

Simulationsstudie HEAT4All Infrarotheizung

Villach, Mai 2019

GENIO Bauphysik GmbH
Brauhausgasse 12
9500 Villach
www.genio.gmbh

Ing. Mag. Andreas Karitnig
+43 676 5249628
andreas.karitnig@genio.gmbh

im Auftrag von:

Heat4All Vertriebs GmbH
Brühlerstraße 73B/Haus 7/Top 5
A-2340 Mödling

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Zielsetzung und Methodik.....	5
1.1 Referenzgebäude	5
1.2 Simulationszeitraum.....	7
1.3 Klimadaten	7
1.4 Zonierung	8
1.5 Gebäudegeometrie	9
1.6 Bauteilaufbauten und Fenster.....	9
1.7 Sonnenschutz und Verschattung.....	10
1.8 Luftwechsel	10
1.9 Anwesenheit.....	12
1.10 Innere Wärmegewinne.....	12
1.11 Thermische Randbedingungen.....	13
1.12 Temperaturregelung	13
1.13 Simulationsmethodik	14
2 Simulations-Szenarien und Ergebnisse.....	15
2.1 System 01: HEAT4All Infrartheizung.....	15
2.2 System 02: Gebläsekonvektoren + Fernwärme	18
2.3 System 03: Heizkörper + Fernwärme	19
2.4 System 04: Fußbodenheizung +Luft-Wasser-Wärmepumpe	20
2.5 Ergebnisse der Gebäudesimulation	22
3 Wirtschaftlichkeitsrechnung	25
3.1 Berechnungsannahmen	25
3.2 Berechnungsvarianten	26
3.3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	29
4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	31
Literaturverzeichnis.....	32
Abbildungsverzeichnis.....	33
Tabellenverzeichnis	34
Anhang	35

1 Zielsetzung und Methodik

Ziel des Projektes war die Erstellung einer vergleichenden Studie zur Beheizung einer Neubau-Wohnung in Österreich mit unterschiedlichen Raumheizungssystemen. Die Studie gliedert sich methodisch in zwei Teile.

Thermisch energetische Aspekte wurden mit der Methode der thermischen Gebäudesimulation betrachtet (Abschnitt 1 und Abschnitt 2). Die Simulation erfolgte anhand eines gekoppelten Mehrzonenmodells der Wohnung mittels der Simulationssoftware IDA-ICE v 4.8. In vier Szenarien wurden verschiedene Systemvarianten der Heizungstechnik simuliert und die Ergebnisse verglichen. Die untersuchten Systemvarianten sind:

- HEAT4ALL Infrarotheizung
- Gebläsekonvektoren + Fernwärme
- Heizkörper + Fernwärme
- Fußbodenheizung + Luft-Wasser-Wärmepumpe

Im Anschluss daran wurde eine betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung der vier Heizungstechnik-Variantendurchgeführt (Abschnitt 3).

Die Definition der Randbedingungen und Szenarien erfolgte in Abstimmung mit dem Auftraggeber.

1.1 Referenzgebäude

Als Referenzgebäude wurde ein Mehrfamilienwohnhaus mit 6 Wohneinheiten definiert.

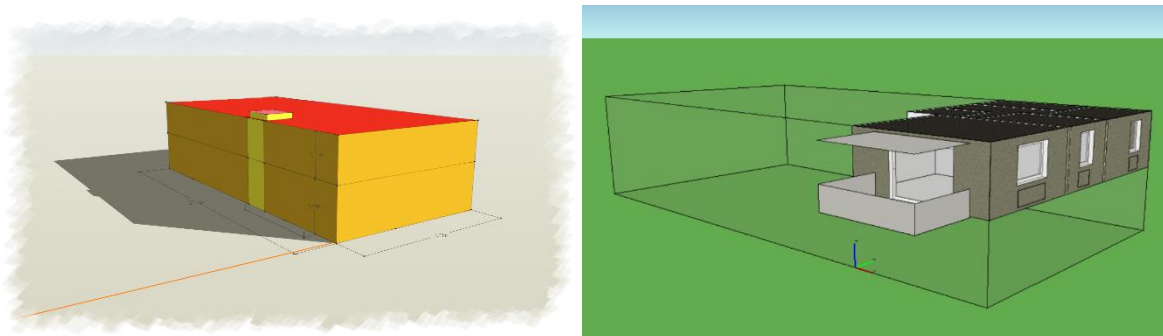


Abbildung 1-1: Referenzgebäude und -wohnung

Für das Gebäude wurde ein Energieausweis erstellt und die Einhaltung der Energiekennzahlen nach OIB-Richtlinie 6 (2015) nachgewiesen. Der Energieausweis wurde mit Infrarotheizungen als alleinigem Heizsystem erstellt. Zur Einhaltung der Anforderungen hinsichtlich Gesamtenergieeffizienz und erneuerbarem Anteil war im vorliegenden Fall auch die Anordnung einer Photovoltaikanlage ($10 \text{ kW}_{\text{peak}}$) erforderlich. In der Simulation und der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnung werden (bis auf die Heizungssysteme) identische Gebäude angenommen. Daher werden die Photovoltaikanlage und auch Anlagen zur Warmwasserbereitung (elektrische Warmwasserboiler) dort nicht explizit berücksichtigt.

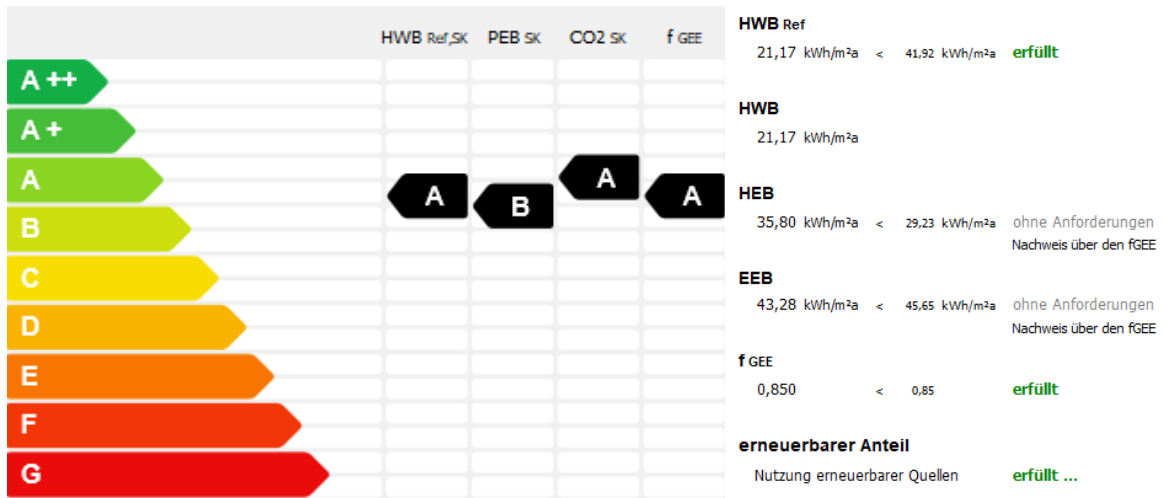


Abbildung 1-2: Energiekennzahlen des Referenzgebäudes

Als Gebäudestandort wurde Klagenfurt am Wörthersee angenommen.



Abbildung 1-3: Gebäudestandort: Klagenfurt am Wörthersee

Die Umlage von allgemeinen Energie- oder Kostenbeiträgen (z.B. Wärmeverteilverluste, Kosten zentraler Heizungsanlagen, ...) von der Gebäudeebene auf die Wohnungsebene erfolgt über Flächenanteile.

Tabelle 1-1: Flächenanteile der betrachteten Wohnung

		Gebäude GESAMT	Wohnung TOP 06	Anteil
Wohnungen	[-]	6	1	17%
BGF	[m ²]	816	113	14%
NF	[m ²]	661	91	14%

1.2 Simulationszeitraum

Für den Vergleich der Heizungssysteme wurde ein Winterhalbjahr (15.10.-15.04.) als Simulationszeitraum gewählt.

1.3 Klimadaten

In der Simulation wurden synthetische stündliche Wetterdaten des ASHRAE IWEC2 Wetterdatensatzes für Klagenfurt verwendet.

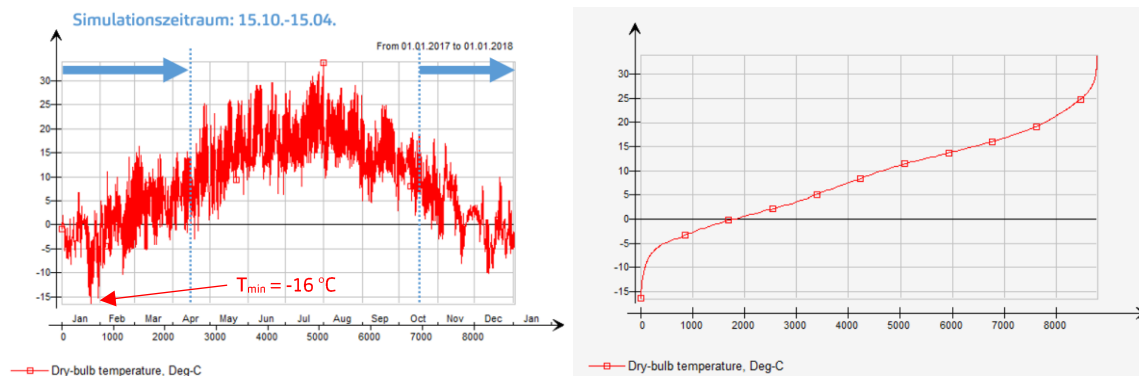


Abbildung 1-4 Außentemperatur

	Variables						
	Dry-bulb temperature, Deg-C	Rel humidity of air, %	Direct normal rad, W/m2	Diffuse rad on hor surf, W/m2	Wind speed, x-component, m/s	Wind speed, y-component, m/s	Cloudness, %
January	-3.6	90.3	87.8	32.3	0.5	-0.6	60.1
February	-0.1	81.4	141.6	47.6	0.3	-0.4	42.0
March	4.4	76.2	153.4	74.5	0.2	-0.4	54.6
April	8.5	73.4	156.0	101.8	0.3	-0.3	58.1
May	14.5	65.3	184.7	120.6	0.1	0.0	52.1
June	17.9	69.1	208.0	125.1	0.2	-0.1	53.6
July	19.5	72.4	208.3	118.1	-0.1	-0.3	48.2
August	18.6	75.0	192.9	105.7	0.1	-0.4	53.0
September	13.8	82.8	164.0	81.5	-0.0	-0.3	52.7
October	9.4	83.0	116.7	60.1	0.5	-0.3	62.8
November	3.3	86.5	70.4	38.4	0.2	-0.3	71.8
December	-1.6	88.9	75.2	27.8	-0.1	-0.2	54.7
mean	8.8	78.7	146.6	77.9	0.2	-0.3	55.4
mean*8760.0 h	76659.7	689240.0	1284118.0	682791.0	1553.2	-2654.4	485055.0
min	-3.6	65.3	70.4	27.8	-0.1	-0.6	42.0
max	19.5	90.3	208.3	125.1	0.5	0.0	71.8

Abbildung 1-5: Monatsmittelwerte für Klagenfurt gemäß ASHRAE IWEC2

Darüber hinaus wurden folgende „Auslegungstage“ für die Heizung bzw. Kühlung definiert (aus ASHRAE Fundamentals 2013).

