläche des Bauteils k in m<sup>2</sup>
- $U_k$ : Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils k in W/(m<sup>2</sup> · K)
- $\Delta U_{WB}$ : Wärmebrückenzuschlag in W/(m<sup>2</sup> · K)
- $\sum_k$ : Summe aller Bauteile k

Der Wärmebrückenzuschlag für ein Bauteil muss nach DIN EN 12831 alle geometrischen, stofflichen/materialbedingten und konstruktiven Wärmebrücken dieses Bauteils berücksichtigen (DIN/TS DIN/TS 12831-1). Dazu zählen alle Wärmebrücken innerhalb des Bauteils, durch seine Montage oder durch die Angrenzung an andere Bauteile. Die Wärmebrückenzuschläge können der DIN/TS EN 12831-1, Tabelle 2 entnommen werden.

Grenzt ein Bauteil an einem unbeheizten Nachbarraum, müssen die Transmissionswärmeverluste korrigiert werden, da die Temperaturdifferenz zu dem Nachbarraum geringer ist als zu der Außenluft (Burkhardt et al. 2011). Damit setzt sich die Gleichung folgendermaßen zusammen:

$$H_{T,iue} = \sum_k A_k \cdot (U_k + \Delta U_{WB}) \cdot b_u \quad [3]$$

$$b_u = \frac{\vartheta_{int} - \vartheta_u}{\vartheta_{int} - \vartheta_e} \quad [4]$$

- $b_u$ : Temperatur-Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung des Temperaturunterschieds zwischen dem beheizten und dem unbeheizten Raum
- $\vartheta_{int}$ : Innentemperatur des beheizten Raumes in °C
- $\vartheta_u$ : Innentemperatur des unbeheizten Raumes in °C

- $\vartheta_e$ : Norm-Außentemperatur in °C

Grenzt ein Bauteil an zwei beheizten Räumen mit unterschiedlichen Innentemperaturen, so müssen die Transmissionswärmeverluste korrigiert werden (Burkhardt et al. 2011). Folgende Gleichung wird verwendet:

$$H_{T,ij} = \sum_k (f_{ij} \cdot A_k \cdot U_k) \quad [5]$$

$$f_{ij} = \frac{\vartheta_{int,i} - \vartheta_{int,j}}{\vartheta_{int,i} - \vartheta_e} \quad [6]$$

- $f_{ij}$ : Temperatur-Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung des Temperaturunterschiedes zwischen den beiden beheizten Räumen
- $\vartheta_{int,i}$ : Innentemperatur des beheizten Raumes in °C
- $\vartheta_{int,j}$ : Innentemperatur des beheizten Nachbarraumes in °C

Die Transmissionswärmeverluste der Bauteile, die an das Erdreich angrenzen, sind mehrdimensional. Sie sind sehr komplex und hängen von der Grundwassertiefe, der Tiefe des Kellerbodens, der Form, der Grundfläche und der Tiefe des Gebäudes, der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens, den Wärmeleitwiderständen der Bodenplatte und der Kellerwände, sowie der Außenluft- und der Grundwassertemperatur ab (Burkhardt et al. 2011). Nach DIN/TS EN 12831-1 werden mehrdimensionalen Einflussgrößen an die Transmissionswärmeverluste an das Erdreich folgendermaßen vereinfacht:

$$H_{T,ig} = f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot (\sum_k A_k \cdot U_{equiv,k}) \cdot G_W \quad [7]$$

$$f_{g2} = \frac{\vartheta_{int} - \vartheta_{m,e}}{\vartheta_{int} - \vartheta_e} \quad [8]$$

- $f_{g1}$ : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der jährlichen Schwankung der Außentemperatur.  
 $f_{g1} = 1,45 = \text{konstant}$
- $f_{g2}$ : Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung des Temperaturunterschiedes zwischen Erdreich und Normaußentemperatur
- $\vartheta_{m,e}$ : Jahresmittel der Außentemperatur in °C
- $U_{equiv,k}$ : „äquivalenter“ Wärmedurchgangskoeffizient in  $W/(m^2 \cdot K)$
- $G_W$ : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Einflussgröße des Grundwassers. Es gilt: Abstand des Grundwasserspiegels kleiner 3m, so ist  $G_W = 1,15$ . Bei größer oder gleich 3m ist  $G_W = 1,0$ .

$$B' = \frac{A_g}{0,5 \cdot P} \quad [9]$$

- $A_g$ : Fläche der Bodenplatte in  $m^2$
- $P$ : erdberührter Umfang der Bodenplatte in m
- $B'$ : (Geometrie-)Parameter in m

### 2.3.4 Norm-Lüftungswärmeverluste

Lüftungswärmeverluste entstehen durch das Eindringen von Außenluft in das Gebäude, z.B. durch Fenster, Türen, durch die Gebäudehülle usw. (Europa Lehrmittel 2018). Um diesen kalten Luftstrom von der Außen- auf die Innentemperatur zu bringen, wird eine bestimmte Heizleistung benötigt. Diese kann folgendermaßen berechnet wird (DIN/TS EN 12831-1):

$$\Phi_{V,i} = c_p \cdot \rho \cdot \dot{V}_{th} \cdot (\vartheta_{int} - \vartheta_e) \quad [10]$$

- $\Phi_{V,i}$ : Norm-Lüftungswärmeverluste eines Raumes in W
- $c_p \cdot \rho$ : Dichte und massenbezogene Wärmekapazität der Luft können nach DIN EN 12831 zu der Konstante 0,34 Wh/(m<sup>2</sup> · K) zusammengefasst werden.
- $\dot{V}_{th}$ : Thermisch wirksamer Volumenstrom in m<sup>3</sup>/h

Bei den Lüftungswärmeverlusten wird zwischen der mechanischen und/oder der natürlichen Belüftung unterschieden. In dieser Arbeit geht es ausschließlich um die natürliche Belüftung, deshalb wurden die Formeln aus der DIN EN 12831 für die Berechnung bereits auf die natürliche Belüftung angepasst. Somit ist der thermische wirksame Volumenstrom abhängig von dem, ob in einem Raum die Infiltration oder der hygienische erforderliche Mindestluftwechsel höher ist (DIN/TS DIN/TS 12831-1). Dies wird anhand folgender Formel beschrieben (DIN EN 12831):

$$q_{env/min,i} = \max(q_{v,env,i}; q_{v,min,i}) \quad [11]$$

- $q_{env/min,i}$ : Thermisch wirksamer Volumenstrom in m<sup>3</sup>/h
- $q_{v,env,i}$ : Außenluftvolumenstrom durch die Gebäudehülle in m<sup>3</sup>/h
- $q_{v,min,i}$ : Mindestluftvolumenstrom in m<sup>3</sup>/h

Der Mindestluftvolumenstrom wird mit folgender Formel berechnet:

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i \quad [12]$$

- $n_{min,i}$ : nutzungsbedingter Mindestluftwechsel in Abhängigkeit von Raumart in 1/h
- $V_i$ : lichtet Raumvolumen in m<sup>3</sup>

Der Außenluftvolumenstrom  $q_{v,env,i}$  wird folgendermaßen berechnet:

$$q_{v,env,i} = \min(q_{v,env,z}; q_{v,leak+ATD,i} \cdot f_{dir}) \quad [13]$$

- $q_{v,env,z}$ : Außenluftvolumenstrom der Zone durch die Gebäudehülle in m<sup>3</sup>/h
- $q_{v,leak+ATD,i}$ : Außenluftvolumenstrom des Raumes durch Undichtigkeiten und Außenwandluftdurchlässe in m<sup>3</sup>/h
- $f_{dir}$ : Fixwert;  $f_{dir}=2$

Der Fixwert  $f_{dir}$  wurde angesetzt, da der Wind nur auf eine Richtung gleichzeitig auf das Gebäude wehen kann, wodurch vereinfacht gesehen nur die Hälfte aller Räume des Gebäudes gleichzeitig infiltriert werden (DIN/TS DIN/TS 12831-1).



Der Außenluftvolumenstrom der Zone durch die Gebäudehülle  $q_{v,env,z}$  ist gleichzeitig auch der Außenluftvolumenstrom der Zone durch die Infiltration und Außenluftdurchlässe (ALD)  $q_{v,inf-add,z}$ , da nur die natürliche Belüftung betrachtet wird (DIN/TS DIN/TS 12831-1). Somit ergibt sich folgende Formel:

$$q_{v,env,z} = q_{v,inf-add,z} = (q_{env,50} \cdot A_{env,z} + q_{v,ATD,50,z}) \cdot f_{qv,z} \cdot f_{e,z} \quad [14]$$

- $q_{v,inf-add,z}$ : Außenluftvolumenstrom der Zone durch die Infiltration und ALD in  $m^3/h$
- $q_{env,50}$ : hüllenbezogene Luftdurchlässigkeit bei 50 Pascal in  $m^3/m^2 \cdot h$
- $A_{env,z}$ : Hüllfläche der Zone  $m^2$
- $q_{v,ATD,50,z}$ : Luftvolumenstrom durch Außendurchlässe der Zone in  $m^3/h$
- $f_{qv,z}$ : Volumenstromkoeffizient
- $f_{e,z}$ : Anpassungsfaktor aufgrund von nicht balancierter Luft- bei balancierter Luft gilt  $f_{e,z}=1,0$

$$q_{v,leak+ATD,i} = q_{v,leak,z} \cdot \frac{A_{env,i}}{A_{env,z}} \quad [15]$$

$$q_{v,leak,z} = (1 - a_{ATD,z}) \cdot q_{v,env,z} \quad [16]$$

- $q_{v,leak,z}$ : Außenluftvolumenstrom in die Zone durch Undichtigkeiten in  $m^3/h$
- $A_{env,i}$ : Hüllfläche des Raumes  $m^2$
- $a_{ATD,z}$ : Autorität der Außenluftdurchlässe

Nach DIN EN 12831 ist die Hüllfläche eines Raumes, die Summe aller Flächen der Bauteile, die an die Außenluft oder an unbeheizten Nachbarräumen grenzen. Die Hüllfläche des Gebäudes ergibt sich aus der Summe der Hüllflächen der beheizten Räume (DIN/TS DIN/TS 12831-1).

### 2.3.5 Zusätzliche Aufheizleistung

Räume, die zeitweise oder beschränkt beheizt werden, zum Beispiel aufgrund von Nachtabenkungen oder Wochenendabsenkungen, benötigen eine zusätzliche Aufheizleistung  $\Phi_{RH}$ , da sie durch die entstandene Temperaturabsenkung eine gewisse Zeit benötigen, um wieder auf die gewünschte Norm-Innentemperatur zu kommen (Europa Lehrmittel 2018). Die Aufheizleistung, die benötigt wird, hängt von der Dauer der Absenkung, den Wärmeverlusten während der Absenkphase und der wirksamen Gebäudemasse ab. Nach DIN EN 12831 wird die Aufheizleistung zu den Transmissions- und den Lüftungswärmeverlusten addiert (Burkhardt et al. 2011).

In dieser Arbeit wird die Aufheizleistung nicht berücksichtigt, da das Beispielgebäude keine Räume aufweist, die weder zeitweise noch beschränkt beheizt werden.

### 2.3.6 Norm-Heizlast

Die Normheizlast eines beheizten Raumes bildet die Grundlage für die Heizflächendimensionierung (Europa Lehrmittel 2018). Sie ergibt sich folgendermaßen:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} \quad [17]$$

- $\Phi_{HL,i}$ : Normheizlast eines Raumes in W

Die Normheizlast eines Gebäudes ermöglicht die Auslegung eines Wärmeerzeugers. Sie setzt sich aus den Normheizlasten der beheizten Räume zusammen. Der Wärmefluss, der zwischen beheizten Räumen entsteht, wird dabei nicht berücksichtigt. Somit ergibt sich folgende Formel:

$$\Phi_{HL,Geb.} = \sum \Phi_{T,i} + \sum \Phi_{V,i} \quad [18]$$

- $\Phi_{HL,Geb.}$ : Norm-Heizlast eines Gebäudes in W

$$\sum \Phi_{V,i} = f_{i-z} \cdot \sum \Phi_{V,i} \quad [19]$$

- $f_{i-z}$ : Volumenstromverhältnis zwischen Raum i und Zone z

Der Faktor  $f_{i-z}$  kann der Tabelle 10 in der DIN/TS 12831-1:2020-04 entnommen werden.

## 2.4 Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B

In den meisten Wärmeübergabesystemen (z.B. Heizkörper, Flächenheizung usw.) wird die thermische Energie an den Raum durch Wasser abgegeben. Bei dem Transport des Wassers in dem Heizungssystem folgt das Wasser dem Prinzip des geringsten Widerstandes. Der Widerstand in den Heizungssystemen setzt sich aus den Rohrreibungsverlusten und den weiteren Einbauten (z.B. Formstücken) im System zusammen. Damit kommt es oft zu dem Phänomen, dass Wärmeübergabesysteme, die weiter entfernt von dem Wärmeerzeuger stehen, größtenteils zu wenig oder zeitlich verzögert Heizwasser und die näher am Erzeuger sind, zu viel Heizwasser erhalten. Dieses Phänomen beschreibt ein nicht abgeglichenes Heizungssystem (VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik 2021).

Ein solches System verursacht wie bereits genannt eine Unter- oder Überversorgung der Heizflächen. Zudem wird die Vorlauftemperatur des Systems nicht erreicht, trotz ausreichender Kesselleistung. Unter anderem können niedrige Rücklauftemperatur durch überdimensionierte Heizflächen nicht erreicht werden. Weiterhin kann durch ein nicht abgeglichenes System bei Vollast eine unzureichende Versorgung entstehen und bei Teillast kann es zu Geräuschentwicklungen im Heizungssystem kommen. Bei nicht ausgeglichenen Heizungssystemen entsteht ein hoher Energieverbrauch, sowohl elektrisch (durch die Pumpe) als auch thermisch (VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik 2021).

Die Durchführung eines hydraulischen Abgleiches hat folgende Vorteile. Alle Räume werden gleichmäßig beheizt und die Geräusche im Heizungssystem werden eliminiert. Zudem werden durch die Vermeidung der Über- und Unterdimensionierung der Heizflächen und der Pumpe Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart (VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik 2021).

In dem folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Faktoren des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B für die Fußbodenheizung (FBH) erläutert. Der Unterschied von Verfahren B zu Verfahren A des hydraulischen Abgleiches ist, dass bei Verfahren B eine raumweise Heizlast berechnet werden muss (VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik 2021). Diese Berechnung wurde in Abschnitt 2.3 erläutert.

Der hydraulische Abgleich für Heizkörper kann näherungsweise mit der Schritt-für-Schritt-Anleitung der Quelle (Schlobach 2021b) durchgeführt werden.

#### 2.4.1 Wärmeleistung

Die Wärmeleistung der FBH wird anhand der beheizten Fläche und der spezifischen Wärmeleistung bestimmt:

$$Q_{HK} = q \cdot A_F \quad [20]$$

- $Q_{HK}$ : Auslegungs-Wärmeleistung von Fußbodenheizungssystem W
- $q$ : spezifische Wärmeleistung von Fußbodenheizungssystem in  $W/m^2$
- $A_F$ : wirksame heizende Fläche  $m^2$

Die spezifische Wärmeleistung der FBH wird mit der Formel (4) aus DIN EN 1264-2 berechnet:

$$q = B \cdot a_B \cdot a_T^{m_T} \cdot a_U^{m_U} \cdot a_D^{m_D} \cdot \Delta\vartheta_H \quad [21]$$

- $B$ : systemabhängiger Koeffizient zur Berechnung der Kennlinie;  $B=6,7 W/m^2 \cdot K$ , wenn die Wärmeleitfähigkeit des Rohres  $\lambda_R = \lambda_{R,0} = 0,35 W/m^2 \cdot K$  und Rohrwanddicke  $s_R = s_{R,0} = (d_a - d_i)/2 = 0,002 m$
- $a_B$ : Fußbodenbelag-Faktor
- $a_T$ : Teilungsfaktor; bestimmbar nach Tab. A.1 DIN EN 1264-2
- $m_T = 1 - (T/0,075)$ ; gilt für  $0,050 m \leq T \leq 0,375m$
- $T$ : Rohrteilung in m (auch als Verlegerabstand (VA) bezeichnet)
- $a_U$ : Überdeckungsfaktor; bestimmbar nach Tab. A.2 DIN EN 1264-2
- $m_U = 100 \cdot (0,045 - s_U)$ ; gilt für  $s_U \geq 0,010m$
- $s_U$ : Dicke der Überdeckung über dem Rohr in m
- $a_D$ : Faktor für den Rohraußendurchmesser; bestimmbar nach Tab.A.3 DIN EN 1264-2
- $m_D = 250 \cdot (D - 0,020)$ ; gilt für  $0,008m \leq D \leq 0,0030m$
- $D$ : Rohraußendurchmesser einschließlich einer Ummantelung in m
- $\Delta\vartheta_H$ : Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Raum in K

Zur Bestimmung des Fußbodenbelagsfaktor wird nach DIN EN 1264-2 folgende Formel verwendet:

$$a_B = \frac{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_{u,0}}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_E} + R_{\lambda,B}} \quad [22]$$

- $\alpha=10,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- $s_{u,0}=0,045 \text{ m}$
- $\lambda_{u,0}=1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- $\lambda_E$ : Wärmeleitfähigkeit des Estrichs in  $\text{W/m} \cdot \text{K}$
- $R_{\lambda,B}$ : Wärmeleitwiderstand des Fußbodenbelags in  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$

Die Formel zur Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Raum setzt sich nach DIN EN 1264-2 wie folgt zusammen:

$$\Delta\vartheta_H = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln\left(\frac{\vartheta_V - \vartheta_i}{\vartheta_R - \vartheta_i}\right)} \quad [23]$$

- $\vartheta_V$ : Vorlauftemperatur des Heizmittels in  $^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_R$ : Rücklauftemperatur des Heizmittels in  $^{\circ}\text{C}$
- $\vartheta_i$ : Norm-Innentemperatur in  $^{\circ}\text{C}$

Für die weiteren Berechnungen wird die Soll-Wärmeleistung der FBH benötigt, diese entspricht der Normheizlast der jeweiligen Räume, da hier der hydraulische Abgleich nach Verfahren B durchgeführt wird.

#### 2.4.2 Durchfluss und Druckabfälle

Die Durchflussmenge einer FBH wird durch die Wassermenge in Litern, die durch Rohre pro Minute fließen, bestimmt. Wird die Durchflussmenge erhöht, wird an den Raum mehr Wärme abgegeben (Treufelsberger o.J.). Der Parameter Durchfluss ist von der Spreizung zwischen der Vorlauftemperatur zur Rücklauftemperatur des Heizkreises, der Wärmeleistung der FBH, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der Dichte des Wassers abhängig (Norm DIN EN 1264-3). Der errechnete Durchfluss aus dem hydraulischen Abgleich wird mit einem Durchflussmesser eingestellt. In der Regel sind Durchflussmesser am Verteiler angebracht, meistens sind diese Schwebekörper-Durchflussmesser, mit deren Hilfe man auf einer Skala den Durchfluss ablesen und einstellen kann (siehe Abbildung 5), (Treufelsberger o.J.).



Abbildung 5: Schwebekörper-Durchflussmesser (Hübner 2020)

Der Durchfluss errechnet sich aus dem Verhältnis des Massenstromes zu der Dichte des Wassers (Norm DIN EN 1264-3). Dabei ist zu beachten, dass die Dichte des Wassers abhängig von der Temperatur ist (siehe Anhang Abbildung 1) (Burkhardt et al. 2011).

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_W} \quad [24]$$

- $\dot{V}$ : Volumenstrom in  $\text{m}^3/\text{h}$
- $\dot{m}$ : Massenstrom in  $\text{kg/h}$
- $\rho_W$ : Dichte des Wassers in  $\text{kg/m}^3$

Der Massenstrom der einzelnen Heizkreise wird folgendermaßen berechnet:

$$\dot{m} = \frac{A_F \cdot q}{\sigma \cdot c_W} \cdot \left(1 + \frac{R_o}{R_u} + \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{q \cdot R_u}\right)$$

Da es sich bei dem Beispielgebäude um ein Bestandsgebäude handelt, gibt es zu dem unteren Fußbodenaufbau keine Angaben, wodurch der Parameter  $R_u$  - Teilwärmedurchgangswiderstand des Fußbodenaufbaus nach unten wegfällt. Zudem wird die Norm-Heizlast der Räume als Wärmeleistung verwendet, wie bereits in 2.4.1 erwähnt. Dadurch ergibt sich folgende Gleichung:

$$\dot{m} = \frac{\Phi_{HL,i}}{\sigma \cdot c_W} \quad [25]$$

- $\sigma$ : Spreizung der Vorlauftemperatur zur Rücklauftemperatur des Heizkreises in K
- $c_W$ : spezifische Wärmekapazität von Wasser,  $c_W = 4190 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Die Druckverlustberechnung für Fußbodenheizungen ist nur dann erforderlich, wenn die Verteiler einstellbare Abgleicharmaturen haben. Laut dem Bundesverband Flächenheizung und Flächenkühlung e.V. (BVF) ist nur die Bestimmung des Gesamtdruckverlustes und die Berücksichtigung des längsten Fußbodenkreises notwendig, um die Förderhöhe der Umwälzpumpe abschätzen zu können (VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik 2021). Druckverlustberechnungen können mit den Grundlagen der Strömungslehre berechnet werden. Bei einem Rohrnetzplan können diese genau berechnet werden. Wenn kein Plan vorhanden ist, müssen die Rohrlängen, die Wandrauigkeit (abhängig vom Rohrmaterial) und der Durchmesser geschätzt werden. Zudem muss überprüft werden, um welchen Strömungszustand (laminar oder turbulent) es sich in den Rohren handelt (Burkhardt et al. 2011).

Exkurs: Volumenströme stehen in engen Zusammenhang mit dem Druck und dem  $K_V$ -Wert. Vor jedem Heizkörper gibt es ein Stellventil. Stellt man sich nun ein Gebäude vor, wird klar, dass die Anforderungen an jeden Heizkörper unterschiedlich sind, da die Heizkörper in Pumpennähe mehr durchströmt werden als die Heizkörper, die weiter entfernt liegen. Der Durchfluss eines jeden Heizkörpers muss somit entsprechen an die Raumheizlast und den Transportweg des Wassers angepasst werden (Held 2019). Das wird am Ventil eingestellt. Dazu wird der  $K_V$ -Wert benötigt, er beschreibt den Druckverlust an einem Ventil. Der Druckverlust über einem Ventil stellt für das Wasser ein Widerstand dar. Mit dem  $K_V$ -Wert kann das Ventil eingestellt werden. Die unterschiedlichen Hersteller der Ventile stellen Diagramme bereit, wo der berechneten  $K_V$ -Wert, die Voreinstellung abgelesen werden kann (Schlobach 2022b).

Die Werte für die Druckverluste  $\Delta p$  wurden dem Programm entnommen, da die Druckverlustberechnungen ohne Rohrnetzplan den Rahmen der Arbeit überschreiten. Die  $K_V$ -Werte werden mit folgender Formel berechnet:

$$K_V = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta p}} \quad [26]$$

- $\Delta p$ : Gesamter-Druckverlust des Heizkreises in bar
- $K_V$ : Ventilkenngröße in  $\text{m}^3/\text{h}$
- $\Delta p_0$ : Einheitsdruckdifferenz  $= 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$

### 2.4.3 Auslegung der Pumpe

Der letzte Punkt für die Optimierung der Heizungsanlage ist die Auslegung der Umwälzpumpe. Sie transportiert im Heizungssystem das Wasser. Für den Transport wird kinetische Energie oder auch Bewegungsenergie benötigt, diese wird von der Rotation des Pumpenlaufrades in der Pumpe erzeugt. Bei der Rotation wird ein Förderdruck aufgebaut, der es ermöglicht, den Strömungswiderstand der Heizungsanlage bei einer bestimmten Durchflussmenge zu überwinden (Schlobach 2021a). Der Förderdruck und der Förderstrom, auch Volumenstrom genannt, der Pumpe werden bei dem hydraulischen Abgleich bestimmt.

Der Förderstrom einer Pumpe lässt sich durch die Summe aller Heizflächenvolumenströme berechnen (Schlobach 2022a):

$$Q_{PU} = \sum \dot{V}_{HK} \quad [27]$$

Für die Berechnung des Förderdruckes der Pumpe wird der ungünstigste Fließweg, auch als Schlechtpunkt der Anlage bezeichnet, benötigt. Hierbei ist zu beachten, dass die Summe aller Einzeldruckverluste, Druckverluste durch Rohrleitungen, Wärmeerzeuger, Heizflächen, Amateuren und weiteren Einbauten, die auf dem Fließweg entstanden sind, berücksichtigt werden müssen. Der Druckverlust, der an dem ungünstigsten Fließweg entsteht, entspricht der Förderhöhe der Umwälzpumpe (VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik 2021).

$$H \approx \Delta p_{max} \quad [28]$$

Mit den beiden Werten kann nun die Umwälzpumpe korrekt eingestellt oder ausgelegt werden. Eine beispielhafte Auslegung der Umwälzpumpe wird in Abschnitt 3.1.2 erläutert.

## 2.5 Jahresarbeitszahl

Für die Bewertung der Leistung und der Effizienz der Wärmepumpe gibt es verschiedene Kennzahlen. Diese werden im Folgenden genauer erläutert, jedoch wird der Fokus auf die Jahresarbeitszahl gelegt.

### **Coefficient of performance (COP)**

Der coefficient of performance (kurz: COP) gibt das Verhältnis zwischen der abgegebenen Wärmeleistung und der eingesetzten elektrischen Leistung einer WP an. Je höher der COP ist, desto effizienter ist die Wärmepumpe. Der COP gibt die Effizienz unter den Laborbedingungen an. Er wird von den Herstellern der Wärmepumpen für bestimmte Betriebspunkte in den Datenblättern angegeben, wodurch eine Vergleichbarkeit geschaffen wird. Betriebspunkte werden in Datenblätter folgendermaßen angegeben, z.B. A7/W35. Dabei beschreibt das A die Quelltemperatur, hier 7 °C und das W beschreibt die Vorlauftemperatur, hier 35 °C (Glaesmann 2022).

## Seasonal coefficient of performance (SCOP)

Der seasonal coefficient of performance (kurz: SCOP) basiert auf den im Labor ermittelten COP-Werte. Zudem wird in den SCOP die saisonale Schwankung und die Leistung eines Heizstabes mit einbezogen. Der SCOP wird viermal im Jahr zu unterschiedlichen Jahreszeiten gemessen. Somit ist er genauer als der COP Wert (Glaesmann 2022).

## Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl (kurz: JAZ) ist die wichtigste Kennzahl einer Wärmepumpe. Sie gibt Aufschluss über die Effizienz und Wirtschaftlichkeit einer WP. Die JAZ gibt das Verhältnis zwischen der erzeugten Wärmemenge für die Heizung und der Warmwasserbereitung zu dem eingesetzten Strom für die Wärmepumpe innerhalb eines Jahres an. Somit drückt die JAZ die Effizienz der Wärmepumpe unter realen Betriebsbedingungen aus. Damit haben Faktoren wie der energetische Stand, sowie der Standort des Gebäudes, die Vor- und Rücklauftemperatur, die Größe der Heizflächen, die Hydraulik sowie das Nutzverhalten Einfluss auf die JAZ (Glaesmann 2022).

Für die Berechnung der Jahresarbeitszahl wird der Onlinerechner des Bundesverbandes Wärmepumpe e.V. (kurz: bwp) verwendet (<https://www.waermepumpe.de/jazrechner/>). Die Berechnungsgrundlage des Onlinerechners des bwp basiert auf dem Verfahren der VDI 4650 Blatt 1:2019-03. Die berechnete JAZ nach VDI 4650 Blatt 1:2019-03 kann in der Praxis deutlich abweichen, aufgrund von Eingriffen des Nutzers wie z.B. Lüftungsgewohnheiten oder andere Rauminnentemperaturen etc. (VDI 4650). Im Folgenden werden die Berechnungsschritte nach VDI 4650 Blatt 1:2019-03 erläutert.

## Berechnung JAZ der LWP nach VDI 4650 Blatt 1

Für die Berechnung der JAZ einer LWP muss der Abtauvorgang berücksichtigt werden. Häufig ist dieser bereits in der Prüfstandmessung bei dem Auslegungspunkt A2/W35 nach DIN EN 14511 enthalten. Die korrigierte Leistungszahl bei A2/W35 wird folgendermaßen berechnet (VDI 4650):

$$COP_{N2(A2/W35)}^* = COP_{N2(A2/W35)} - S_{AB} \quad [29]$$

- $COP_{N2(A2/W35)}^*$ : korrigierte Leistungszahl der WP bei A2/W35 unter Berücksichtigung der Abtauung
- $COP_{N2(A2/W35)}$ : Leistungszahl der WP bei A2/W35
- $S_{AB}$ : Korrekturabschlag für das Abtauverfahren (siehe Tab.10 VDI 4650)

Die JAZ für die Raumheizung wird mit der folgenden Formel berechnet (VDI 4650):

$$SCOP_H = \frac{F_{\Delta\theta}}{\frac{F_{\vartheta 1}}{COP_{N1}} + \frac{F_{\vartheta 2}}{COP_{N2}^*} + \frac{F_{\vartheta 3}}{COP_{N3}}} \quad [30]$$

- $SCOP_H$ : Jahresarbeitszahl der Heizung
- $F_{\Delta\theta}$ : Korrekturfaktor für die Abweichung der Temperaturdifferenz am Verflüssiger von Messung zum Betrieb (siehe Tabelle 1 VDI 4650)
- $F_{\vartheta 1, \vartheta 2, \vartheta 3}$ : Korrekturfaktor für unterschiedliche Betriebsbedingungen, abhängig von Heizgrenztemperatur und Regelung der WP (siehe Tab. 11-16 VDI 4650)

- $COP_{N1}$ : Leistungszahl der WP nach DIN EN 14511 bei A-7/W35
- $COP_{N2}^*$ : korrigierte Leistungszahl der WP nach DIN EN 14511 bei A2/W35
- $COP_{N3}$ : Leistungszahl der WP nach DIN EN 14511 bei A7/W35

Bei der Berechnung der JAZ für die Trinkwassererwärmung mit der Heizungswärmepumpe wird eine Auslegungstemperatur nach VDI 4650 von 50 °C angesetzt. Wird die Warmwasserbereitstellung für höhere Temperaturen ausgelegt, wird ein Korrekturfaktor benötigt. Zudem sollte geprüft werden, ob der Speicher mit innenliegenden Heizwasser-Rohrschlangen oder mit einem anderen Ladesystem ausgestattet ist. Mit folgender Formel wird die JAZ für das Trinkwasser errechnet (VDI 4650):

$$SCOP_W = COP_{N3} \cdot F_{\Delta\theta} \cdot F_1 \cdot F_2 \quad [31]$$

- $SCOP_W$ : Jahresarbeitszahl des Trinkwassers über die Luft-Wasser-Wärmepumpe
- $F_1$ : Korrekturfaktor für die Abweichung der Auslegungstemperatur des Warmwassers (siehe Tabelle 24 VDI 4650)
- $F_2$ : Korrekturfaktor, 1. Speicher mit innenliegend Heizwasser-Rohrschlangen  $F_2 = 0,716$   
2. alle anderen Bauformen  $F_2 = 0,644$

Die Gesamtjahresarbeitszahl ergibt sich somit mit folgender Gleichung (VDI 4650):

$$SCOP_{WPA} = \frac{1}{(1-\gamma) \frac{\alpha}{SCOP_H} + \gamma \frac{\alpha}{SCOP_W} + (1-\alpha)} \quad [32]$$

- $SCOP_{WPA}$ : Gesamtjahresarbeitszahl einer WP
- $\alpha$ : Deckungsanteil im monoenergetischen Betrieb (siehe Anhang Abbildung 15)
- $\gamma$ : Anteil der Trinkwassererwärmung am gesamten Wärmebedarf (Beispielgebäude  $\gamma = 0,18$ )

### Berechnung JAZ der SWP mit Erdkollektoren nach VDI 4650 Blatt 1

Die JAZ für die Raumheizung für die Wärmequelle Erdreich errechnet sich folgendermaßen (VDI 4650):

$$SCOP_H = \frac{COP_N \cdot F_{\Delta\theta} \cdot F_{\vartheta}}{F_P} \quad [33]$$

- $COP_N$ : Leistungszahl der WP nach DIN EN 14511 zu den Norm-Nennbedingungen B0/W35
- $F_{\vartheta}$ : Korrekturfaktor für unterschiedliche Betriebsbedingungen (Tab.2-4 VDI 4650)
- $F_P$ : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpe

Der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpe wird mit folgender Formel berechnet:

$$F_P = 1 + \frac{P_P}{P_{WP}} \quad [34]$$

- $P_P$ : Antriebsleistung der Wärmequellenpumpe am Auslegungspunkt



- $P_{WP}$ : Antriebsleistung der WP bei B0/W35

Die JAZ der Trinkwassererwärmung mit der SWP berechnet sich mit folgender Gleichung:

$$SCOP_W = COP_N \cdot \frac{F_{\Delta\theta} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_\theta}{F_P} \quad [35]$$

- $F_1$ : Korrekturfaktor für abweichende Auslegungstemperatur des Warmwassers (Tab.17 VDI 4650)
- $F_2$ : Korrekturfaktor, 1. Speicher mit innenliegend Heizwasser-Rohrschlangen  $F_2 = 0,764$   
2. alle anderen Bauformen  $F_2 = 0,699$

Die Gesamtjahresarbeitszahl der monovalenten SWP wird genauso mit Gleichung [32] berechnet.

## 2.6 Energetische Bewertung eines Gebäudes

Die Bewertung des Gebäudeenergiebedarfs wird in dieser Arbeit anhand der DIN 18599 durchgeführt, die Berechnungsschritte werden nicht angeführt, da sie den Rahmen der Arbeit überschreiten würden. Die Grundlage der DIN 18599 ist die Energiebilanz der Gebäudehülle, diese muss durch die Bilanzgrenze, die Energieströme in der Bilanzgrenze und die internen Energiequellen bilanziert werden. Zudem wird bei der DIN 18599 als Klimareferenzregion die Klimazone 4 Potsdam für ganz Deutschland verwendet (Beckmann 2020).

Die Berechnungen werden mit dem Programm Energieberater 18599 von Hottgenroth und dem Programm Polysun der Firma Vela Solaris AG durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter zur Bewertung des Gebäudes angeführt.

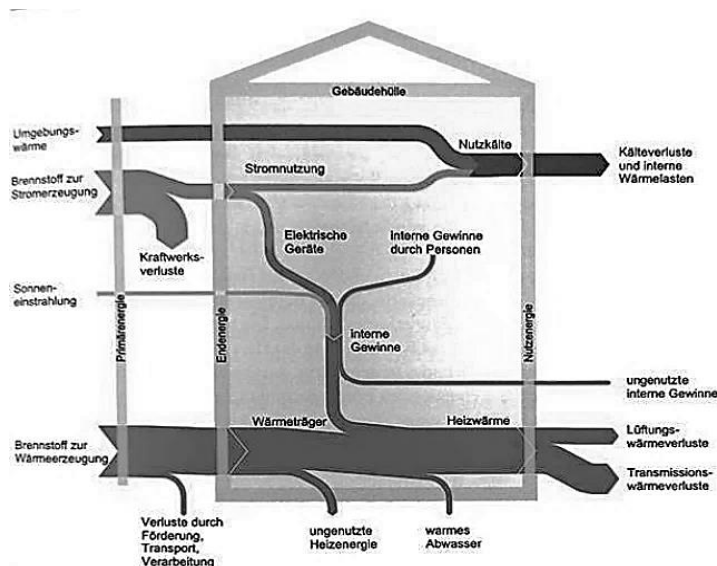


Abbildung 6: Energiefluss von der Primärenergie zu dem Nutzenergiebedarf des Gebäudes (Bollin 2016)

## Nutzenergie

Die Nutzenergie beschreibt den Energieanteil der Endenergie abzüglich der Anlagenverluste des Heizungssystems und der Wärmeverluste durch die Verteilung, die den Verbrauchern direkt zur Verfügung stehen, um Beleuchtung, Innentemperatur und Warmwasser sicherzustellen (Glaesmann 2022), (Schild und Brück 2010). Die Nutzenergie eines Gebäudes beinhaltet die Heizungs-, die Warmwasser-, die Kühlungs- und die Lüftungsenergie. Bei einem Einfamilienhaus (EFH) ohne Klima- oder Lüftungsanlage entspricht die Nutzenergie dem Bedarf des Warmwassers und dem Heizwärmebedarf (Vornorm DIN V 18599).

Um die Nutzenergie zu ermitteln, werden die Wärmesenken (Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, Abstrahlungen nach außen sowie, interne Wärmeverluste) mit den Wärmequellen (solare Einstrahlung, interne Gewinne und Transmission und Lüftung aus angrenzenden Bereichen, interne Wärmeverluste) in einer Monatsbilanzierung gegenübergestellt (Schild und Brück 2010), (Vornorm DIN V 18599). Die Wärmequellen und -senken müssen für jeden Monat als Tageswerte berechnet und im Anschluss für einen Monat zusammengefasst werden. Dabei wird grundsätzlich ein mittlerer Tag eines Monats betrachtet. Bei verschiedenen Nutzungstagen (z.B. Wochenende, Werkstage, Ferienzeiten/Urlaub) müssen die unterschiedlichen Zeiträume getrennt bilanziert werden (Vornorm DIN V 18599).

Um den Heizbedarf einer Gebäudezone zu bestimmen, wird noch der Ausnutzungsgrad benötigt (siehe Abbildung 7). Dieser beschreibt die Schwankungen der Wärmequellen und -senken, die innerhalb des Betrachtungszeitraumes schwächer oder stärker auftreten (Vornorm DIN V 18599). In Abbildung 7 wird das Prinzip zur Ermittlung des Heizwärme- und Kühlbedarfs eines Nutzungstages dargestellt.

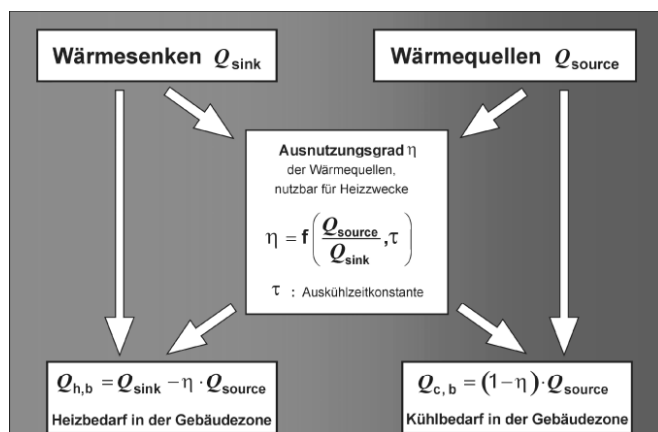


Abbildung 7: Prinzip der Ermittlung des Heizwärme- und Kühlbedarfs einer Gebäudezone (Vornorm DIN V 18599)

Aus dem bilanzierten Heizwärmebedarf für einen Nutzungstag im Monat wird der monatliche Heizwärmebedarf errechnet (multipliziert mit der Anzahl an Tagen im Monat). Die Summe aller monatlichen Heizwärmebedarfe ergibt den Jahresheizwärmebedarf (Vornorm DIN V 18599). Die Nutzenergie für Trinkwarmwasser kann nach DIN V 18599-8 berechnet werden und wird in diesem Abschnitt nicht weiter erläutert.

## **Endenergie**

Der Endenergiebedarf gibt die Energiemenge an, die der Anlagentechnik zur Verfügung gestellt wird, um die festgelegte Rauminnentemperatur, das Trinkwarmwasser, die Beleuchtung und die raumluftechnische Anlage über das gesamte Jahr sicherzustellen (Vornorm DIN V 18599). Die Endenergie wird an der Bilanzgrenze der Gebäudehülle übergeben und wird durch den verwendeten Energieträger angegeben. In der Endenergie werden die Verluste in der Erzeugung, Speicher, Verteilung und der Übergabe berücksichtigt (Schild und Brück 2010). Um die Endenergie zu ermitteln, werden zu der Nutzenergie die bereits genannten Energieverluste (über ein Jahr) addiert. Zudem wird zu der Endenergie, die benötigte Hilfsenergie (z.B. durch Pumpen, Ventilatoren, Regelungen, Elektronik usw.), die die Nutzenergiebereitstellung ermöglicht, addiert (Vornorm DIN V 18599).

## **Primärenergie $q_p$**

Die Primärenergie ist die Energiemenge, die die vorgelagerten Prozessketten (Rohstoffgewinnung, Umwandlung und Verteilung) eines Brennstoffes außerhalb der Bilanzgrenze einbezieht. Diese ergibt sich aus der Multiplikation des Endenergiebedarfes mit einem Primärenergiefaktor  $f_p$ . Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht der gesamte Primärenergiebedarf, sondern nur der nicht erneuerbare Anteil der Primärenergie gemeint ist (Schild und Brück 2010).

Der Jahres-Primärenergiebedarf ist neben dem Transmissionswärmeverlust  $H'_T$  eine der Anforderungsgrößen der Energieeinsparverordnung und wird zur Gesamtbewertung des Gebäudes nach den GEG-Anforderungen 2023-Anlage 1 verwendet (Bundesregierung 08.08.2020), (Schild und Brück 2010). Für den Brennstoff muss noch ein Umrechnungsfaktor berücksichtigt werden, der das Verhältnis zwischen Heizwert zu Brennwert darstellt (Schild und Brück 2010), (Vornorm DIN V 18599).

In Abbildung 6 ist der Energiefluss zwischen der Primärenergie zu der Nutzenergie eines Gebäudes dargestellt.

## **Primärenergiefaktor $f_p$**

Der Primärenergiefaktor beschreibt, wie bereits erwähnt, die Prozesskette eines jeden Energieträgers. Dabei wird nach der Berechnungsgrundlage der DIN V 18599-1 nur der nicht erneuerbare Anteil berücksichtigt. Die Primärenergiefaktoren können der Anhang Abbildung 2 entnommen werden.

## **Transmissionswärmeverlust $H'_T$**

Der spezifische Transmissionswärmeverlust ist wie bereits erläutert eine der beiden Kenngrößen für die Bewertung des Gebäudes nach den GEG-Anforderungen. Er beschreibt das Maß für die Dämmqualität der Umfassungsflächen eines Gebäudes. Je kleiner der  $H'_T$  -Wert ist, umso geringer sind die Wärmeverluste durch das Gebäude (Baunetz\_Wissen\_).

### 3 Simulation am Beispielgebäude in 63674 Altenstadt

Die Berechnungen der Simulation werden mit den Programmen von Hottgenroth und Vela Solaris durchgeführt. Um die Simulation zu veranschaulichen, wurde ein typisches Einfamilienhaus gewählt (siehe Abbildung 8).

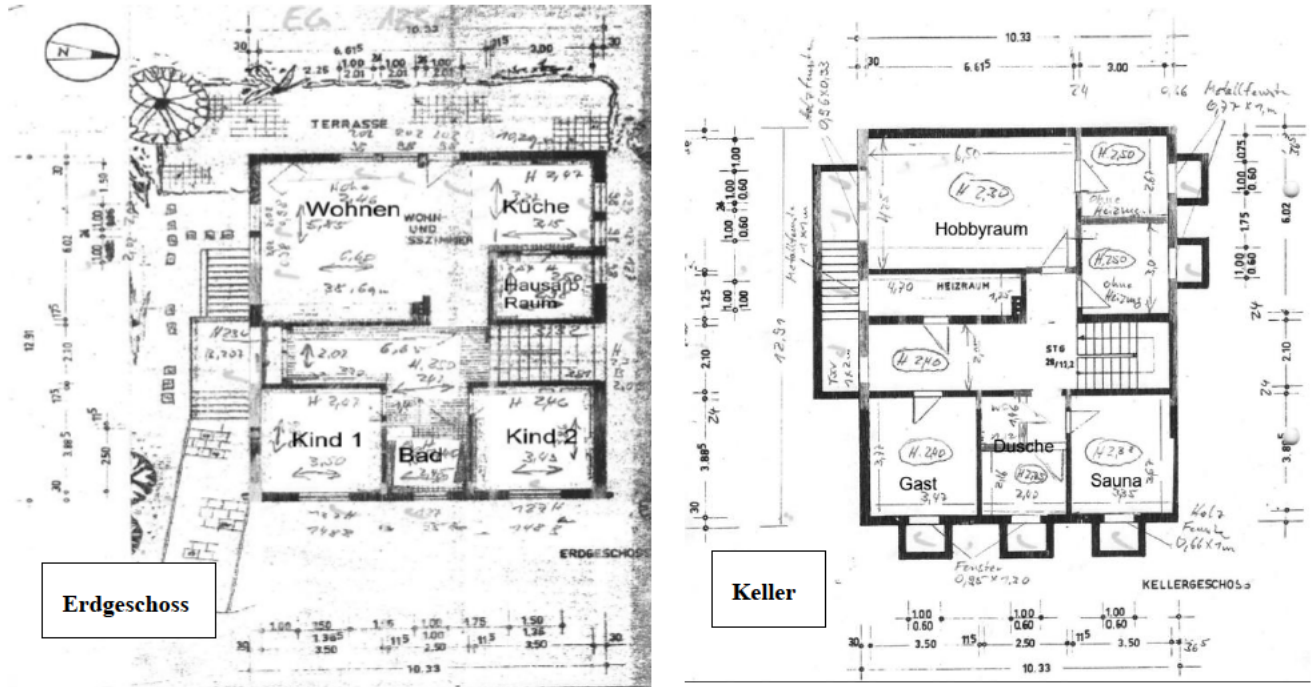


Abbildung 8: Grundrisse der Geschosse (Unterlagen des Kunden)

Im Anhang befinden sich noch weiter Skizzen und Angaben zu dem Einfamilienhaus (siehe Anhang Abbildung 3 und Anhang Abbildung 4).

### 3.1 Ist-Zustand des Gebäudes

Im Ist-Zustand des Gebäudes wird die Raumweise Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 berechnet. Die Berechnungen werden nach der Norm DIN EN 12831 schrittweise erläutert. Zudem wird die Anlagentechnik des Gebäudes überprüft. Zurzeit wird das Gebäude mit einem Ölheizkessel aus dem Baujahr 1991 beheizt (siehe Anhang Abbildung 5). Die Raumwärme für das Gebäude wird durch eine Fußbodenheizung (Baujahr: 1979) bereitgestellt. Im Ist-Zustand des Gebäudes wird geschaut, wie die Anlagentechnik funktioniert und ob sich ohne Sanierungsmaßnahmen eine Luft-Wasser-Wärmepumpe lohnt. In Tabelle 1 und Tabelle 2 werden die wichtigsten Gebäudedaten tabellarisch dargestellt.

Tabelle 1: Gebäudedaten des Einfamilienhauses (eigene Darstellung)

Gebäudedaten	
Haustyp	Bestandsgebäude
Baujahr	1979
Zustand	Saniert (Dachgauben Fenster und Giebel Fenster)
Norm-Außentemperatur	-10,3°C
Jahresmittel-Außentemperatur	10,4°C
Beheizte Gesamtfläche	246 m <sup>2</sup>

Tabelle 2: die beheizte Räume des Beispielgebäudes und die wichtigsten Daten zur Berechnung der Raum-Heizlast (eigene Darstellung)

Raumbezeichnung	Innentemperatur °C / Differenz K	Außenwände m <sup>2</sup>	Innenwand m <sup>2</sup>	Fenster m <sup>2</sup>	Außentür m <sup>2</sup>	Innentür m <sup>2</sup>	Dach m <sup>2</sup>	Fußboden m <sup>2</sup>	Decke m <sup>2</sup>	Raumfläche m <sup>2</sup>
Keller-Dusche	22/ 32,3	9,32	27,83	1,14	/	3,68	/	12,50	12,41	10,32
Keller-Sauna	22/ 32,3	21,05	19,93	0,66	/	1,79	/	15,44	15,33	12,57
Keller- Gast	20/ 30,3	21,21	20,49	1,14	/	1,89	/	16,47	16,40	13,48
Keller-Hobby	20/ 30,3	30,32	27,42	1,78	/	3,89	/	32,65	32,59	28,11
EG-Wohnen	20/ 30,3	30,38	18,26	7,96	1,98	/	/	44,37	44,35	39,75
EG- Küche	20/ 30,3	17,05	7,14	2,48	/	2,10	/	12,60	12,58	10,34
EG-Hausarbeitsraum	18/ 28,3	6,13	23,75	1,24	/	2,10	/	8,52	8,87	7,62
EG- Bad	22/ 32,3	5,99	21,16	1,22	/	1,79	/	7,49	7,49	6,25
EG -Kind 1	20/ 30,3	20,41	20,41	1,92	/	1,79	/	16,46	16,44	13,56
EG-Kind 2	20/ 30,3	24,26	16,86	1,92	/	1,79	/	16,40	16,50	13,6
DG- Studio	20/ 30,3	10,24	62,14	14,55	/	5,99	70,56	52,46	/	48,68
DG- Schlafen	20/ 30,3	16,66	33,25	8,08	/	4,10	44,68	33,16	/	29,48
DG- Bad	22/ 32,3	7,18	39,78	2,55	/	1,89	26,3	13,59	/	11,89

Die Innentemperaturen in den Bädern und dem Hausarbeitsraum weichen von den Norm-Innentemperaturen (siehe Anhang Tabelle 1) ab. Die Innentemperaturen der Räume wurden aus den Heizkörperdatenblättern entnommen (siehe Anhang Abbildung 6 bis Anhang Abbildung 10). In Tabelle 2 sind die Gesamtflächen der Bauteile dargestellt. Für die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 werden einige Flächen der Bauteile aufgeteilt, da z.B. nicht alle Innenwände eines Raumes an beheizten Räumen, sondern auch an unbeheizten Räumen grenzen. In den Berechnungen nach DIN EN 12831 müssen solche Flächen unterschiedlich betrachtet werden.

### 3.1.1 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831

Für die Heizlastberechnung wird das Programm TGA-Heizung von Hottgenroth verwendet. Um zu veranschaulichen, ob das Programm nach Norm arbeitet, wird in diesem Abschnitt anhand des Beispielgebäudes in 63674 Altstadt nach DIN EN 12831 die Heizlastberechnung Schritt für Schritt berechnet.

Für die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 werden U-Werte benötigt. Einige der U-Werte waren den Hauseigentümer bekannt, diese wurden übernommen. Die unbekannt U-Werte wurden aus dem Bauteilkatalog des Programmes TGA-Heizung Hottgenroth übernommen. Die U-Werte des Programmes basieren auf der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2015-Typologie für bestehende Gebäude. Der Tabelle 3 können die U-Werte des Ist-Zustandes entnommen werden.

Tabelle 3: U-Werte der Bauteile- IST-Zustand (eigene Darstellung)

Kurzbezeichnung der Bauteile	Bauteil	U-Wert $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
IT	Innentüren	1,84
AT	Außentür-KG	2,9
AT	Außentüren-EG	2,9
AW	Außenwand Gaube	0,7
AW	Außenwand (1979)	0,8
AW	Kellerwand (1979)	0,8
IW	Innenwand	1,7
DA	Dach (1979)	0,7
AF	Fenster-Giebel	1,1
AF	Dachgauben Fenster	1,1
AF	Holzfenster- 2-fach verglast (1979)	2,7
DE	Holzbalkendecke (1979)	0,4
FB	Bodenplatte (1979)	0,8
DE	Kellerdecke- Massivdecke (1979)	0,8

## EG-Wohnen

### Norm-Transmissionswärmeverluste

Die Berechnung wird am Raum EG-Wohnen dargestellt. Die Berechnungen zu den anderen Räumen werden im Anhang beigelegt. Zuerst werden für den Raum EG-Wohnen die Transmissionswärmeverluste, wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, berechnet.

Für die Berechnung der Flächen müssen die kompletten Flächen der Außenwände, die Hälfte der Flächen der Innenwände zu beheizten Räumen, die gesamte Fläche der Innenwand zu unbeheizten Räumen sowie die gesamten Geschossdecken berücksichtigt werden. Vorhandene Fenster und Türen müssen von den Flächen in der Wand abgezogen werden. In Tabelle 2 wurden die Fenster- und Türflächen bereits von den Wänden abgezogen (Beckmann 2020).

Im ersten Schritt werden die Transmissionswärmeverluste an die Umgebung berechnet. Dazu wurden die Flächen der Außenwand ( $30,38 \text{ m}^2$ ), der Fenster ( $7,96 \text{ m}^2$ ) und der Außentür ( $1,98 \text{ m}^2$ ) mit den jeweiligen U-Werten der Bauteile, die mit dem Wärmebrückenzuschlag  $0,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  addiert wurden, multipliziert. Damit ergibt sich folgende Rechnung aus der Gleichung [2].



$$H_{T,ie} = \left( 30,38 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 7,96 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,98 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,9 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) = 55,57 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Als Nächstes wurden die Transmissionswärmeverluste an unbeheizten Nachbarräumen berechnet. Um zu verdeutlichen, wie gerechnet worden ist, wurden die Bauteile zu den unbeheizten Räumen separiert. Folgende Rechnung ergibt sich aus den Gleichungen [4] und [5].

$$H_{T,iue(IW)} = 10,89 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) = 3,23 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(FB)} = \left( 3,57 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) + \left( 8,7 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 2,14 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(DE)} = 7,09 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 10)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) = 1,17 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(FB)} + H_{T,iue(DE)} = 6,54 \text{ W}$$

Im nächsten Schritt wurden die Transmissionswärmeverluste gegen beheizte Räume mit unterschiedlichen Innentemperaturen berechnet. Die Bauteile, die an beheizten Räumen mit identischer Raum-Innentemperatur grenzen, werden nicht betrachtet, da die Transmissionswärmeverluste null sind. Somit ergibt sich aus Formel [5] und [6] diese Rechnung.

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 18)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 7,37 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,83 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(DE)} = \left( \frac{(20-22)}{(20-(-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 5,01 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(20-20)}{(20-(-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 32,35 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,13 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(DE)} = 0,7 \text{ W}$$

Im letzten Schritt wurden mit der Gleichung [1] die Gesamt-Transmissionswärmeverluste für den Raum EG-Wohnen bestimmt.

$$\Phi_{T,i} = \left( 55,57 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 6,54 \text{ W} + 0,7 \text{ W} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 1903,14 \text{ W} = 1,90 \text{ kW}$$

### Norm-Lüftungswärmeverluste

Die Norm-Lüftungswärmeverluste wurden anhand des Beispiels B.4.2 aus der DIN/TS 12831:2020-04 berechnet. Zunächst wurde der Luftvolumenstrom durch Infiltration und ALD in der Lüftungszone nach Gleichung [14] berechnet.

$$q_{v,env,z} = q_{v,inf-add,z} = (q_{env,50} \cdot A_{env,z} + q_{v,ATD,50,z}) \cdot f_{qv,z} \cdot f_{e,z}$$

$q_{env,50} = 6,0 \frac{\text{m}^3}{(\text{m}^2 \cdot \text{h})}$ ; Tabelle 11 der DIN/TS 12831:2020-04 entnommen, Luftdichtheit mittel

$A_{env,z} = 581,93 \text{ m}^2$ ; Hüllfläche der Zonen, Summe Hüllflächen der Räume

$q_{v,ATD,50,z} = 0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ; keine Außenluftdurchlässe

$f_{qv,z} = 0,08$ ; Tabelle 13 der DIN/TS 12831:2020-04 entnommen

$f_{e,z} = 1,0$ ; balancierte Luft

$$q_{v,env,z} = q_{v,inf-add,z} = \left( 6,0 \frac{\text{m}^3}{(\text{m}^2 \cdot \text{h})} \cdot 581,93 \text{ m}^2 + 0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \cdot 0,08 \cdot 1,0 = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Als Nächstes muss der Außenluftvolumenstrom des Raumes durch die Gebäudehülle  $q_{v,env,i}$  bestimmt werden [13], dieser kann erst dann bestimmt werden, wenn  $q_{v,leak+ATD,i}$  [15] und  $q_{v,leak,z}$  [16] berechnet worden sind.

$$q_{v,leak,z} = (1 - 0) \cdot 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{70,57 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 33,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; 33,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 67,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Nun muss noch geprüft werden, ob der Außenluftvolumenstrom des Raumes durch die Gebäudehülle größer ist als der Mindestluftvolumenstrom. Dieser wird mit der Gleichung [12] berechnet. Der größer Wert von beiden ergibt den thermisch wirksamen Volumenstrom.

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 99,38 \text{ m}^3 = 49,69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{V}_{th} = q_{env/min} = \max \left( 67,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; 49,69 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 67,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Nach der Bestimmung des maximalen thermisch wirksamen Volumenstroms werden die Normlüftungswärmeverlustes des Raumes EG-Wohnen bestimmt. Damit ergibt sich aus der Gleichung [10] folgende Rechnung.

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 67,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 \text{ K} - (-10,3 \text{ K})) = 697,86 \text{ W}$$

### Norm Heizlast

Die Norm-Heizlast des Raumes EG-Wohnen wurde mit Gleichung [17] berechnet.

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 1903,14 \text{ W} + 697,86 \text{ W} = 2601 \text{ W}$$

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Transmission- und Lüftungswärmeverluste und die Norm-Heizlast der einzelnen Räume dargestellt. Zudem wurden die Lüftungswärmeverluste der Räume mit dem  $f_{i-z}=0,5$  multipliziert (siehe Formel [19]).

Die Berechnungen der weiteren beheizten Räume des Gebäudes befinden sich im Anhang.



Tabelle 4: Ergebnisse der Berechnungen der beheizten Räume des Beispielgebäudes (eigene Darstellung)

Raum	Transmissionswärmeverluste $\Phi_{T,i}$ W	Lüftungswärmeverluste $\Phi_{V,i}$		Normheizlast $\Phi_{HL,i}$ W
		Raum $\Phi_{V,env,min,i}$ W	Zone $\Phi_{V,leak,min,i}$ W	
Keller-Dusche	480	155	77	635
Keller-Sauna	592	173	86	765
Keller- Gast	500	174	87	674
Keller- Hobby	1099	424	212	1523
EG- Wohnen	1903	698	349	2601
EG-Küche	819	359	180	1178
EG- Hausarbeitsraum	303	263	132	566
EG-Bad	437	152	76	589
EG-Kind 1	825	416	208	1241
EG-Kind 2	924	420	210	1344
DG-Studio	2806	1228	614	4034
DG-Schlafen	2496	894	447	3390
DG-Bad	984	389	195	1373
	$\sum$ 14.168		$\sum$ 2.873	

$$\Phi_{HL,Geb.} = 14.168 + 2.873 = 17.041 \text{ W} = 17,04 \text{ kW}$$

Somit ergibt sich für das Gebäude eine Gesamtheizlast von 17,04 kW. Die spezifische Normheizlast des Gebäudes ergibt sich aus der Gesamtheizlast und der Nettogrundfläche:

$$\varphi_{HL} = \frac{\Phi_{HL,Geb.}}{A_{NGF}} = \frac{17041 \text{ W}}{246 \text{ m}^2} = 69,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die mit dem Programm, TGA-Heizung, berechnete Gesamtheizlast des Gebäudes ergibt 17,079 kW, die spezifische Heizlast liegt bei 70 W/m<sup>2</sup>. Diese Abweichung in den letzten beiden Stellen ergibt sich durch Rundungsfehler. Zudem rechnet das Programm zu den Räumen im Dachgeschoss einen Zuschlag von 4 % zu den Lüftungswärmeverlusten dazu. In der DIN/TS 12831:2020-04 wurde der Zuschlag von 4 % zu den Lüftungswärmeverlusten von beheizten Dachgeschossräumen nicht erwähnt. Die mit dem Programm errechnete Heizlastberechnung kann dem elektronischen Anhang Datei „Heizlastberechnung\_Ist-Zustand“ entnommen werden.

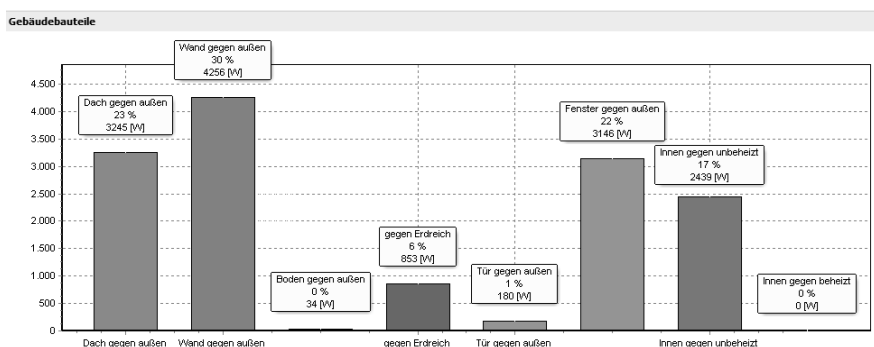


Abbildung 9: Transmissionswärmeverluste der Bauteile im IST-Zustand (erstellt mit TGA-Heizung)

In Abbildung 9 wird veranschaulicht, durch welche Bauteile das Gebäude die meisten Transmissionswärmeverluste verzeichnet.

Bei den Varianten 1 und 2 werden die Heizlastberechnungen mithilfe des Programmes TGA-Heizung berechnet.

### 3.1.2 Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B

Für die Berechnung des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B wurde das Programm Optimus 3D plus von der Firma Hottgenroth verwendet. Dabei wurde vorher betrachtet, wie das Programm Berechnungen durchführt.

Die Berechnungen werden an dem Raum EG-Küche des Beispielgebäudes erläutert. Dabei wurde die Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Raum mithilfe der Formel [23] berechnet. Für die Systemtemperatur wurde 50/40/20 °C angenommen. Die Systemtemperatur ist für die Berechnung von Heizflächen eine Auslegungsgröße. Dabei wird die Vorlauf-, die Rücklauf und die Norm-Innentemperatur angegeben (z.B. 50/40/20 °C), (OldBo 2019).

$$\Delta\vartheta_H = \frac{(50 - 40)}{\ln\left(\frac{(50 - 20)}{(40 - 20)}\right)} = 24,66 \text{ K}$$

Im nächsten Schritt wurde die spezifische Wärmeleistung des Fußbodenheizkreises mit der Gleichung [21] bestimmt. Dazu mussten vorab die unbekannt Parameter der Gleichung [21] und [22] bestimmt werden. Der Verlegerabstand und der Fußbodenbelag des Raumes EG-Küche können der Anhang Abbildung 9 entnommen werden. Die Estrichüberdeckung wurden mit 0,045 m angenommen.

$$a_B = \frac{\frac{1}{10,8} + \frac{0,045}{1}}{\frac{1}{10,8} + \frac{0,045}{1,2} + 0,015} = 0,948$$

- $R_{\lambda, \text{Fliesen}} = 0,015 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$ ; siehe Anhang Abbildung 13
- $\lambda_E = 1,2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ ; bestimmt mit Hilfe der Tabelle C.1 (Zementestrich) aus der DIN EN 1264-2

$$q_{\text{Küche}} = 6,7 \cdot 0,948 \cdot 1,23^{-1} \cdot 1,057^{0,2025} \cdot 1,04^{-1} \cdot 24,66 = 123,88 \text{ W/m}^2$$

- $m_T = 1 - \frac{0,15 \text{ m}}{0,075} = -1 \text{ m}$
- $m_U = 100 \cdot (0,045 - 0,045 \text{ m}) = 0,2025 \text{ m}$
- $m_D = 250 \cdot (0,016 \text{ m} - 0,020) = -1 \text{ m}$

Damit ergibt sich aus Gleichung [20] folgenden Wärmeleistung der FBH für den Raum EG-Küche:

$$Q_{HK} = 123,88 \cdot 10,34 = 1280,94 \text{ W}$$

Im nächsten Schritt wurde der Massenstrom nach Gleichung [25] berechnet. Die Spreizungen zwischen der Heizfläche und der Vorlauftemperatur wurden dem Programm entnommen, da die Berechnung den Rahmen der Ausarbeitung sprengen würden.

$$\dot{m} = \frac{1178 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s}}{5 \text{ K} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = 202,42 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Nachdem der Massenstrom der Heizfläche bestimmt ist, kann der Volumenstrom (auch Durchfluss genannt) mit Gleichung [24] berechnet werden.

$$\dot{V} = \frac{202,42 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{992,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,204 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 3,40 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

Die  $K_V$ -Werte wurden dem Programm entnommen. Aus der Gleichung [26] ergibt sich damit für den Druckverlust:

$$K_V = \frac{0,204 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\sqrt{\frac{0,931 \text{ bar}}{1 \text{ bar}}}} = 0,211 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Die errechneten Werte für die anderen Räume können der Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Berechnungsergebnisse des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B -IST-Zustand (Entwurf aus Optimus 3D)

Raumdaten			Verteilerdaten		Heizflächendaten			Verteilerventile		
Raum	Beheizte Fläche m <sup>2</sup>	Heizlast W	Verteiler	Verteiler-zulauf m	VA	t <sub>R</sub> °C	Normleistung W	K <sub>V</sub> -Wert m <sup>3</sup> /h	Δp mbar	Ḃ <sub>HK</sub> l/min
Keller-Dusche	10,3	631	Verteiler 1	5	15	31	1278,46	0,056	1194	1,02
Keller-Sauna	12,6	763	Verteiler 1	5	15	31	1557,20	0,067	1179	1,19
Keller-Gast	13,5	673	Verteiler 1	5	15	27	1290,58	0,042	1200	0,76
Keller-Hobby	28,1	1518	Verteiler 1	5	15	25	1740,54	0,040	1200	0,73
			Verteiler 1	5	15	25	1741,78	0,040	1200	0,73
EG-Wohnen	39,8	2601	Verteiler 2	10	15	29	2477,64	0,100	1022	1,69
			Verteiler 2	10	15	29	2446,67	0,101	1027	1,71
EG-Küche	10,3	1178	Verteiler 2	10	15	35	1280,94	0,211	931	3,40
EG-Hausarbeitsraum	7,6	567	Verteiler 2	10	15	26	943,98	0,032	1162	0,58
EG-Bad	6,3	587	Verteiler 2	10	15	35	774,26	0,096	1122	1,70
EG-Kind 1	13,6	1242	Verteiler 2	10	15	35	1298,24	0,244	775	3,58
EG-Kind 2	13,6	1345	Verteiler 2	10	15	35	1302,07	0,273	728	3,88
DG-Studio	48,7	4088	Verteiler 3	15	15	35	2141,79	0,605	333	5,82
			Verteiler 3	15	15	35	2141,79	0,605	333	5,82
DG-Schlafen	29,5	3429	Verteiler 3	15	15	35	1435,00	0,353	692	4,89
			Verteiler 3	15	15	35	1435,00	0,353	692	4,89
DG-Bad	11,9	1386	Verteiler 3	15	15	35	1502,13	0,256	862	3,96

Der  $K_{VS}$ -Wert ist der Wert bei voll geöffnetem Ventil (Schlobach 2022b), der liegt hier bei 0,605 m<sup>3</sup>/h (rot markiert in Tabelle 5). Die Berechnungen können der Excel-Datei aus dem elektronischen Anhang „FBH\_Ist-Zustand“ entnommen werden. Der Volumenstrom der Pumpe ergibt sich aus der Gleichung [27]:

$$Q_{PU} = 2781,45 \frac{l}{h}$$

Die Förderhöhe der Pumpe wird mit Gleichung [28] bestimmt. Der Fußbodenheizkreis mit dem höchsten Druckverlust entspricht ungefähr der Förderhöhe der Pumpe (hier: FBH Keller-Gast):

$$H \approx 1200 \text{ mbar} \approx 12,00 \text{ mWS}$$

Die Werte für die Umwälzpumpe wurden in den Rechner der WILO Pumpenauswahl eingetragen Wilo-Select 4. Dieser sucht die passende Pumpe mithilfe des Pumpendiagramms aus. Die x-Achse eines Pumpendiagramms zeigt den Förderstrom auf, die y-Achse die Förderhöhe. Als Nächstes wird der Arbeitsbereich der Pumpe definiert, hier ist der maximal berechnete Förderstrom und die maximale berechnete Förderhöhe wichtig. Sie bilden den Betriebspunkt der Pumpe. Der Betriebspunkt einer Pumpe muss im roten Bereich liegen (siehe Abbildung 10). Die Pumpe, die für diese Angaben z.B. in Betrachtung käme, ist die WILO Atmos GIGA-B32/200.1-0,75/4. Für die Auslegung der Pumpe können auch andere Pumpenhersteller verwendet werden, wie z.B. Grundfos, Biral usw.

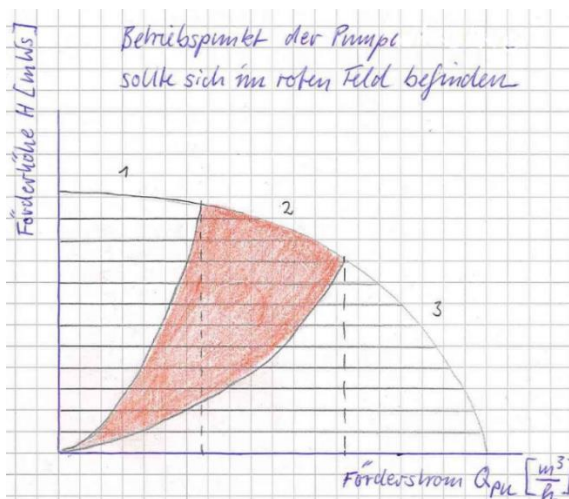


Abbildung 10: Arbeitsbereich einer Pumpe (Schlobach 2022b)

Die errechnete Einstellwerte mit dem Programm Optimus 3D plus für den IST-Zustand des Gebäudes können der Anhang Abbildung 14 entnommen werden. Der berechnete Volumenstrom mit dem Programme ergibt  $Q_{PU} = 3143 \text{ l/h}$ , die Förderhöhe bei  $H = 1224 \text{ mbar}$  in Meter Wassersäulen  $H = 12,24 \text{ mWS}$ . Die Abweichungen der Ergebnisse ergeben sich durch den Volumenstrom, hier rechnet das Programm eventuell mit anderen Werten für die unbekannt Parameter. Zum einen konnte das Programm mit einer anderen Dichte des Wassers gerechnet haben. Zudem könnte bei der Berechnung des Massenstromes für den Teilwärmehdurehgangswiderstand des Fußbodenaufbaus nach unten Standardwerte verwendet werden.