Tabelle 1-2 Auslegungstage für die Heizung

Winter	
Dry-bulb min	-14.0
Dry-bulb max	-6.9
Wet-bulb max	-7.2
Wind direction	310
Wind speed	1.3
Clear-sky	tau_b 0.32
optical depth	tau_d 2.436

1.4 Zonierung

Die Wohnung wurde in nachfolgend angeführte thermische Zonen geteilt.

Tabelle 1-3 Thermische Zonierung

Name	Fläche [m2]
Wohnen	32.0
Eltern	12.3
Kind1	6.4
Kind2	13.4
Bad	12.6
Vorraum, AR, WC	14.3
WOHNUNG	91.0

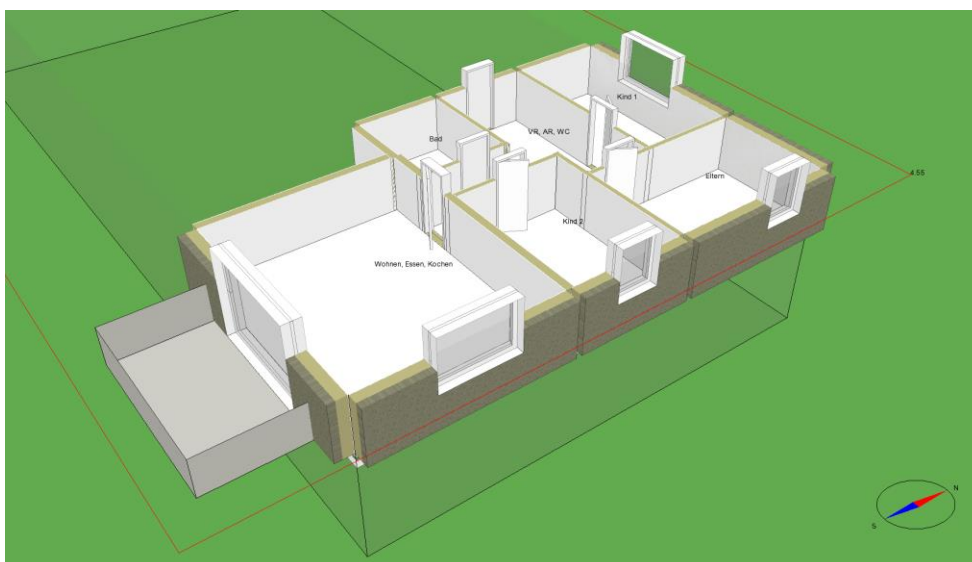


Abbildung 1-6 Thermische Zonierung

1.5 Gebäudegeometrie

Die Gebäudegeometrie wird über die Innenoberfläche der Außenbauteile definiert. Längen von geometrischen Wärmebrücken (Wandecken,...) und Bauteilanschlüssen werden automatisiert ermittelt und zur Wärmebrückenberechnung herangezogen.

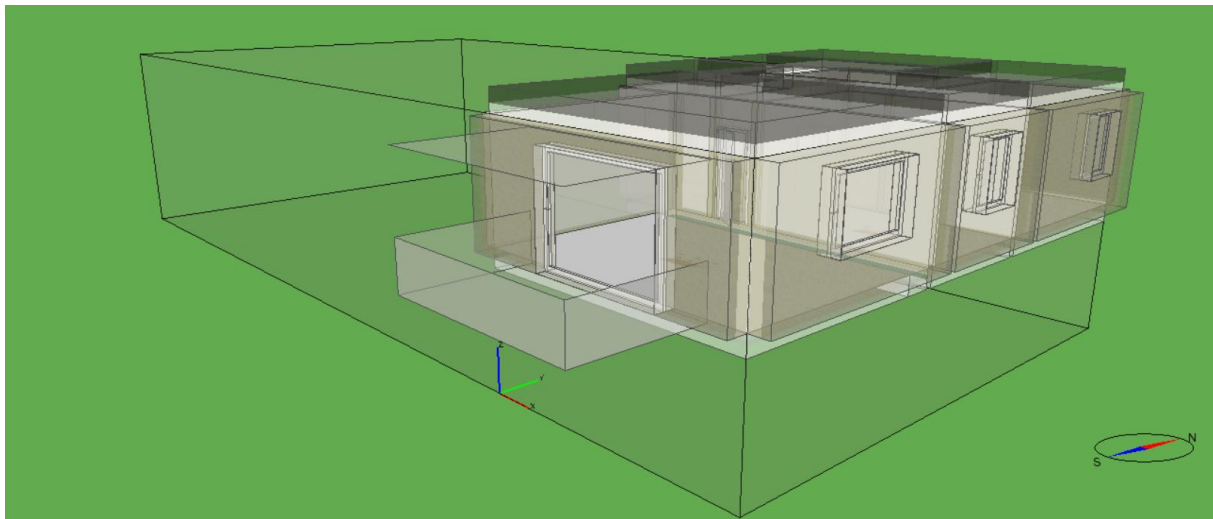


Abbildung 1-7 Gebäudegeometrie

1.6 Bauteilaufbauten und Fenster

Das Referenzgebäude wird in Ziegel-Massivbauweise berechnet. Die Dämmstärken ergeben sich aus den Energieeffizianzorderungen für Neubauten (siehe 1.1). Außenfenster werden mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Die Bauteilaufbauten der Außenbauteile und die Außenfenster sind in nachfolgender Grafik angeführt, eine umfassende Aufstellung befindet sich im Anhang. Bauphysikalische Kennwerte wurden der Baustoffdatenbank baubook (baubook GmbH 2019) entnommen.

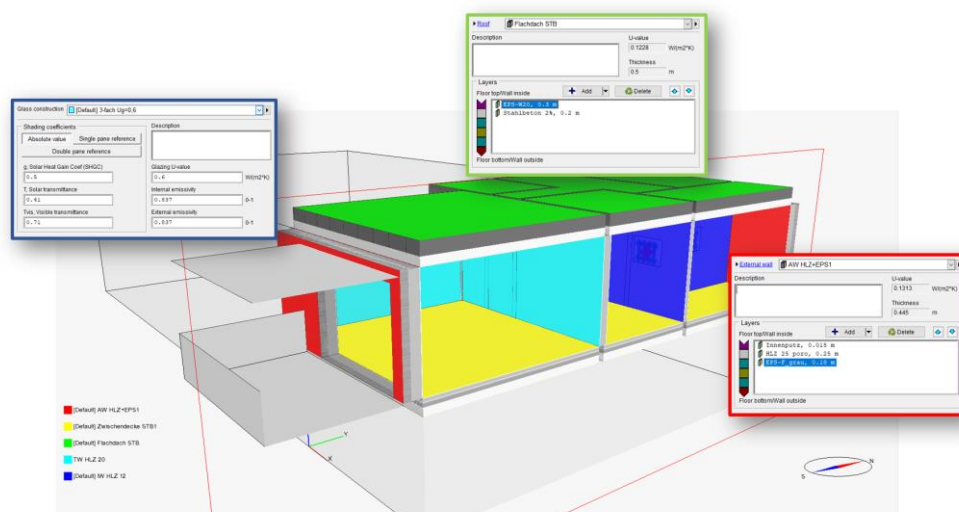


Abbildung 1-8 Zuweisung Bauteilaufbauten

1.7 Sonnenschutz und Verschattung

Die horizontale Balkonüberdachung wird in der Simulation als Fixverschattung berücksichtigt.



Abbildung 1-9: Balkonüberdachung

Darüber hinaus werden bei allen Außenfenstern Außenjalousien eingesetzt.

Parameters for integrated shading (curtains, blinds, etc.)		
Multipller for g (solar gain factor)	<input type="text" value="0.14"/>	- Given multipliers modify corresponding parameters for the window when integrated shadings are drawn
Multipller for T (short-wave shading coefficient)	<input type="text" value="0.09"/>	-
Multipller for U-value	<input type="text" value="1.0"/>	-
Diffusion factor	<input type="text" value="1"/>	- 1 = fully diffuse 0 = no diffusion

Abbildung 1-10 Daten Außenjalousien

Hinsichtlich der Steuerung wurde angenommen, dass bewegliche Sonnenschutzelemente zur Vermeidung von Überhitzung aktiviert werden, wenn die Raumtemperatur 23°C überschreitet.

1.8 Luftwechsel

Luftwechsel

Während der Benutzungszeiten wird ein personenabhängiger Luftwechsel 25 [m³/Pers h] angenommen. Die Zuluft-Temperatur entspricht der Außenlufttemperatur, die Ablufttemperatur der mittleren Raumlufttemperatur. Dahinter steht die vereinfachende Annahme, dass die Bewohner während ihrer Anwesenheit über Fensterlüftung für den hygienisch erforderlichen Luftwechsel sorgen.

Infiltration

Ergänzend dazu wird der (unbeabsichtigte) Luftwechsel durch Gebäudeundichtheiten (Infiltration) windabhängig berechnet. Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Luftdichtheit: $n_{50} = 3,00$; Mindestanforderung lt. OIB-Richtlinie 6 (OIB 2015)
- Windgeschwindigkeit und Richtung lt. Klimadatensatz
- Die Druckkoeffizienten der einzelnen Oberflächen wurden mit dem programminternen Algorithmus (IDA-ICE 4.8 (EQUA 2018)) auf Basis der 3D-Geometrie abgeschätzt.

Luftwechsel zwischen Zonen

Durch geöffnete Türen wird auch ein Luftaustausch zwischen den einzelnen thermischen Zonen berücksichtigt. Der Luftwechsel errechnet sich in jedem Simulationszeitpunkt aus Temperatur bzw. Druckunterschieden zwischen den Zonen.

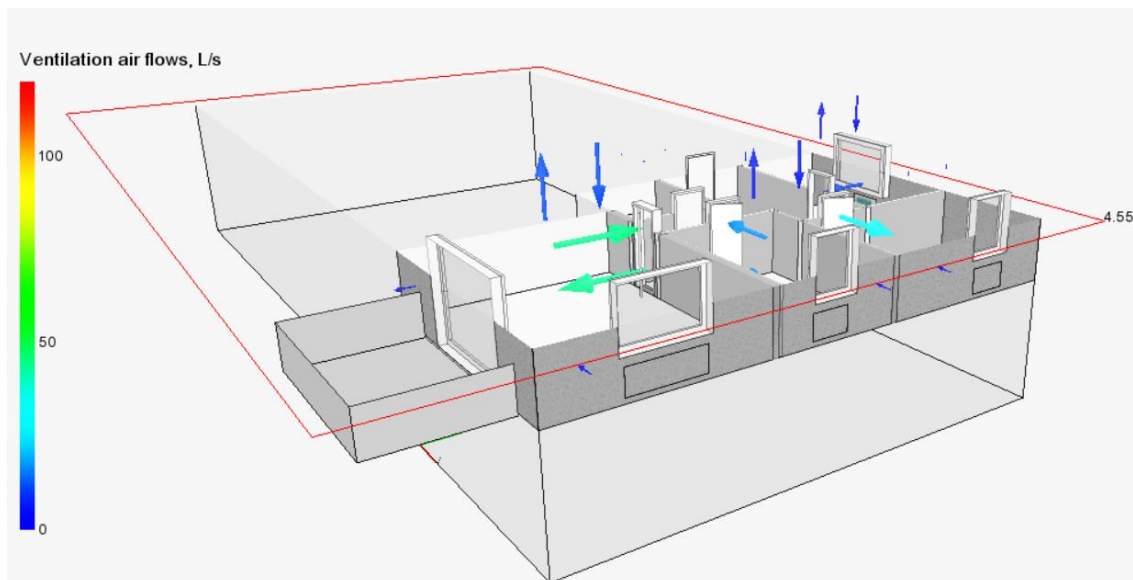


Abbildung 1-11 Beispiel Luftströme

1.9 Anwesenheit

Abbildung 1-12 zeigt das Anwesenheitsprofil der vier Bewohner (2 Erwachsene, 2 Kinder).