### 3.1.3 Jahresarbeitszahl

Im Ist-Zustand des Gebäudes befindet sich ein Heizkessel aus dem Baujahr 1991 (siehe Anhang Abbildung 5), der mit Öl heizt. Nach GEG §72 Absatz 2 muss der Heizkessel ausgetauscht werden, da

er bereits über 30 Jahre in Betrieb ist (Bundesregierung 08.08.2020). Der Heizkessel wird im IST-Zustand durch eine LWP ersetzt.

Die Außenluft als Wärmequelle ist überall vorhanden und muss nicht erschlossen werden. Zudem ist die LWP nicht genehmigungspflichtig und viele Hersteller verkaufen die WQA bereits vollständig fertig. Wichtig für die Planung der LWP ist zu entscheiden, wo der Einsatzbereich liegt und in welcher Betriebsweise die WP arbeiten soll. Weitere Planungsaspekte sind die jährlichen Temperaturschwankungen der Außenluft, sowie die Aufstellung der WQA und die Schallemissionen (Glaesmann 2022).

Im Folgenden wird gezeigt, wie eine LWP, grafisch und rechnerisch ausgelegt wird. Die Auslegung erfolgt durch die Normaußentemperatur (hier:  $-10,3\text{ °C}$ ). Die LWP wird in diesem Fall für die Beheizung und für die Brauchwarmwassererwärmung ausgelegt. Ein Zuschlag für das Brauchwarmwasser auf die Gebäudegesamtheizlast von  $17,079\text{ kW}$  wird nicht berücksichtigt, da in der Berechnung der Gebäudeheizlast bereits ausreichend Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden, die laut Stiebel Elektron das Brauchwarmwasser für ein Gebäude abdecken können (Glaesmann 2022). Aus der Tabelle 6.6 der Quelle „Wärmepumpenheizungen“ von Nicolas Glaesmann kann bei Einfamilienhäusern der Zuschlag weggelassen werden (Glaesmann 2022). Für die Betriebsweise der LWP wurde der monoenergetische Betrieb gewählt, da bei einer monovalenten Betriebsweise, die LWP in den Übergangszeiten überdimensioniert wäre und somit unwirtschaftlich laufen würde (Glaesmann 2022).

Als Erstes muss ein Leistungsdiagramm einer Wärmepumpe ausgewählt werden. Für den Ist-Zustand des EFH wurde die WP von Buderus Logatherm WLW196i-14 IR gewählt, auch andere WP können gewählt werden, denn der Ablauf ist identisch. Danach muss die Heizgrenztemperatur festgelegt werden, das ist der Punkt, an dem die Heizlast  $0\text{ kW}$  ist (Glaesmann 2022). Dieser Punkt wurde mithilfe des JAZ-Rechners des Bundesverbands Wärmepumpe e.V. bestimmt. Er liegt bei Altbauten bei  $15\text{ °C}$  (bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V.). Aus der Heizgrenztemperatur und dem Punkt der Heizlast des Gebäudes bei der Normaußentemperatur ergibt sich die Gebäudekennlinie.

Als Nächstes muss für den monoenergetischen Betrieb der Bivalenzpunkt ermittelt werden. Dies ist der Punkt, an dem sich der 2. Wärmeerzeuger (hier Heizstab), einschaltet (siehe Abschnitt 2.1). Der Schnittpunkt zwischen der Gebäudekennlinie und der Leistungskennlinie der Wärmepumpe ergibt den Bivalenzpunkt. Der Bivalenzpunkt sollte bei einer Normaußentemperatur von ca.  $-10\text{ °C}$  zwischen  $-2\text{ °C}$  und  $-5\text{ °C}$  liegen (Glaesmann 2022).

In Abbildung 11 wird die grafische Auslegung der Wärmepumpe für den Ist-Zustand gezeigt (Leistungskurve 4 für Logatherm WLW196i-14 IR). Der grafisch ermittelte Bivalenzpunkt der Wärmepumpe liegt bei ca.  $-4\text{ °C}$ , somit kann die LWP für den Betrieb des Gebäudes genutzt werden. Die Gebäudeheizlast bei der Bivalenztemperatur von  $-4\text{ °C}$  liegt bei ca.  $11\text{ kW}$ .

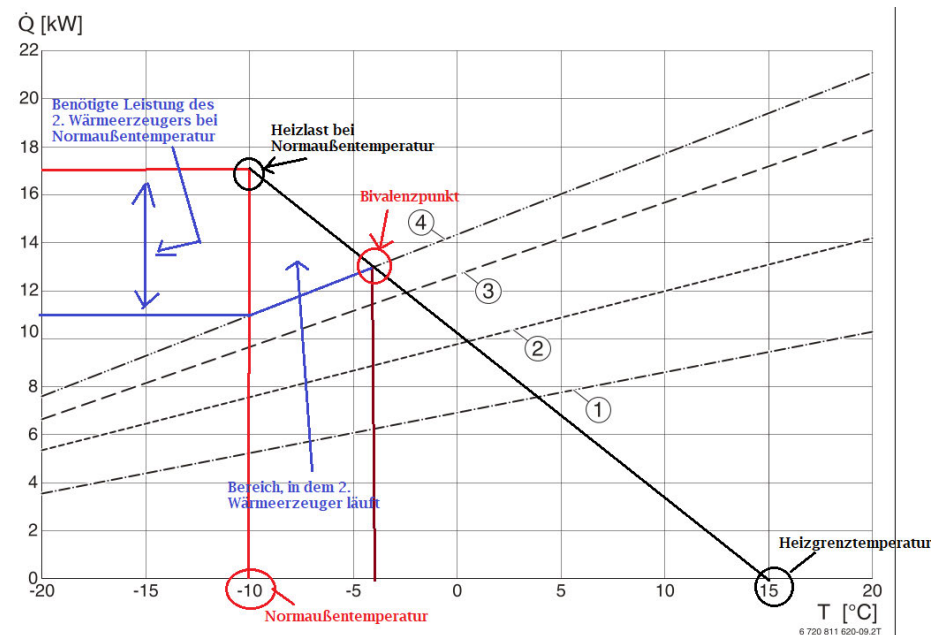


Abbildung 11: grafische Auslegung der LWP Logatherm WLW196i-14 IR (eigene Darstellung)

Die Gebäudeheizlast bei der Bivalenztemperatur kann auch rechnerisch mit folgender Formel ermittelt werden (Glaesmann 2022):

$$\dot{Q}_{H,B} = \dot{Q}_{H,Ges} \cdot \frac{(\vartheta_{HG} - \vartheta_B)}{(\vartheta_{HG} - \vartheta_N)} = 17,079 \cdot \frac{(15 - (-4))}{(15 - (-10,3))} = 12,83 \text{ kW} \quad [36]$$

- $\dot{Q}_{H,B}$ : Gebäudeheizlast bei vorgesehener Bivalenztemperatur in kW
- $\dot{Q}_{H,Ges}$ : Gesamt-Heizlast des Gebäudes bei Normaußentemperatur in kW
- $\vartheta_{HG}$ : Heizgrenztemperatur in °C
- $\vartheta_B$ : Bivalenztemperatur in °C
- $\vartheta_N$ : Normaußentemperatur in °C

Für die Berechnung wurde der grafisch ermittelte Bivalenzpunkt in Gleichung [29] eingesetzt, es könnten wie bereits vorher erwähnt alle Temperaturen zwischen -2 °C und -5 °C eingesetzt werden.

Anhand der ermittelten Gebäudeheizlast bei der Bivalenztemperatur kann der Leistungsanteil der Wärmepumpe bestimmt werden (Glaesmann 2022):

$$\xi = \frac{\dot{Q}_{WP}}{\dot{Q}_{H,ges}} = \frac{12,38}{17,079} = 0,725 = 72,5\% \quad [37]$$

- $\xi$ : Leistungsanteil der Wärmepumpe
- $\dot{Q}_{WP} = \dot{Q}_{H,B}$ : Heizleistung bei Normaußentemperatur in kW

Aus dem Leistungsanteil der Wärmepumpe kann der Deckungsanteil  $\alpha$  der Wärmepumpe bestimmt werden. Der Deckungsanteil einer Wärmepumpe beschreibt den Energieanteil, den eine Wärmepumpe benötigt, um den jährlichen Heizwärme- und Warmwasserbedarf eines Gebäudes zu decken (Glaesmann 2022). Der Deckungsanteil kann mithilfe der Tabelle 28 aus dem VDI 4650 Blatt 1 bestimmt werden

(siehe Anhang Abbildung 15). Ein Leistungsanteil von 72,5 % entspricht einem Deckungsanteil von  $\alpha = 0,99 = 99\%$ .

Im nächsten Schritt wird der Elektroheizstab der Anlage dimensioniert. Dieser läuft bei der Bivalenztemperatur parallel mit der Wärmepumpe. Damit kann die benötigte Leistung des Elektroheizstabes mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{el} = \dot{Q}_{H,ges} - \dot{Q}_{WP} = 17,079 - 12,38 = 4,7 \text{ kW} \quad [38]$$

- $\dot{Q}_{el}$ : erforderliche Leistung des Elektroheizstabes in kW

Als Nächstes wird die Jahresarbeitszahl für LWP nach VDI 4650 Blatt 1 berechnet. Alle COP Werte der LWP Logatherm WLW196i-14 können der Anhang Abbildung 16 entnommen werden. Zudem wird das Abtauen der Logatherm WLW196i-14 mittels Kreislaufumkehr durchgeführt, dafür beträgt der Korrekturabschlag nach VDI 4650 Tabelle 10  $S_{AB} = 0,3$ . Damit ergibt sich durch Formel [29] eine korrigierte Leistungszahl bei A2/W35 von:

$$COP_{N2(A2/W35)}^* = 4,03 - 0,3 = 3,73$$

Die Temperaturdifferenz bei der Prüfstandmessung ergibt  $\Delta\vartheta_M = 5$  K. Die Temperaturdifferenz im Betrieb kann dem Hydraulischen Abgleich nach Verfahren B entnommen. Bei einer Vorlauftemperatur von  $40^\circ\text{C}$  und einer Rücklauftemperatur von  $34^\circ\text{C}$  ergibt sich eine Differenz von  $\Delta\vartheta_B = 6$  K. Damit ergibt sich aus Tabelle 1 der VDI 4650 für  $F_{\Delta\vartheta} = 1,01$ . Aus Tabelle 12 der VDI 4650 ergeben sich die weiteren Korrekturfaktoren. Die JAZ der Heizung ergibt nach Formel [30]:

$$SCOP_H = \frac{1,01}{\frac{0,024}{2,55} + \frac{0,488}{3,73} + \frac{0,43}{4,82}} = 4,40$$

Die Warmwassertemperatur liegt bei  $55^\circ\text{C}$ . Die Temperaturdifferenz bei der Prüfstandmessung und im Betrieb ergibt  $\Delta\vartheta_M = 5$  K und  $\Delta\vartheta_B = 5$  K. Damit ergibt sich für  $F_{\Delta\vartheta} = 1,00$  aus Tabelle 1 der VDI 4650. Für  $F_1 = 0,905$  aus Tabelle 24 der VDI 4650. Da es sich um einen Speicher mit innenliegenden Heizwasser-Rohrschlangen handelt, ist  $F_2 = 0,716$ . Damit ergibt sich nach Formel [31] folgende JAZ für das Trinkwasser über die LWP:

$$SCOP_W = 4,82 \cdot 1,00 \cdot 0,905 \cdot 0,716 = 3,12$$

Für die Gesamtjahresarbeitszahl ergibt sich mithilfe der Formel [32]:

$$SCOP_{WPA} = \frac{1}{(1 - 0,18) \cdot \frac{0,99}{4,40} + 0,18 \cdot \frac{0,99}{3,12} + (1 - 0,99)} = 3,98$$

Der JAZ-Rechner des Bundesverbands Wärmepumpen e.V. hat für den  $SCOP_H = 4,4$ , für den  $SCOP_W = 3,1$  und für den  $SCOP_{WPA} = 4,1$  (siehe Anhang Abbildung 17). Der Unterschied der Gesamtjahresarbeitszahl der LWP liegt an den unterschiedlich errechneten Deckungsanteil der LWP. Im elektronischen Anhang können die Berechnungen der Excel-Datei „JAZ-Berechnung“ entnommen werden.

### 3.1.4 Energetische Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird der Ist-Zustand des Gebäudes, der Ist-Zustand mit einem neuen Heizkessel (HK) sowie der Ist-Zustand mit einer LWP energetisch bewertet. Die energetische Bewertung wird für alle Zustände mit dem Programm von Hottgenroth Energieberater 18599 3D plus durchgeführt. Für die Berechnungsgrundlage wurde die DIN 18599 ausgewählt, da sie detaillierter ist und die DIN 4108/4701 ab 2024 außer Kraft tritt (Beckmann 2020). Die wichtigsten Einstellungsparameter im Programm werden im Folgenden beschrieben.

Für die korrekte Erfassung der Gebäudegeometrie müssen vorab die charakteristische Breite und Länge, die Geschosshöhe, die Wohneinheit, die Anzahl der Geschosse, das Baujahr und die Angaben zum Keller im Programm hinterlegt werden. Mithilfe dieser Angaben kann das Programm die Bezugsgröße, der Gebäudenutzfläche, bestimmen. Aus den eingegebenen Werten des Beispielgebäudes ergibt sich eine Gebäudenutzfläche von 267 m<sup>2</sup>.

Im nächsten Schritt müssen die Gebäudeparameter eingestellt werden. Dazu muss die Gebäudebauart (=mittelschwer ( $c_{wirk} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )), die Lüftung (=freie Lage, mehr als eine Fassade und Kategorie III-Gebäudebestand ( $n_{50} = 6,0 \text{ 1/h}$ )) und die Wärmebrücken (=  $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) eingestellt werden. Der Parameter Standort kann nicht geändert werden (siehe Abschnitt 2.6). Als nächstes bestimmt das Programm, aus den eingegebenen U-Werten des Gebäudes (siehe Tabelle 3) den Transmissionswärmebedarf  $H'_T$ . Dieser ergibt für das Gebäude im Ist-Zustand  $H'_T = 0,865 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (siehe Anhang Abbildung 18).

Anschließend wird die Anlagentechnik erfasst. Zuerst werden die Daten für das Heizungssystem des Ist-Zustandes mit dem alten Heizkessel definiert. Dabei wird die Übergabe und Verteilung und der Wärmeerzeuger mit den bekannten Daten aus dem hydraulischen Abgleich und den Daten des Heizkessels aus Anhang Abbildung 5 definiert. Die wichtigsten Daten können den elektronischen Anhang-Datei „Ist-Zustand\_Energieberater“, „Ist-Zustand mit neuem HK\_Energieberater“ und „Ist-Zustand mit LWP\_Energieberater“ entnommen werden.

Als Nächstes werden die Daten für das Warmwasser eingetragen. Das Warmwasser des Gebäudes wird über den HK, der auch die Raumwärme zur Verfügung stellt, erwärmt. Die Beleuchtung wurde in der Berechnung nicht berücksichtigt. Im elektronischen Anhang „Ist-Zustand\_Energieberater“, „Ist-Zustand mit neuem HK\_Energieberater“ und „Ist-Zustand mit LWP\_Energieberater“ können alle wichtigen Daten für die Bewertung des Gebäudes nach DIN 18599 entnommen werden.

Die Energiebilanz des Gebäudes für die unterschiedlichen Ist-Zustände können Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 entnommen werden. Dabei werden die Ergebnisse in kWh/a und in kWh/m<sup>2</sup>·a dargestellt. Die Monatsbilanzierung der Nutzenergie, der Endenergie und der Primärenergie des Ist-Zustandes können dem elektronischen Anhang „Ist-Zustand\_Energieberater“, „Ist-Zustand mit neuem HK\_Energieberater“ und „Ist-Zustand mit LWP\_Energieberater“ entnommen werden.



Tabelle 6: Ergebnisse der Energiebilanz des Ist-Zustand mit dem alten HK (Ergebnisse aus dem Energieberater 3D plus)

In kWh/a In kWh/m <sup>2</sup> · a	Gesamt	Heizung	Warmwasser
Nutzenergie	56.759	54.676	2.083
	212,35	204,56	7,79
Endenergie	76.917	71.475	5.442
	287,77	267,41	20,36
Primärenergie	80.593	74.914	5.679
	301,52	280,28	21,25

Tabelle 7: Ergebnisse der Energiebilanz des Ist-Zustand mit dem neuen HK (Ergebnisse aus dem Energieberater 3D plus)

In kWh/a In kWh/m <sup>2</sup> · a	Gesamt	Heizung	Warmwasser
Nutzenergie	57.336	55.253	2.083
	214,51	206,72	7,79
Endenergie	74.192	69.154	5.038
	277,58	258,73	18,85
Primärenergie	77.835	72.569	5.266
	291,20	271,50	19,70

Tabelle 8: Ergebnisse der Energiebilanz des Ist-Zustand mit der LWP (Ergebnisse aus dem Energieberater 3D plus)

In kWh/a In kWh/m <sup>2</sup> · a	Gesamt	Heizung	Warmwasser
Nutzenergie	54.984	52.902	2.083
	205,71	197,92	7,79
Endenergie	32.204	30.961	1.242
	120,48	115,84	4,65
Primärenergie	57.966	55.730	2.236
	216,87	208,50	8,37

Die Bewertung entsprechend der GEG-Anforderung kann für die unterschiedlichen Ist-Zustände der Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Bewertung des Gebäudes entsprechend der GEG-Anforderung (Ergebnisse aus dem Energieberater 3D plus)

	Ist-Zustand mit altem HK	Ist-Zustand mit neuem HK	Ist-Zustand mit LWP	Mod. Altbau	GEG-Neubau	GEG-15%	GEG-30%	GEG-50%
Jahres-Primärenergiebedarf $q_p$ in kWh/m <sup>2</sup> · a	301,52	291,20	216,87	137,21	53,90	45,82	37,73	26,95
Transmissionswärmeverluste $H'_T$ in W/m <sup>2</sup> · K	0,865	0,865	0,865	0,351	0,351	0,298	0,246	0,176

Der Jahres-Primärenergiebedarf wurde bei beiden Varianten zu dem Referenzwert aus der GEG-Anforderungen für modernisierte Altbauten überschritten. Auch der Transmissionswärmeverluste wird in beiden Varianten nicht eingehalten.

### 3.2 Variante 1

In Variante 1 werden das Dach, die Haustür und die Nebeneingangstür im EG, die Kellerdecke und die Innenwände zu den unbeheizten Räumen/Abseiten (Keller und DG) saniert. Diese Sanierungsoptionen

wurden aufgrund der Transmissionswärmeverluste in Abbildung 9 gewählt. Zudem wird für das Heizen und die Warmwasseraufbereitung eine SWP mit Erdkollektoren ausgelegt.

### 3.2.1 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831

In der Tabelle 10 werden die veränderten U-Werte der sanierten Bauteile dargestellt. Alle Bauteile, die in der Tabelle 10 nicht aufgelistet wurden, bleiben unverändert (siehe Tabelle 3). Das gilt auch für alle weiteren Parameter, die für die Berechnung der Heizlastberechnung benötigt werden.

Tabelle 10: Veränderte U-Werte der sanierten Bauteile (eigene Darstellung)

Kurzbezeichnung der Bauteile	Bauteil	U-Wert $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
AT	Außentüren-EG	1,3
AW	Außenwand Gaube	0,184
IW	Innenwand zu unbeheizten Räumen/Abseiten	0,297
DA	Dach	0,184
DE	Kellerdecke	0,226

Die neuen U-Werte der veränderten Bauteile wurden mithilfe von Ubakus berechnet. Die Grundlage der Berechnung waren die U-Werte des Ist-Zustandes. Durch die U-Werte wurde für jedes Bauteil ein Beispiel Schichtaufbau genommen. Nachdem der Ist-Zustand in Ubakus dargestellt war, wurden die Bauteile aus Tabelle 10 saniert. Den Schichtaufbau der Bauteile vom Ist-Zustand zur sanierten Option können Anhang Abbildung 19 bis Anhang Abbildung 23 entnommen werden.

Die Außenwände der Dachgaube wurden genauso wie das Dach gedämmt. Die Kellerdecke wurde nicht vollständig saniert. Der U-Wert für die Kellerdecke von  $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  darf nicht überschritten werden (Bundestag 08.08.2020). Zudem ist ein Teil der Kellerdecke gedämmt, wo die beheizten EG-Räume an den darunterliegenden unbeheizten Kellerräumen liegen. Da hier die Temperaturunterschiede der beheizten zu den unbeheizten Räumen einen größeren Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes haben als die Wärmeverluste von beheizten zu beheizten Räumen (siehe Formel [3], [5]). Der U-Wert nach dem GEG Anlage 7 von  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  sollte nicht überschritten werden. Die Sanierung der Innenwände von beheizten zu unbeheizten Räumen erfolgte nachfolgendem Prinzip. Dabei wurden die Innenwände, die zwischen einem beheizten und einem unbeheizten Raum liegen, saniert. Außentüren, die im EG an beheizten Räumen grenzen, sind durch neue Modelle, die ein besseren Wärmedurchgangskoeffizienten haben, ausgetauscht wurden.

Nachdem die neuen U-Werte des Beispielgebäudes verändert sind, konnten diese im Programm TGA-Heizung im CAD-Modell verändert werden. Mit den neuen U-Werten wurde die Norm-Heizlast der beheizten Räume und des Gebäudes bestimmt (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Ergebnisse der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831-Variante 1 (simuliert mit TGA-Heizung)

Raum	Transmissionswärmeverluste $\Phi_{T,i}$ W	Lüftungswärmeverluste $\Phi_{V,i}$		Normheizlast $\Phi_{HL,i}$ W
		Raum $\Phi_{V,env,min,i}$ W	Zone $\Phi_{V,leak,min,i}$ W	
Keller-Dusche	393	154	77	548
Keller-Sauna	452	144	72	625
Keller- Gast	402	147	73	576
Keller- Hobby	848	422	211	1271
EG- Wohnen	1772	704	352	2476
EG-Küche	767	364	182	1131
EG- Hausarbeitsraum	274	264	132	537
EG-Bad	436	152	76	587
EG-Kind 1	824	417	209	1242
EG-Kind 2	924	421	210	1345
DG-Studio	1407	1282	641	2689
DG-Schlafen	1588	934	467	2522
DG-Bad	552	403	202	955
	$\Sigma$ 10.640		$\Sigma$ 2.931	

$$\Phi_{HL,Geb.} = 10.640 + 2.931 = 13.571 \text{ W} = 13,6 \text{ kW}$$

Somit ergibt sich für das Gebäude eine Gesamtheizlast von 13,6 kW. Die spezifische Normheizlast des Gebäudes ergibt:

$$\varphi_{HL} = \frac{\Phi_{HL,Geb.}}{A_{NGF}} = \frac{13571 \text{ W}}{246 \text{ m}^2} = 55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Der prozentuale Anteil der Transmissionswärmeverluste der Bauteile in Variante 1 können dem Anhang Abbildung 24 entnommen werden. Durch die Sanierungen sinkt damit die Gesamtheizlast des Gebäudes zum Ist-Zustand um 3.508 W, prozentual gesehen um 20,5 %.

### 3.2.2 Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B

Der hydraulische Abgleich nach Verfahren B wurde für die Variante 1 mit dem Programm Optimus 3D plus von der Firma Hottgenroth durchgeführt. Die Vorlauftemperatur liegt bei Variante 1 bei 40 °C, die Rücklauftemperatur bei ca. 33 °C. Die Berechnungsergebnisse zur Einstellung der Fußbodenheizung sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Berechnungsergebnisse für den hydraulischen Abgleich-Variante 1 (Entwurf aus Optimus 3D plus)

Raumdaten			Verteilerdaten		Heizflächendaten			Verteilerventile		
Raum	Beheizte Fläche $\text{m}^2$	Heizlast W	Verteiler	Verteiler-zulauf m	VA cm	$t_R$ °C	Norm-leistung W	Kv-Wert $\text{m}^3/\text{h}$	$\Delta p$ mbar	Durch-fluss l/min
Keller-Dusche	10,3	548	Verteiler 1	5	15	28	1280	0,053	624	0,70
Keller-Sauna	12,6	625	Verteiler 1	5	15	27	1559	0,054	621	0,71
Keller-Gast	13,5	576	Verteiler 1	5	15	25	1292	0,042	626	0,56

Keller-Hobby	28,1	1271	Verteiler 1	5	15	25	1743	0,047	623	0,62
			Verteiler 1	5	15	25	1744	0,047	623	0,62
EG-Wohnen	39,8	2476	Verteiler 2	10	15	28	2481	0,153	462	1,73
			Verteiler 2	10	15	28	2450	0,150	466	1,71
EG-Küche	10,3	1131	Verteiler 2	10	15	35	1282	0,370	350	3,65
EG-Hausarbeitsraum	7,6	537	Verteiler 2	10	15	26	945	0,048	580	0,60
EG-Bad	6,3	587	Verteiler 2	10	15	35	775	0,159	540	1,94
EG-Kind 1	13,6	1242	Verteiler 2	10	15	35	1300	0,572	193	4,18
EG-Kind 2	13,6	1345	Verteiler 2	10	15	35	1304	-	145	4,45
DG-Studio	48,7	2689	Verteiler 3	15	15	33	2143	0,309	377	3,16
			Verteiler 3	15	15	33	2143	0,309	377	3,16
DG-Schlafen	29,5	2522	Verteiler 3	15	15	35	1436	0,416	361	4,17
			Verteiler 3	15	15	35	1436	0,416	361	4,17
DG-Bad	11,9	955	Verteiler 3	15	15	35	1503	0,260	474	2,98

Der berechnete Volumenstrom für die Pumpe liegt bei 2347 l/h. Die errechnete Förderhöhe liegt bei 639 mbar, das ergibt 6,39 mWS (Meter Wassersäule). Die Pumpe, die für diese Angaben z.B. in Betrachtung käme, ist die WILO Atmos GIGA-B 32/115.1-0,25/4.

### 3.2.3 Jahresarbeitszahl

Für die Variante 1 wird als Wärmeerzeuger für das Heizen und die Brauchwarmwassererwärmung eine monovalente SWP mit Erdkollektoren ausgelegt.

Für die Auslegung von WP in monovalenter Betriebsweise wird die Heizlast bei der Normaußentemperatur benötigt. Die Leistung der WP muss dabei bei der Normaußentemperatur gleich oder größer der Heizlast des Gebäudes sein. Die monovalente Betriebsweise wird meistens für die Auslegung von SWP und Wasser-Wasser-WP (WWP) verwendet, da die Quelle der beiden WP eine fast ganzjährige konstante Temperatur aufweist und somit die Leistung und die Effizienz nahezu gleichbleibt. Somit ist die Leistungskurve von WWP und SWP eine Konstante (Glaesmann 2022).

Bei SWP wird die Leistungskurve oftmals in Abhängigkeit der Soleeintrittstemperatur angegeben. Mit steigender Soleeintrittstemperatur steigt die Leistungskurve der WP an. Die Auslegung wird mit der minimalen Soleeintrittstemperatur durchgeführt. Meistens wird für die Angabe die Temperatur von 0 °C gewählt. Die Heizlast der SWP muss bei 0 °C Soleeintrittstemperatur größer als die Gebäudeheizlast sein (Glaesmann 2022). Bei der ausgewählten SWP-Buderus Logatherm WSW196i.2-16 TP50 liegt bei dem Betriebspunkt B0/W35 die Leistung bei 15,53 kW (siehe Anhang Abbildung 27). Somit liegt die Leistung der SWP über der Gebäudeheizlast (=13,6 kW) bei der Normaußentemperatur. Damit kann die SWP Logatherm WSW196i.2-16 in monovalenter Betriebsweise laufen.

Nachdem die SWP dimensioniert würde, müssen die Erdkollektoren ausgelegt werden. Bei der richtigen Auslegung von Erdkollektoren regeneriert sich das Erdreich jedes Jahr ausreichend, sodass die Wärmequelle Erdreich unbegrenzt genutzt werden kann (Glaesmann 2022). Im Gegenteil zu der optimal ausgelegten Erdsonde, die nach 50 Jahren in Betrieb, ausgeschaltet werden muss, da die Temperatur des Erdreichs unter 0 °C sinkt und sich somit die Effizienz der WP verschlechtert (Glaesmann 2022).

Für die Auslegung der Erdkollektoren gibt es einige Aspekte, die beachtet werden sollten. Diese sind in Abschnitt 2.1.2 erläutert. Die Auslegung von Erdkollektoren werden mit der VDI 4640 Blatt 2 durchgeführt. Einen Zugang zu dem VDI war nicht gegeben, wodurch die Auslegung in dieser Arbeit anhand der Literatur Wärmepumpenheizungen von Glaesmann aus den Seiten 143-147 durchgeführt wurde.

Die Leistung der Erdkollektoren muss die Heizleistung der Wärmepumpe decken. Dabei ist die Leistung der Kollektoren abhängig von der mittleren Jahrestemperatur und der Beschaffenheit des Bodens. Feuchter und erdiger Boden leitet die Wärme besser und führt zu einer besseren Wärmespeicherfähigkeit als grober und trockener Boden (Glaesmann 2022). Um die Entzugsleistung der Erdkollektoren zu bestimmen, wird der Bodentyp und die Klimazone des Standortes benötigt. Da die VDI 4640 Blatt 2 nicht vorliegt, muss die Entzugsleistung nur anhand des Bodentyps am Standort bestimmt werden (Glaesmann 2022). Dazu wird der Bodenatlas ([Bodenatlas \(bgr.de\)](http://Bodenatlas(bgr.de))) verwendet. In den Bodenatlas wurde der Standort 63674 Altstadt eingegeben. Das Ergebnis der Bodenart kann Anhang Abbildung 26 entnommen werden. Bei dem Bodentyp am Standort Altstadt in Hessen handelt es sich um ein Auenboden/Gley aus lehmigen bis tonigen Auensediment. Der Boden ist kein grundwasserführender Boden und wird somit nach Tab. 6.15 (Glaesmann 2022), (siehe Anhang Abbildung 26) als feuchter, lehmiger Boden eingestuft. Zur Sicherheit wird aus der Tab. 6.15 (siehe Anhang Abbildung 25) die kleinere Entzugsleistung von  $25 \text{ W/m}^2$  angenommen, um eine Unterdimensionierung zu verhindern.

Im nächsten Schritt wird die Kollektorfläche berechnet. Dazu wird die bestimmte Entzugsleistung  $\dot{q}_E$  und die maximale Verdampferleistung der WP  $\dot{Q}_O$  benötigt (Glaesmann 2022). Die Kollektorfläche wird dann folgendermaßen berechnet:

$$A_K = \frac{\dot{Q}_O}{\dot{q}_E} = \frac{7200 \text{ W}}{25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 288 \text{ m}^2 \quad [39]$$

Nach der Bestimmung der Kollektorfläche wird die Gesamtlänge der Kollektorrohre ermittelt. Diese ergibt sich aus der berechnete Kollektorfläche und dem Verlegerabstand  $s$ . Für den Verlegerabstand wird das Maximum von 0,55 Meter gewählt (siehe Abschnitt 2.1.2). Die Gesamtlänge der Kollektorrohre ergibt damit (Glaesmann 2022):

$$L_K = \frac{A_K}{s} = \frac{288 \text{ m}^2}{0,8 \text{ m}} = 360 \text{ m} \quad [40]$$

Aus der Gesamtlänge der Kollektorrohre kann die Anzahl der benötigten Kollektorkreise berechnet werden. Ein Kollektorkreis sollte maximal 100 Meter lang sein (siehe Abschnitt 2.1.2). Damit ergibt sich folgende Anzahl an Kollektorkreisen (Glaesmann 2022):

$$n_K = \frac{L_K}{100} = \frac{360 \text{ m}}{100 \text{ m}} = 3,6 \approx 4 \text{ Kollektorkreise} \quad [41]$$

Im letzten Schritt muss noch geprüft werden, ob die jährliche Entzugsleistung zwischen 50 und 70 kWh/(m<sup>2</sup> · a) liegt, um die langfristige Regeneration des Erdreiches zu gewährleisten (Glaesmann 2022). Dazu wird eine übliche Betriebsstundenanzahl von 2.100 Stunden angenommen. Damit ergibt sich folgende jährliche Entzugsleistung (Glaesmann 2022):

$$\dot{q}_{E,a} = \frac{\dot{Q}_O \cdot t}{A_K} = \frac{7,2 \text{ kW} \cdot 2100 \text{ h}}{288 \text{ m}^2} = 52,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \quad [42]$$

Als Nächstes wird die Jahresarbeitszahl für die SWP nach VDI 4650 Blatt 1 berechnet. Die wichtigen Werte für die Berechnung der JAZ der SWP von Logatherm WSW196i.2-16 TP50 können (siehe Anhang Abbildung 27) entnommen werden. Die Temperaturdifferenz bei der Prüfstandmessung ergibt  $\Delta\vartheta_M = 5\text{K}$ . Die Temperaturdifferenz im Betrieb kann dem hydraulischen Abgleich nach Verfahren B entnommen werden. Bei einer Vorlauftemperatur von  $40\text{ °C}$  und einer Rücklauftemperatur von  $33\text{ °C}$  ergibt sich eine Differenz von  $\Delta\vartheta_B = 7\text{ K}$ . Damit ergibt sich aus Tabelle 1 der VDI 4650 für  $F_{\Delta\vartheta} = 1,02$ . Aus Tabelle 2 der VDI 4650 ergibt sich der Korrekturfaktor  $F_g = 1,062$ . Die  $P_p$  wurde mit  $180\text{ W}$  angesetzt. Der  $P_{WP} = 1,11\text{ kW}$  wurde dem Datenblatt der SWP entnommen. Der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmequellenpumpen wird nach Gleichung [34] berechnet:

$$F_p = 1 + \frac{180\text{ W}}{1110\text{ W}} = 1,162$$

Die JAZ für die Raumheizung ergibt aus Formel [33]:

$$SCOP_H = \frac{4,8 \cdot 1,02 \cdot 1,112}{1,126} = 4,68$$

Die Warmwassertemperatur liegt bei  $55\text{ °C}$ . Die Temperaturdifferenz bei der Prüfstandmessung und im Betrieb ergibt  $\Delta\vartheta_M = 5\text{ K}$  und  $\Delta\vartheta_B = 7\text{ K}$ . Damit ergibt sich für  $F_{\Delta\vartheta} = 1,02$  aus Tabelle 1 VDI 4650. Für  $F_1 = 0,919$  aus Tab.17 der VDI 4650. Da es sich um einen Speicher mit innenliegenden Heizwasser-Rohrschlangen handelt, ist  $F_2 = 0,764$ . Damit ergibt sich aus Formel [35] folgende JAZ für das Trinkwasser:

$$SCOP_W = 4,8 \cdot \frac{1,02 \cdot 0,919 \cdot 0,764 \cdot 1,112}{1,126} = 3,29$$

Die Gesamtjahresarbeitszahl wird nach der Gleichung [32] berechnet. Der Deckungsanteil der SWP liegt bei  $100\%$ , da diese monovalent betrieben wird.

$$SCOP_{WPA} = \frac{1}{(1 - 0,18) \cdot \frac{1,0}{4,68} + 0,18 \cdot \frac{1,0}{3,29} + (1 - 1,0)} = 4,35$$

Die Jahresarbeitszahl wurde mit dem JAZ Rechner des Bundesverbands Wärmepumpe e.V. nachberechnet. Der Anhang Abbildung 28 können die Ergebnisse entnommen werden. Die Berechnung kann in der Excel-Datei „JAZ-Berechnung“ im elektronischen Anhang betrachtet werden.

### 3.2.4 Energetische Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Variante 1 mit der SWP-Erdkollektoren energetisch bewertet. Die energetische Bewertung wird mit dem Programm von Hottgenroth Energieberater 18599 3D plus durchgeführt. Auch für diese Variante wird für die Berechnungsgrundlage die DIN 18599 ausgewählt.

Die Einstellwerte für die Gebäudegeometrie und die -parameter bleiben identisch zu denen aus Abschnitt 3.1.4. Die U-Werte für das Gebäude wurden im Programm nach Tabelle 10 angepasst. Damit ergibt sich für den Transmissionswärmebedarf  $H'_T = 0,612\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  (siehe Tabelle 14, Anhang Abbildung 29).

Die SWP wird sowohl für das Heizen als auch für die Bereitstellung des Warmwassers verwendet. Die relevanten Daten der Anlagentechnik sind im elektronischen Anhang „Variante 1\_Energieberater“.

In Tabelle 13 ist die Energiebilanz der Variante 1 dargestellt. Die Ergebnisse werden dabei in kWh/a und in kWh/m<sup>2</sup>·a dargestellt. Die Monatsbilanzierung der Nutzenergie, der Endenergie und der Primärenergie können zum Verständnis der Energiebilanz dem elektronischen Anhang „Variante 1\_Energieberater“ betrachtet werden.

Tabelle 13: Ergebnisse der Energiebilanz der Variante 1 (Ergebnisse aus dem Energieberater 3D plus)

In kWh/a In kWh/m <sup>2</sup> · a	Gesamt	Heizung	Warmwasser
Nutzenergie	41.045	38.962	2.083
	153,56	145,77	7,79
Endenergie	16.477	14.957	1.520
	61,65	55,96	5,69
Primärenergie	29.659	26.922	2.737
	110,96	100,72	10,24

Die Bewertung entsprechend der GEG-Anforderung kann Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Bewertung des Gebäudes entsprechend der GEG-Anforderung- Variante 1 (Ergebnisse aus dem Energieberater 3D plus)

	Variante 1- SWP mit Erdkollektoren	Mod. Altbau	GEG- Neubau	GEG- 15%	GEG- 30%	GEG- 50%
Jahres-Primärenergiebedarf $q_p$ in kWh/m <sup>2</sup> · a	110,96	137,21	53,90	45,82	37,73	26,95
Transmissionswärmeverluste $H'_T$ in W/m <sup>2</sup> · K	0,612	0,351	0,351	0,298	0,246	0,176

Der Jahres-Primärenergiebedarf wurde mit der Variante 1 zu den Werten für den modernisierten Altbau eingehalten. Der Transmissionswärmeverlust liegt aber weiterhin über dem des modernisierten Altbaus.

### 3.3 Variante 2

In Variante 2 wurden zu den Sanierungen aus Variante 1 zusätzlich die Fassade und die Fenster saniert. Zudem wird für die Anlagentechnik eine PVT-Anlage und eine Sole-Wasser-Wärmepumpe ausgelegt. Die PVT-Kollektoren sind für die WP die einzigen Wärmequellen und decken den gesamten Energiebedarf des sanierten Gebäudes ab.

#### 3.3.1 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831

In der Tabelle 15 werden alle in der Variante 2 verwendeten U-Werte angeführt. Dabei sind auch die veränderten U-Werte der Variante 1 und die U-Werte des Ist-Zustandes angeführt.



Tabelle 15: U-Werte der Variante 2 (eigene Darstellung)

Kurzbezeichnung der Bauteile	Bauteil	U-Wert $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
IT	Innentüren	1,84
AT	Außentür-KG	2,9
AT	Außentüren-EG	1,3
AW	Außenwand Gaube	0,184
AW	Außenwand EG/DG	0,169
AW	Kellerwand (1979)	0,8
IW	Innenwand	1,7
IW	Innenwand zu unbeheizten Räumen/Abseiten	0,297
DA	Dach	0,184
AF	Fenster-Giebel	1,1
AF	Dachgauben Fenster	1,1
AF	Holzfenster- 3-fach verglast	0,9
DE	Holzbalkendecke (1979)	0,4
FB	Bodenplatte (1979)	0,8
DE	Kellerdecke- Massivdecke (1979)	0,8
DE	Kellerdecke	0,226

Der U-Wert für die Fassade wurde mithilfe von Ubakus ermittelt. Dazu werden wie auch in Variante 1 der Ist-Zustand der Außenwand als Grundlage verwendet. Auf dieser Grundlage sind die U-Werte geändert. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Außenwand mindestens einen U-Wert von  $0,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  haben sollte (Bundestag 08.08.2020). Die Kellerwand wurde nicht gedämmt. Der Schichtaufbau der neuen Fassade kann dem Anhang entnommen werden (siehe Anhang Abbildung 30 und Anhang Abbildung 31).

Die Fenster des Gebäudes wurden in Variante 2 ausgetauscht. Es wurden wie auch im Ist-Zustand Holzfenster eingesetzt, nur wurde in Variante 2 eine 3-Fach Verglasung gewählt. Der U-Wert darf bei Fenstern maximal bei  $1,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  liegen (Bundestag 08.08.2020). Zudem wurde die Luftdichtigkeitsklasse von C auf B umgestellt, da in dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass bei dem Einbau der neuen Fenster eine Luftdichtheitsprüfung durchgeführt wird (DIN/TS DIN/TS 12831-1).

Die neuen U-Werte der veränderten Bauteile wurden am Beispielgebäude im Programm TGA-Heizung verändert. Die Ergebnisse der Norm-Heizlast der beheizten Räume und des Gebäudes können Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Ergebnisse der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831-Variante 2 (simuliert mit TGA-Heizung)

Raum	Transmissionswärmeverluste $\Phi_{T,i}$ W	Lüftungswärmeverluste $\Phi_{V,i}$		Normheizlast $\Phi_{Ht,i}$ W
		Raum $\Phi_{V,env,min,i}$ W	Zone $\Phi_{V,leak,min,i}$ W	
Keller-Dusche	327	142	71	469
Keller-Sauna	414	173	86	586
Keller- Gast	340	174	87	514
Keller- Hobby	751	362	181	1113
EG- Wohnen	757	512	256	1269
EG-Küche	306	182	91	488
EG- Hausarbeitsraum	101	132	66	232
EG-Bad	243	86	43	329
EG-Kind 1	329	209	104	538



EG-Kind 2	355	210	105	566
DG-Studio	1212	801	401	2013
DG-Schlafen	829	467	233	1296
DG-Bad	552	202	101	753
	$\sum$ 6.516		$\sum$ 1.825	

$$\Phi_{HL,Geb.} = 6.516 + 1.825 = 8.341 \text{ W} = 8,34 \text{ kW}$$

Somit ergibt sich für das Gebäude für die Variante 2 eine Gesamtheizlast von 8,34 kW. Die spezifische Normheizlast des Gebäudes ergibt:

$$\varphi_{HL} = \frac{\Phi_{HL,Geb.}}{A_{NGF}} = \frac{8341 \text{ W}}{246 \text{ m}^2} = 33,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Durch die Sanierungen sinkt die Gesamtheizlast des Gebäudes zum Ist-Zustand um 8.738 W, prozentual sinkt sie um 51,2 %. Die Gesamtheizlast von Variante 2 zu Variante 1 sinkt um 5.230 W, prozentual sinkt sie um 38,5 %.

### 3.3.2 Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B

Für Variante 2 wurde der hydraulische Abgleich nach Verfahren B mit dem Programm Optimus 3D plus durchgeführt. Dabei wurde eine Vorlauftemperatur von 35 °C angesetzt, da die Heizlast mit den durchgeführten Sanierungen enorm sank. Die errechnete Rücklauftemperatur liegt bei 28 °C. Die errechneten Ergebnisse mit dem Programm Optimus 3D plus können der Tabelle 17 entnommen werden.

Tabelle 17: Berechnungsergebnisse des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B- Variante 2 (Entwurf aus Optimus 3D plus)

Raumdaten			Verteilerdaten		Heizflächendaten			Verteilerventile		
Raum	Beheizte Fläche m <sup>2</sup>	Heizlast W	Verteiler	Verteiler-zulauf m	VA	t <sub>R</sub> °C	Norm-leistung W	Kv-Wert m <sup>3</sup> /h	Δp mbar	Durch-fluss l/min
Keller-Dusche	10,3	469	Verteiler 1	5	15	29	1280	0,122	294	1,10
Keller-Sauna	12,6	586	Verteiler 1	5	15	29	1559	0,162	269	1,40
Keller-Gast	13,5	514	Verteiler 1	5	15	25	1292	0,084	303	0,77
Keller-Hobby	28,1	1113	Verteiler 1	5	15	25	1743	0,075	306	0,69
			Verteiler 1	5	15	25	1744	0,075	306	0,69
EG-Wohnen	39,8	1269	Verteiler 2	10	15	23	2450	0,094	281	0,84
			Verteiler 2	10	15	23	2481	0,096	280	0,85
EG-Küche	10,3	488	Verteiler 2	10	15	26	1282	0,093	298	0,85
EG-Hausarbeitsraum	7,6	232	Verteiler 2	10	15	20	945	0,026	315	0,24
EG-Bad	6,3	329	Verteiler 2	10	15	30	775	0,119	299	1,09
EG-Kind 1	13,6	538	Verteiler 2	10	15	29	1300	0,179	251	1,49
EG-Kind 2	13,6	566	Verteiler 2	10	15	29	1304	0,186	247	1,54
DG-Studio	48,7	2013	Verteiler 3	15	15	30	2143	-	80	3,3
			Verteiler 3	15	15	30	2143	0,7	80	3,3
DG-Schlafen	29,5	1296	Verteiler 3	15	15	30	1436	0,294	228	1,98
			Verteiler 3	15	15	30	1436	0,294	228	1,98
DG-Bad	11,9	753	Verteiler 3	15	15	30	1503	0,294	224	2,32

Der errechnete Volumenstrom der Pumpe liegt bei 1465 l/h. Die Pumpförderhöhe ergibt 326 mbar, das ergibt umgerechnet 3,26 mWS. Mit diesen Werten für die Pumpe könnten z.B. die Pumpe WILO IL-E 40/170-5,5/2 eingesetzt werden.

### 3.3.3 Auslegung der PVT-Kollektoren mit SWP

Die Auslegung der PVT-Kollektoren wird anhand der Erfahrung der Firma Consolar durchgeführt. Dazu wurde der Vortrag vom 10. Oktober 2021 über die PVT-Wärmepumpen-Systeme für die Planung und Auslegung der Anlagentechnik in Variante 2 verwendet (Siegemund 2021).

Für die Auslegung der PVT-Kollektoren sind zwei Parameter wichtig. Zum einen sollte festgelegt werden, ob es sich um eine Freiaufständerung oder um eine Paralleldachaufständerung handelt. Die Freiaufständerung der PVT-Kollektoren weist eine bessere Hinterlüftung auf, wodurch sie etwas weniger Fläche pro Kilowatt-Heizleistung benötigen (Siegemund 2021).

Der zweite Parameter der zu beachten ist die Art der WP. Mehrstufige WP und Inverter-WP haben eine längere Laufzeit, da sie die Leistung regeln können. Dadurch kann aus den Kollektoren mehr Wärme entnommen werden. Zudem entsteht eine geringere Spreizung zur Luft, wodurch höhere Quellentemperaturen erreicht werden. Das hat den Vorteil, dass weniger Kollektorfläche benötigt wird (Siegemund 2021). Mithilfe der Tabelle 18 und den zuvor beschriebenen Parametern kann die Fläche pro Kilowatt-Heizleistung entnommen werden.

Tabelle 18: Werte für die Auslegung der Kollektorfläche (Siegemund 2021)

	Freiaufständerung m <sup>2</sup> /kW	Paralleldach m <sup>2</sup> /kW
Mehrstufige/ Inverter WP	3,3	3,6
Einstufige WP	4	4,3

Als Nächstes ist die Soleeintrittstemperatur entscheidend. Diese sollte immer zwischen 2 und 5 Kelvin kälter sein als die Normaußentemperatur am Standort (-10,3 °C), da durch den Wind Energie von der Außenluft an die Sole verloren geht. Es sollte eine WP gewählt werden, die bis zu -15 °C Soleeintrittstemperatur arbeitet, dadurch kann sicherstellen werden, dass auch mit einer Normaußentemperatur von -10 °C (bei dem Beispielgebäude) die Energie für das Gebäude bereitgestellt werden kann (Siegemund 2021).

Eine solche WP wird z.B. von der Firma Waterkotte angeboten. Um die entsprechende WP zu finden, wird die Heizleistung des Gebäudes inklusive des Warmwasserbedarf benötigt. Für das Beispielgebäude liegt die Gesamtheizlast bei 8,341 kW (siehe Abschnitt 3.3.1). Zudem wird die notwendige Leistung der WP bei B-15 benötigt. Viele SWP-Hersteller stellen nur die Daten für den Betriebszustand B0 zur Verfügung, da die Soletemperatur bei Erdsonden und Erdkollektoren nicht unter 0 °C gehen sollte. Da die PVT-Kollektoren die einzige Quelle für die SWP sind und es möglich ist, dass die Lufttemperatur unter 0 °C bis zu -10,3 °C sinkt, kann die Soleeintrittstemperatur, wie bereits erklärt, bis zu -15 °C gehen. Die SWP sollte damit höher konzentriert werden, um einfrieren und stocken zu vermeiden (Siegemund 2021). Um den Betriebszustand bei B-15 zu erhalten, sollte die Leistung des Betriebspunkt B0 um 30-40 % reduziert werden. Die Ausrichtung spielt für die Vorauslegung keine große Rolle, da für den kältesten Tag ausgelegt wird (Siegemund 2021).

Die notwendige WP-Leistung bei  $-15\text{ °C}$  Soletemperatur wird im Vortrag folgendermaßen berechnet (Siegemund 2021):  $8,341\text{ kW} \cdot 0,75 = 6,26\text{ kW}$ . Anhand dieser Angabe wurde im Programm Polysun die Inverter-WP EcoTouch 5014.5 Ai der Firma Waterkotte ausgewählt. Diese WP hat bei B0 eine Leistung von  $10,43\text{ kW}$  (siehe Anhang Abbildung 32), reduziert man die Leistung, wie bereits erwähnt, um  $35\%$ , erhält man für den Betriebspunkt B-15 eine Leistung von  $6,78\text{ kW}$ .

Für die Bestimmung der Kollektorfläche wird die Leistung der Inverter-SWP bei B-15 mit dem entsprechenden Wert aus Tabelle 18 multipliziert:  $6,78\text{ kW} \cdot 3,6\text{ m}^2/\text{kW} = 24,41\text{ m}^2$ . Die Kollektorfläche eines Solink PV 450Wp beträgt  $2,25\text{ m}^2$  (Siegemund 2021). Damit ergibt sich  $24,41\text{ m}^2 / 2,25\text{ m}^2 = 10,85 \approx 11$  Kollektoren. Die Gesamt-Nennleistung der PVT-Kollektoren ergibt  $4,95\text{ kW}$  (siehe Anhang Abbildung 33). Für das gesamte System wurden der Kombispeicher Solus II 1000 I S der Firma Consolar verwendet. Die JAZ des Systems wird in dem Abschnitt 3.3.4 dargestellt.

Die schematische Darstellung der Anlagentechnik der Variante 2 kann Abbildung 12 entnommen werden. Im Programm eingestellte Wert für die Anlagentechnik können den Anhang Abbildung 33 und Anhang Abbildung 38 entnommen werden.

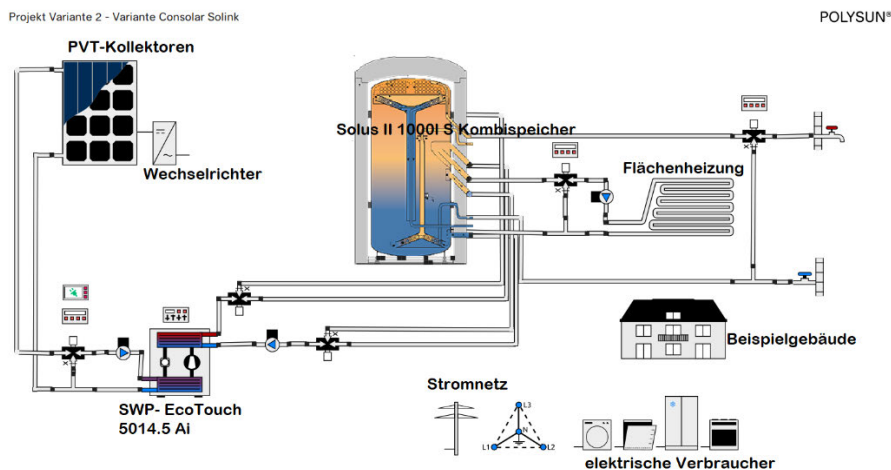


Abbildung 12: schematische Darstellung der Anlagentechnik in Variante 2 (erstellt mit Polysun)

### 3.3.4 Energetische Bewertung

Im folgenden Abschnitt wird die Variante 2 mit der SWP und der PVT-Kollektoren energetisch bewertet. Zudem wurde in Anlehnung an die Variante 2 eine weitere Variante erstellt, diese beinhaltet zusätzlich einen Batteriespeicher (siehe Anhang Abbildung 39), der restliche Aufbau ist zu dem aus Abbildung 12 identisch. Diese zusätzliche Variante wurde erstellt, um zu überprüfen, ob und wie sich der Batteriespeicher auf den Autarkiegrad auswirkt. Die energetische Bewertung wird teils mit dem Programm von Hottgenroth Energieberater 18599 3D plus und teils mit dem Programm Polysun durchgeführt.

Mit dem Programm Polysun wurde die System-JAZ (SJAZ) errechnet, sie liegt bei der Variante 2 ohne Batterie bei  $3,8$  und bei der Variante mit dem Batteriespeicher bei  $3,7$ . Die SJAZ wird definiert als das Verhältnis der jährlichen Wärmeabgabe des Wärmeerzeugers an das Fluid zu dem elektrischen Verbrauch des Wärmeerzeugers und dem Energieverbrauch der Pumpen etc. ausgenommen ist die

Umwälzpumpe des Heizkreises (Sauter et al. 2020). Das Ergebnis der SJAZ ist durch das ausgewählte Verbrauchsprofile des Polysun Programmes realistischer als die errechneten JAZ nach VDI 4650 Blatt 1. Zudem wird bei Berechnung der SJAZ in Polysun der gesamte Stromverbrauch, der Netzbezug, die Netzaufwandszahl und der Autarkiegrad einbezogen (Sauter et al. 2020).

Die Primärenergie wird in Polysun als der Parameter  $E_{tot}$  definiert. Er bezieht sich, laut Andreas Wolf von der Firma Polysun, auf den Energiewert des Brennstoffes bzw. des Stroms, der verbraucht wird, dabei ist zu berücksichtigen, dass die Solarenergie nicht eingerechnet wird (siehe Anhang Abbildung 42). Die Ergebnisse der Variante 2, mit und ohne Batteriespeicher, also die Nutzenergie  $Q_{use}$ , der Endenergiebedarf ( $Q_{dem,Gebäude} + Q_{dem,Warmwasser} = Q_{dem,gesamt}$ ) und die Primärenergie ( $E_{tot}$ ) können Tabelle 19 entnommen werden.

Alle Simulationsergebnisse sind in der Datei „Polysun\_Variante 2\_Bericht“ und „Polysun\_Variante 2\_Bericht mit Batterie“ aus dem elektronischen Anhang zu entnehmen. In Anhang Abbildung 40 und Anhang Abbildung 41 sind die wichtigsten Resultate der Simulation komprimiert dargestellt.

Tabelle 19: Ergebnisse der Variante 2\_ ohne und mit Batterie (Werte aus Polysun)

In kWh/a In kWh/m <sup>2</sup> · a	Variante 2_PVT und ohne Batterie	Variante 2_PVT und Batterie
<b>Nutzenergie</b>	19.001	18.999
	71,16	71,16
<b>Endenergie</b>	19.058	19.058
	71,38	71,38
<b>Primärenergie</b>	3.663	3.679
	13,72	13,78

Weitere wichtige Parameter in der Polysun Simulation ist der Eigenverbrauch des produzierten Stroms über ein Jahr, dieser liegt bei der Variante ohne Batterie bei 2.012 kWh und der Autarkiegrad bei 23,5%. Für die Variante mit dem Batteriespeicher liegt der Eigenverbrauch bei 3.537 kWh und der Autarkiegrad bei 34,1 %. Der Eigenverbrauch und der Autarkiegrad beschreiben, wie viel produzierter Solarstrom direkt genutzt wird und damit nicht ins öffentliche Netz eingespeist wird (Sauter et al. 2020). Somit wird bei der Variante 2 mit Batteriespeicher 1.525 kWh/a mehr für den Eigenverbrauch verwendet und somit nicht ins öffentliche Netz eingespeist.

Der Transmissionswärmebedarf wurde mit dem Energieberater 3D plus errechnet, da dieser Wert nur die Gebäudehülle beschreibt (siehe Anhang Abbildung 43). Die Einstellwerte für die Gebäudegeometrie und die Gebäudeparameter bleiben identisch zu denen aus Abschnitt 3.1.4. Die U-Werte für Variante 2 wurden im Programm nach Tabelle 15 angepasst. Damit ergibt sich für die Variante 2 der Transmissionswärmebedarf  $H'_T = 0,404 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Bewertung des Gebäudes entsprechend der GEG-Anforderung-Variante 2 (teils aus dem Energieberater, teils Eigenberechnung)

	Variante 2- SWP mit PVT- Kollektoren	Variante 2- SWP mit PVT- Kollektoren +Batterie	Mod. Altbau	GEG- Neubau	GEG- 15%	GEG- 30%	GEG- 50%
<b>Jahres-Primärenergiebedarf</b> $q_p$ in kWh/m <sup>2</sup> · a	13,72	13,78	137,21	53,90	45,82	37,73	26,95
<b>Transmissionswärmeverluste</b> $H'_T$ in W/m <sup>2</sup> · K	0,404	0,404	0,351	0,351	0,298	0,246	0,176

Der Jahres-Primärenergiebedarf wurde mit der Variante 2 für den modernisierten Altbau und sogar für das GEG-50 % eingehalten. Der Transmissionswärmeverlust liegt aber weiterhin über dem des modernisierten Altbaus.

## 4 Auswertung der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Varianten, die im Abschnitt 3 erläutert wurden, ausgewertet. Zudem wird zu jeder Variante sowohl eine energetische als auch eine ökonomische Auswertung durchgeführt.

### 4.1 Energetische Auswertung

Die Ergebnisse der Energiebilanzen der unterschiedlichen Varianten sind in Abbildung 13 dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Endenergie des Ist-Zustandes mit dem alten und neuem Heizkessel deutlich höher ist als die der anderen Varianten. Da der Wärmeerzeuger dieser Variationen ein Ölheizkessel ist, der weder Strom noch Energie eigenständig produziert.

Der Endenergiebedarf wird nur reduziert, wenn vor Ort Strom oder Energie erzeugt wird (K.R 2023). Diese ist der Fall bei der Variante 1 und dem Ist-Zustand mit LWP, da diese Varianten mit einer WP ausgestattet sind. Die WP entzieht der Umwelt die Wärme und stellt diese als Heizwärme zur Verfügung. Wird viel Energie oder der Strom vor Ort erzeugt, kann der Endenergiebedarf geringer als die Nutzenergie sein (K.R 2023). Bei der Variante 2 ist der Endenergiebedarf und der Nutzenergiebedarf nahezu identisch, die Endenergie ist minimal höher als die Nutzenergie. Die Varianten mit altem und neuem Heizkessel haben einen höheren Endenergiebedarf als Nutzenergiebedarf, da im Betrieb höhere Energieverluste entstehen (Paschotta 2014). In der Abbildung 13 sind die Nutz- und die Endenergie der Varianten in einem Säulendiagramm dargestellt.

Die LWP im unsanierten Gebäude lohnt sich hier aufgrund der Fußbodenheizung, da diese mit einer Vorlauftemperatur von 40 °C betrieben wird. Bei Radiatoren sollte eine Vorlauftemperatur von 55 °C nicht überschritten werden, da es bei höheren Vorlauftemperaturen zum öfteren Einschalten des Heizstabs kommt, wodurch ein höherer Energiebedarf und Emissionen entstehen (Bettgenhäuser und Boermans 2011). Beim hydraulischen Abgleich sollte geprüft werden, ob die bestehenden Heizkörper unterdimensioniert sind. Ist dies der Fall sollten, diese vor dem Einbau einer WP ausgetauscht werden.

Die Primärenergie ist für die Varianten mit einem Ölheizkessel deutlich höher als die der anderen Varianten, da dieser Wärmeerzeuger keine erneuerbaren Anteile aufweist (siehe Abschnitt 2.6). Auffällig ist, dass der Primärenergiebedarf der Variante 2 geringer als der Endenergiebedarf ist. Der Grund für den niedrigeren Primärenergiebedarf ist, dass nicht der gesamte Primärenergiebedarf angegeben wird, sondern immer nur der nicht-erneuerbare Anteil (K.R 2023), (siehe Abschnitt 2.6). Damit hat die Variante 2 einen geringen, nicht-erneuerbaren Anteil an Primärenergie.

Anhand dieser Ergebnisse ist die Wärmepumpe für das Beispielgebäude der effizientere Wärmeerzeuger, da weniger Energieverluste im Betrieb auftreten (= Endenergie) und der nicht-erneuerbare Anteil an Primärenergie geringer ist (siehe Abbildung 13).

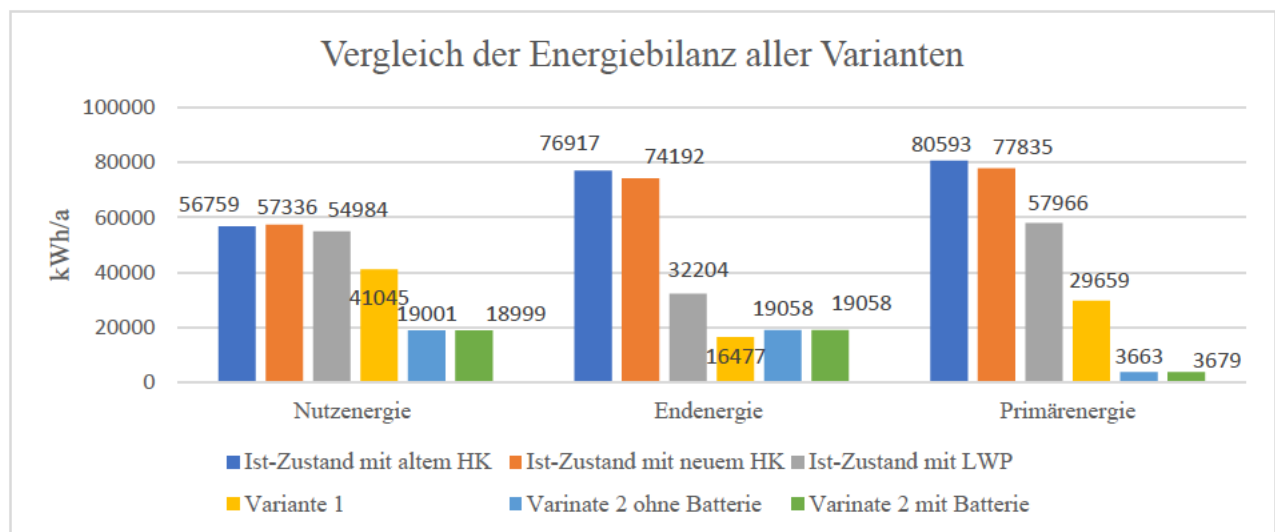


Abbildung 13: Ergebnisse der Energiebilanz der unterschiedlichen Varianten (eigene Darstellung)

Die Berechnung der  $CO_2$ -Äquivalenten wurde mit Hilfe der Publikation „Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland“ des Umweltbundesamtes durchgeführt. Für die Berechnung der  $CO_2$ -Äquivalenten werden sowohl die reinen  $CO_2$ -Emissionen ohne Vorkette (VK) als auch die  $CO_2$ -Emissionen mit Vorkette betrachtet (Bettgenhäuser und Boermans 2011). Die Vorkette beschreibt die vorgelagerten Prozesse, die bereits in Abschnitt 2.6 bei der Primärenergie erläutert wurden.

Die  $CO_2$ -Emissionsfaktoren sind in Anhang Tabelle 2 dargestellt. Der  $CO_2$ -Emissionsfaktor ohne VK für das Heizöl wurden dem GEG der Anlage 9 Nummer 3 entnommen. Für den  $CO_2$ -Emissionsfaktor mit VK wurde wie in dem GEG Anlage 9 Nummer 1e) auf den  $CO_2$ -Emissionsfaktor ohne VK ein pauschaler Aufschlag von 20 % berücksichtigt (Bundesregierung 08.08.2020). Die  $CO_2$ -Emissionsfaktoren des deutschen Strommix wurden aus einer Studie des Umweltbundesamtes entnommen (Icha und Lauf 2022). Der  $CO_2$ -Emissionsfaktor ohne VK wurde mit der Endenergie multipliziert. Der  $CO_2$ -Emissionsfaktor mit VK wurde mit dem Primärenergiebedarf multipliziert, da der Primärenergiebedarf die Rohstoffgewinnung, Umwandlung und Verteilung eines Brennstoffes außerhalb der Bilanzgrenze einbezieht. In der Berechnung der  $CO_2$ -Äquivalente mit VK wurde nur der nicht erneuerbare Anteil der Primärenergie berücksichtigt.

Die Ergebnisse der  $CO_2$ -Äquivalente der unterschiedlichen Varianten sind in Abbildung 14 dargestellt. Die genaue Berechnung der  $CO_2$ -Äquivalente kann in der Datei „Auswertung“ aus dem elektronischen Anhang nachvollzogen werden.



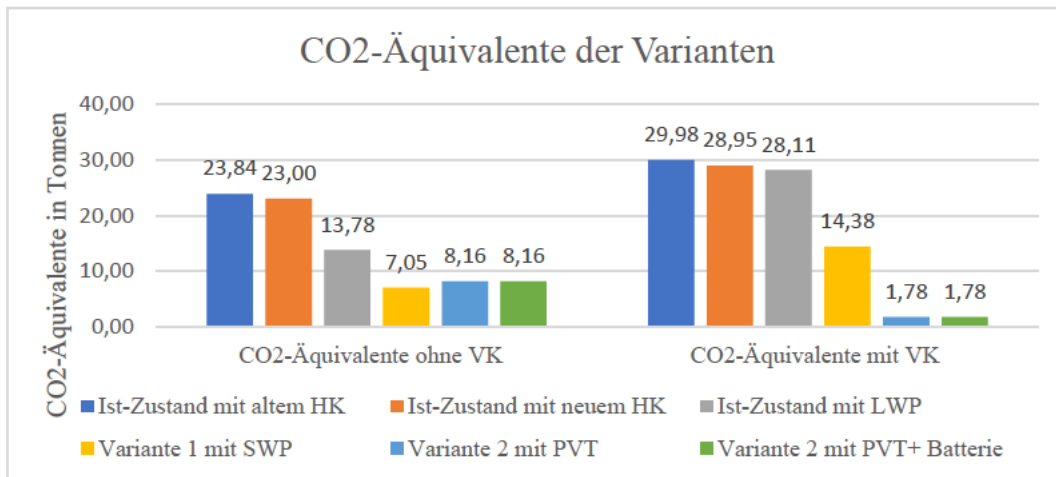


Abbildung 14: Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Äquivalente der unterschiedlichen Varianten (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 14 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die höchsten Emissionen von dem unsanierten Gebäude emittiert werden. Zu diesem Ergebnis kam auch die Studie „Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland“ des Umweltbundesamtes (Bettgenhäuser und Boermans 2011). Die Variante, in denen das Beispielgebäude saniert worden ist, emittieren deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen. Somit sind aus Sicht der ökologischen Bewertung die Variante 1 und die Varianten 2 für das Beispielgebäude in Betracht zu ziehen (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14).

#### 4.2 Ökonomische Bewertung

Für die ökonomische Bewertung der Varianten wurde eine Wirtschaftlichkeitsrechnung anhand der Publikation „Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland“ des Umweltbundesamtes durchgeführt. Die Investitionsberechnung wurde mithilfe eines dynamischen Verfahrens dargestellt. Bei statischen Verfahren werden nur die Durchschnittswerte von Kosten und Erlösen berücksichtigt, bei dynamischen Verfahren werden darüber hinaus die Zahlungszeitpunkte miteingebunden, die einen Vergleich untereinander ermöglichen. Das verwendete dynamische Verfahren für die ökonomische Auswertung ist die Annuitätenmethode (Bettgenhäuser und Boermans 2011). „Annuitäten sind jährliche anfallenden Zahlungen für laufenden Kosten und Investitionen“ (Bettgenhäuser und Boermans 2011).

Die jährlich anfallenden Kosten werden in drei Kostenkomponenten unterteilt. Zum einen in die kapitalgebundenen Kosten, diese beinhalten die Annuitäten der Sanierungskosten und die Anschaffungs- und Einbaukosten der Wärmeerzeuger der Varianten (Bettgenhäuser und Boermans 2011). Dabei wurde die Montagearbeiten, der Einbau und Anschluss, das Zubehör und die Erschließung der Anlagentechnik sowie die Mehrwertsteuern berücksichtigt. Förderungen und Kredite wurden in der ökonomischen Bewertung nicht miteinbezogen. Für die Berechnung der Investitionskosten wurden Durchschnittspreise der Bauteile und Komponenten gewählt. Die Lebensdauer aller Komponenten wurde auf 20 Jahre gesetzt bis auf die Lebensdauer der Erdkollektoren, diese wurden auf 50 Jahre angesetzt (siehe Abschnitt 3.2.3- „unbegrenzt“).