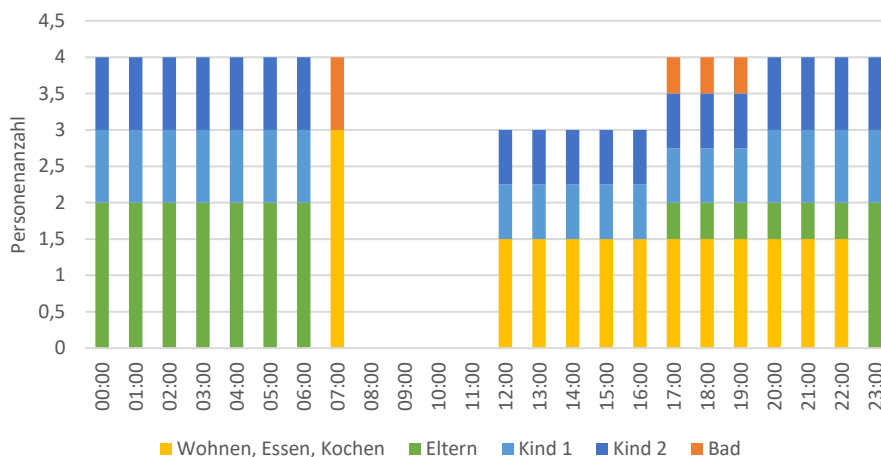


Abbildung 1-12: Anwesenheitsprofil

1.10 Innere Wärmegewinne

Die spezifische Wärmeleistung von Geräten und Beleuchtung wurde gemäß ÖNORM B 8110-5 (ON 2012) im Tagesmittel mit $3,75 \text{ W/m}^2$ angenommen. Abweichend dazu wurde die Wärmeleistung jedoch nicht konstant angenommen, sondern nur während der Tagesnutzungsstunden (siehe Abbildung 1-13). 50% der Wärmelast wurde als Wärmestrahlung angenommen, die restliche Wärmelast wirkt konvektiv. Für die Simulation wird ein Ausnutzungsfaktor der inneren Wärmegewinne von 75% angenommen.

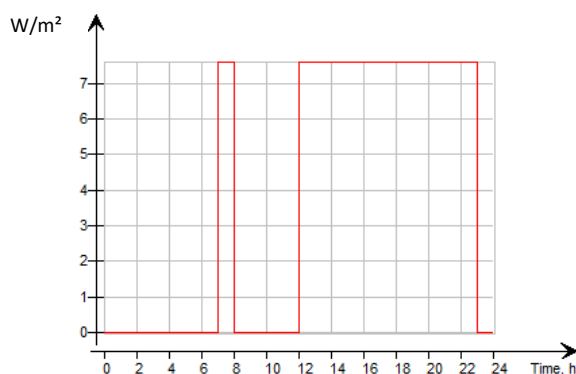


Abbildung 1-13: Tagesprofil für spez. Wärmeleistung von Geräte + Beleuchtung

Die mittlere Belegungsdichte der Wohnung ergibt sich aus dem Anwesenheitsprofil (Abbildung 1-12). Die Wärmeabgabe der Personen wird zu jedem Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Aktivität (1.0 MET), der Bekleidung ($0,75 \pm 0,25 \text{ CLO}$) und der Raumtemperatur berechnet.

1.11 Thermische Randbedingungen

An Außenwänden, Dächern und Fensterflächen liegen die thermischen Randbedingungen (Temperatur, Solarstrahlung, Feuchte, Wind, ...) lt. Klimadatensatz an (siehe Abschnitt 1.1).

Wohnungstrennwände und Geschoßdecken zu angrenzenden konditionierten Gebäudebereichen werden mit adiabatischen Randbedingungen berechnet.

1.12 Temperaturregelung

In der Simulation werden je nach Variante unterschiedliche Regelungen umgesetzt (Details siehe Abschnitt 2).

Für einen möglichst guten Vergleichbarkeit unterschiedlicher Heizsysteme wurde eine Regelung nach der operativen Temperatur implementiert. Die operative Temperatur („gefühlte Temperatur“) umfasst das Zusammenwirken von Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur der Umgebungsoberflächen und ist ein Hauptfaktor für thermische Behaglichkeit. Eine Regelung nach der operativen Temperatur ist jedoch in der Realität technisch nicht praktikabel. Dahinter steht die idealisierende Annahme, dass die Bewohner beispielsweise angesichts höherer Wärmestrahlung die Solltemperatur entsprechend reduzieren um die gewünschte „gefühlte Temperatur“ zu erreichen. Ein derartiges Nutzerverhalten konnte im Zusammenhang mit Infrartheizungen in vergleichenden Studien messtechnisch belegt werden (AEE INTEC 2018).

Abbildung 1-14 zeigt die gewählten Soll-Temperaturen. In Abwesenheitszeiten wird (ausgenommen bei der Fußbodenheizung) eine Temperaturabsenkung durchgeführt.

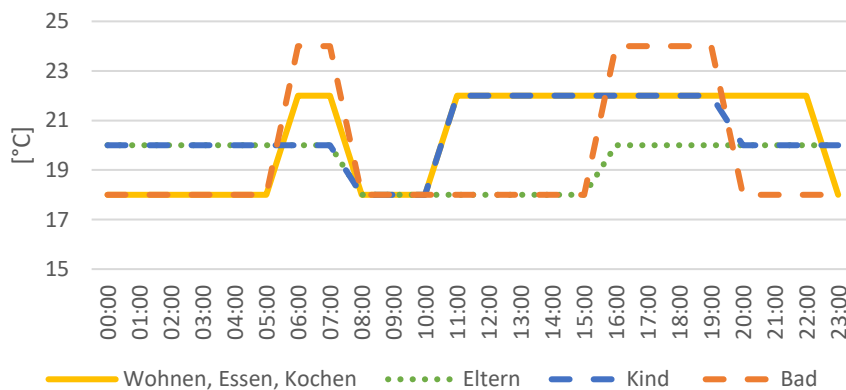


Abbildung 1-14: Solltemperaturen

1.13 Simulationsmethodik

Die thermische Gebäudesimulation wurde mit der Software IDA-ICE v 4.8 durchgeführt. Die dort implementierten thermischen Modelle und numerischen Methoden sind in (EQUA 2018) bzw. (Bring, Sahlin und Vuolle 1999) dokumentiert.

Hinweis zu den Grenzen der Simulationsmethodik: IDA-ICE v 4.8 zählt aktuell zu den leistungsfähigsten Simulationsprogrammen für dynamische thermische Gebäudesimulation. Dennoch sind der Simulationsmethodik Grenzen gesetzt (idealisierte Modelle und Randbedingungen). Insbesondere wird darauf hingewiesen, dass eine räumliche Auflösung von Temperaturen, Luft- und Wärmeströmungen innerhalb einer thermischen Zone nicht möglich ist (Bilanzmodell mit einem Raumlufknoten je Zone). Dadurch können beispielsweise Effekte wie die lokale Erwärmung der Raumluft durch Sonneneinstrahlung oder Temperaturschichtungen nicht in der Simulation abgebildet werden.

Die Simulation für die Heizlastberechnung wird mit den Wetterdaten des Auslegungstages durchgeführt. Der Auslegungstag wird solange simuliert bis das Gebäude einen thermisch eingeschwungenen Zustand erreicht hat. Die oben definierten inneren Wärmegewinne werden dabei nicht berücksichtigt.

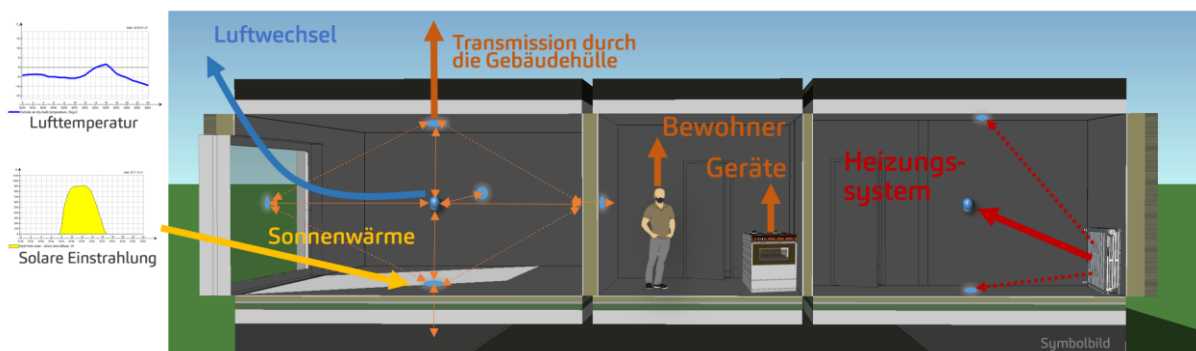


Abbildung 1-15 Symbolbild thermische Gebäudesimulation

2 Simulations-Szenarien und Ergebnisse

2.1 System 01: HEAT4All Infrarotheizung

System 01 besteht aus dezentralen direktelektrischen Infrarot-Heizkörpern der Firma HEAT4ALL.

Um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der HEAT4ALL Infrarotheizung zu erreichen, wurde das Simulationsmodell anhand von Messdaten (ITW Universität Stuttgart 2016) kalibriert (siehe Tabelle 2-1). Die Messung bezieht sich auf HEAT4ALL Infrarotheizungen mit einem hemisphärischen Gesamt-Emissionsgrad $\epsilon = 0,96$.

Tabelle 2-1 Strahlungs- und Konvektionsanteile in Messung und Simulation

	Wärme- strahlung Vorderseite	Wärme- strahlung Hinterseite	Konvektion
Messung lt. Prüfbericht	55.2%	15.9%	29.0%
Simulation	55.2%	16.1%	28.8%

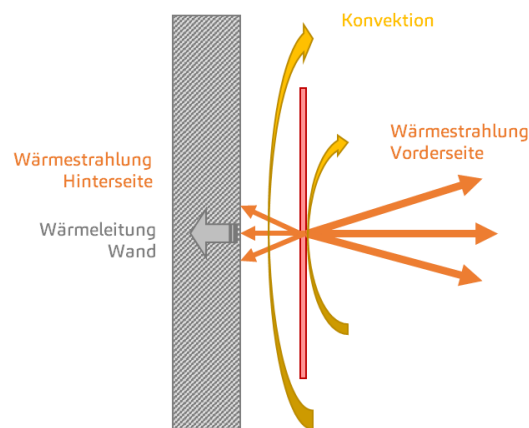


Abbildung 2-1 Systembild: Wärmeübertragung Infrarotheizung (Wandmontage)

Obwohl effizientere Regelungsarten grundsätzlich möglich sind, wurde die Regelung der Infrarotheizung im Sinne einer konservativen Annahme als Zweipunktregler (Ein/Aus) mit einer Hysterese von 1K abgebildet.

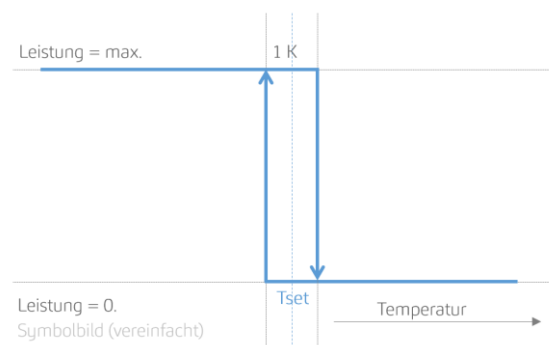


Abbildung 2-2 Symbolbild Temperaturregelung Infrarotheizung

Die Auslegungsleistungen der Infrarotheizung sind in Tabelle 2-2 angegeben.

Tabelle 2-2 Auslegungsleistungen der Infrarotheizung

	[W]
Wohnen	1200
Eltern	600
Kind1	600
Kind2	600
Bad	350

Abbildung 2-3 zeigt die Positionierung der Paneele in den Räumen.

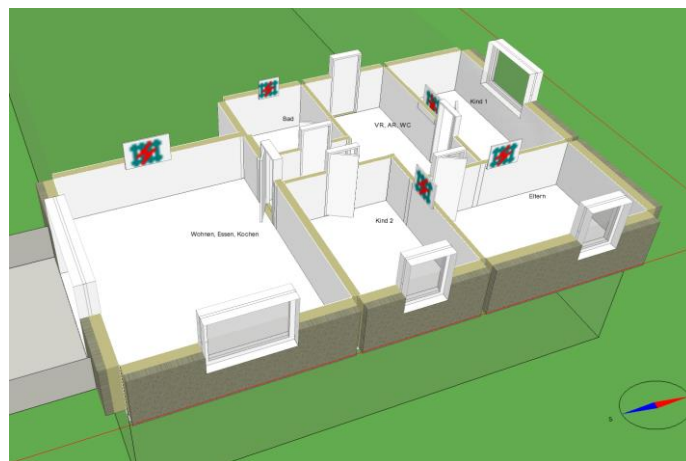


Abbildung 2-3 Positionierung Infrarotheizung

Als Beispiel sind nachfolgend die simulierten Energieflüsse und Temperaturverläufe im Wohn-Esszimmer an einem kalten strahlungsreichen Wintertag abgebildet.

Abbildung 2-4 zeigt die Raumlufttemperatur (blau) und die gerichteten operativen Temperaturen in Richtung der sechs raumumschließenden Flächen (gemessen vom Raummittelpunkt). Die dünne rote Linie zeigt die erhöhte empfundene Temperatur aus Richtung der Wand mit Infrartheizung.

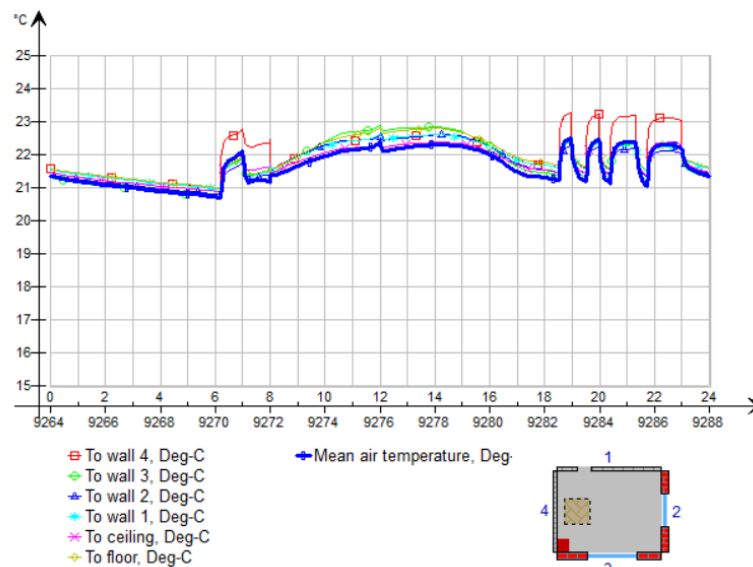


Abbildung 2-4 Raumtemperatur und gerichtete operative Temperaturen (Wohnen-Essen-Kochen, 22.01.)

Abbildung 2-5 zeigt die Wärmebilanz des Raumes. Die Infrartheizung (orange) wird am Morgen und am Abend aktiv, tagsüber wird der Raum durch Sonneneinstrahlung (gelb) erwärmt.

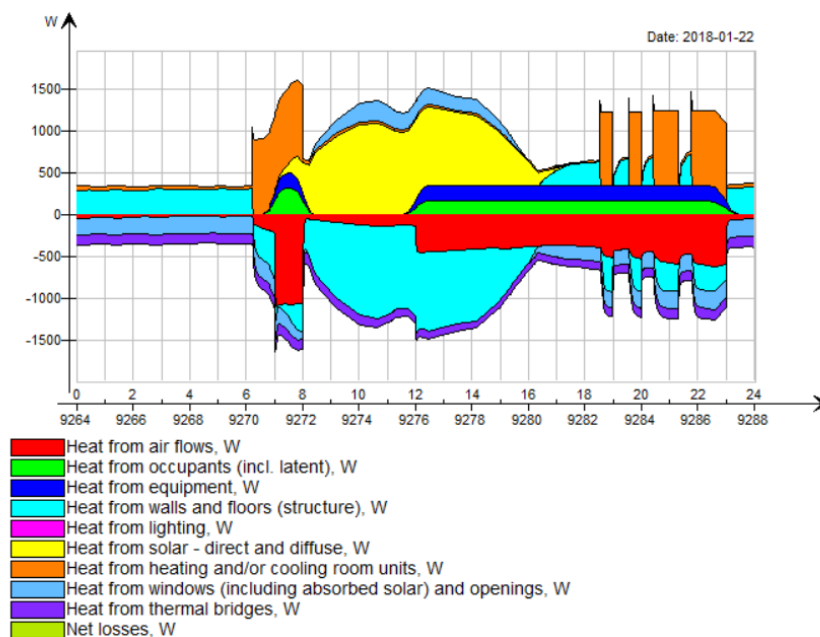


Abbildung 2-5 Wärmebilanz (Wohnen-Essen-Kochen, 22.01.)

2.2 System 02: Gebläsekonvektoren + Fernwärme

Die Wärmeabgabe in System 02 erfolgt über Gebläsekonvektoren ($T_V/T_R = 45^\circ\text{C}/40^\circ\text{C}$), die Wärmebereitstellung erfolgt mittels Fernwärme. Die Auslegungsleistungen der Konvektoren sind in Tabelle 2-3 angegeben.

Tabelle 2-3 Auslegungsleistungen der Gebläsekonvektoren

	[W]
Wohnen	1120
Eltern	695
Kind1	695
Kind2	695
Bad	695

Die Regelung erfolgt luftseitig und wird vereinfachend über einen Proportionalregler abgebildet. Bei Unterschreitung der Minimalleistung wird abgeregelt.

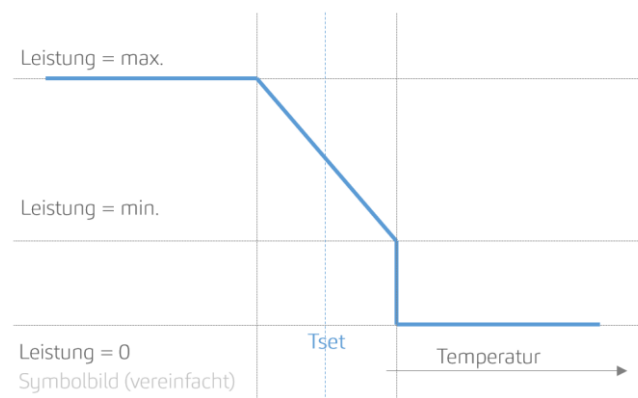


Abbildung 2-6 Symbolbild Temperaturregelung Gebläsekonvektoren

Die Verluste der Fernwärmeübergabestation wurden mit 2% angesetzt. Die Wärmeverteilverluste wurden anhand der Leitungslängen und Wassertemperaturen mit 9% abgeschätzt.

2.3 System 03: Heizkörper + Fernwärme

Die Wärmeabgabe in System 03 erfolgt über Flachheizkörper ($T_V/T_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$), die Wärmebereitstellung erfolgt mittels Fernwärme. Die Auslegungsleistungen der Heizkörper sind in Tabelle 2-4 angegeben.

Tabelle 2-4 Auslegungsleistungen der Heizkörper

	[W]
Wohnen	1200
Eltern	600
Kind1	600
Kind2	600
Bad	535

Abbildung 2-7 zeigt die Positionierung der Heizkörper in den Räumen.

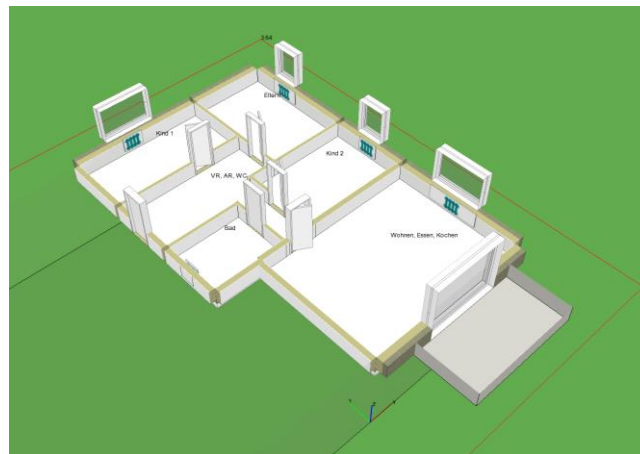


Abbildung 2-7 Positionierung Heizkörper

Die Regelung erfolgt wasserseitig über ein Thermostatventil (Proportionalregler).

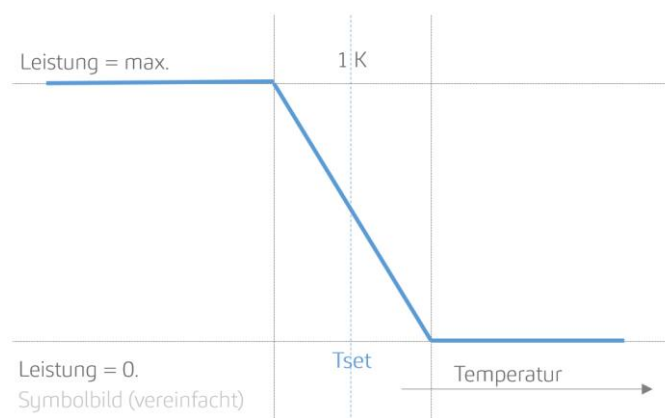


Abbildung 2-8 Symbolbild Temperaturregelung Heizkörper

Die Verluste der Fernwärmeübergabestation wurden mit 2% angesetzt. Die Wärmeverteilungsverluste wurden anhand der Leitungslängen und Wassertemperaturen mit 11% abgeschätzt.