Die Ergebnisse der kapitalgebundenen Kosten können Anhang Tabelle 3 entnommen werden. Die genauen Berechnungsschritte können der Datei „Auswertung“ aus dem elektronischen Anhang

entnommen werden. Wie aus Anhang Tabelle 3 erkennbar ist, sind die Gesamtkapitalgebunden Annuitätenkosten für die Variante 2 mit PVT-Kollektoren und Batteriespeicher am höchsten. Die Varianten der Ist-Zustände mit neuem Heizkessel und LWP sind von den kapitalgebunden Annuitätenkosten am günstigsten. Zum einen da keine Sanierungskosten für diese Variationen anfallen und zum anderen sind die Annuitätenkosten für den Wärmeerzeuger geringer. Die Ergebnisse der kapitalgebundenen Annuitätenkosten für den Wärmeerzeuger waren vorhersehbar, da die SWP, die PVT-Kollektoren und der Batteriespeicher mit höheren Investitionskosten verbunden sind.

Die nächste Kostenkomponente sind die betriebsgebundenen Kosten, diese Kosten setzen sich aus den jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten der Wärmeerzeuger zusammen. Aus der Publikation „Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland“ wurden die Wartungs- und Instandhaltungskosten entnommen (Bettgenhäuser und Boermans 2011). In der Anhang Tabelle 4 sind die betriebsgebundenen Kosten dargestellt. Die Berechnungsschritte können der Datei „Auswertung“ des elektronischen Anhangs entnommen werden. Aus Anhang Tabelle 4 ist zu erkennen, dass die Wartungs- und Instandhaltungskosten für den Heizkessel höher sind als für die WP.

Die letzte Kostenkomponente sind die verbrauchsgebundenen Kosten, diese ergeben sich aus dem Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers und die dafür benötigte Hilfsenergie (Bettgenhäuser und Boermans 2011). Für Berechnungen der Strommixkosten wurde ein Preis von 49,61 ct/kWh verwendet, dieser wurde aus der Strompreisanalyse des Bundesverbands für Energie- und Wasserwirtschaft entnommen (bdew-Energie.Wasser.leben. 2023). Die Heizölkosten wurden mit einem Preis von 15 ct/kWh angenommen (Calließ 2023). Beide Preise sind Durchschnittswerte für das Jahr 2023. Die verbrauchsgebundenen Kosten sind in der Anhang Tabelle 5 dargestellt. In der Datei „Auswertung“ des elektronischen Anhangs können die Berechnungen nachvollzogen werden.

Anhand der Anhang Tabelle 5 ist zu erkennen, dass die verbrauchsgebundenen Kosten für den Ist-Zustand mit einem neuen Heizkessel und der einer LWP am höchsten sind. Die hohen Verbrauchskosten des Ist-Zustandes sind die Folgen des hohen Endenergiebedarfs, der durch das nicht sanierte Gebäude entsteht (siehe Abschnitt 4.1). Zudem wird für den konventionellen Wärmeerzeuger, sowohl das Heizöl für die Wärme als auch der Strommix für die Hilfsenergie benötigt. Die Variante 2 mit dem Batteriespeicher ist von den verbrauchsgebundenen Kosten niedriger als die Variante 2 ohne die Batterie. Der Grund für die niedrigeren Kosten der Variante 2 mit Batterie ist der höhere Eigenverbrauch des Stroms, wodurch weniger Strom aus dem öffentlichen Netz zugekauft werden muss.

Aus den drei Kostenkomponenten ergeben sich die Gesamtannuitätenkosten der unterschiedlichen Varianten (siehe Abbildung 15). Aus dem Ergebnis der Gesamtannuitätenkosten wird deutlich, dass die Variante 1 mit der SWP und der Ist-Zustand mit der LWP die kostengünstigsten Varianten des Beispielgebäudes sind (siehe Abbildung 15). Die höchsten Gesamtannuitätenkosten entstehen bei dem Ist-Zustand mit dem neuen Heizkessel, da die verbrauchsgebundenen Kosten abhängig von dem Endenergiebedarf sind (siehe Anhang Tabelle 5). Die erhöhten Kosten für die Variante 2 mit und ohne Batterie liegen an den höheren Investitionskosten für die PVT-Module (siehe Anhang Tabelle 3).



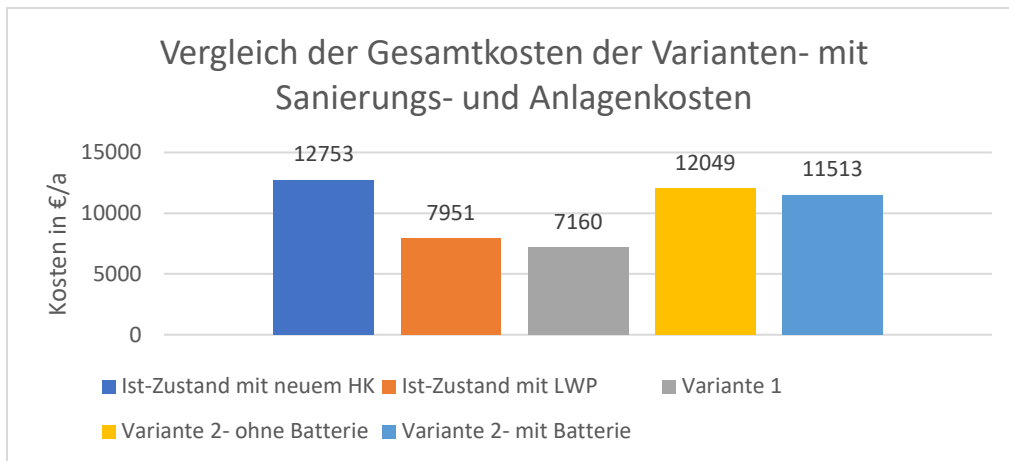


Abbildung 15: Gesamtannuitätenkosten der unterschiedlichen Varianten (eigene Darstellung)

Betrachtet man sowohl die ökonomische als auch die energetische Auswertung, ist die Variante 1 mit der SWP in beiden Auswertungen als bestmögliche Variante für das Beispielgebäude in Betracht zu ziehen. Die Variante 2 mit und ohne Batterie ist ausgehend von dem niedrigen  $CO_2$ -Ausstoßen eine weitere Option für das Beispielgebäude. Aus ökonomischer Sicht lohnt sich die PVT-Anlagen mit Batteriespeicher mehr. Dennoch sind die Varianten 2 mit PVT-Kollektoren deutlich teurer als die Variante 1 mit der SWP. Der Ist-Zustand des Gebäudes lohnt sich auch nicht mit dem neuen Heizkessel, da die Gesamtannuitätenkosten und die  $CO_2$ - Emissionen bei dieser Variante am höchsten sind (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15).

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde an einem Bestandsgebäude vom Typ „Einfamilienhaus“ unter unterschiedlichen Sanierungskonzepten die Wärmepumpen dimensioniert, betrachtet und bewertet. Zu Anfang wurden die theoretischen Grundlagen vorgestellt, es wurden sowohl Wärmeerzeuger als auch Berechnungsmethoden vorgestellt. Die in dieser Arbeit dargestellten Berechnungsmethoden zeigen, wie ein Gebäude energetisch bewertet werden kann. Zur Veranschaulichung der vorgestellten Berechnungsmethoden zur energetischen Bewertung eines Gebäudes wurden die Verfahren an einem Beispielgebäude mit unterschiedlichen Varianten veranschaulicht.

Die erste Berechnungsmethode dieser Arbeit ist die Raumweise Heizlastberechnung nach DIN EN 12831, dieses Verfahren ist die Grundlage für die Berechnung der Normheizlast für die einzelnen beheizten Räume und das gesamte Gebäude. Durch die unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen der Varianten sinkt die Heizlast des Gebäudes vom Ist-Zustand mit 17,079 kW, bei Variante 1 auf 13,57 kW und bei Variante 2 auf 8,34 kW. Damit reduziert sich die Gebäudeheizlast vom Ist-Zustand bei Variante 1 um 20,55 % und bei Variante 2 um 51,17 %. Durch die Reduzierung der Gebäudeheizlast in Variante 1 und 2 konnten Wärmeerzeuger mit geringerer Leistung gewählt werden. Zudem reduzierten sich in Variante 1 und 2 auch die Heizlasten der Räume.

Durch die ermittelten Heizlasten der Räume konnte im hydraulischen Abgleich nach Verfahren B die benötigte Wärmeleistung der Flächenheizkörper, sowie die Durchflussmenge, der Druckverlust und der

Durchflusskoeffizienten bestimmt werden. Wie in den Ergebnissen des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B (siehe Tabelle 5, Tabelle 12, Tabelle 17) zu sehen ist, reduziert sich die Durchflussmenge, wenn sich die Raumheizlast reduziert, da der Raum, durch die Sanierungsmaßnahmen, weniger Wärme benötigt. Außerdem kann in Variante 2 zu dem Ist-Zustand und Variante 1, durch die niedrigeren Raumheizlasten, die Vorlauftemperatur des Heizungssystems von 40 °C auf 35 °C gesenkt werden. Die Senkung der Vorlauftemperatur können Energie und  $CO_2$ - Emissionen einspart werden.

Zudem konnte mithilfe des hydraulischen Abgleiches nach Verfahren B die Umwälzpumpe, anhand des Förderstroms und der Förderhöhe, richtig dimensioniert werden. Durch die richtige Dimensionierung der Pumpe kann Energie und  $CO_2$ - Emissionen eingespart werden. Zudem konnten in der Variante 1 und 2 kleiner Pumpen gewählt werden, da der Förderstrom und die Förderhöhe niedriger waren als im Ist-Zustand des Gebäudes. Dabei reduzierte sich die Förderhöhe vom Ist-Zustand mit 1224 mbar, bei Variante 1 auf 639 mbar (um 585 mbar) und bei Variante 2 auf 326 mbar (um 898 mbar). Der Förderstrom reduziert sich vom Ist-Zustand mit 3143 l/h bei Variante 1 auf 2347 l/h (um 796 l/h) und bei Variante 2 auf 1465 l/h (um 1678 l/h).

Als Nächstes wurden die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen mithilfe der Gesamtheizlast des Gebäudes und den Systemtemperaturen der Heizungsanlage bestimmt. Die Jahresarbeitszahl gibt Aufschluss über die Effizienz und Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe innerhalb eines Jahres. Für den Ist-Zustand mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe und für die Variante 1 wurde die Jahresarbeitszahl anhand der VDI 4650 Blatt 1 errechnet. Bei der Variante 2 wurde die Systemjahresarbeitszahlen mit dem Programm Polysun ermittelt. Die Jahresarbeitszahl gibt Aufschluss über die Effizienz und Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe innerhalb eines Jahres. Die errechnete Jahresarbeitszahl des Ist-Zustands mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe Logatherm WLW196i-14 IR liegt bei 3,98 und die der Variante 1 mit der Sole-Wasser-Wärmepumpe Logatherm WSW196i.2-16 bei 4,35. Für die Variante 2 errechnet Systemjahresarbeitszahl mit der Sole-Wasser-Wärmepumpe EcoTouch 5014.5 Ai liegt ohne Batterie bei 3,8 und mit Batterie bei 3,7. Dabei ist die mit Polysun ermittelte Jahresarbeitszahl realistischer, da hier der gesamte Stromverbrauch, der Netzbezug, die Netzaufwandszahl und die Autarkie in die Berechnung einbezogen werden.

Das letzte Berechnungsverfahren stellt die Bewertung der Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes anhand der Vornormreihe DIN V 18599 dar. In der Berechnung werden alle Energiemengen eines Gebäudes betrachtet. Dazu wird eine Monatsbilanzierung der Heizung, des Warmwassers, der raumluftechnischen Konditionierung und der Beleuchtung durchgeführt. Die Monatsbilanzierungen werden zu einer Jahresbilanz zusammenaddiert. Wichtige Parameter der Bewertung des Gebäudes sind der Transmissionswärmeverlustkoeffizient, die Nutz-, die End- und die Primärenergie.

Der Transmissionswärmeverlustkoeffizient gibt Aufschluss über die Dämmqualität des Gebäudes und liegt für modernisierte Altbauten nach GEG -Anforderung bei  $0,351 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Beim Ist-Zustand des Gebäudes liegt der Transmissionswärmeverlustkoeffizient bei  $0,865 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , in Variante 1 bei  $0,612 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  und in Variante 2 bei  $0,404 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

Die Nutzenergie beschreibt die Energie, die dem Verbraucher direkt zur Verfügung stehen, abzüglich der Anlagen- und Wärmeverluste. Im Ist-Zustand mit altem Heizkessel entsprechen diese 56.759 kWh/a, mit neuem Heizkessel 57.336 kWh/a und mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe 54.984 kWh/a. Für die

Variante 1 liegt die Nutzenergie bei 41.045 kWh/a und für Variante 2 ohne Batterie bei 19.001 kWh/a und mit Batterie bei 18.999 kWh/a.

Der Parameter Endenergie beschreibt die Energiemenge, die der Anlagentechnik zur Verfügung stehen. Für den Ist-Zustand des Gebäudes mit altem Heizkessel entspricht sie 76.917 kWh/a, mit neuem Heizkessel 74.192 kWh/a und mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe 32.204 kWh/a. Für die Variante 1 liegt der Endenergiebedarf bei 16.477 kWh/a und für die Variante 2 ohne und mit Batterie bei 19.058 kWh/a. Die Endenergie reduziert sich bei der Variante 1 sowie bei dem Ist-Zustand mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe, da vor Ort Energie und Strom erzeugt wird. Dadurch kann die Endenergie geringer als die Nutzenergie sein. In diesen beiden Varianten wird mithilfe der Wärmepumpe, ob Luft-Wasser-WP oder Sole-Wasser-WP, vor Ort Energie hergestellt. Bei Variante 2 ist die Endenergie trotz WP und PVT-Kollektoren etwas höher als die Nutzenergie.

Die Primärenergie beschreibt die Energie, die die vorgelagerten Prozessketten eines Brennstoffes außerhalb der Bilanzgrenze (dem Gebäude) einbezieht. In der Primärenergie wird nur der nicht erneuerbare Anteil angegeben. Für den Ist-Zustand des Gebäudes mit altem Heizkessel entspricht der Primärenergiebedarf 80.593 kWh/a, mit neuem Heizkessel 77.835 kWh/a und mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe 57.966 kWh/a. Für die Variante 1 liegt der Primärenergiebedarf bei 29.659 kWh/a und für die Variante 2 ohne Batterie bei 3.663 kWh/a und mit Batterie bei 3.679 kWh/a. Die Primärenergie der Varianten des Ist-Zustandes mit einem Heizkessel sind deutlich höher als die der anderen Varianten, da der Ölheizkessel keinen erneuerbaren Anteil aufweist. Zudem ist auffällig, dass die Primärenergie der Variante 2 geringer als der Endenergiebedarf ist, da nicht der gesamte Primärenergiebedarf gemeint ist, sondern immer nur der nicht erneuerbare Anteil der Primärenergie. Dadurch kann der Primärenergiebedarf höher sein als die Endenergie.

Am Ende der Arbeit wurden die Ergebnisse der Berechnungsmethoden anhand ökonomischer und ökologischer Aspekte bewertet. In der ökologischen Auswertung wurden die  $CO_2$ -Emissionen mit und ohne Vorkette betrachtet.  $CO_2$ -Emissionen ohne Vorkette wurden aus dem Endenergiebedarf und  $CO_2$ -Emissionen mit Vorkette wurden aus dem Primärenergiebedarf der Varianten errechnet. Die  $CO_2$ -Äquivalenten ohne Vorkette liegen bei dem Ist-Zustand mit altem Heizkessel bei 23,84 Tonnen, bei dem mit neuem Heizkessel bei 23 Tonnen und bei dem mit der Luft-Wasser-WP bei 13,78 Tonnen. Für die Variante 1 liegen diese bei 7,05 Tonnen und bei Variante 2 mit und ohne Batterie bei 8,16 Tonnen.

Die  $CO_2$ -Äquivalenten mit Vorkette liegen bei dem Ist-Zustand mit altem Heizkessel bei 29,98 Tonnen, bei dem mit neuem Heizkessel bei 28,95 Tonnen und bei dem mit der Luft-Wasser-WP bei 28,11 Tonnen. Für die Variante 1 liegen diese bei 14,38 Tonnen und bei Variante 2 mit und ohne Batterie bei 1,78 Tonnen. Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung zeigen, dass die höchsten Emissionen von den unsanierten Gebäude mit konventionellen Wärmeerzeuger, also dem Ist-Zustand mit neuem und altem Heizkessel, ausgehen. Zudem ist zu erkennen, dass die  $CO_2$ -Äquivalente mit Vorkette, bis auf Variante 2, höher sind als die  $CO_2$ -Äquivalente ohne Vorkette, da in der Vorkette sowohl die Umwandlung, die Verteilung und die Rohstoffgewinnung miteinbezogen wird. Die  $CO_2$ -Äquivalente mit Vorkette sind bei Variante 2 niedriger, da auch der Primärenergiebedarf dieser Variante geringer als die Endenergie ist. Anhand der ökologischen Bewertung wurde sich für das Beispielgebäude Variante 1 und Variante 2 lohnen.

Anhand der Annuitätenmethode wurden die unterschiedlichen Varianten ökonomisch bewertet. Die Gesamtannuitätenkosten des Ist-Zustandes liegen mit neuem Heizkessel bei 12.753 €/a und mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe bei 7.951 €/a. Für die Variante 1 liegen diese bei 7.160 €/a und für Variante 2 ohne Batterie bei 12.049 €/a und mit Batterie bei 11.513 €/a. Anhand der ökonomischen Bewertung wurde sich für das Beispielgebäude Variante 1 und der Ist-Zustand mit der Luft-Wasser-WP lohnen.

In einer weiterführenden Arbeit könnten weitere Gebäudetypen, Baujahren und Varianten anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsmethoden bewertet werden. Das ermöglicht zum einen allgemeingültige Aussagen über unterschiedliche Gebäudekonzepte zu treffen und zum anderen eine Vergleichbarkeit zwischen identischen Gebäudetypen oder Baujahren zu schaffen.

Zudem kann mithilfe der Betrachtung weiterer Gebäudetypen, Baujahren und Sanierungsgrade die Effizienz der Wärmepumpe im Gebäudebestand anhand der Jahresarbeitszahl untersucht werden. Dabei könnte, wie in der Studie „WPsmart im Bestandsgebäude“ des Fraunhofer-Instituts, ein Monitoring durchgeführt werden, bei dem Bestandsgebäude mit bereits eingebauten Wärmepumpen über einen bestimmten Zeitraum beobachtet werden.

## Literaturverzeichnis

Baunetz\_Wissen\_: Transmissionswärmeverlust. Hg. v. Baunetz\_Wissen. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/transmissionswaermeverlust-45031>, zuletzt geprüft am 05.06.2023.

bdew-Energie.Wasser.leben. (2023): Strompreisanalyse April 2023. Die BDEW-Strompreisanalyse zeigt die aktuelle Entwicklung der Strompreise in Deutschland. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. bdew-Energie.Wasser.leben. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, zuletzt geprüft am 10.06.2023.

Beckmann, Nicolei (2020): Energieeffizientes Bauen und wie es sich lohnt. Ein Ratgeber für Bauherren. Wiesbaden: Springer.

VDI 4650, März 2019: Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen Elektrowärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung.

Bettgenhäuser, Kjell; Boermans, Thomas (2011): Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland. Hg. v. Umwelt Bundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4070.pdf>, zuletzt geprüft am 10.06.2023.

Beucker, Severin (o.J.): Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudebestand durch digitales Energiemanagement. Hg. v. Borderstep Institut. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/08/Reduktion-von-CO2-Emissionen-durch-Energiemanagement\\_20190812.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/08/Reduktion-von-CO2-Emissionen-durch-Energiemanagement_20190812.pdf), zuletzt geprüft am 10.05.2023.

Bollin, Elmar (2016): Regenerative Energien im Gebäude nutzen. Wärme- und Kälteversorgung, Automation, Ausgeführte Beispiele. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer.

Buderus: Logatherm WLW196i AR Logatherm WLW196i IR. Luft-Wasser-Wärmepumpe, Leistungsbereich 4-14 kW. Hg. v. Buderus Thermotechnik GmbH. Online verfügbar unter <https://productsde.buderus.com/buderus/productsde.buderus.com/broschueren/buderus-broschuere-logatherm-wlw196i-ar-ir-de-122018.pdf>, zuletzt geprüft am 21.05.2023.

Bundesregierung (08.08.2020): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden §72 Betriebsverbot für Heizkessel, Ölheizungen. GEG. Fundstelle: Bundesministerium der Justiz. Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/geg/\\_72.html](https://www.gesetze-im-internet.de/geg/_72.html), zuletzt geprüft am 20.05.2023.

Bundestag (08.08.2020): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz)- Anlage 7 (zu §48) Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen bei Änderung an bestehenden Gebäuden. GEG. Fundstelle: BGBl. I 2020, 1783-1786. Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage\\_7.html](https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_7.html), zuletzt geprüft am 21.04.2023.

Burkhardt, Wolfgang; Kraus, Ronald; Ziegler, Franz Josef; Kirsch, Christian; Stockinger, Volker (2011): Projektierung von Warmwasser. 8.Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.

bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V.: JAZ-Rechner. Hg. v. bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/jazrechner/>, zuletzt geprüft am 25.05.2023.

- bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V. (o.J.): Wärmepumpen tragen zum Klimaschutz bei. Hg. v. bwp-Bundesverband Wärmepumpe e.V. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/klimaschutz/>, zuletzt geprüft am 10.05.2023.
- Calließ, Sebastian (2023): Gas- oder Ölheizung? Ein Vergleich mit der Wärmepumpe. Hg. v. thermondo. Online verfügbar unter <https://www.thermondo.de/info/rat/vergleich/erdgas-oder-heizoel/>, zuletzt geprüft am 10.06.2023.
- Consolar Solare Energiesysteme GmbH (2018): PVT-Kollektoren Solink. Online verfügbar unter <https://www.consolar.de/de/pvt-kollektor-solink/>, zuletzt geprüft am 05.06.2023.
- Die Bundesregierung (2023): Klimaschutz braucht Wärmewende. Klimafreundlich Heizen: Neues Gebäudeenergiegesetz kommt. Hg. v. Die Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/neues-gebaeudeenergiegesetz-2184942>, zuletzt aktualisiert am 10.05.2023.
- Dildey, Fritz (2022/2023): Solar Thermal Systems. HAW- Hochschule für angewandte Wissenschaften. Department Umwelttechnik. Hamburg, 2022/2023.
- Vornorm DIN V 18599, Dezember 2011: Energetische Bewertung von Gebäuden- Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- Europa Lehrmittel (Hg.) (2018): Installations- und Heizungstechnik. Technische Mathematik. Unter Mitarbeit von Europa Lehrmittel. Europa- Fachbuchreihe für metalltechnische Berufe. 6.Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel.
- Glaesmann, Nicolas (2022): Wärmepumpenheizungen. Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude. Wiesbaden: Springer.
- Günther, Danny; Wapler Jeannette; Langner, Robert; Helmling, Sebastian; Miara, Marek; Fischer, David et al. (2020): WPsmart im Bestand. Felduntersuchung optimal abgestimmter Wärmepumpenheizungssysteme in Bestandsgebäuden beim Betrieb im konventionellen sowie im intelligenten Stromnetz (Smart Grid). Version 2.1. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Fraunhofer-Institut; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Freiburg. Online verfügbar unter [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart\\_im\\_Bestand-Schlussbericht.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf), zuletzt geprüft am 10.05.2023.
- Held, Elmar (2019): Wie funktioniert eigentlich die Regelung eines Ventils. Hg. v. Haustec.de. Online verfügbar unter <https://www.haustec.de/heizung/waermeverteilung/wie-funktioniert-eigentlich-die-regelung-eines-ventils#:~:text=Der%20Kv%2DWert%20beschreibt,und%20bis%20zwei%20Kelvin%20betr%C3%A4gt.,> zuletzt geprüft am 12.05.2023.
- Hottgenroth Software AG (o.J.): Wärmedurchlasswiderstände von Bodenbelägen. Hg. v. Hottgenroth Software AG. Online verfügbar unter <https://confluence.hottgenroth.de/pages/viewpage.action?pageId=78244800>, zuletzt geprüft am 08.05.2023.
- Hübner, W. (2020): Durchflussanzeiger und -Einsteller. Hg. v. Wärmepumpen, Heißwasser, Lüftung und Energieberatung. Online verfügbar unter

<https://www.genialwarm.de/index.php/fussbodenheizung/durchflussanzeiger-ersatzteil>, zuletzt geprüft am 07.05.2023.

Icha, Petra; Lauf, Thomas (2022): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2021. Unter Mitarbeit von Gunter Kuhs. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13\\_cc\\_15-2022\\_strommix\\_2022\\_fin\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf), zuletzt geprüft am 10.06.2023.

K.R (2023): Nutzenergie, Endenergie, Primärenergie. Nutzenergie, Endenergie, Primärenergie – die Definition der Begriffe aus dem Energieausweis verständlich erklärt. Hg. v. Baugorilla. Online verfügbar unter <https://baugorilla.com/energieausweis-nutzenergie-endenergie-primarenergie>, zuletzt geprüft am 10.06.2023.

Kramer, Korbinian (2020): PVT-Status Quo für den Anwendermarkt. Status Quo Herausforderung im Zusammenhang mit dem Markteintritt. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg. Online verfügbar unter [https://www.getec-freiburg.de/fileadmin/content/GETEC/PDF\\_Dokumente/Vortraege\\_2020/FR\\_PVT\\_KramerK\\_final\\_V2.pdf](https://www.getec-freiburg.de/fileadmin/content/GETEC/PDF_Dokumente/Vortraege_2020/FR_PVT_KramerK_final_V2.pdf), zuletzt geprüft am 22.06.2023.

Leibfried, Ulrich; Wagner, Andreas; Abdul-Zahar, Amar; KIT, Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau (2017): Hocheffiziente, auf intelligenter Verknüpfung von PVT- und Wärmepumpentechnik basierenden Wärmeversorgung für Gebäudebestand und Neubau. Teil 1: Funktionsentwicklung und Aufbau eines Anwender-Konsortiums. Hg. v. Consolar Solare Energiesysteme GmbH. Karlsruher Institut für Technologie. Online verfügbar unter <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33226-01.pdf>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2018.

Müller, Berit; Grammer Solar GmbH; Consolar Solare Energiesysteme GmbH (o.J.): Hybridkollektor/PVT-Kollektor. Geschichte der Sanitär- Heizungs- Klima und Solartechnik. Hg. v. Bosity-online. Online verfügbar unter <http://www.bosity-online.de/Hybridkollektor.htm>, zuletzt geprüft am 11.05.2023.

OldBo (2019): Systemtemperatur. Hg. v. HaustechnikDialog. Online verfügbar unter <https://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/2539/Systemtemperatur>, zuletzt geprüft am 07.05.2023.

Paschotta, Rüdiger (2014): Aufwandszahl. Hg. v. RP-Energie-Lexikon. Online verfügbar unter <https://www.energie-lexikon.info/aufwandszahl.html>, zuletzt aktualisiert am 05.06.2023, zuletzt geprüft am 20.06.2023.

Norm DIN EN 1264-3, 08.2021: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung.

Sauter, David; Hunziker, Manuel; Schubert, Maike; Sperr, Nadia; Martin Koch; Rohrer, Jürg (2020): L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe. Neuartiges System für die optimierte Nutzung von PVT und Wärmepumpe in EFH ohne Erdwärmesonde und Aussenlufteinheit. Hg. v. Bundesamt für Energie BFE und Schweizerische Eidgenossenschaft. ZHAW Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften; Bundesamt für Energie BFE. Wädenswil. Online verfügbar unter <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=65363&Load=true>, zuletzt geprüft am 09.06.2023.

- Schild, Kai; Brück, Henrik (2010): Energie-Effizienzbewertung von Gebäuden. Anforderungen und Nachweisverfahren gemäß EnEV 2009. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+ Teubner Verlag.
- Schlobach, Martin (2021a): Auslegung einer Heizungspumpe mit Beispielrechnung. Hg. v. Haustechnik Verstehen. Online verfügbar unter <https://www.haustechnikverstehen.de/auslegung-einer-heizungspumpe-mit-beispielrechnung/>, zuletzt geprüft am 12.05.2023.
- Schlobach, Martin (2021b): Hydraulischen Abgleich selber machen- Schritt 1: Grundlagen. Hg. v. Haustechnik Verstehen. Online verfügbar unter <https://www.haustechnikverstehen.de/hydraulischer-abgleich-selber-machen-grundlagen/>, zuletzt geprüft am 15.05.2023.
- Schlobach, Martin (2022a): Hydraulischer Abgleich selber machen- Schritt 7: Heizungspumpe berechnen. Hg. v. Haustechnik Verstehen. Online verfügbar unter <https://www.haustechnikverstehen.de/hydraulischer-abgleich-heizungspumpe-berechnen/>, zuletzt geprüft am 12.05.2023.
- Schlobach, Martin (2022b): Hydraulischer Abgleich selber machen-Schritt 6: Voreinstellung der Heizkörperventile. Hg. v. Haustechnik Verstehen. Online verfügbar unter <https://www.haustechnikverstehen.de/hydraulischer-abgleich-voreinstellung-heizkoerperventile/>, zuletzt geprüft am 12.05.2023.
- Siegemund, Andreas (2021): PVT-Wärmepumpen-System. Die geräuschlose Alternative zur Luftwärmepumpe? Aktionskreis Energie. Frankfurt, 10.10.2021. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=CgHxBhVy0r4>, zuletzt geprüft am 28.05.2023.
- Treifelsberger, Andreas (o.J.): Fußbodenheizung Durchflussmenge einstellen. Hg. v. Heizungshelden.com. Online verfügbar unter <https://heizungshelden.com/fussbodenheizung-durchflussmenge-einstellen/>, zuletzt geprüft am 07.05.2023.
- Umwelt Bundesamt (2022): Energiesparende Gebäude. Hg. v. Umwelt Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebaeude#gebaeude-wichtig-fur-den-klimaschutz>, zuletzt geprüft am 10.05.2023.
- VdZ-Spitzenverband der Gebäudetechnik (2021): Hydraulischer Abgleich in Heizungsanlagen. 1.Auflage. Hg. v. VdZ e.V./FÖGES GmbH. Berlin. Online verfügbar unter [https://files.vdzev.de/pdfs/hydraulischer-abgleich-heizungsanlagen/Hydraulischer\\_Abgleich\\_Heizungsanlagen.pdf](https://files.vdzev.de/pdfs/hydraulischer-abgleich-heizungsanlagen/Hydraulischer_Abgleich_Heizungsanlagen.pdf), zuletzt geprüft am 11.05.2023.
- DIN/TS DIN/TS 12831-1, April 2020: Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast.
- Wietschel, Martin; Ullrich, Sandra; Markewitz, Peter; Schulte, Friedrich; Genoese, Fabio (2015): Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer.



## **Eidstaatliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst habe und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den .....

..  ..

*(Unterschrift der/des Studierenden)*

# Anhang

## Norm-Innentemperatur

Anhang Tabelle 1: Norm-Innentemperaturen nach DIN EN 12831, Beiblatt 1 (Burkhardt et al. 2011)

Ifd. Nr.	Raumart	Norm-Innentemperatur $\theta_{i,int}$ [°C]
1	Wohn- und Schlafräume	+ 20
2	Büroräume, Sitzungszimmer, Ausstellungsräume, Haupttreppenhallen und Schalterhallen	+ 20
3	Hotelzimmer	+ 20
4	Verkaufsräume und Läden allgemein	+ 20
5	Unterrichtsräume allgemein	+ 20
6	Theater- und Konzerträume	+ 20
7	Bade- und Duschräume, Bäder, Umkleideräume, Untersuchungszimmer (generell jede Nutzung für den unbedeckten Bereich)	+ 24
8	WC-Räume	+ 20
9	Beheizte Nebenräume (Flure, Treppenhäuser)	+ 15
10	Unbeheizte Nebenräume (Keller, Treppenhäuser, Nebenräume, Abstellräume)	+ 10

## Wasserdichte

$\vartheta$ in °C	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\vartheta$ in °C	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\vartheta$ in °C	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>
30	995,6	55	985,7	80	971,8
35	993,9	60	983,2	85	968,6
40	992,2	65	980,5	90	965,3
45	990,2	70	977,7	95	961,9
50	988,0	75	974,9	100	958,3

Anhang Abbildung 1: Wasserdichte abhängig von der Temperatur (Burkhardt et al. 2011)

## Primärenergiefaktor $f_p$

Energieträger <sup>a</sup>		Primärenergiefaktoren $f_p$	
		insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil
		A	B
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus KWK <sup>b</sup>	fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,7	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,5	2,0
	Vordrängungstrommix	2,5	2,5
Umweltenergie <sup>c</sup>	Solarenergie	1,0	0,0
	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme	1,0	0,0
	Umgebungskälte	1,0	0,0
	Windenergie	1,0	0,0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	aus Prozessen, siehe 3.1.32	1,0	0,0

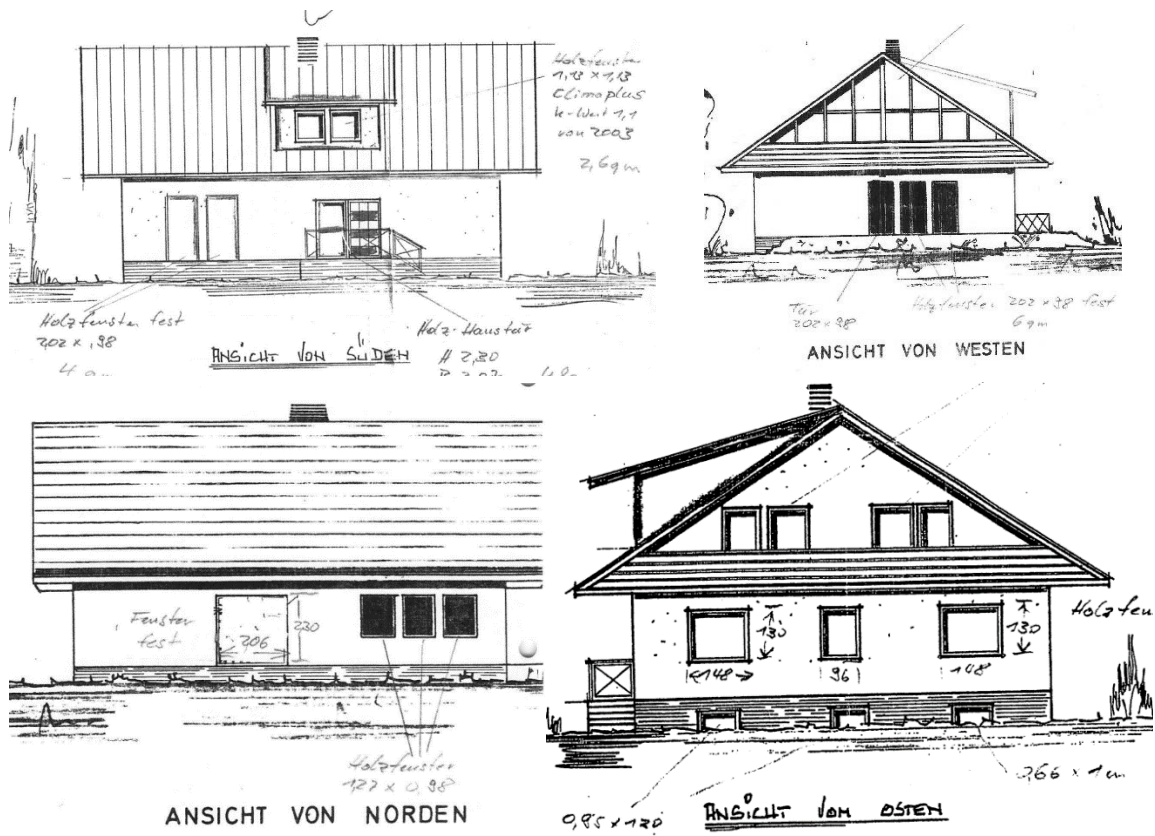
<sup>a</sup> Bezugsgröße Endenergie: Heizwert  $H_i$ .

<sup>b</sup> Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %.

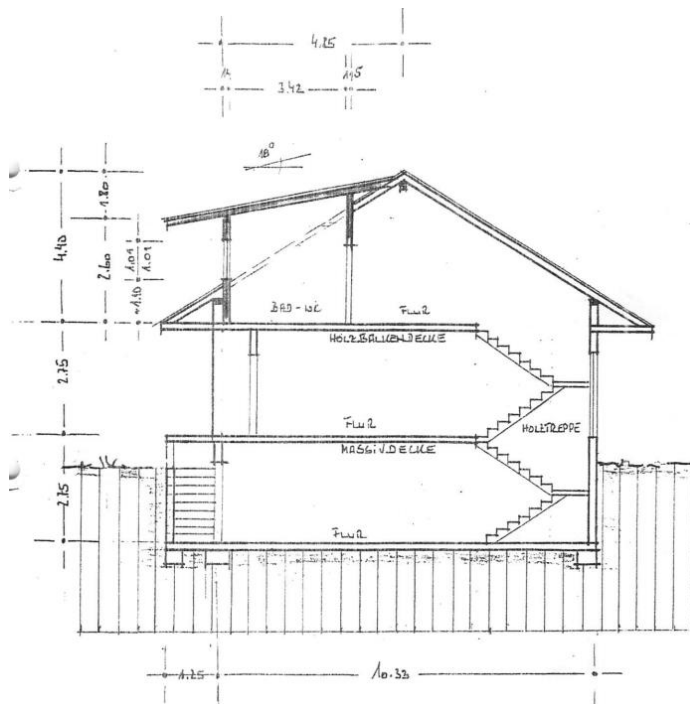
<sup>c</sup> Der Primärenergiefaktor gilt für die Umweltenergie an sich. Strom, Wärme oder Kälte, die aus Umweltenergie generiert werden, sind entsprechend den jeweiligen Vorschriften (z. B. Verrechnung auf Endenergieebene oder mit dem Stromverdrängungsmix) zu bewerten.

Anhang Abbildung 2: Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599-1 (Vornorm DIN V 18599)

## Unterlagen zum Gebäude



Anhang Abbildung 3: Ansichten des Gebäudes (Unterlagen des Kunden)



Anhang Abbildung 4: Schnitt des Einfamilienhauses (Unterlagen des Kunden)

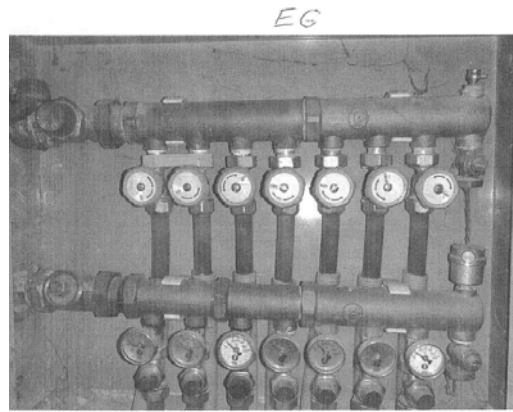
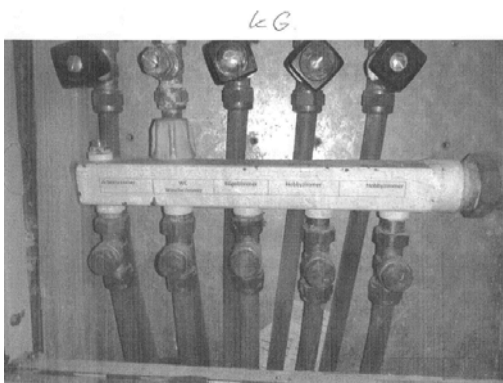


Anhang Abbildung 5: Typschild Heizkessel (Unterlagen des Kunden)

1 Raum-Nr.	2 Bezeichnung des Raumes	3 Raum-tiefe m <sup>2</sup>	4 Innertemp. °C	5 Bereinigter Wärme- bedarf kcal/h (W)	6 Zusatz In Radiator- heizkörpern Wärmeleistung Heizkörper kcal/h (W)	7 Zusatz In Radiator- heizkörpern Wärmeleistung Heizkörper kcal/h (W)	8 Guß- / Stahl- Radiatoren nach DIN 4720/22 (Gliederzahlen)										18 Andere Heizflächen	19 Anzahl der Heiz- körper	20 Besi- tzt- länge	21 Tot- schleife Wärme- leistung kcal/h (W)
							9 300		10 500		11 350		12 200		13 150					
<b>Keller</b>																				
01	Hobbyraum	25,0	20	25,0	90	-	1										m Rohr			
	dito					-	1										120			
02	Sauna	12,2	22	10,8	88	-	1										35			
03	Dusche	10,3	22	9,0	86	-	1										112			
04	Gast	13,3	20	11,9	85	-	1										108			
<b>Erdgeschoss</b>																				
1	Wohnen	40,2	20	41,0	96		1										36			
	dito						1										160			
2	Küche	10,5	20	10,2	87		1										35			
3	Hausarb.-Raum	7,2	18	6,5	87		1										70			
4	Kind II	13,6	20	14,0	83		1										110			
5	Bad	6,3	22	6,0	100		1										73			
6	Kind II	14,0	20	15,2	102		1										118			
<b>Dachgeschoss</b>																				
1.1	studio	54	20	56,0	103		1										160			
	dito						1										160			
1.2	Schlafen	3,5	20	3,6	104	-	2										120			
1.3	Bad	1,2	22	1,2	99	-	1										70		17 Rollen	120m

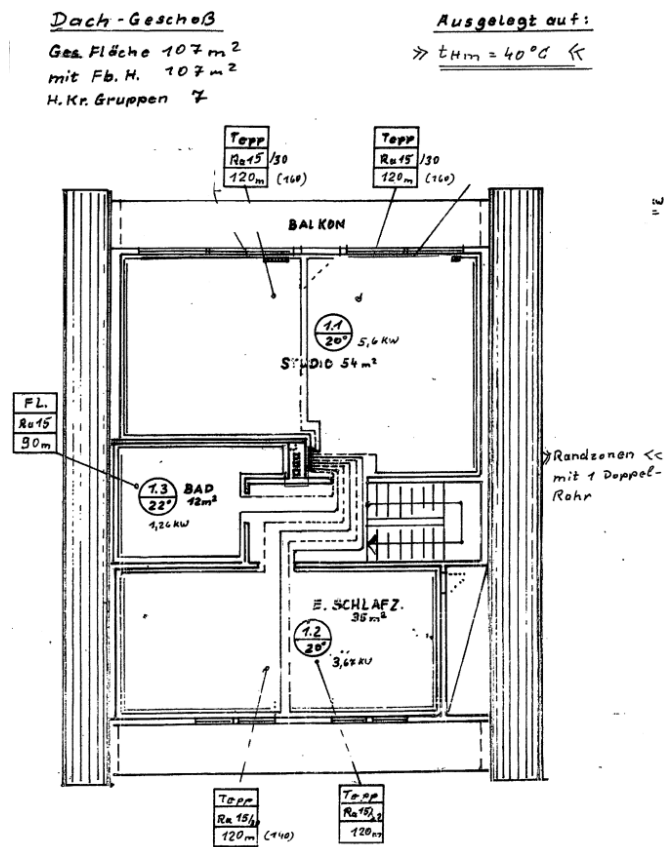
Pumpe Grundlast By UPS 220V mit 5m Länge

Anhang Abbildung 6: Datenblatt für die Fußbodenheizung des Gebäudes (Unterlagen des Kunden)

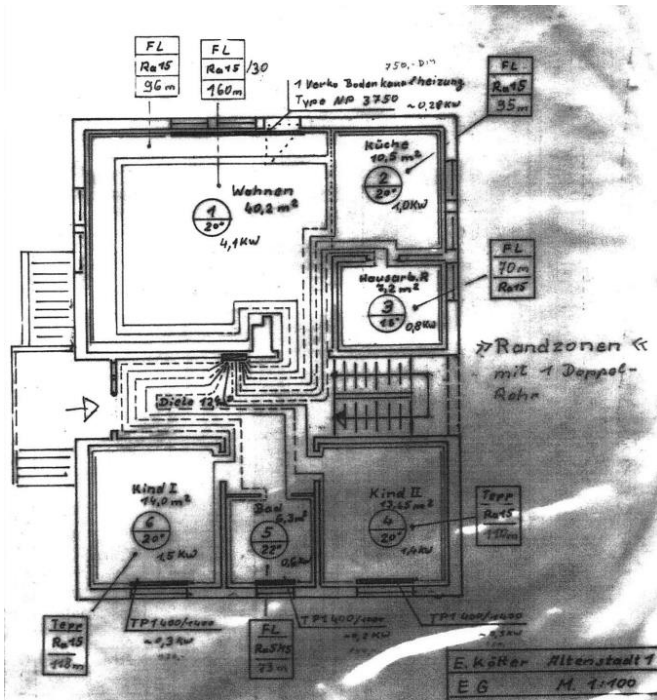


Arbeits- | Bad ↑ Küche ↑ Wohn-Ess-  
 zimmer | Schlaft- ↑ Hans-  
 zimmer | zimmer

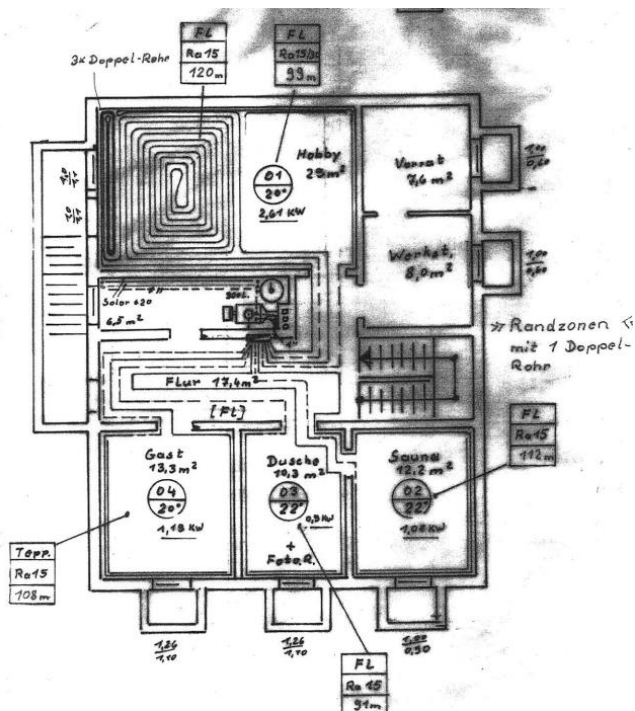
Anhang Abbildung 7: Heizkreisverteiler der Fußbodenheizung für EG und Keller (Unterlagen des Kunden)



Anhang Abbildung 8: Angaben zur FBH im DG (Unterlagen des Kunden)



Anhang Abbildung 9: Angaben zur FBH im EG (Unterlagen des Kunden)



Anhang Abbildung 10: Angaben zur FBH im Keller (Unterlagen des Kunden)

## Berechnungen der Normheizlast der anderen beheizten Räume des Gebäudes

EG-Küche

Norm-Transmissionsverluste:

$$H_{T,ie} = \left( 17,05 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 2,48 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) \\ = 22,29 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(FB)} = \left( 12,11 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 2,88 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(DE)} = 4,78 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 10)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) = 0,79 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(FB)} + H_{T,iue(DE)} = 3,67 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 18)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 7,14 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,80 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IT)} = \left( \frac{(20 - 18)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 2,1 \text{ m}^2 \cdot 1,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,26 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(IT)} = 1,06 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 22,29 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 3,67 \text{ W} + 1,06 \text{ W} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 818,71 \text{ W} = 0,82 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{36,2 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 17,38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 17,38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 34,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 25,85 \text{ m}^3 = 12,93 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 34,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 12,93 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 34,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 34,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 \text{ K} - (-10,3 \text{ K})) = 358,5 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 819 \text{ W} + 359 \text{ W} = 1178 \text{ W}$$

EG-Hausarbeitsraum

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 6,13 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,24 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) \\ = 8,99 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 9,24 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(18 - 15)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) = 1,76 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(FB)} = \left( 8,52 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(18 - 12)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) = 1,63 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(DE)} = 3,43 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(18 - 10)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) = 0,48 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(FB)} + H_{T,iue(DE)} = 3,87 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(18 - 20)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 7,14 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(18 - 20)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 7,37 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \\ = -1,74 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IT)} = \left( \frac{(18 - 20)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 2,1 \text{ m}^2 \cdot 1,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,27 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(DE)} = \left( \frac{(18 - 20)}{(18 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 5,44 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,15 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(IT)} + H_{T,ij(DE)} = -2,16 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 8,99 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 3,87 \text{ W} + (-2,16) \text{ W} \right) \cdot (18 - (-10,3)) \text{K} = 302,81 \text{ W} = 0,30 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{28,4 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 13,63 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 13,63 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 27,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 19,05 \text{ m}^3 = 9,53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 27,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 9,53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 27,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 27,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (18 - (-10,3)) \text{K} = 262,7 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 303 \text{ W} + 263 \text{ W} = 565,5 \text{ W}$$



EG-Bad

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 5,99 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,22 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) \\ = 8,81 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 5,42 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(22 - 15)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 2,11 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IT)} = \left( 1,79 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,84 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(22 - 15)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 0,75 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(IT)} = 2,86 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 15,74 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 1,66 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(DE)} = \left( \frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 7,49 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,19 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(DE)} = 1,85 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 8,81 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 2,86 \text{ W} + 1,85 \text{ W} \right) \cdot (22 - (-10,3)) \text{ K} = 436,7 \text{ W} = 0,437 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{14,4 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 6,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 6,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 13,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 15,62 \text{ m}^3 = 7,81 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 13,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 7,81 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 13,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 13,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (22 - (-10,3)) \text{ K} = 151,6 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 437 \text{ W} + 152 \text{ W} = 589 \text{ W}$$

EG-Kind 1

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 20,41 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,924 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) \\ = 23,76 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 12,54 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 3,72 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IT)} = \left( 1,79 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,84 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 0,57 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(DE)} = 5,55 \text{ m}^2 \cdot (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot \frac{(20-10)}{(20-(-10,3))} \text{ K} \quad H_{T,iue(DE)} = \left( 5,55 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20-10)}{(20-(-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 0,92 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(IT)} + H_{T,iue(DE)} = 5,21 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 7,87 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,88 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(FB)} = \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 16,46 \text{ m}^2 \cdot 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,87 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(FB)} = -1,75 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 23,76 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 5,21 \text{ W} - 1,75 \text{ W} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 824,77 \text{ W} = 0,825 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{42,01 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 20,17 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 20,17 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 40,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 33,9 \text{ m}^3 = 16,95 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 40,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 16,95 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 40,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 40,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 415,5 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 825 \text{ W} + 416 \text{ W} = 1241 \text{ W}$$

EG-Kind 2

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 24,26 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,92 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) \\ = 27,21 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 8,99 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) = 2,67 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IT)} = \left( 1,79 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,84 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) = 0,57 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(DE)} = \left( 5,6 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20-10)}{(20-(-10,3))} \text{K} \right) \right) = 0,92 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(IT)} + H_{T,iue(DE)} = 4,16 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 7,865 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,88 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 27,21 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 4,16 \text{ W} - 0,88 \text{ W} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{K} = 923,85 \text{ W} = 0,924 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{42,5 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 20,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 20,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 40,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 33,99 \text{ m}^3 = 16,99 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 40,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 16,99 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 40,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 40,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 - (-10,3)) \text{K} = 420,3 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:

$$\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 924 \text{ W} + 420 \text{ W} = 1344 \text{ W}$$

DG-Studio

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 10,24 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 14,55 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,1 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 70,56 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) = 83,12 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( \left( 17,22 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 10)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) + \left( 4,74 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) \right) = 12,48 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(FB)} = \left( 6,97 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) = 0,58 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(FB)} = 13,06 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 30,91 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(20 - 20)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 9,27 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -3,47 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IT)} = \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 1,89 \text{ m}^2 \cdot 1,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(20 - 20)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 4,1 \text{ m}^2 \cdot 1,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,23 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(FB)} = \left( \frac{(20 - 20)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 40,05 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(20 - 18)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 5,44 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,14 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(IT)} + H_{T,ij(FB)} = -3,56 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 83,12 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 13,06 \text{ W} - 3,56 \text{ W} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{K} = 2806,39 \text{ W} = 2,8 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{124,2 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 59,62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 59,62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 119,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 149,06 \text{ m}^3 = 74,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 119,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 74,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 119,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 119,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 - (-10,3))\text{K} = 1228 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 2806 \text{ W} + 1228 \text{ W} = 4034 \text{ W}$

DG-Schlafen

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 16,66 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 8,08 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 44,68 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) = 73,36 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( \left( 12,6 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 10)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) + \left( 4,59 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) \right) = 9,67 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(FB)} = \left( 3,89 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \right) = 0,32 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(FB)} = 9,99 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 20)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 9,28 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 6,78 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,76 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(FB)} = \left( \frac{(20 - 20)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 21,78 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(20 - 22)}{(20 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 7,49 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -0,2 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(FB)} = -0,96 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left( 73,36 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 9,99 \text{ W} - 0,96 \text{ W} \right) \cdot (20 - (-10,3))\text{K} = 2496,42 \text{ W} = 2,5 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{90,4 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 43,39 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 43,39 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 86,79 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{h} \cdot 85,93 \text{ m}^3 = 42,97 \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$q_{env/min} = \max\left(86,79 \frac{\text{m}^3}{h}; 42,97 \frac{\text{m}^3}{h}\right) = 86,79 \frac{\text{m}^3}{h}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 86,79 \frac{\text{m}^3}{h} \cdot (20 - (-10,3))\text{K} = 894,11 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 2496 \text{ W} + 894 \text{ W} = 3390 \text{ W}$

DG-Bad

Norm-Transmissionsverlust:

$$\begin{aligned} H_{T,ie} = & \left(0,95 \text{ m}^2 \cdot \left((0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) + \left(6,23 \text{ m}^2 \cdot \left((0,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) \\ & + \left(2,6 \text{ m}^2 \cdot \left((1,1 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) + \left(16,26 \text{ m}^2 \cdot \left((0,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) \\ & + \left(10,04 \text{ m}^2 \cdot 0,1 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) + \left(2,1 \text{ m}^2 \cdot \left((0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) = 24,02 \frac{\text{W}}{\text{K}} \end{aligned}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left(2,16 \text{ m}^2 \cdot \left((1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right) \cdot \left(\frac{(22 - 10)}{(22 - (-10,3))} \text{K}\right)\right) = 1,44 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(FB)} = \left(6,48 \text{ m}^2 \cdot \left((0,4 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right) \cdot \left(\frac{(22 - 15)}{(22 - (-10,3))} \text{K}\right)\right) = 0,70 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(FB)} = 2,14 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left(\frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{K}\right) \cdot 37,62 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 3,96 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IT)} = \left(\frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{K}\right) \cdot 1,89 \text{ m}^2 \cdot 1,84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,22 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(FB)} = \left(\frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{K}\right) \cdot 5,01 \text{ m}^2 \cdot 0,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,12 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(IW)} + H_{T,ij(IT)} + H_{T,ij(FB)} = 4,3 \text{ W}$$

$$\Phi_T = \left(24,02 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 2,14 \text{ W} + 4,3 \text{ W}\right) \cdot (22 - (-10,3))\text{K} = 983,86 \text{ W} = 0,98 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{36,9 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 17,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min\left(279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; 17,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2\right) = 35,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 30,47 \text{ m}^3 = 15,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max\left(35,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; 15,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) = 35,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 35,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (22 - (-10,3))\text{K} = 388,8 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 984 \text{ W} + 389 \text{ W} = 1373 \text{ W}$

Keller-Hobby

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left(9,62 \text{ m}^2 \cdot \left((0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) + \left(1,78 \text{ m}^2 \cdot \left((2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)\right) = 13,64 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left(12,95 \text{ m}^2 \cdot \left((1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right) \cdot \left(\frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{K}\right)\right) + \left(14,47 \text{ m}^2 \cdot \left((1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right) \cdot \left(\frac{(20 - 15)}{(20 - (-10,3))} \text{K}\right)\right) = 10,45 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IT)} = \left(3,89 \text{ m}^2 \cdot \left((1,84 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right) \cdot \left(\frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{K}\right)\right) = 1,99 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(IT)} = 12,44 \text{ W}$$

$$H_{T,ig} = 1,45 \cdot \frac{\vartheta_{int} - \vartheta_{m,e}}{\vartheta_{int} - \vartheta_e} \cdot \left(\sum_k A_k \cdot U_{equiv,k}\right) \cdot G_W$$

$G_W$ , bei dem Gebäude ist der Abstand des Grundwasserspiegels zu Fundamentplatte 5m, deshalb den Wert 1,0 verwenden.

$\vartheta_{m,e}$  (Jahresmittel Außentemperatur) ist am Standort 10,4 °C.

$$\text{Fläche der Bodenplatte } A_g = (32,65 \cdot 1,0) = 33,65 \text{ m}^2$$

Perimeterlänge (erdreichberührt, wird mit der Länge und Breite der Außenwände berechnet, die das Erdreich berühren):  $P = (7,04 + 2,5 + 1,24 + 2,5) \text{ m} = 13,28 \text{ m}$

$$B' = \frac{33,65 \text{ m}^2}{0,5 \cdot 13,28 \text{ m}} = 5,07 \text{ m}$$

Aus den Abb. 15 und 16 im Anhang ergibt sich für:

$$U_{equiv,AW} \approx 0,46$$

$$U_{equiv,FB} \approx 0,38$$

Somit ergibt sich:

$$H_{T,ig(AW+FB)} = 1,45 \cdot \frac{(20 - 10,4)}{(20 - (-10,3))} \cdot \left( 32,65 \text{ m}^2 \cdot 0,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + 20,7 \text{ m}^2 \cdot 0,46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot 1,0$$

$$= 10,18 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$\Phi_T = \left( 13,64 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 12,44 \text{ W} + 10,18 \frac{\text{W}}{\text{K}} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 1098,7 \text{ W} = 1,1 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{42,9 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 20,59 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 20,59 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 41,18 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 70,28 \text{ m}^3 = 35,14 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 41,18 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 35,14 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 41,18 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 41,18 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 424,2 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 1099 \text{ W} + 424 \text{ W} = 1523 \text{ W}$

Keller-Gast

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 3,19 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,14 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) = 6,06 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 8,64 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 4,11 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IT)} = \left( 1,89 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,84 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(20 - 12)}{(20 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 0,97 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(IT)} = 5,08 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(20 - 22)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 11,85 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = -1,33 \text{ W}$$



$$H_{T,ig} = 1,45 \cdot \frac{\vartheta_{int} - \vartheta_{m,e}}{\vartheta_{int} - \vartheta_e} \cdot \left( \sum_k A_k \cdot U_{equiv,k} \right) \cdot G_W$$

Fläche der Bodenplatte  $A_g = (3,8 \cdot 4,3) = 16,34 \text{ m}^2$

Perimeterlänge (erdreichberührt, wird mit der Länge und Breite der Außenwände berechnet, die das Erdreich berühren):  $P = (4,3 + 2,5 + 7,27 + 1,0) \text{ m} = 15,07 \text{ m}$

$$B' = \frac{16,34 \text{ m}^2}{0,5 \cdot 15,07 \text{ m}} = 2,17 \text{ m}$$

Aus den Abb.15 und 16 im Anhang ergibt sich für: ( $z = -2,5 \text{ m}$ )

$$U_{equiv,AW} \approx 0,46$$

$$U_{equiv,FB} \approx 0,38$$

Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned} H_{T,ig(AW+FB)} &= 1,45 \cdot \frac{(20 - 10,4)}{(20 - (-10,3))} \cdot \left( 16,47 \text{ m}^2 \cdot 0,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + 18,02 \text{ m}^2 \cdot 0,46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot 1,0 \\ &= 6,68 \frac{\text{W}}{\text{K}} \end{aligned}$$

$$\Phi_T = \left( 6,06 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 5,08 \text{ W} - 1,33 \text{ W} + 6,68 \frac{\text{W}}{\text{K}} \right) \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 499,65 \text{ W} = 0,5 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{14,8 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 7,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 7,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 14,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 33,7 \text{ m}^3 = 16,85 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 14,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 16,85 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 16,85 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 16,85 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (20 - (-10,3)) \text{ K} = 173,59 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 500 \text{ W} + 174 \text{ W} = 674 \text{ W}$

Keller-Sauna

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 3,14 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 0,66 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) = 4,67 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 9,87 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(22 - 12)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 5,5 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(DE)} = \left( \frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{K} \right) \cdot 15,33 \text{ m}^2 \cdot 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,81 \text{ W}$$

Fläche der Bodenplatte  $A_g = 3,59 \cdot 4,3 = 15,44 \text{ m}^2$

Perimeterlänge (erdreichberührt, wird mit der Länge und Breite der Außenwände berechnet, die das Erdreich berühren):  $P = (7,16 + 1,0 + 2,5 + 4,3) \text{ m} = 14,96 \text{ m}$

$$B' = \frac{15,44 \text{ m}^2}{0,5 \cdot 14,96 \text{ m}} = 2,06 \text{ m}$$

Somit ergibt sich:

$$H_{T,ig(AW+FB)} = 1,45 \cdot \frac{(22 - 10,4)}{(22 - (-10,3))} \cdot \left( 15,44 \text{ m}^2 \cdot 0,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + 17,91 \text{ m}^2 \cdot 0,46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot 1,0$$

$$= 7,36 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$\Phi_T = \left( 4,67 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 5,5 \text{ W} + 0,81 \text{ W} + 7,36 \frac{\text{W}}{\text{K}} \right) \cdot (22 - (-10,3)) \text{ K} = 592,38 \text{ W} = 0,59 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{13,8 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 6,62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 6,62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 13,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 31,42 \text{ m}^3 = 15,71 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max \left( 13,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 15,71 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = 15,71 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 15,71 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (22 - (-10,3)) \text{ K} = 172,5 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 592 \text{ W} + 173 \text{ W} = 765 \text{ W}$

Keller-Dusche

Norm-Transmissionsverlust:

$$H_{T,ie} = \left( 1,88 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) + \left( 1,14 \text{ m}^2 \cdot \left( (2,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \right) = 4,88 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$H_{T,iue(DE)} = \left( 3,8 \text{ m}^2 \cdot \left( (0,8 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(22 - 15)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 0,74 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IW)} = \left( 5,92 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,7 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(22 - 12)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 3,3 \text{ W}$$

$$H_{T,iue(IT)} = \left( 1,89 \text{ m}^2 \cdot \left( (1,84 + 0,1) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \left( \frac{(22 - 12)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \right) = 1,14 \text{ W}$$

$$H_{T,iue} = H_{T,iue(DE)} + H_{T,iue(IW)} + H_{T,iue(IT)} = 5,18 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(DE)} = \left( \frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 1,12 \text{ m}^2 \cdot 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(22 - 22)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 7,49 \text{ m}^2 \cdot 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 0,06 \text{ W}$$

$$H_{T,ij(IW)} = \left( \frac{(22 - 22)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 10,06 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \left( \frac{(22 - 20)}{(22 - (-10,3))} \text{ K} \right) \cdot 11,85 \text{ m}^2 \cdot 1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = 1,33 \text{ W}$$

$$H_{T,ij} = H_{T,ij(DE)} + H_{T,ij(IW)} = 1,39 \text{ W}$$

Fläche der Bodenplatte  $A_g = 5,46 \cdot 6,4 = 34,94 \text{ m}^2$

Perimeterlänge (erdreichberührt, wird mit der Länge und Breite der Außenwände berechnet, die das Erdreich berühren):  $P = (4,96 + 1,0) \text{ m} = 5,96 \text{ m}$

$$B' = \frac{34,94 \text{ m}^2}{0,5 \cdot 5,96 \text{ m}} = 11,72 \text{ m}$$

Aus den Abb. 15 und 16 im Anhang ergibt sich für:

$$U_{equiv,FB} \approx 0,34$$

Somit ergibt sich:

$$H_{T,ig(AW+FB)} = 1,45 \cdot \frac{(22 - 10,4)}{(22 - (-10,3))} \cdot \left( 12,5 \text{ m}^2 \cdot 0,34 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} + 4,96 \text{ m}^2 \cdot 0,46 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot 1,0 = 3,4 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$\Phi_T = \left( 4,88 \frac{\text{W}}{\text{K}} + 5,18 \text{ W} + 1,39 \text{ W} + 3,4 \frac{\text{W}}{\text{K}} \right) \cdot (22 - (-10,3)) \text{ K} = 479,7 \text{ W} = 0,48 \text{ kW}$$

Norm-Lüftungsverlust:

$$q_{v,leak+ATD,i} = 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{14,7 \text{ m}^2}{581,93 \text{ m}^2} = 7,06 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{v,env,i} = \min \left( 279,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; 7,06 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 2 \right) = 14,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

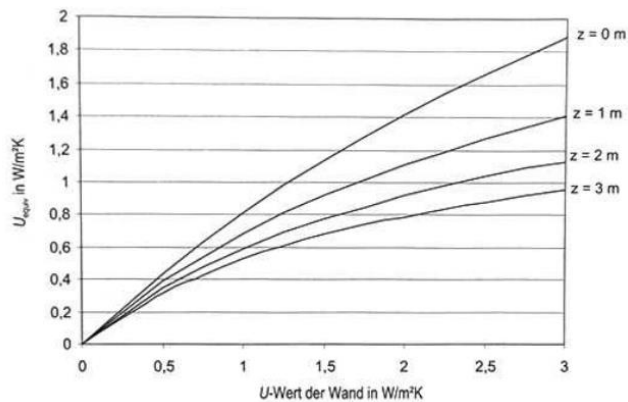
$$q_{v,min,i} = n_{min,i} \cdot V_i = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 25,8 \text{ m}^3 = 12,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$q_{env/min} = \max\left(14,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} ; 12,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) = 14,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

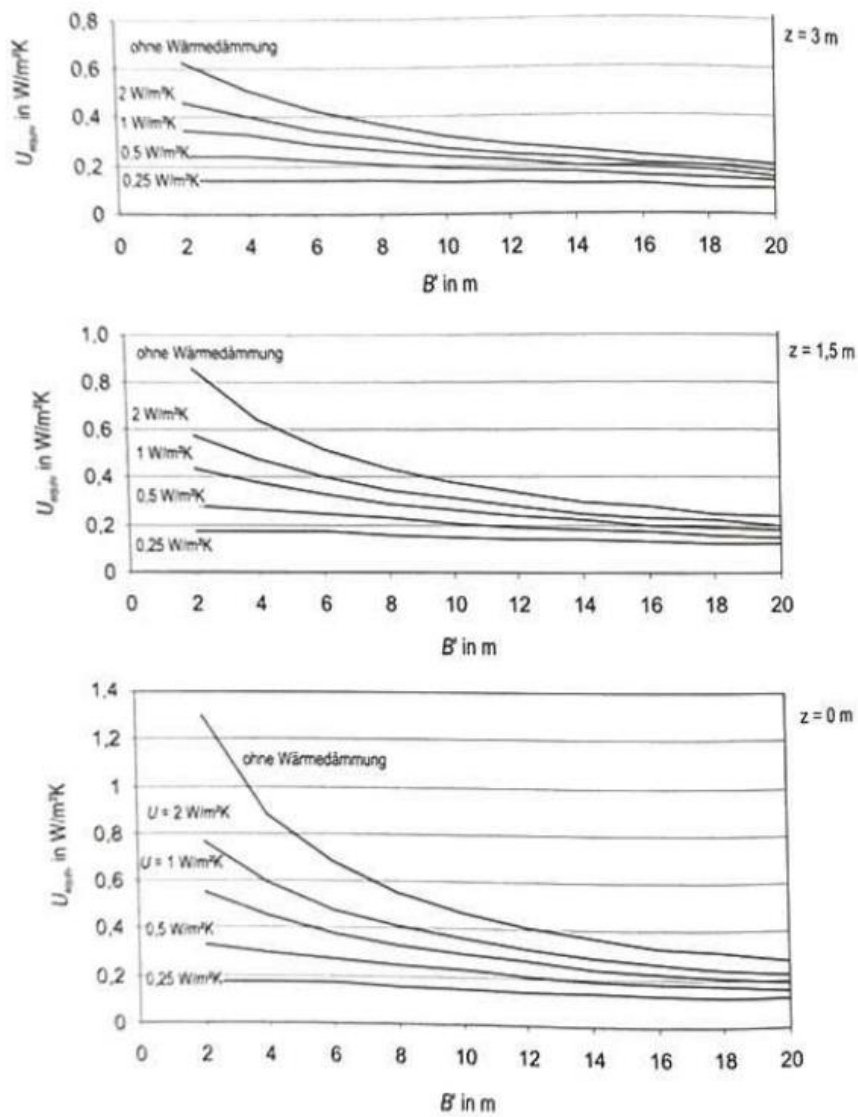
$$\Phi_{V,i} = 0,34 \frac{\text{Wh}}{(\text{m}^3 \cdot \text{K})} \cdot 14,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot (22 - (-10,3))\text{K} = 155,1 \text{ W}$$

Norm-Heizlast:  $\Phi_{HL,i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} = 480 \text{ W} + 155 \text{ W} = 635 \text{ W}$

### Diagramme für die Berechnung der Erdsreich-Transmissionswärmeverluste



Anhang Abbildung 11: Äquivalenter U-Wert, erdsreichberührten Wände als Funktion des U-Wertes der Wand und der Tiefe z unter Erdbodenniveau (Burkhardt et al. 2011)



Anhang Abbildung 12: Äquivalenter U-Wert, des Fußbodens als Funktion des Geometrieparameters  $B'$  des U-Wertes des Fußbodens und der Tiefe  $z$  der Bodenplatte unter Erdbodenniveau (Burkhardt et al. 2011)

## Wärmedurchlasswiderstand der Bodenbeläge

Bodenbelag	Wärmedurchlasswiderstand, [m <sup>2</sup> K/W]
Fliesen	0.015
Laminat	0.100
PVC	0.009
Teppich (Dicke 5 mm)	0.065
Teppich (Dicke 8 mm)	0.100
Teppich (Dicke 12 mm)	0.150
Linoleum	0.015
Stabparkett	0.100
Mosaikparkett	0.040
Fertigparkett	0.100
Marmor	0.008
Kork	0.100
Nadelvliz	0.120
Naturstein	0.010
Betonwerkstein	0.008
Standardbelag	0.100
Keramikfliesen (Dicke 13 mm)	0.012
Korkparkett (Dicke 11 mm)	0.129
Kunststoff-PVC (Dicke 2 mm)	0.010
Kunststoff-Vinyl (Dicke 3 mm)	0.015
Laminat (Dicke 9 mm)	0.044
Linoleum (Dicke 2,5 mm)	0.015
Marmorplatten (Dicke 30 mm)	0.014
Mosaikparkett (Dicke 8 mm)	0.038
Naturstein (Dicke 20 mm)	0.017
Nadelvlies (Dicke 6,5 mm)	0.120
Stabparkett (Dicke 22 mm)	0.105

Anhang Abbildung 13: Wärmedurchlasswiderstände der Bodenbeläge im Programm Optimus 3D plus (Hottgenroth Software AG o.J.)