2.4 System 04: Fußbodenheizung + Luft-Wasser-Wärmepumpe

Die Wärmeabgabe in System 04 erfolgt über Fußbodenheizung ($T_V/T_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$), die Wärmebereitstellung erfolgt mittels Luft-Wasser-Wärmepumpe. Die Auslegungsleistungen der Fußbodenheizung sind in Tabelle 2-5 angegeben.

Tabelle 2-5 Auslegungsleistungen der Fußbodenheizung

	[W]
Wohnen	1126
Eltern	528
Kind1	505
Kind2	492
Bad	189

Abbildung 2-9 zeigt die Positionierung der Heizflächen der Fußbodenheizung in den Räumen.

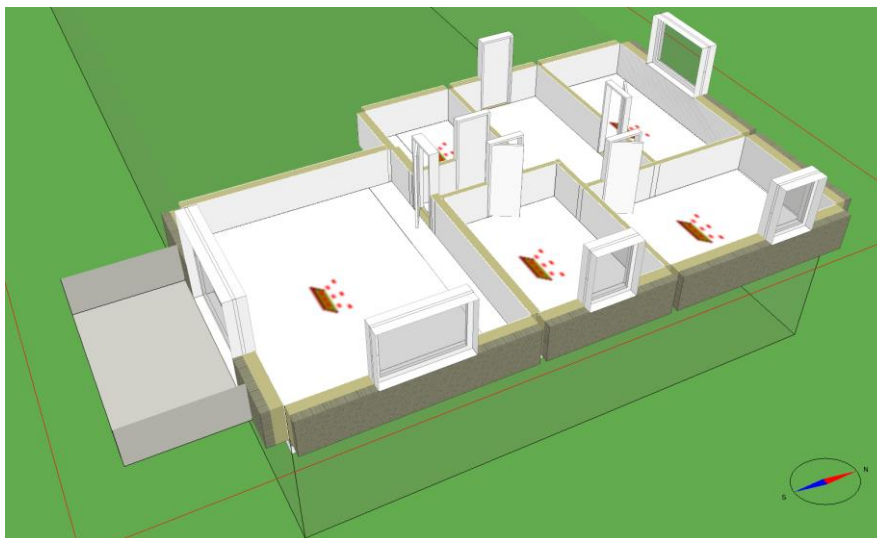


Abbildung 2-9 Positionierung Heizflächen der Fußbodenheizung

Die Regelung erfolgt raumweise über Thermostatventile (Proportionalregler). Angesichts der hohen thermischen Trägheit der Fußbodenheizung wurde in dieser Variante keine Nachtabsenkung implementiert.

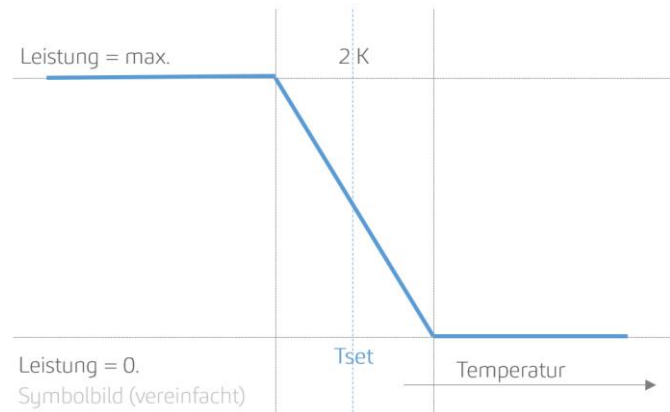


Abbildung 2-10 Symbolbild Temperaturregelung Heizkörper

Die Wärmeverteilverluste wurden anhand der Leitungslängen und Wassertemperaturen mit 11% abgeschätzt.

Die Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde mit dem Modell A2W_HP (COP =3,62) abgebildet.

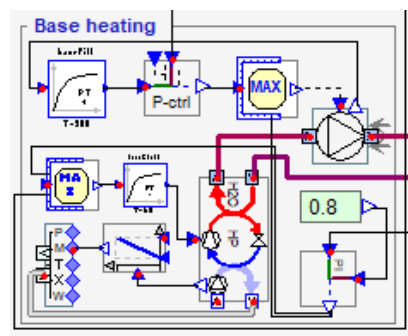


Abbildung 2-11 Symbolbild Wärmepumpenmodell

2.5 Ergebnisse der Gebäudesimulation

Abbildung 2-12 zeigt die Wärmeabgabe der Heizsysteme in die zu beheizenden Räume. Bezogen auf die Systemgrenze Raum (Nutzenergie) weist das System „HEAT4ALL-Infrarotheizung“ den geringsten Energiebedarf auf. Die Systeme mit Gebläsekonvektoren bzw. Heizkörper weisen einen geringfügig höheren Nutzenergiebedarf auf (+6% bzw. +5%). Das System mit Fußbodenheizung weist mit +15% einen merklich höheren Energiebedarf gegenüber dem Infrarotheizsystem auf.

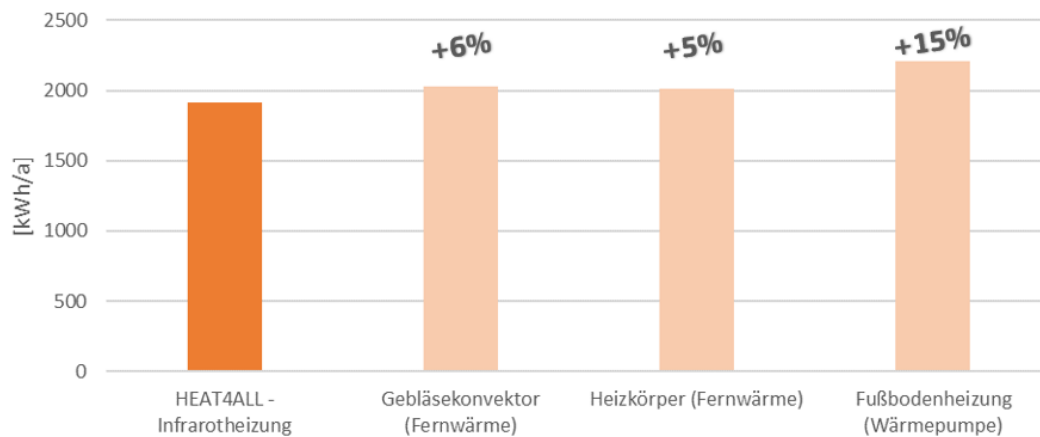


Abbildung 2-12 Wärmeabgabe in die zu beheizenden Räume

Die Unterschiede erklären sich aus dem Zusammenspiel einer Reihe von Einflussfaktoren.

Grundsätzlich lässt die Regelung nach der operativen Temperatur für Systeme mit höherem Strahlungsanteil (Infrarotheizung, Fußbodenheizung) bei vergleichbarem Temperaturempfinden eine niedrigere Raumlufttemperatur zu. Abbildung 2-13 zeigt als Beispiel die Stundenmittelwerte von Raumlufttemperatur (blau), operativer Temperatur (rot) und Oberflächentemperaturen der Bauteile (orange) an einem strahlungsarmen (bedeckten) Wintertag im Wohn-Esszimmer.

Bei der Infrarotheizung (links oben) liegen Raumluft- und operative Temperatur (Stundenmittelwerte) während der Anwesenheitszeit der Bewohner sehr nahe am Sollwert von 22°C, während es bei den anderen Heizsystemen regelungs- und systembedingt (operative Temperaturregelung, thermische Trägheit, bleibende Regelabweichung der Thermostatventile, etc.) zu höheren Temperaturen kommt. Insbesondere bei den Gebläsekonvektoren (oben rechts) zeigt sich die im Vergleich zur operativen Temperatur erhöhte Raumlufttemperatur bei rein konvektivem Wärmeeintrag, was sich letztlich in höheren Wärmeverlusten durch Lüftung und Infiltration niederschlägt.

Der gegenläufige Fall tritt bei der Fußbodenheizung (rechts unten) auf, hier liegt die Raumlufttemperatur konstant unter der operativen Temperatur. Der Mehrverbrauch ergibt sich hier in erster Linie durch die trägere Regelung (keine Temperaturabsenkung) und konstant höhere Oberflächentemperaturen von Außenbauteilen. Unter den gewählten Annahmen weist die Fußbodenheizung auch eine geringere solare Energienutzung auf. Die Konstruktionen werden auch in der Nacht durchgehend beheizt und starten mit entsprechend höherer Temperatur in den Tag, Solareinträge führen so schneller zu Überwärmung und werden dann mittels Sonnenschutz ausgeblendet oder abgelüftet. Dem gegenüber sind Bauteile nach der Nachtabsenkung etwas stärker ausgekühlt und können tagsüber mit Solarenergie beladen werden.

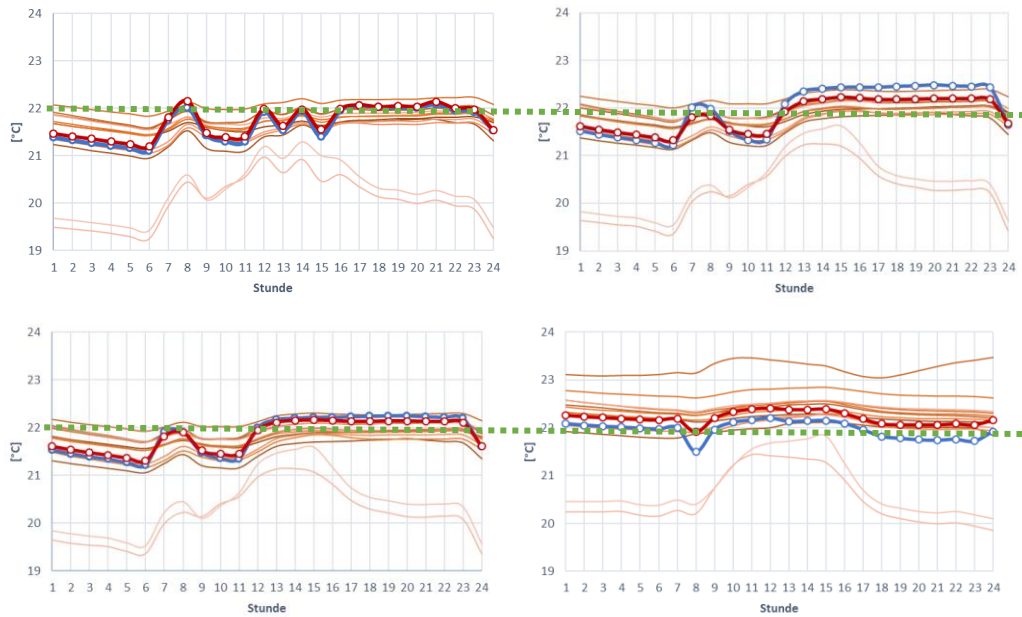


Abbildung 2-13 Temperaturverläufe (Wintertag) im Wohn-Esszimmer mit Infrarotheizung (oben links), Gebläsekonvektoren (oben rechts), Heizkörper (unten links) und Fußbodenheizung (unten rechts)

Abbildung 2-14 zeigt die Monatsmittelwerte der Raumlufttemperatur im Wohn-Essraum während der Benutzungsstunden. Auch hier wird das im Mittel etwas niedrigere Raumluft-Temperaturniveau der Infrarotheizung während der Heizperiode ersichtlich.