# Unterlagen zum Hydraulischen Abgleich nach Verfahren B- Ist-Zustand

Ist-Zustand 63674 Altenstadt

## Heizkreis: Fußbodenheizkreis

### Pumpendaten

Pumpenmodell	: -
Pumpentyp	: Pumpe ist nicht vorhanden
Pumpenstufe	: -
Restförderhöhe	: 1224 mbar (entspricht 12,24 m)
Volumenstrom	: 3143 l/h
Vorlauftemperatur	: 40 °C
Rücklauftemperatur	: 34 °C

### Differenzdruckregler

Der Einsatz eines Strang-Differenzdruckreglers ist nicht erforderlich.

### Sonstiges

Δp(sonder):	0 mbar
Kennw. HK-Dim.:	33% 1,6 Benötigte Förderhöhe: 1224 mbar
Der hydraulische Abgleich wurde für eine nicht-einheitliche HK-Dimensionierung berechnet.	

### Berechnungsergebnisse für Fußbodenheizkreis

Inzustellende Auslegungsvorlauftemperatur 40 °C, berechnete Auslegungsrücklauftemperatur 34 °C

Raumdaten					Verteilerdaten		Heizflächendaten				Verteilerventile - Ermittlung der Voreinstellwerte					
Lfd. Nr.	Raumbezeichnung	Geschoss	Beheizte Fläche [m²]	Heizlast [W]	Verteiler	Verteilerzuleitung [m]	Heizflächentyp	t <sub>R</sub> [°C]	Normleistung 50/40 °C	Verhältnis Q <sub>HW</sub> /Q <sub>R</sub>	Kv-Wert [m³/h]	Δp [mbar]	Durchfluß [l/min]	Gewähltes Ventil: Hersteller, Typ, DN, Bauform	Voreinstellung	Bemerkung
1	Bad	DG	11,9	1386	FBH 3 / Verteiler 3	15	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	1503	1,0	0,285	862	4,41	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
2	Schlafen	DG	29,5	3429	FBH 3 / Verteiler 3	15	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	1436	0,8	0,409	692	5,67	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
					FBH 3 / Verteiler 3	15	Fußbodenheizung 2 15 cm	35	1436	0,8	0,409	692	5,67	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.

Raumdaten					Verteilerdaten		Heizflächendaten				Verteilerventile - Ermittlung der Voreinstellwerte					
Lfd. Nr.	Raumbezeichnung	Geschoss	Beheizte Fläche [m²]	Heizlast [W]	Verteiler	Verteilerzuleitung [m]	Heizflächentyp	t <sub>R</sub> [°C]	Normleistung 50/40 °C	Verhältnis Q <sub>HW</sub> /Q <sub>R</sub>	Kv-Wert [m³/h]	Δp [mbar]	Durchfluß [l/min]	Gewähltes Ventil: Hersteller, Typ, DN, Bauform	Voreinstellung	Bemerkung
3	Studio	DG	48,7	4088	FBH 3 / Verteiler 3	15	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	2143	1,0	0,700	333	6,73	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
					FBH 3 / Verteiler 3	15	Fußbodenheizung 2 15 cm	35	2143	1,0	-	333	6,73	ANDERER HERSTELLER	voll offen	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
4	Bad	EG	6,3	587	FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	775	1,2	0,110	1122	1,94	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
5	Hausarbeit-Raum	EG	7,6	567	FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 1 15 cm	26	945	1,8	0,034	1162	0,61	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
6	Kind 1	EG	13,6	1242	FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	1300	1,0	0,285	775	4,18	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
7	Kind 2	EG	13,6	1345	FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	1304	1,0	0,313	728	4,45	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
8	Küche	EG	10,3	1178	FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 1 15 cm	35	1282	1,1	0,228	931	3,66	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
9	Wohnen	EG	39,8	2601	FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 1 15 cm	29	2481	1,9	0,113	1022	1,90	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
					FBH 2 / Verteiler 2	10	Fußbodenheizung 2 15 cm	29	2450	1,9	0,111	1027	1,88	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
10	Dusche	Keller	10,3	631	FBH 1 / Verteiler 1	5	Fußbodenheizung 1 15 cm	31	1280	1,9	0,058	1194	1,05	ANDERER HERSTELLER	-	Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.

Raumdaten					Verteilerdaten		Heizflächendaten				Verteilerventile - Ermittlung der Voreinstellwerte					
Lfd. Nr.	Raumbezeichnung	Geschoss	Beheizte Fläche [m²]	Heizlast [W]	Verteiler	Verteilerzuleitung [m]	Heizflächentyp	t <sub>R</sub> [°C]	Normleistung 50/40 °C	Verhältnis Q <sub>th</sub> /Q <sub>R</sub>	Kv-Wert [m³/h]	Δp [mbar]	Durchfluß [l/min]	Gewähltes Ventil: Hersteller, Typ, DN, Bauform	Voreinstellung	Bemerkung
11	Gast	Keller	13,5	673	FBH 1 / Verteiler 1	5	Fußbodenheizung 1 15 cm	27	1292	1,9	0,042	1200	0,78	ANDERER HERSTELLER		- Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
12	Hobbyraum	Keller	28,1	1518	FBH 1 / Verteiler 1	5	Fußbodenheizung 1 15 cm	25	1743	2,3	0,041	1200	0,76	ANDERER HERSTELLER		- Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
					FBH 1 / Verteiler 1	5	Fußbodenheizung 2 15 cm	25	1744	2,3	0,041	1200	0,76	ANDERER HERSTELLER		- Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.
13	Sauna	Keller	12,6	763	FBH 1 / Verteiler 1	5	Fußbodenheizung 1 15 cm	31	1559	1,9	0,067	1179	1,21	ANDERER HERSTELLER		- Ventiltyp muss manuell ausgewählt werden.

Anhang Abbildung 14: Hydraulischer Abgleich nach Verfahren B- Ist-Zustand (Ergebnisse erstellt mit Optimus 3D plus)

## Deckungsanteil

Quellen	Betriebsweise bivalent oder mono-energetisch	Leistungsanteil $\xi$ der Wärmepumpe bei Normaußentemperatur in %							
		100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %
Sole, Wasser, Direktverdampfung	alternativ	1,00	0,97	0,93	0,88	0,78	0,64	0,45	0,21
	parallel	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96	0,92	0,84	0,71
Luft	alternativ	1,00	0,99	0,97	0,94	0,91	0,86	0,76	0,57
	parallel	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,93	0,87

Anhang Abbildung 15: Deckungsanteil der Wärmepumpe (VDI 4650 Blatt 1-Tabelle 28)



## Jahresarbeitszahl Ist-Zustand

Logatherm WLW196i IR (innen aufgestellte Wärmepumpeneinheit)		WLW196i-6 IR	WLW196i-8 IR	WLW196i-11 IR	WLW196i-14 IR
Höhe	mm	1.505	1.505	1.805	1.805
Breite	mm	927	927	1.115	1.115
Tiefe	mm	468	468	538	538
Gewicht	kg	120	124	190	193
Heizleistung bei A2/W35 <sup>1)</sup>	kW	7,6	10,7	13,1	16
Heizleistung und COP bei A7/W35 <sup>2)</sup>	kW	2,96/4,84	3,32/4,93	5,11/4,90	4,80/4,82
Heizleistung und COP bei A2/W35 <sup>2)</sup>	kW	3,90/4,13	5,04/4,29	7,11/4,05	7,42/4,03
Heizleistung und COP bei A-7/W35 <sup>2)</sup>	kW	6,18/2,82	8,43/2,96	10,99/2,85	12,45/2,55
Kühlleistung bei A35/W7	kW	4,83	6,32	8,86	10,17
Schalleistung nach ErP	dB(A)	38	36	37	36
Max. Schalleistungspegel Tagbetrieb	dB(A)	50	52	57	56
Max. Schalleistungspegel Nachtbetrieb	dB(A)	47	49	54	53
Max. Schalldruckpegel bei 1 m Abstand	dB(A)	46/37	46/39	43/44	46/43
Modulationsbereich	kW	2–max.	3–max.	5,5–max.	5,5–max.
Spannungsversorgung	V	230	230	400	400
Maximale Vorlauftemperatur Wärmepumpe	°C	62	62	62	62
Klasse für die Raumheizungs-Energieeffizienz bei Vorlauftemperatur 55 °C	–	A++	A++	A++	A++
Energieeffizienzklassen-Spektrum		A++ → G	A++ → G	A++ → G	A++ → G
Umwelttechnischer Hinweis	–	Enthält fluorierte Treibhausgase			
Kältemitteltyp	–	R410A			
Treibhauspotenzial – GWP	kgCO <sub>2</sub> -eq	2,088	2,088	2,088	2,088
Füllmenge des Kältemittels	kg	1,75	2,35	3,3	4,0
Füllmenge des Kältemittels	tCO <sub>2</sub> -eq	3,65	4,91	6,89	8,35
Bauart des Kältekreises	–	Hermetisch geschlossen			

Anhang Abbildung 16: Datenblatt der Buderus Logatherm WLW196i-6-14 IR (Buderus)

**Bestimmung der Jahresarbeitszahl entsprechend VDI 4650 Blatt 1 (2019)****Angaben zum Projekt**

Name	Ist-Zustand mit LWP
Adresse	, 63674 Altenstadt
Heizgrenztemperatur in °C	15
Vorlauftemperatur / Rücklauftemperatur in °C	40 / 34
Kombigerät	nein

**Angaben zur Heizungs-Wärmepumpe**

Hersteller	Buderus
Typenbezeichnung	Logatherm WLW196i-14 IR E/B/T/TS/TP
Leistungszahl COP (A-7/W35 / A2/W35 / A7/W35)	2,68 / 3,96 / 4,90
Ablaufverfahren (A2/W35)	Kreislaufumkehr
Korrekturabschlag (A2/W35) (in COP enthalten)	0,3
Nennleistung in kW (A7/W35)	5,07
Leistung Wärmepumpe in kW (bei -10 °C)	11,00
Gebäudeheizlast in kW	17,08

**Wärmequelle und Betriebsweise**

Wärmequelle	Außenluft
Normaußentemperatur in °C	-10
Betriebsweise	bivalent (parallel), monoenergetisch
Deckungsanteil	0,98

**Berechnung mit Backup (für die BAFA-Förderung relevant)**

Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Heizbetrieb	4,4
Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für Trinkwassererwärmung	3,1
Gesamtjahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage	4,1

**Berechnung ohne Backup**

Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Heizbetrieb	4,6
Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für Trinkwassererwärmung	3,2
Gesamtjahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage	4,3

**Bestimmung der Jahresarbeitszahl entsprechend VDI 4650 Blatt 1 (2019)****Berechnungsgrundlagen Heizung**

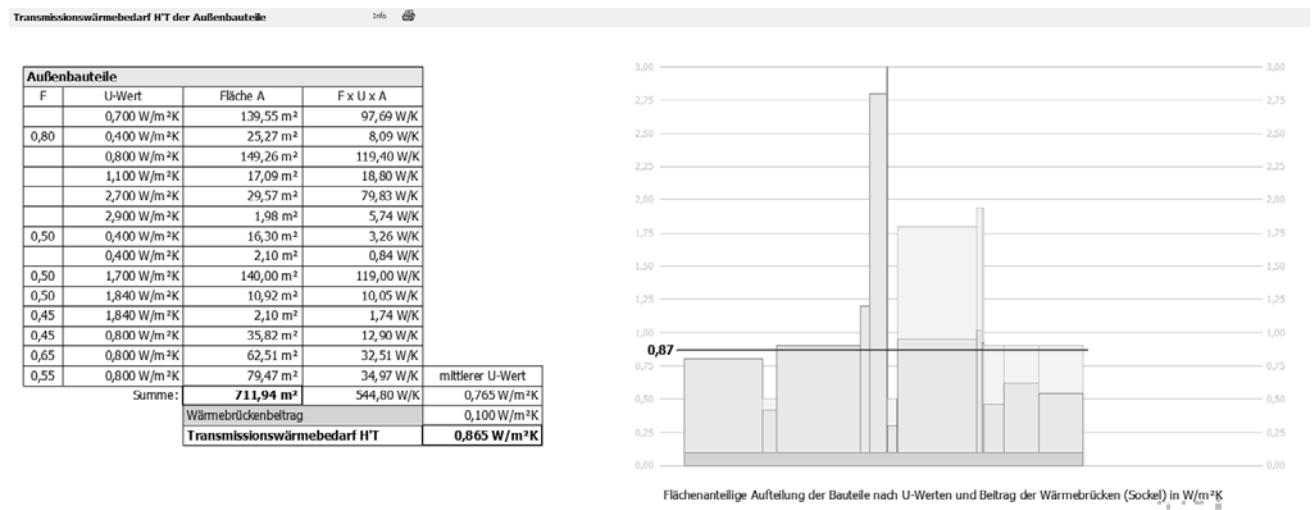
Temperaturdifferenz am Verflüssiger im Betrieb in K	6,0
Heizung Korrekturfaktor (Verflüssiger)	1,010
Primärtemperatur in °C	-7 / +2 / +7
Korrekturfaktor Heizung (untersch. Betriebsbedingungen bei -10 °C)	0,024 / 0,488 / 0,430

**Berechnungsgrundlagen Warmwasser**

Art der Trinkwassererwärmung	Heizungs-Wärmepumpe
Anteil Trinkwassererwärmung am Gesamtwärmebedarf in %	18
Trinkwassererwärmung Korrekturfaktor (Verflüssiger)	1,000
Speichertyp	WÜ innenlegend
Korrekturfaktor Warmwasser (untersch. Betriebsbed.)	0,905 / 0,716
Speichertemperatur in °C	55

Anhang Abbildung 17: Ergebnis der Jahresarbeitszahl- Ist-Zustand (berechnet mit JAZ-Rechner des Bundesverband WP e.V.)

# Bewertung des Gebäudes Ist-Zustand



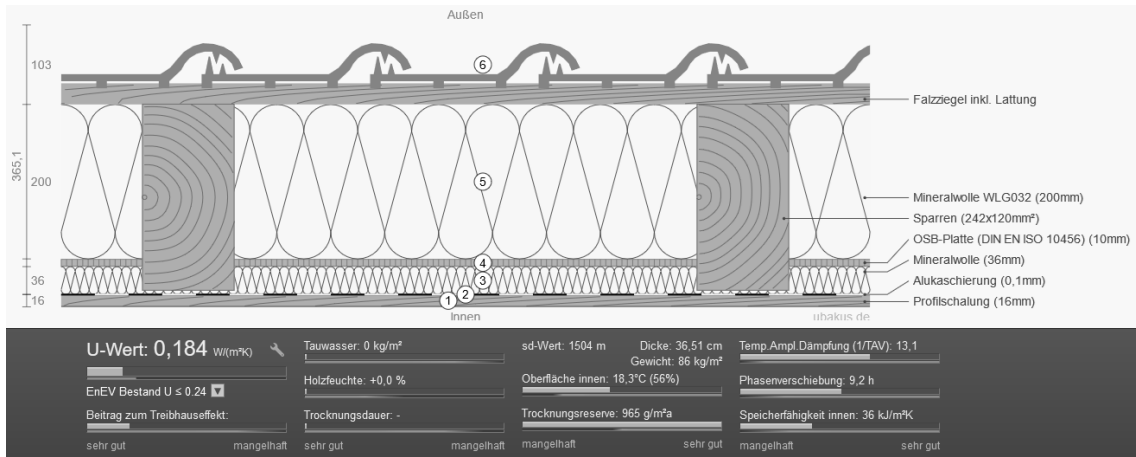
Anhang Abbildung 18: Transmissionswärmeverlust des Ist-Zustands (erstellt im Energieberater 3D plus)

## Variante 1

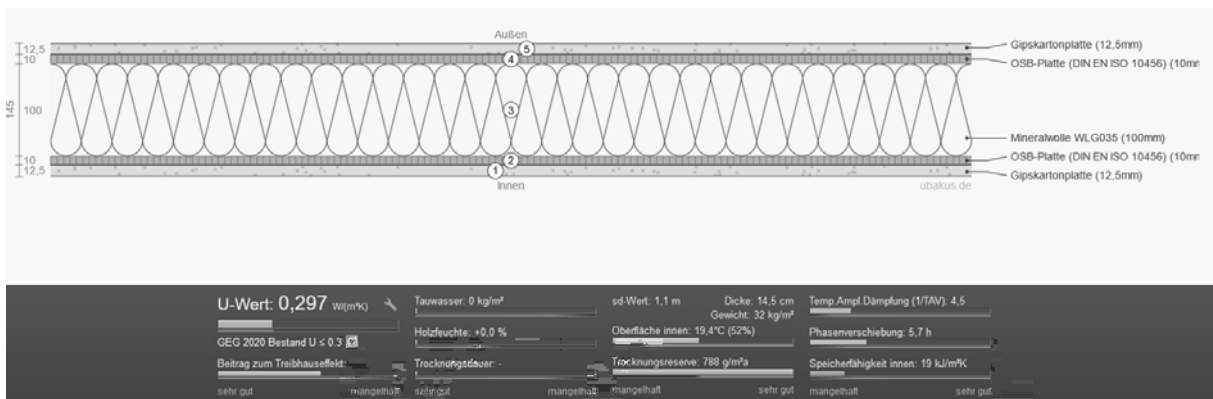
### U-Wert Berechnungen



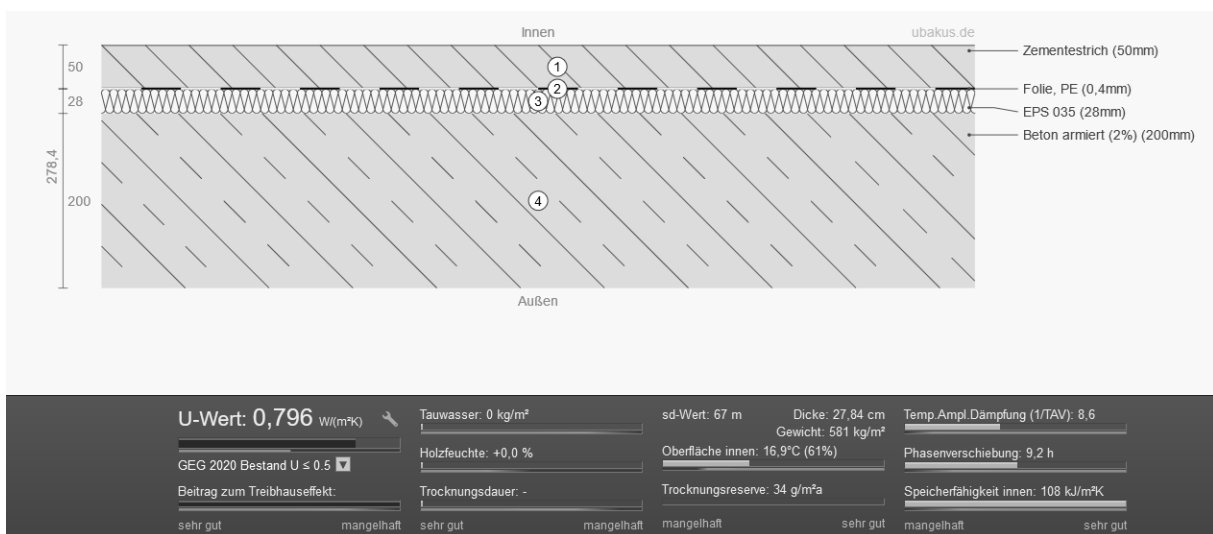
Anhang Abbildung 19: Dach- Ist-Zustand (erstellt mit Ubakus)



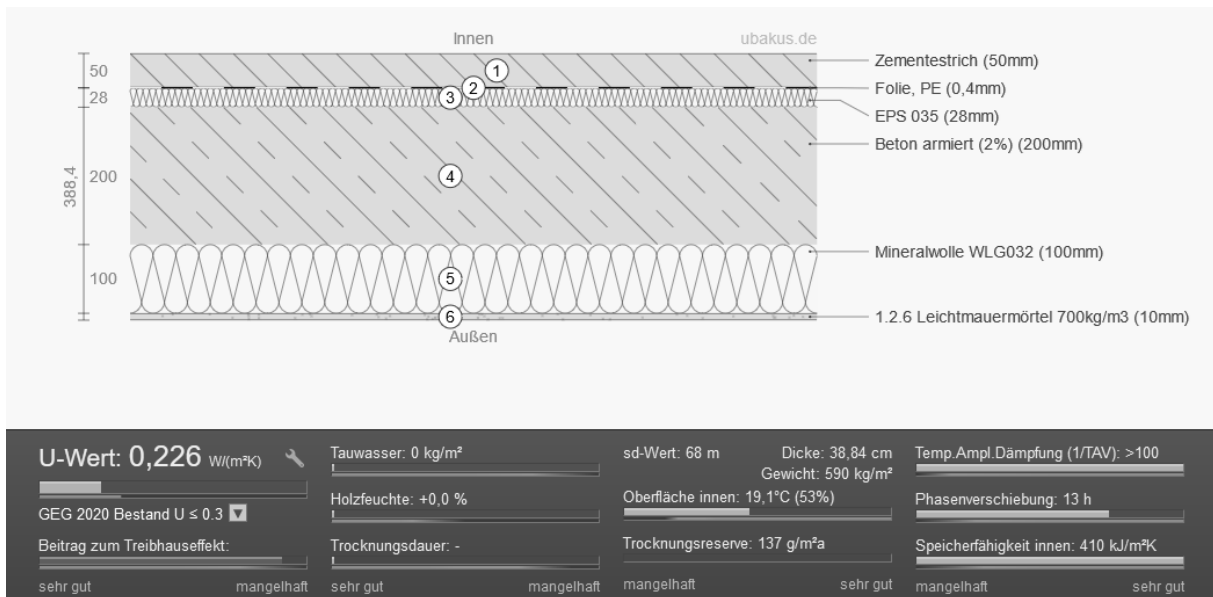
Anhang Abbildung 20: Dach saniert (erstellt mit Ubakus)



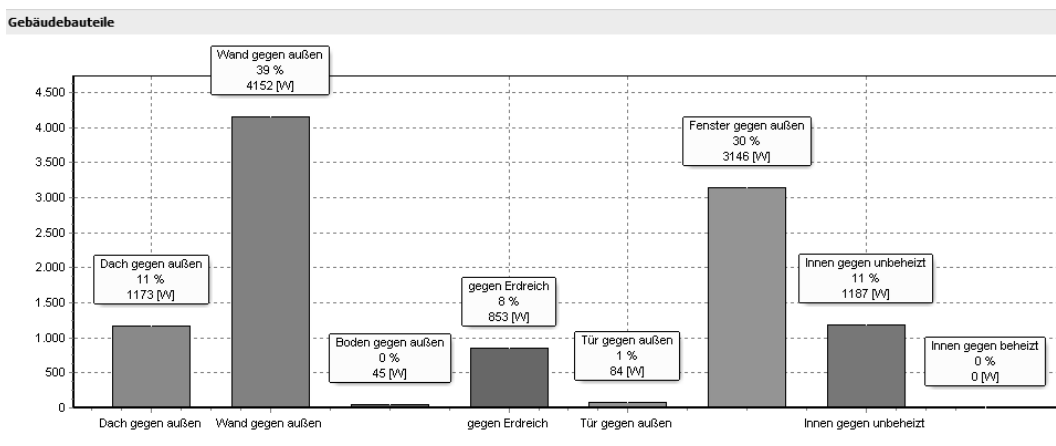
Anhang Abbildung 21: Innenwand gegen unbeheizt saniert (erstellt mit Ubakus)



Anhang Abbildung 22: Kellerdecke gegen unbeheizt Ist-Zustand (erstellt mit Ubakus)



Anhang Abbildung 23: Kellerdecke gegen unbeheizt saniert (erstellt mit Ubakus)



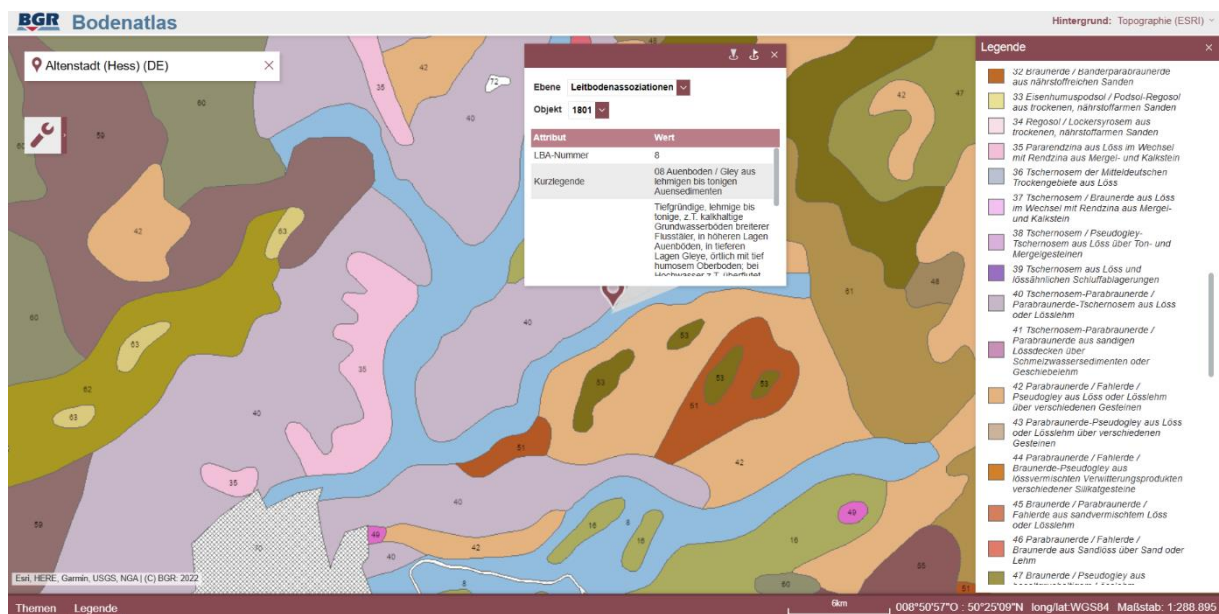
Anhang Abbildung 24: Transmissionswärmeverluste der Bauteile Variante 1 (Simulation mit TGA-Heizung)

## Auslegung SWP

Tab. 6.15 Entzugsleistungen von Erdkollektoren aus [24, S. 34]

Untergrund	Spezifische Entzugsleistung (W/m <sup>2</sup> )
Trockener, sandiger Boden	10–15
Feuchter, sandiger Boden	15–20
Trockener, lehmiger Boden	20–25
Feuchter, lehmiger Boden	25–30
Grundwasserführender Boden	30–35

Anhang Abbildung 25: Bestimmung der Entzugsleistung (Glaesmann 2022)



Anhang Abbildung 26: Bodentyp des Standortes Altenstadt in Hessen ([Bodenatlas \(bgr.de\)](http://bgr.de))

## Jahresarbeitszahl

Modell	WSW196L2-16
Produktdatenblatt	
SCOP	4,1
Schalleistungspegel (nach EN 12102)	41 dB(A)
Höhe (ohne Rohre, mit FÜßen)	1.180 mm
Gewicht (ohne Wasser im Warmwasserspeicher, mit Verkleidung)	211 kg
Gewicht (ohne Wasser mit Warmwasserspeicher, ohne Verkleidung)	189 kg
Gewicht Hydraulikeinheit mit Warmwasserspeicher (ohne Verkleidung)	64 kg
Gewicht Kältekreis	125 kg
Max. Schalldruckpegel	37 dB(A)
Nennleistung bei B0/W35°C	6,06 kW
maximale Leistung bei B0/W35°C	15,53 kW
Nenn-COP bei B0/W35°C	4,8
Maximale Kühlleistung bei B0/W35°C	-
Nennstromverbrauch bei B0/W35°C	1,11 kW
Nenn-COP bei B0/W45°C	3,71
Nennleistung bei B0/W55°C	7,09 kW

Anhang Abbildung 27: wichtige Kenndaten der SWP Buderus WSW196i.2-16 TP50 (Wärmepumpe | Logatherm WSW196i(T) | Buderus)

**Bestimmung der Jahresarbeitszahl entsprechend VDI 4650 Blatt 1 (2019)****Angaben zum Projekt**

Name	Variante 1_SWP mit Erdkollektoren
Adresse	, 63674 Altstadt
Vorlauftemperatur / Rücklauftemperatur in °C	40 / 33
Kombigerät	nein

**Angaben zur Heizungswärmepumpe**

Hersteller	Buderus
Typenbezeichnung	Logatherm WSW196i.2-16 (TP50)
Leistungszahl COP (B0/W35)	4,80
Nennleistung in kW (B0/W35)	6,06

**Wärmequelle und Betriebsweise**

Wärmequelle	Erdreichkollektor
Quellentemperatur in °C	0
Betriebsweise	monovalent

**Berechnung ohne Backup (für die BAFA-Förderung relevant)**

Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Heizbetrieb	4,8
Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für Trinkwassererwärmung	3,0
Gesamtjahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage	4,3

**Bestimmung der Jahresarbeitszahl entsprechend VDI 4650 Blatt 1 (2019)****Berechnungsgrundlagen Heizung**

Temperaturdifferenz am Verflüssiger im Betrieb in K	7,0
Heizung Korrekturfaktor (Verflüssiger)	1,020
Primärtemperatur in °C	0
Korrekturfaktor Heizung (untersch. Betriebsbedingungen)	1,112
Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Quellenpumpe	1,143

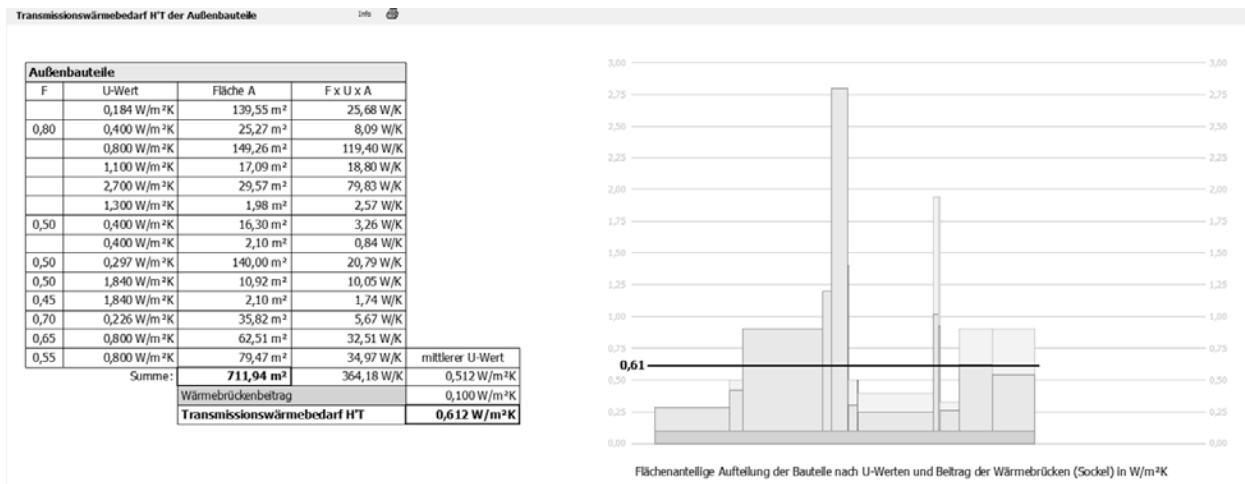
**Berechnungsgrundlagen Warmwasser**

Art der Trinkwassererwärmung	Heizungswärmepumpe
Anteil Trinkwassererwärmung am Gesamtwärmebedarf in %	18
Trinkwassererwärmung Korrekturfaktor (Verflüssiger)	1,020
Speichertyp	WÜ innenliegend
Korrekturfaktor Warmwasser (untersch. Betriebsbed.)	0,919 / 0,764
Speichertemperatur in °C	55

Anhang Abbildung 28: Ergebnis der Jahresarbeitszahlberechnung-Variante 1 (JAZ-Online Rechner Bundesverband WP e.V.)