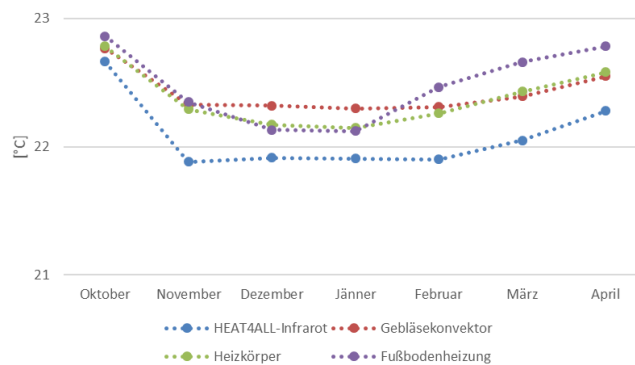


Abbildung 2-14 Monatsmittel der Raumlufttemperatur im Wohn-Essraum während der Benutzungsstunden

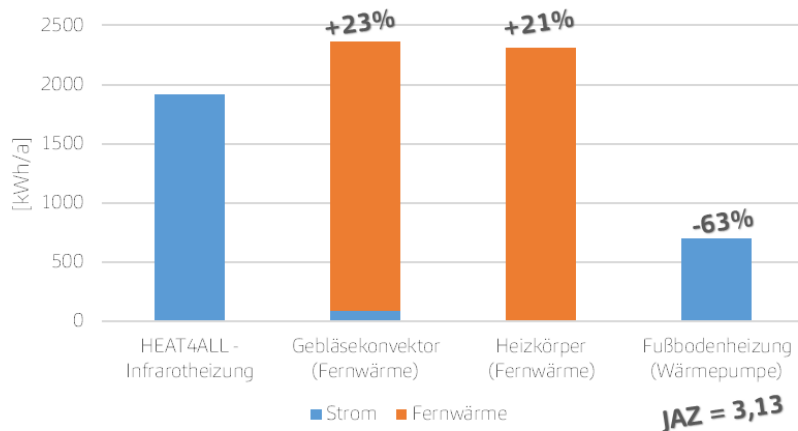


Abbildung 2-15 Endenergieverbrauch der betrachteten Systeme

Auch bezogen auf die Systemgrenze Gebäude (Endenergie) treten die Unterschiede der Heizungssysteme sehr deutlich zutage. Bei allen wasserführenden Systemen müssen Wärmeverluste der Rohrleitungen (je nach Temperaturniveau $\sim 8-11\%$) bzw. der Wärmeübergabe (Fernwärme: $\sim 2\%$) ausgeglichen werden, was zu entsprechenden Mehrverbräuchen führt. Darüber hinaus sind noch die entsprechenden Hilfsenergieverbräuche zu berücksichtigen (z.B. Strombedarf für den Betrieb der Ventilatoren und der Umwälzpumpen). Die Wärmepumpe erreicht unter den gegebenen Bedingungen eine Jahresarbeitszahl von 3,13, womit diese Systemvariante mit Abstand den niedrigsten Endenergiebedarf aufweist.

Bei der Interpretation der Ergebnisse auf Raumebene ist zu beachten, dass die auftretenden Temperaturunterschiede relativ gering sind und sensibel von den gewählten Annahmen (Regelung, Nutzerverhalten, ...) abhängen. Beispielsweise ist die empfundene Temperatur von der Position im Raum abhängig. Das bedeutet, dass an bestimmten Stellen im Raum (z.B. direkt vor einem Infrarot-Heizpaneel oder einem Fenster) stark abweichende Strahlungstemperaturen auftreten können (verglichen mit den flächengemittelten Werten der Simulation). Insbesondere die Infrarotheizung weist systembedingt eine relativ inhomogene Verteilung im Raum auf, was einerseits als Vorteil für eine schnelle, punktgenaue Beheizung genutzt werden kann, andererseits bei ungünstiger Umsetzung und Nutzung aber auch zu Mehrverbräuchen führen kann. Dementsprechend sind die Ergebnisse auf Raumebene als „typische Werte“ aufzufassen, von denen je nach tatsächlicher Situation und Nutzung auch merkbare Abweichungen möglich sind.

Auf Ebene des Endenergiebedarfs sind die Resultate eindeutiger. Zwar treten auch hier gewisse Unsicherheiten auf (z.B. Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpe, Wärmeverteilungsverluste, ...), eine Änderung der Rangfolge ist dadurch allerdings nicht zu erwarten.

3 Wirtschaftlichkeitsrechnung

3.1 Berechnungsannahmen

Im Anschluss an die Simulation wurde eine betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung der vier Heizungsvarianten durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde anhand der in ÖNORM M 7140 beschriebenen dynamischen Methode durchgeführt.

In Tabelle 3-1 sind allgemeine Berechnungsannahmen angegeben.

Tabelle 3-1 Allgemeine Berechnungsannahmen

Betrachtungszeitraum	Jahre	20
kalkulatorischer Zinssatz	% p.a.	2.0%
Preissteigerungsrate	% p.a.	3.0%
Angabe aller Kosten		brutto

Die angesetzten **Energiepreise** für Strom und Fernwärme wurden aus tatsächlichen Energieabrechnungen bzw. Angeboten vergleichbarer Objekte aus den Jahren 2018 bzw. 2019 abgeleitet (E-Control 2019). Die Preise wurden jeweils in verbrauchsgebundene Anteile (je kWh) und betriebsgebundene Anteile (jährliche Pauschale) gegliedert.

Tabelle 3-2: Energiepreise für Strom (links) und Fernwärme (rechts)

	Verbrauchs- gebunden	Betriebs- gebunden		Verbrauchs- gebunden	Betriebs- gebunden
	[€/kWh]	[€/a]		[€/kWh]	[€/a]
NETZ			Arbeitspreis	0.090 €	
Netznutzung+Netzverlust	0.080 €	- €	Jahresgrundpreis		114 €
Netznutzung	- €	37 €	Messpreis		16 €
Messpreis	- €	34 €	SUMME	0.090 €	130 €
ENERGIE					
Grundpreis	- €	12 €			
Arbeitspreis	0.067 €	- €			
ABGABEN					
Elektrizitätsabgabe	0.018 €	- €			
Ökostrom-Pauschale	- €	35 €			
KWK-Pauschale	- €	2 €			
Ökostromförderbeitrag	- €	33 €			
Gebrauchsabgabe	- €	28 €			
SUMME	0.165 €	180 €			

Die Ansätze für die **Nutzungsdauer** der einzelnen Anlagenteile wurden auf Basis der Richtwerte der Norm getroffen.

Tabelle 3-3: Berechnungsansätze Nutzungsdauer

Anlagenteil	Nutzungsdauer
Baumaßnahmen (Fernwärmeanschluss,...)	50 Jahre
Installationen (Elektro, HKLS)	30 Jahre
div. Komponenten der Heizungsanlage (Pumpen,...)	20 Jahre
Wärmepumpe	17 Jahre
Elektronische Mess- & Regelgeräte	10 Jahre

Tabelle 3-4 zeigt die Berechnungsansätze für **Wartung und Instandhaltung**.

Tabelle 3-4 Berechnungsansätze Wartung und Instandhaltung

Anlagenteil	Wartung & Instandhaltung in % der Investition
Wärmepumpe	4,5 % p.a.
Umwälzpumpen	4,0 % p.a.
Fernwärme Übergabestation	2,0 % p.a.
Gebläsekonvektor	1,0 % p.a.

Die **Investitionskosten** für die berechneten wasserführenden Heizungsvarianten wurden durch einen externen Experten (HKLS-Planer) geschätzt. Die Investitionskosten für die HEAT4ALL-Infrarotheizung wurden durch den Auftraggeber bereitgestellt.

3.2 Berechnungsvarianten

In diesem Abschnitt sind die jeweiligen Kostenpositionen der einzelnen Berechnungsvarianten dargestellt. Diese gliedern sich in die drei Kostengruppen:

- **Kapitalgebundene Kosten:**
 - beinhalten Anfangsinvestitionen, Ersatzinvestitionen und Restwerte der Anlagenteile
- **Verbrauchsgebundene Kosten:**
 - Aufwand für Betriebsmittel (Kosten für Energieträger, Hilfsstoffe, ...) eines Energiesystems im Rechnungsjahr
- **Betriebsgebundene Kosten:**
 - Aufwand für Bedienung, Wartung, Reinigung, Reparaturen und Instandhaltung sowie für sonstige Betriebskosten, wie anteilige Abgaben, Steuern und Verwaltungskosten des Systems im Rechnungsjahr

In nachfolgenden Tabellen sind die Kostenansätze der betrachteten Systeme nach den Kostengruppen gegliedert im Detail abgebildet. Die Darstellung bezieht sich auf die betrachtete Wohnung, allgemeine Kosten auf Gebäudeebene (z.B. Wärmepumpe, Fernwärme-Übergabestation, ...) wurden auf die Wohnungsebene umgelegt.

Tabelle 3-5 Berechnungsvariante System 01: HEAT4ALL Infrarotheizung

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen		Quelle	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungsdauer	Preissteigerungsrate
	AI					
	€			j	N	a
				Jahr	a	%/a
Infrarot-Heizungspaneel	2 720 €	Angabe HEAT4ALL; DN M7140		0	20	3%
E-Installationen	1 740 €	Angabe HEAT4ALL; DN M7140		0	30	3%
Steuerung, programmierbarer Thermostat	500 €	Angabe HEAT4ALL; DN M7140		0	10	3%
Summe der Anfangsinvestitionen	4 960 €					

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungsdauer	Preissteigerungsrate
	VKj				
	€/a		j	N	a
			Jahr	a	%/a
Strom (verbrauchsgebunden)	316 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	316 €				

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungsdauer	Preissteigerungsrate
	BKj				
	€		j	N	a
			Jahr	a	%/a
Strom (betriebsgebunden)	180 €	E-controll	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	180 €				

Tabelle 3-6 Berechnungsvariante System 02: Gebläsekonvektoren + Fernwärme

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen		Quelle	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungsdauer	Preissteigerungsrate
	AI					
	€			j	N	a
				Jahr	a	%/a
Fernwärmeanschluss	508 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	50	3%
Fernwärme-Übergabestation (inkl. Regelung)	789 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Primärsseitige Verrohrung FW-Station	136 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Pumpen, Ausdehnungsgefäß, Armaturen	345 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	20	3%
Heizungsverrohrung inkl. Wärmedämmung	419 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Elektroverkabelung für FW-Station, Pumpen, Außenfühler	141 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Inbetriebnahme	71 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Heizungsverrohrung in Wohnung	1 296 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Heizungs-UP-Verteilerschrank, inkl. WMZ	936 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	20	3%
Stand Gebläsekonvektoren inkl. Regelventil und Raumthermostat	4 920 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	20	3%
Zentraler Raumregler	564 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	10	3%
Elektroverkabelung für Raumthermostate, Gebläsekonvektoren	810 €	Abschätzung HKLS-Planer; DN M7140		0	30	3%
Summe der Anfangsinvestitionen	10 936 €					

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungsdauer	Preissteigerungsrate
	VKj				
	€/a		j	N	a
			Jahr	a	%/a
Fernwärme (verbrauchsgebunden)	205 €	Abrechnungsbetrag	1	20	3%
Strom (verbrauchsgebunden)	14 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	219 €				

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungsdauer	Preissteigerungsrate
	BKj				
	€		j	N	a
			Jahr	a	%/a
Strom (betriebsgebunden)	180 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Fernwärme (betriebsgebunden)	130 €	Abrechnungsbetrag	1	20	3%
Instandhaltung Fernwärme	30 €	DN M7140	1	20	3%
Instandhaltung Gebläsekonvektoren	49 €	DN M7140	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	389 €				

Tabelle 3-7 Berechnungsvariante System 03: Heizkörper + Fernwärme

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen		Quelle	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	AI	€				
Fernwärmeanschluss	508 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	50	3%	
Fernwärme-Übergabestation (inkl. Regelung)	789 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Primärseitige Verrohrung FW-Station	136 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Pumpen, Ausdehnungsgefäß, Armaturen	345 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	20	3%	
Heizungsverrohrung inkl Wärmedämmung	419 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Elektroverkabelung für FW-Station, Pumpen, Außenfühler	141 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Inbetriebnahme	71 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Heizungsverrohrung in Wohnung	1 296 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Heizungs-UP-Verteilerschrank, inkl WMZ	936 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	20	3%	
Heizkörper inkl. Thermostatkopf	2 460 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	20	3%	
Zentraler Raumregler	564 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	10	3%	
Elektroverkabelung für Raumregler	162 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Summe der Anfangsinvestitionen	7 828 €					

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	VKj	€/a			
Fernwärme (verbrauchsgebunden)	208 €	Abrechnungsbetrag	1	20	3%
Strom (verbrauchsgebunden)	1 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	208 €				

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	BKj	€			
Strom (betriebsgebunden)	180 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Fernwärme (betriebsgebunden)	130 €	Abrechnungsbetrag	1	20	3%
Instandhaltung Fernwärme	30 €	ÖN M7140	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	340 €				

Tabelle 3-8 Berechnungsvariante System 04: Fußbodenheizung + Luft-Wasser-Wärmepumpe

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen		Quelle	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	AI	€				
LW-Wärmepumpe 17kW Heizleistung inkl Pufferspeicher	1 877 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Pumpen, Ausdehnungsgefäß, Armaturen	531 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	20	3%	
Heizungsverrohrung inkl Wärmedämmung	452 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Elektroverkabelung für WP, Pumpen, Außenfühler	385 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Inbetriebnahme	96 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	17	3%	
Heizungsverrohrung in Wohnung	324 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Heizungs-UP-Verteilerschrank, inkl WMZ	1 176 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	20	3%	
Fußbodenheizung inkl Einzelraumregelung	3 058 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Zentraler Raumregler	564 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	10	3%	
Elektroverkabelung für Raumregler	810 €	Abschätzung HKLS-Planer; ÖN M7140	0	30	3%	
Summe der Anfangsinvestitionen	9 273 €					

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	VKj	€/a			
Strom (verbrauchsgebunden)	116 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	116 €				

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr		Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	BKj	€			
Strom (betriebsgebunden)	180 €	Simulation; Econtroll	1	20	3%
Instandhaltung Wärmepumpe	106 €	ÖN M7140	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	286 €				

3.3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung. Unter den getroffenen Annahmen ist das System 01 (HEAT4All Infrarotheizung) über den Betrachtungszeitraum (20 Jahre) das kostengünstigste. Das System 04 (Fußbodenheizung+Wärmepumpe) weist etwas höhere Gesamtkosten (ca. 8 %) auf, die Systeme 02 (Gebläsekonvektoren+Fernwärme) bzw. 03 (Heizkörper+Fernwärme) weisen mit 20% bzw. 47% signifikant höhere Gesamtkosten auf.

Tabelle 3-9 Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum

	Heat4All- Infrarot	Gebläsekonvektor +FW	Heizkörper+FW	Fußbodenheizung+ LW-WP
Kapitalgebundene Kosten BKK	4 806 €	9 703 €	6 858 €	8 212 €
Verbrauchsgebundene Kosten BVK	7 016 €	4 861 €	4 625 €	2 581 €
Betriebsgebundene Kosten BBK	3 995 €	8 628 €	7 537 €	6 341 €
	15 817 €	23 193 €	19 019 €	17 133 €
Rang	1	4	3	2
Differenz (20a) in €	- €	7 376 €	3 203 €	1 317 €
Differenz (20a) in %	0%	47%	20%	8%

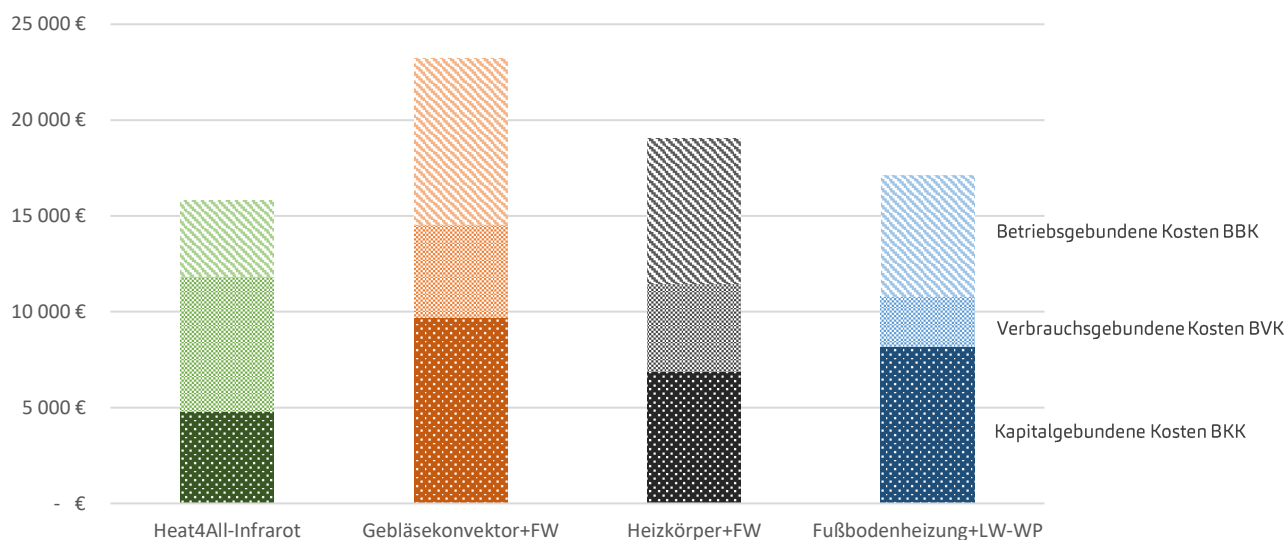


Abbildung 3-1 Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum

Abbildung 3-2 zeigt die Entwicklung der Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum. Die Anfangsinvestitionen markieren den Ausgangspunkt im Jahr 0, die jährlichen Kosten (Energieträger, Fixkosten, Wartung, ...) ergeben die Steigung der Kurven, Ersatzinvestitionen sind als Sprünge im jeweiligen Jahr ersichtlich und die Restwerte der Anlagenteile werden im letzten Jahr abgezogen.

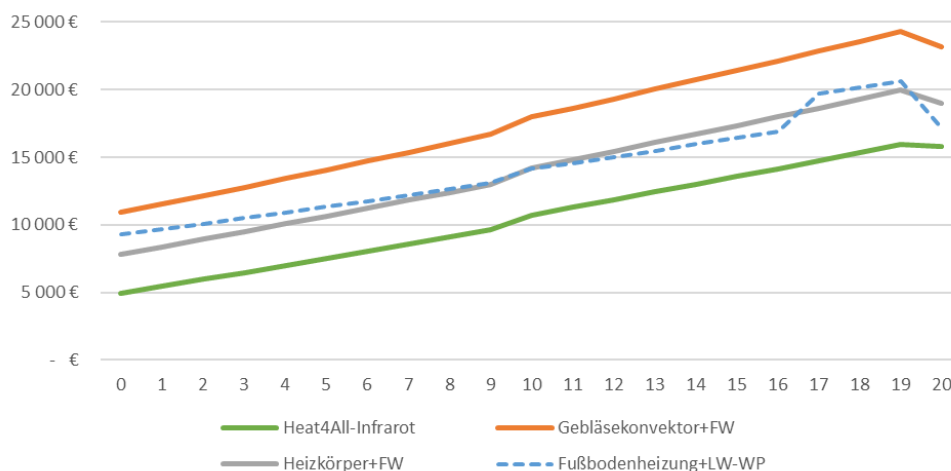


Abbildung 3-2 Reale Gesamtkostenentwicklung aller Komponenten sowie jahresbezogene Kapitalbewegungen und Restwerte im letzten Jahr

Im Vergleich der einzelnen Kostengruppen wird ersichtlich, dass die HEAT4ALL-Infrarotheizung mit Abstand die niedrigsten Investitionskosten aufweist. Obwohl die laufenden Energiekosten bei der Infrarotheizung deutlich höher sind als bei allen anderen Varianten bleibt das System angesichts der vergleichsweise hohen Investitions-, Wartungs- und Fixkosten der Vergleichssysteme in Summe das kostengünstigste. Durch den sehr hohen thermischen Standard der Gebäudehülle treten die laufenden Energiekosten gegenüber den Kapital- und Betriebsgebundenen Kosten eher in den Hintergrund. Dadurch ist zu erklären, dass trotz des Effizienzvorteils der Wärmepumpe (Abbildung 2-15) deren Gesamtkosten höher als jene der Infrarotheizung sind.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend können nachfolgend angeführte Ergebnisse und Schlussfolgerungen festgehalten werden.

Energiebedarf:

- Bezogen auf die Systemgrenze Raum (Nutzenergie) weist das System „HEAT4ALL-Infrarotheizung“ den geringsten Energiebedarf auf. Die Systeme mit Gebläsekonvektoren bzw. Heizkörper weisen einen geringfügig höheren Nutzenergiebedarf auf (+6% bzw. +5%). Das System mit Fußbodenheizung weist mit +15% einen merklich höheren Energiebedarf gegenüber dem Infrarotheizsystem auf.
- Bezogen auf die Systemgrenze Gebäude (Endenergie) treten die energietechnischen Unterschiede der Systeme sehr deutliche zutage. Bei allen wasserführenden Systemen müssen Wärmeverluste der Rohrleitungen bzw. der Wärmeübergabe ausgeglichen werden, was zu entsprechenden Mehrverbräuchen führt. Darüber hinaus sind noch die entsprechenden Hilfsenergieverbräuche zu berücksichtigen (z.B. Strombedarf für den Betrieb der Ventilatoren und der Umwälzpumpen). Die Wärmepumpe erreicht unter den getroffenen Annahmen eine Jahresarbeitszahl von 3,13, womit diese Systemvariante den mit Abstand niedrigsten Endenergiebedarf aufweist.