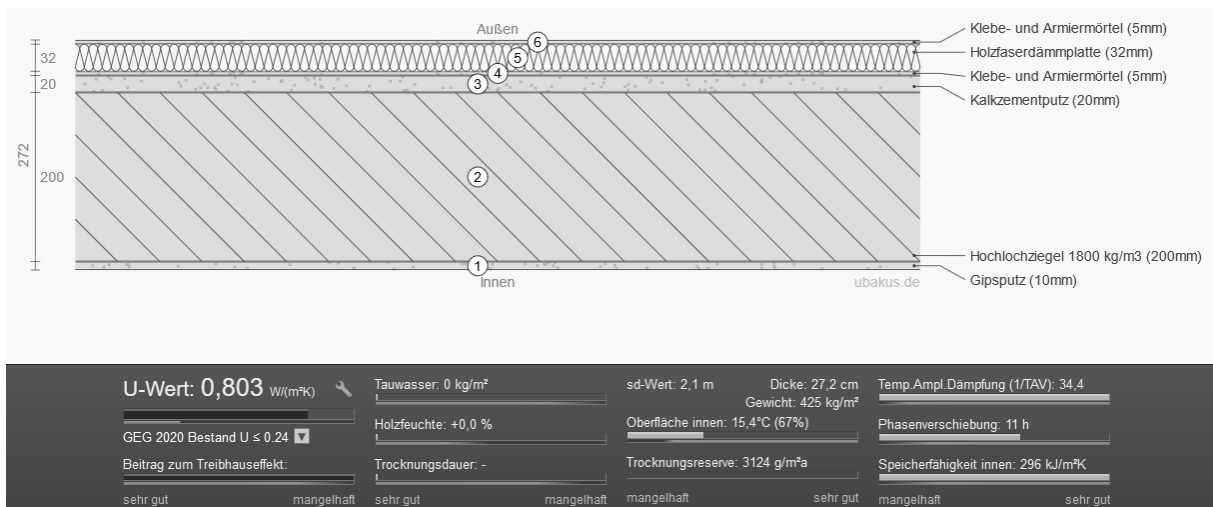
# Energetische Bewertung



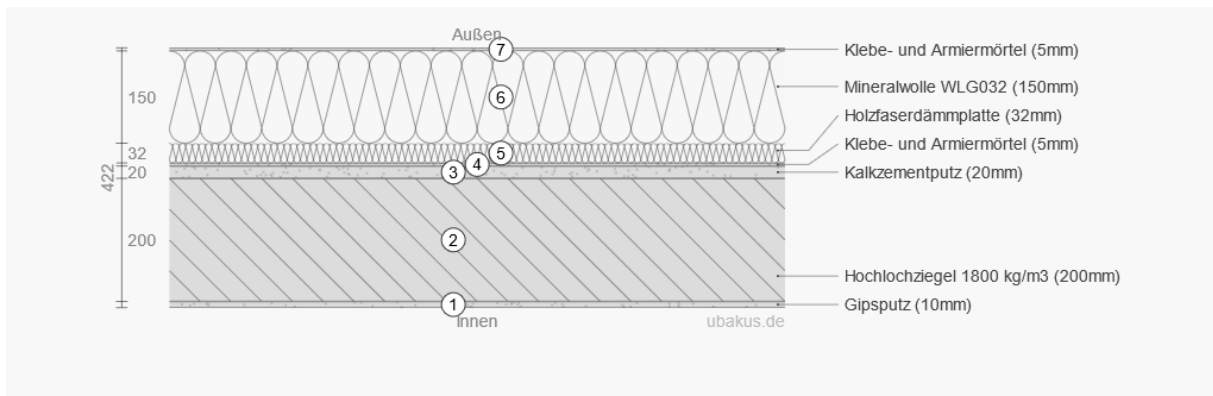
Anhang Abbildung 29: Berechnung des Transmissionswärmebedarfs für Variante 1 (erstellt mit dem Energieberater 3D plus)

## Variante 2

### U-Werte der sanierten Bauteile



Anhang Abbildung 30: Außenwand Ist-Zustand (erstellt mit Ubakus)



**U-Wert: 0,169**  $W/(m^2K)$   
 GEG 2020 Bestand  $U \leq 0.24$   
 Beitrag zum Treibhauseffekt: **sehr gut**

Tauwasser: 0  $kg/m^2$   
 Holzfeuchte: +0,0 %  
 Trocknungsdauer: - **sehr gut**

sd-Wert: 1,8 m  
 Oberfläche innen: 19,0°C (53%)  
 Trocknungsreserve: 3546  $g/m^2a$   
**mangelhaft**

Dicke: 42,2 cm  
 Gewicht: 428  $kg/m^2$   
 Temp.Ampl.Dämpfung (1/TAV): >100  
 Phasenverschiebung: 13 h  
 Speicherkapazität innen: 397  $kJ/m^2K$   
**mangelhaft**

Anhang Abbildung 31: Außenwand saniert (erstellt mit Ubakus)

### Wichtige Kenndaten zur Simulation aus Polysun

Katalog-Nr.	Name	Hersteller	Wärmepumpen-Typ	Modulation	Heizleistung bei B-5/W35 [kW]	Heizleistung bei B0/W35 [kW]	Heizleistung bei B5/W35 [kW]	Heizleistung bei B-5/W50 [kW]	Heizleistung bei B
1231	EcoTouch AII 5010.5 Geo	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	9,34	10,65	12,11	8,93	10,1
1232	EcoTouch AII 5013.5 Geo	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	12,07	13,76	15,63	11,54	13,04
1233	BL AII 5005.5 Geo	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	4,24	4,88	5,58	4,08	4,64
1234	BL AII 5006.5 Geo	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	5,08	5,8	6,59	4,84	5,5
1235	BL AII 5008.5 Geo	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	6,65	7,59	8,62	6,45	7,27
1236	BL AII 5010.5 Geo	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	8,9	10,1	11,41	8,57	9,64
1237	EcoTouch 5007.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	4,32	4,96	5,67	4,13	4,71
1238	EcoTouch 5008.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	5,12	5,86	6,66	4,85	5,53
1239	EcoTouch 5010.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	6,72	7,69	8,77	6,46	7,31
1240	EcoTouch 5014.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	9,14	10,43	11,86	8,72	9,87
1241	EcoTouch 5018.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	11,59	13,23	15,04	11,11	12,56
1242	EcoTouch 5023.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	15,33	17,49	19,87	14,57	16,5
1243	EcoTouch 5029.5 Ai	Waterkotte	Sole/Wasser	Keine	18,9	21,61	24,59	17,95	20,35
1244	EcoTouch DS 5028.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	18,51	21,1	23,95	17,67	19,99
1245	EcoTouch DS5034.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	22,58	25,66	29,05	21,71	24,46
1246	EcoTouch DS5045.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	30,08	34,27	38,87	28,52	32,3
1247	EcoTouch DS5056.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	37,3	42,61	48,42	35,33	40,07
1248	EcoTouch 5063.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	42,12	47,68	53,73	40,62	45,75
1249	EcoTouch 5075.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	50,16	56,84	64,06	48	53,98
1250	EcoTouch 5085.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	56,87	64,37	72,49	53,94	60,88
1251	EcoTouch 5095.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	63,4	71,73	80,83	60,76	68,19
1252	EcoTouch 5112.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Nach Bedarf	75,05	85	95,72	71,87	80,68
1253	EcoTouch 5068.5 DT	Waterkotte	Sole/Wasser	Nach Bedarf	45,34	51,31	57,84	44,06	49,45
1254	EcoTouch 5090.5 DT	Waterkotte	Sole/Wasser	Nach Bedarf	58,26	65,93	74,3	56,09	63,03
1255	EcoTouch 5112.5 DT	Waterkotte	Sole/Wasser	Nach Bedarf	72,37	82,16	92,84	69,44	78,27
1256	EcoTouch 5145.5 T	Waterkotte	Sole/Wasser	Zweistufig	97,13	110,76	125,78	92,97	104,84

Anhang Abbildung 32: Wichtige Kenndaten der EcoTouch 5014.5 Ai (Polysun-Datenbank)

PVT-Kollektor 1

Name	Wert	Einheit	Schema
Beschreibung	1		
Umgebung	▼ aussen		
Prüfnorm	▼ Europa		
PVT-Kollektor	Consolar Solink PV450Wp		
- Modultyp	monokristallin		
- Nennleistung STC	450	W	
- Kollektortyp	Unverglast		
- Prüfnorm Solar Keymark-Test	EN 12975		
Parallele thermische Abschnitte	1		
Bezugsgröße für die Fläche	▼ Anzahl Module		
Anzahl Module	11		
Anzahl Module (Auslegung)	11		
Gesamte Nennleistung DC	4,95	kW	
Bruttogesamtfläche	24,75	m <sup>2</sup>	
Gesamte Aperturfläche	24,75	m <sup>2</sup>	
Gesamte Absorberfläche	24,75	m <sup>2</sup>	
Ausrichtung (O=+90°, S=0°, W=-90°)	0	°	
Anstellwinkel (hor.=0°, vert.=90°)	43	°	
Nachführung	▼ Keine Nachführung		
Windanteil	50	%	
Hinterlüftung	▼ mittel		
Verschmutzung	2	%	
Degradation	0,5	%	
Kabelverluste	2	%	
Mismatching	4	%	
Wechselrichterauslegung	▼ Wizard		
Anzahl Wechselrichtertypen	1		
Auslegung 1: Wechselrichter	REW PPI 5S		
Auslegung 1: Anzahl Wechselrichter	1		
Auslegung 1: A Anzahl Stränge	1		
Auslegung 1: A Module pro Strang	11		

Anhang Abbildung 33: Wichtige Einstellungen der PVT-Kollektoren (aus Berechnungen ergeben-Polysun)

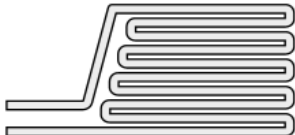
Gebäude

Name	Wert	Einheit	Schema
Beschreibung			
Energiebedarf bekannt?	▼ Ja		
Modell	▼ Quasi-dynamisch		
Energieverbrauch bekannt als	▼ Maximaler Leistungsbedar...		
Maximaler Leistungsbedarf	8.341	W	
Beheizte/gekühlte Wohnfläche	267	m <sup>2</sup>	
Soll-Raumtemperatur	20	°C	
Unbeheizte Räume	▼ Ja		
Mitteltemperatur	18	°C	
Temperaturbereich	0	K	
Wärmster Monat	▼ Juli		

Anhang Abbildung 34: Wichtige Einstelldaten des Gebäudes (Polysun)

▼ Heiz-/Kühlelement

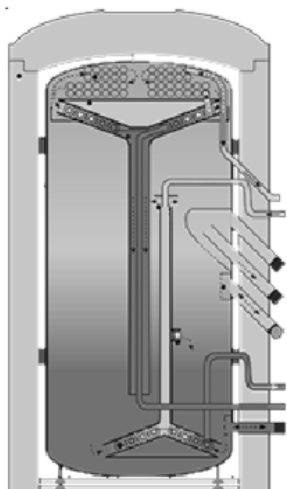
?

@	Name	Wert	Einheit	Schema
	Beschreibung			
	Modultyp	▼ Konvektor/Radiator		
	Heiz-/Kühlelement	<input checked="" type="checkbox"/> Fussbodenheizung		
	- Soll-Vorlauftemperatur	35	°C	
	- Soll-Rücklauftemperatur	28	°C	
	- Leistung pro Heiz-/Kühlelement bei Nor...	1.000	W	
	- Fläche des Heiz-/Kühlelements	11	m <sup>2</sup>	
	- Normvolumenstrom pro Heiz-/Kühlelem...	107	l/h	
	Anzahl Heiz-/Kühlelemente automatisch	▼ Ja		

Anhang Abbildung 35: Wichtige Einstellwerte der FBH (Polysun)

▼ Speicher Pufferspeicher

?

@	Name	Wert	Einheit	Schema
	Beschreibung	Pufferspeicher		
	Umgebung	▼ innen		
	Speicher	<input checked="" type="checkbox"/> Solus II 1050 L		
	- Volumen	1.000	l	
	- Höhe	1,99	m	
	- Höhe der Ausbauchung	100	mm	
	- Material	Stahl		
	- Wandstärke	2	mm	
	- Wärmedämmung	EPDM-Schaum		
	- Dämmungs-Dicke	125	mm	
	- Stärke beim Deckel	140	mm	
	- Stärke am Speicherboden	50	mm	
	- Stillstandsverlust	171	W	
	- Volumen (Energie-label)	1.000	l	
	Volumen interner Speicher	0	l	
	Volumen Mantelwärmetauscher	0	l	

Anhang Abbildung 36: Wichtige Kenndaten des Kombispeichers Solus II 1050 L (Polysun)

Elektrische Verbraucher 1

?

@	Name	Wert	Einheit	Schema
	Beschreibung	1		
	Anzahl der elektrischen Verbrauchsprofile	▼ 1		
	Verbrauchsprofil 1	Standardprofil Haush..		
	Jahresverbrauch	3.500	kWh	
	Gesamtverbrauch der Profile	3.500	kWh	

Anhang Abbildung 37: Wichtige Einstellwerte des Verbraucherprofiles (Polysun)

Stromnetz


?

@	Name	Wert	Einheit	Schema
	Beschreibung	Dreiphasen (110V/19...		
	Stromnetz	Dreiphasen-Stern		
	- Netzform			
	- Nennspannung	190	V	
	- Nennfrequenz	50	Hz	
	Energieträger	Elektrisch		
	Örtliche Netzspannung	190	V	
	Verkettete Spannung	190	V	
	Sternspannung	109,7	V	
	Phasenschieflast prüfen	▼ Pro Phase		
	Netzeinspeisung	▼ ja		
	Profil verwenden	▼ nein		
	Wirkleistungsbegrenzung	▼ nein		

Anhang Abbildung 38: Wichtige Kenndaten des Stromnetzes (Polysun)

Batterie

@	Name	Wert	Einheit	Schema
	Beschreibung			
	Anzeige in Report	▼ sichtbar		
	Typ	▼ AC		
	Batterie	📄 B-Box 5.0		
	- Nennkapazität	5	kWh	
	- Batterietechnologie	Lithium-Eisenphosphat (Li..		
	Anzahl Batterien	1		
	Nennkapazität	5	kWh	
	Max. Ladeleistung	5.000	W	
	Max. Entladeleistung	5.000	W	
	Batteriewechselrichter	📄 Batteriewechselricht...		
	Anzahl Batteriewechselrichter	1		
	Laden ab PV-Leistungsquotient	0		
	Tiefentladungsschwellwert	66		
	Initialer SOC	1		
	Zeit der SOC-Initialisierung	▼ Simulations-Vorlauf		



Anhang Abbildung 39: wichtige Kenndaten des Batteriespeichers (Polysun)

## Ergebnisse der Simulation der Variante 2\_ohne Batteriespeicher

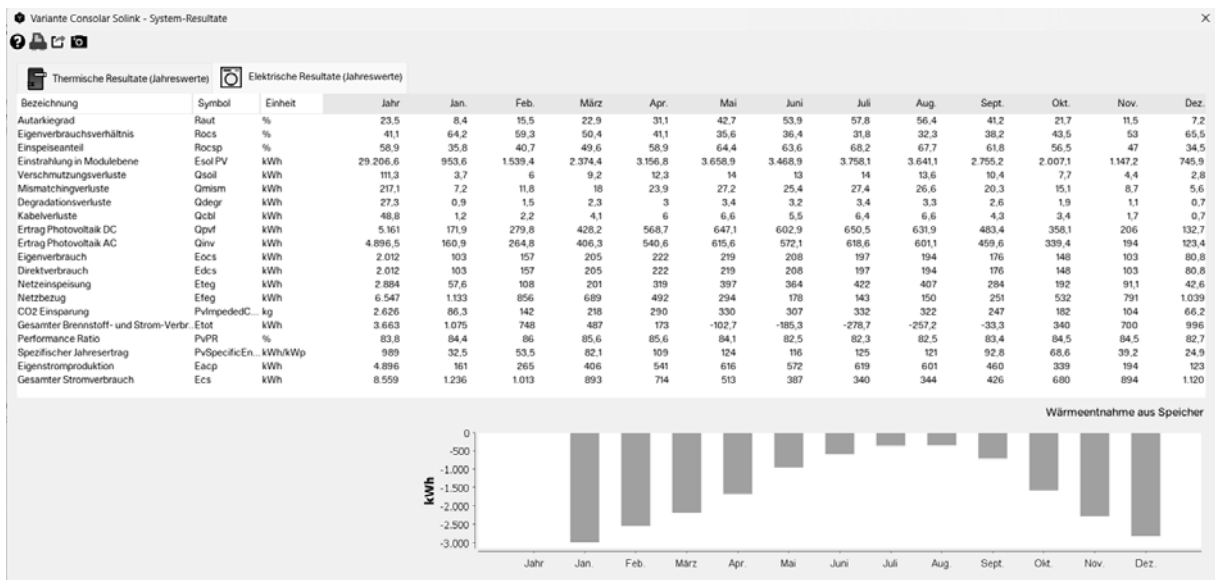
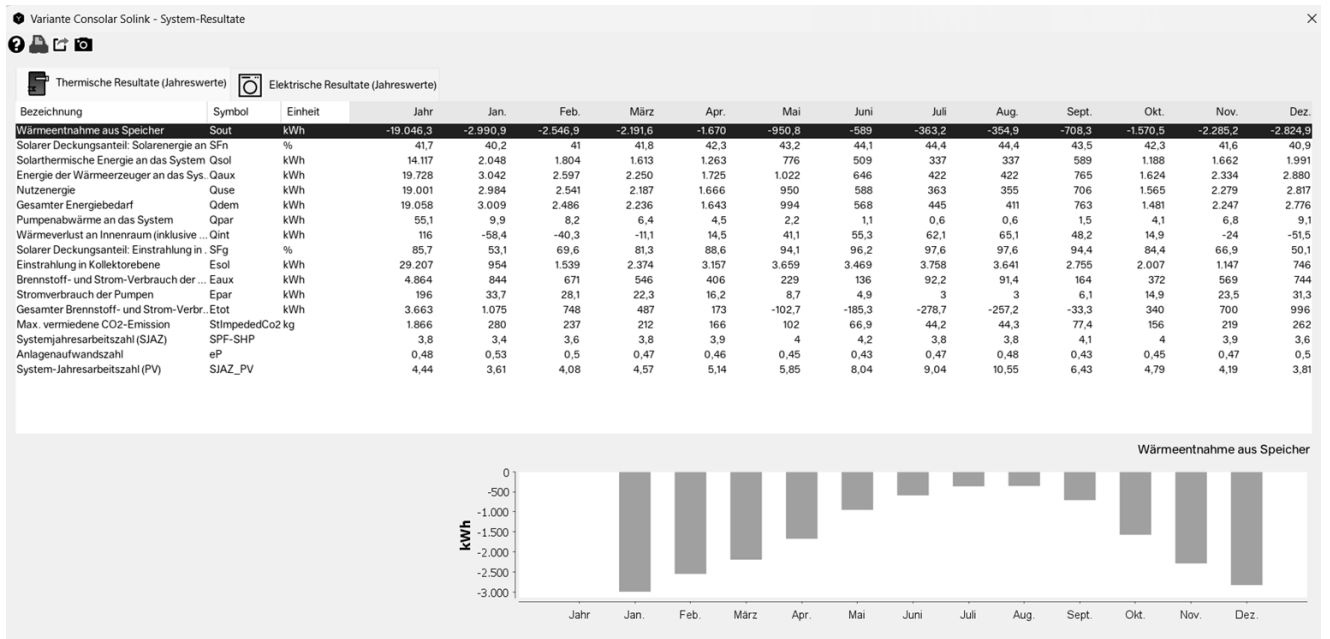
Resultate-Übersicht

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Jahr
Solarer Deckungsanteil: Solarenergie an das System	SFn	%	41,7
Solarer Deckungsanteil Warmwasser	SFnHw	%	46,5
Solarer Deckungsanteil Gebäude	SFnBd	%	42,4
Solarthermische Energie an das System	Qsol	kWh	14.117
Ertrag Photovoltaik AC	Qinv	kWh	4.896,5
Eigenverbrauch	Eocs	kWh	2.012
Netzspeisung	Eteg	kWh	2.884
Netzbezug	Efeg	kWh	6.547
Energie der Wärmeerzeuger an das System (ohne Solarthermie)	Qaux	kWh	19.728
Nutzenergie	Quse	kWh	19.001
Energiedefizit	Qdef	kWh	32,2
Gesamter Brennstoff- und Strom-Verbrauch des Systems	Etot	kWh	3.663
Gesamter Stromverbrauch	Ecs	kWh	8.559
Anlagenaufwandszahl	eP		0,48
System-Jahresarbeitszahl (PV)	SJAZ_PV		4,44
CO2 Emission	EmissionCO2	kg	3.512

Solarer Deckungsanteil: Solarenergie an das System

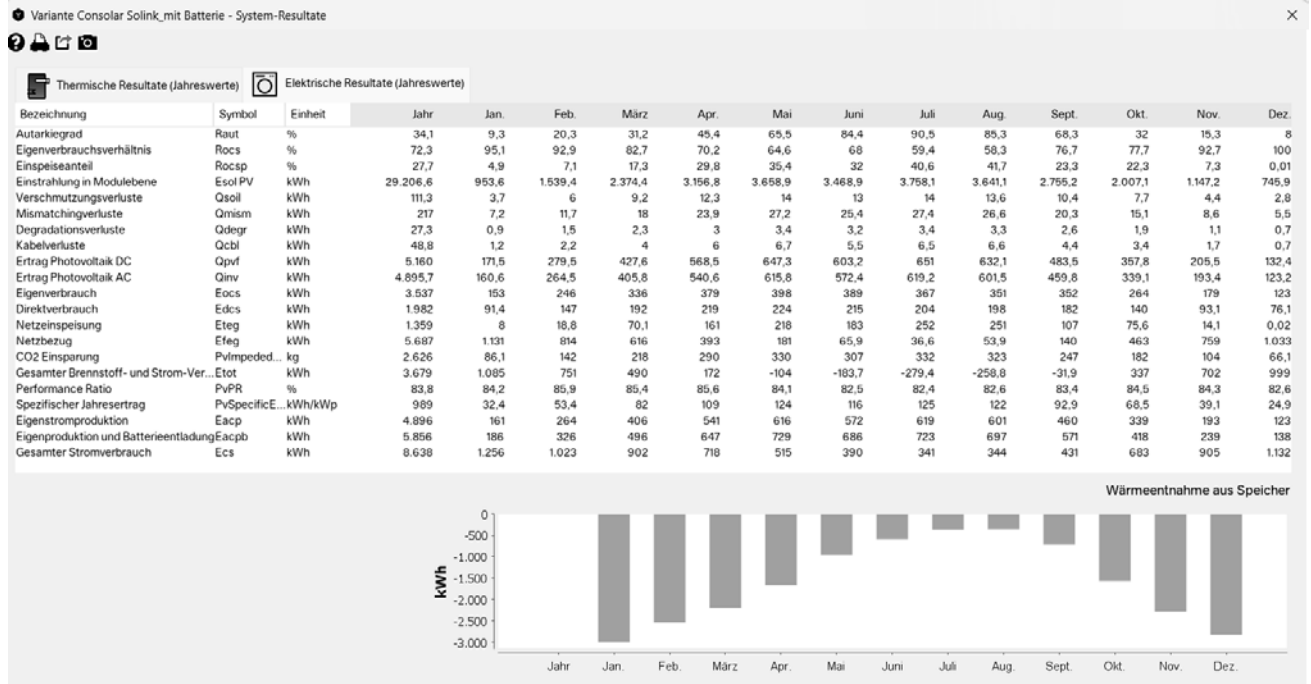
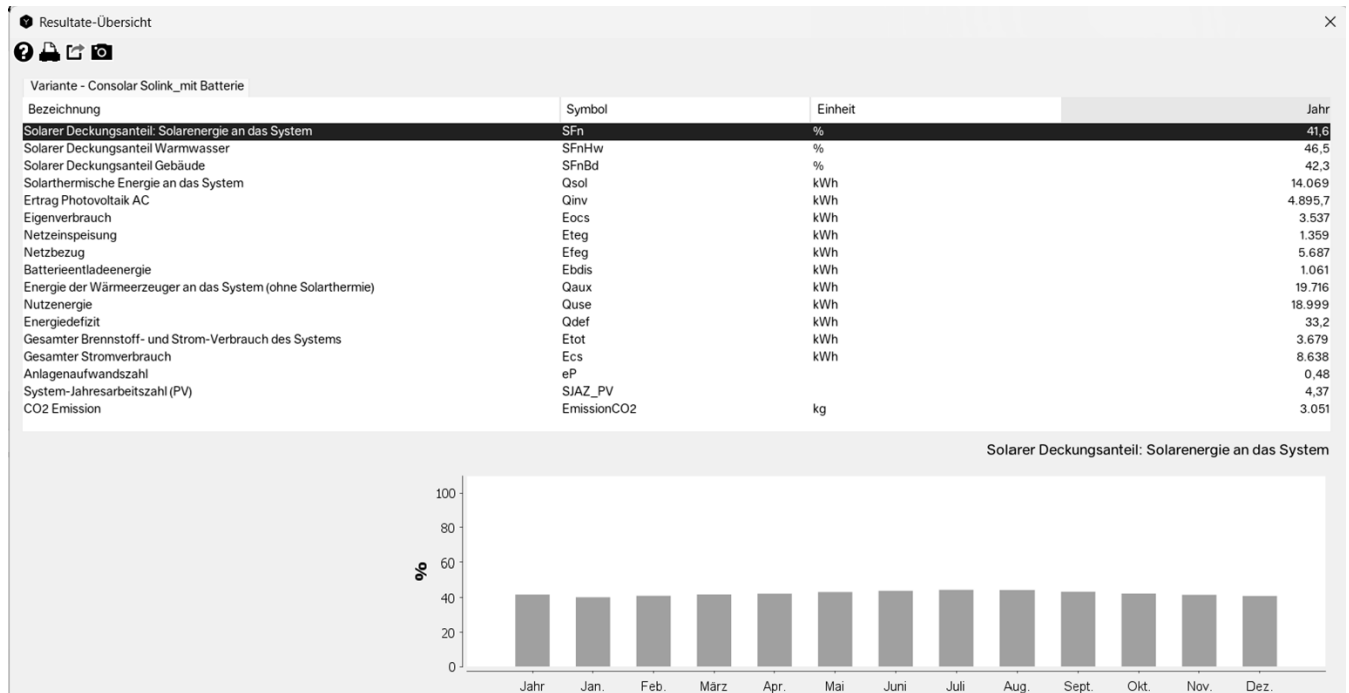


Month	Percentage (%)
Jahr	41.7
Jan	41.7
Feb	41.7
März	41.7
Apr	41.7
Mai	41.7
Juni	41.7
Juli	41.7
Aug	41.7
Sept	41.7
Okt	41.7
Nov	41.7
Dez	41.7

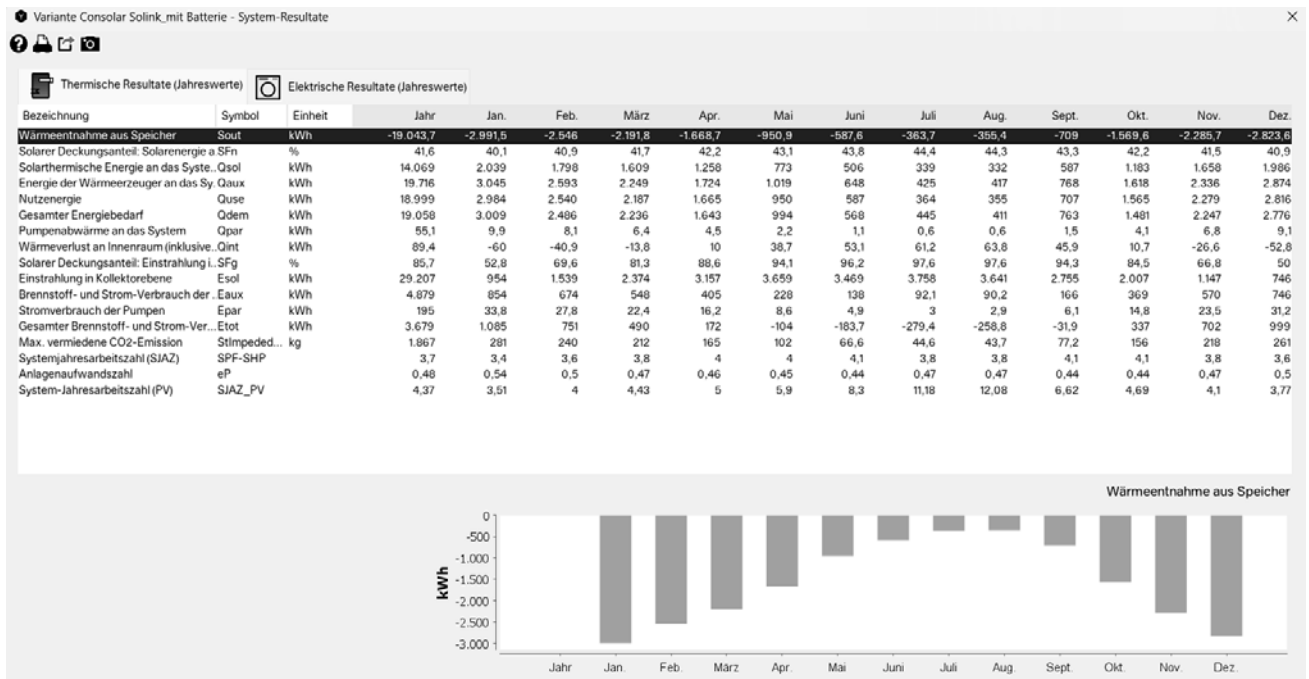


Anhang Abbildung 40: komprimierte Ergebnisdarstellung der Variante 2 (Simulation erstellt mit Polysun)

# Ergebnisse der Simulation der Variante 2\_mit Batteriespeicher









Anhang Abbildung 41: komprimierte Ergebnisdarstellung der Variante 2\_ mit Batteriespeicher (Simulation erstellt mit Polysun)

## Mail von Polysun

Re: Aw: Re: Aw: Polysun

 **Andreas Wolf**  
7. Juni 2023 12:15  
[Details einblenden](#)

 EXTERNE INHALTE VON DIESEM ABSENDER IMMER ANZEIGEN

Hallo Frau Brack,


Etot bezieht sich auf die Primärenergie, also den Energiewert des Brennstoffs bzw. des Stroms, der verbraucht wird. Bitte beachten Sie, dass Solarenergie dort nicht eingerechnet wird.

Der Endenergieverbrauch auf der Verbraucherseite wäre Quse.

Beste Grüße

Andreas Wolf

ANDREAS WOLF  
International Sales Manager



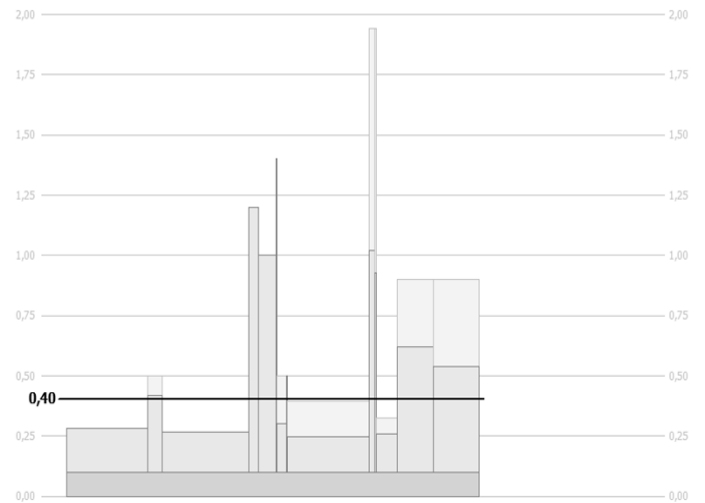
Anhang Abbildung 42: Mail von Andreas Wolf

## Energetische Bewertung

Transmissionswärmebedarf HT der Außenbauteile

Info

Außenbauteile			
F	U-Wert	Fläche A	F x U x A
	0,184 W/m <sup>2</sup> K	139,55 m <sup>2</sup>	25,68 W/K
0,80	0,400 W/m <sup>2</sup> K	25,27 m <sup>2</sup>	8,09 W/K
	0,169 W/m <sup>2</sup> K	149,26 m <sup>2</sup>	25,22 W/K
	1,100 W/m <sup>2</sup> K	17,09 m <sup>2</sup>	18,80 W/K
	0,900 W/m <sup>2</sup> K	29,57 m <sup>2</sup>	26,61 W/K
	1,300 W/m <sup>2</sup> K	1,98 m <sup>2</sup>	2,57 W/K
0,50	0,400 W/m <sup>2</sup> K	16,30 m <sup>2</sup>	3,26 W/K
	0,400 W/m <sup>2</sup> K	2,10 m <sup>2</sup>	0,84 W/K
0,50	0,297 W/m <sup>2</sup> K	140,00 m <sup>2</sup>	20,79 W/K
0,50	1,840 W/m <sup>2</sup> K	10,92 m <sup>2</sup>	10,05 W/K
0,45	1,840 W/m <sup>2</sup> K	2,10 m <sup>2</sup>	1,74 W/K
0,70	0,226 W/m <sup>2</sup> K	35,82 m <sup>2</sup>	5,67 W/K
0,65	0,800 W/m <sup>2</sup> K	62,51 m <sup>2</sup>	32,51 W/K
0,55	0,800 W/m <sup>2</sup> K	79,47 m <sup>2</sup>	34,97 W/K
Summe:		<b>711,94 m<sup>2</sup></b>	216,78 W/K
			mittlerer U-Wert
			0,304 W/m <sup>2</sup> K
			Wärmebrückenbeitrag
			0,100 W/m <sup>2</sup> K
			<b>Transmissionswärmebedarf HT</b>
			<b>0,404 W/m<sup>2</sup>K</b>



Flächenanteilige Aufteilung der Bauteile nach U-Werten und Beitrag der Wärmebrücken (Sockel) in W/m<sup>2</sup>K

Anhang Abbildung 43: Berechnung des Transmissionswärmebedarf-Variante 2 (erstellt im Energieberater 3D plus)

## Auswertung

Anhang Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für die Auswertung der Varianten

	Heizöl	Strommix
CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor ohne VK in g CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh	310	428
CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor mit VK in g CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh	372	485

Anhang Tabelle 3: Ergebnisse der kapitalgebundenen Kosten der unterschiedlichen Varianten (eigene Darstellung)

	Annuitätenkosten Sanierungen in €/a	Annuitätenkosten Wärmegerzeuger in €/a	Gesamte Annuitätenkosten in €/a
Ist-Zustand mit Heizöl	0	1021,06	1021,06
Ist-Zustand mit LWP	0	1427,81	1427,81
Variante 1 mit SWP	3551,08	1641,36	5192,45
Variante 2 ohne Batterie	6698,99	1931,61	8630,60
Variante 2 mit Batterie	6698,99	2113,34	8812,33

Anhang Tabelle 4: Ergebnis der betriebsgebundenen Kosten der Varianten (eigene Darstellung)

	Wartungskosten in €/a	Schornsteinfeger in €/a	Energieversorgungsanschluss in €/a	Gesamte Betriebskosten in €/a
Ist-Zustand mit Heizöl	150	100	0	250
Ist-Zustand mit LWP	100	0	70	170
Variante 1 mit SWP	100	0	70	170
Variante 2 ohne/mit Batterie	100	0	70	170

Anhang Tabelle 5: Ergebnis der verbrauchsgebundenen Kosten der Varianten (eigene Darstellung)

	<b>Verbrauchsgebundene Kosten in €/a</b>
<b>Ist-Zustand mit Heizöl</b>	11.482
<b>Ist-Zustand mit LWP</b>	6.354
<b>Variante 1 mit SWP</b>	1.798
<b>Variante 2 ohne Batterie</b>	3.248
<b>Variante 2 mit Batterie</b>	2.531