Wirtschaftlichkeit:

- Durch den sehr hohen thermischen Standard der Gebäudehülle treten die laufenden Energiekosten gegenüber den kapital- und betriebsgebundenen Kosten eher in den Hintergrund. Das System „HEAT4ALL-Infrarotheizung“ weist von allen Systemen die mit Abstand niedrigsten Investitionskosten auf. Obwohl die laufenden Energiekosten bei der Infrarotheizung höher sind als bei allen anderen Varianten bleibt das System angesichts der vergleichsweise hohen Investitions-, Wartungs- und Fixkosten der Vergleichssysteme in Summe das kostengünstigste. Dadurch ist zu erklären, dass trotz des Effizienzvorteils der Wärmepumpe, deren Gesamtkosten höher als jene der Infrarotheizung sind.
- Unter den getroffenen Annahmen ist das System „HEAT4All-Infrarotheizung“ über den Betrachtungszeitraum (20 Jahre) das kostengünstigste. Das System „Fußbodenheizung+Wärmepumpe“ weist etwas höhere Gesamtkosten auf (~+8%), die Systeme „Gebläsekonvektoren+Fernwärme“ bzw. „Heizkörper+Fernwärme“ weisen signifikant höhere Gesamtkosten auf (+20% bzw. +47%).

Sowohl die Gebäudesimulation als auch die Wirtschaftlichkeitsberechnung basieren notwendigerweise auf idealisierten Modellen und Berechnungsannahmen. Manche dieser Berechnungsannahmen können nicht zuverlässig prognostiziert werden und unterliegen signifikanten Unsicherheiten (Zins- und Preisentwicklung, technische Lebensdauer, Nutzerverhalten, ...). In der vorliegenden Studie wurde darauf geachtet, möglichst repräsentative Annahmen für die betrachteten Szenarien zu treffen, im Einzelfall können, je nach tatsächlicher Realisierung, aber durchaus signifikante Abweichungen auftreten. Insbesondere ist anzumerken, dass die Ergebnisse der Studie nicht ohne Weiteres auf andere Situationen (Altbau, andere Länder, anderes Klima, etc.) übertragen werden können.

Literaturverzeichnis

- AEE INTEC. *InfraMess, Begleituntersuchung für ein Infrarot-Heizsystem und ein fernwärmebasiertes Radiatorensystem, Wohnanlage Kaindorf a.d. Sulm*. Abschlussbericht, Gleisdorf: AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, 2018.
- baubook GmbH. *baubook-Plattform*. 2019. <https://www.baubook.info/> (Zugriff am März 2019).
- Bring, Axel, Per Sahlin, und Mika Vuolle. *Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation*. Report of IEA SHC Task 22: Building Energy Analysis Tools, Subtask B: Model Documentation, Stockholm: KTH, Dept. of Building Sciences, 1999.
- E-Control. *E-Control Tarifkalkulator*. 2019. <https://www.e-control.at/konsumenten/service-und-beratung/toolbox/tarifkalkulator> (Zugriff am 17. April 2019).
- EQUA. *Manual Version 4.8 - Getting Started with IDA Indoor Climate and Energy*. Zug: EQUA Simulation AB, 2018.
- ITW Universität Stuttgart. *Sonderuntersuchung Effizienzmessung an einem Infrarotstrahler*. Prüfbericht, Stuttgart: Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 2016.
- Meteonorm. *Meteonorm, Global Meteorological Database*. Bern: Meteotest AG, 2015.
- OIB. *OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz*. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.
- ON. *ÖNORM B 8110 Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile*. Wien: Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2012.
- ON. *ÖNORM EN 15251 Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Wien: Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2007.
- . *ÖNORM EN ISO 10456 - Baustoffe und Bauprodukte — Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften — Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*. Wien: Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2010.
- Perez, R, P Ineichen, E Maxwell, R Seals, und A Zelenka. „Dynamic Models for hourly global-to-direct irradiance conversion.“ *Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society*. Denver: ISES, 1991.
- Perez, R, R Stewart, C Arbogast, R Seals, und J Scott. „An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation.“ *Solar Energy*, 1986: 481-497.
- Remund, J. „Qualit of Meteonorm Version 6.0.“ *Proceedings of 10th World Renewable Energy Conference*. Glasgow, 2008.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Referenzgebäude und -wohnung.....	5
Abbildung 1-2: Energiekennzahlen des Referenzgebäudes.....	6
Abbildung 1-3: Gebäudestandort: Klagenfurt am Wörthersee	6
Abbildung 1-4 Außentemperatur	7
Abbildung 1-5: Monatsmittelwerte für Klagenfurt gemäß ASHRAE IWEC2	7
Abbildung 1-6 Thermische Zonierung	8
Abbildung 1-7 Gebäudegeometrie	9
Abbildung 1-8 Zuweisung Bauteilaufbauten	9
Abbildung 1-9: Balkonüberdachung.....	10
Abbildung 1-10 Daten Außenjalousien.....	10
Abbildung 1-11 Beispiel Luftströme	11
Abbildung 1-12: Anwesenheitsprofil	12
Abbildung 1-13: Tagesprofil für spez. Wärmeleistung von Geräte + Beleuchtung.....	12
Abbildung 1-14: Solltemperaturen	13
Abbildung 1-15 Symbolbild thermische Gebäudesimulation	14
Abbildung 2-1 Systembild: Wärmeübertragung Infrarotheizung (Wandmontage)	15
Abbildung 2-2 Symbolbild Temperaturregelung Infrarotheizung	15
Abbildung 2-3 Positionierung Infrarotheizung	16
Abbildung 2-4 Raumtemperatur und gerichtete operative Temperaturen (Wohnen-Essen-Kochen, 22.01.).....	17
Abbildung 2-5 Wärmebilanz (Wohnen-Essen-Kochen, 22.01.).....	17
Abbildung 2-6 Symbolbild Temperaturregelung Gebläsekonvektoren	18
Abbildung 2-7 Positionierung Heizkörper.....	19
Abbildung 2-8 Symbolbild Temperaturregelung Heizkörper	19
Abbildung 2-9 Positionierung Heizflächen.....	20
Abbildung 2-10 Symbolbild Temperaturregelung Heizkörper	21
Abbildung 2-11 Symbolbild Wärmepumpenmodell	21
Abbildung 2-12 Wärmeabgabe in zu beheizende Räume	22
Abbildung 2-13 Temperaturverläufe (Wintertag) im Wohn-Esszimmer mit Infrarotheizung (oben links), Gebläsekonvektoren (oben rechts), Heizkörper (unten links) und Fußbodenheizung (unten rechts).....	23
Abbildung 2-14 Monatsmittel der Raumlufttemperatur im Wohn-Essraum während der Benutzungsstunden...	23
Abbildung 2-15 Endenergieverbrauch der betrachteten Systeme.....	24
Abbildung 3-1 Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum	29
Abbildung 3-2 Reale Gesamtkostenentwicklung aller Komponenten sowie jahresbezogene Kapitalbewegungen und Restwerte im letzten Jahr.....	30

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1-1: Flächenanteile der betrachteten Wohnung.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabelle 1-2 Auslegungstage für die Heizung.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 1-3 Thermische Zonierung.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 2-1 Strahlungs- und Konvektionsanteile in Messung und Simulation.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 2-2 Auslegungsleistungen der Infrarotheizung.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabelle 2-3 Auslegungsleistungen der Gebläsekonvektoren.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 2-4 Auslegungsleistungen der Heizkörper.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 2-5 Auslegungsleistungen der Fußbodenheizung.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 3-1 Allgemeine Berechnungsannahmen.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3-2: Energiepreise für Strom (links) und Fernwärme (rechts).....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3-3: Berechnungsansätze Nutzungsdauer.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3-4 Berechnungsansätze Wartung und Instandhaltung.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 3-5 Berechnungsvariante System 01: HEAT4ALL Infrarotheizung.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 3-6 Berechnungsvariante System 02: Gebläsekonvektoren + Fernwärme.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 3-7 Berechnungsvariante System 03: Heizkörper + Fernwärme.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 3-8 Berechnungsvariante System 04: Fußbodenheizung + Luft-Wasser-Wärmepumpe.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 3-9 Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum.....</i>	<i>29</i>

Anhang

Bauteilaufbauten

Name	Type	Wetted area, m ²	Connected to	Construction	U-value, W/(m ² K)	Thickness, m		Layer material		Layer thickness, m		Layer material		Layer thickness, m	
						Zwischendecke STB1	Flachdach STB	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	
Wohnen, Essen, Kochen, Floor	Int. floor	32	None	Zwischendecke STB1	0.3225	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.2				
Wohnen, Essen, Kochen, Ceiling	Roof	32	Baukörper 01, Roof	Flachdach STB	0.1007	0.5 Stahlbeton 2%	0.2 EPS-W20 grau	0.3							
Wohnen, Essen, Kochen, Wall 1	Int. wall	14.94	VR, AR, WC, Bad; Kind 2	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
Wohnen, Essen, Kochen, Wall 2	Ext. wall	10.2	Baukörper 01, f3	AW HLZ+EPS1	0.1282	0.445 Innenputz	0.015 HIZ 25 poro	0.25 EPS-F grau	0.18						
Wohnen, Essen, Kochen, Wall 3	Ext. wall	9.74	Baukörper 01, f4	AW HLZ+EPS1	0.1282	0.445 Innenputz	0.015 HIZ 25 poro	0.25 EPS-F grau	0.18						
Wohnen, Essen, Kochen, Wall 4	Int. wall	13	None	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
Kind 2, Floor	Int. floor	12.3	None	Zwischendecke STB1	0.3225	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.2				
Kind 2, Ceiling	Roof	12.3	Baukörper 01, Roof	Flachdach STB	0.1007	0.5 Stahlbeton 2%	0.2 EPS-W20 grau	0.3							
Kind 2, Wall 1	Int. wall	10.66	VR, AR, WC, Eltern	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Kind 2, Wall 2	Ext. wall	6.26	Baukörper 01, f3	AW HLZ+EPS1	0.1282	0.445 Innenputz	0.015 HIZ 25 poro	0.25 EPS-F grau	0.18						
Kind 2, Wall 3	Int. wall	10.66	Wohnen, Essen, Kochen	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
Kind 2, Wall 4	Int. wall	6.1	VR, AR, WC	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Bad, Floor	Int. floor	6.44	None	Zwischendecke STB1	0.3225	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.2				
Bad, Ceiling	Roof	6.44	Baukörper 01, Roof	Flachdach STB	0.1007	0.5 Stahlbeton 2%	0.2 EPS-W20 grau	0.3							
Bad, Wall 1	Int. wall	7.28	VR, AR, WC	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Bad, Wall 2	Int. wall	4.28	VR, AR, WC	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Bad, Wall 3	Int. wall	7.28	Wohnen, Essen, Kochen	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
Bad, Wall 4	Int. wall	5.98	None	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
Eltern, Floor	Int. floor	13.35	None	Zwischendecke STB1	0.3225	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.2				
Eltern, Ceiling	Roof	13.35	Baukörper 01, Roof	Flachdach STB	0.1007	0.5 Stahlbeton 2%	0.2 EPS-W20 grau	0.3							
Eltern, Wall 1	Ext. wall	7.8	Baukörper 01, f2	AW HLZ+EPS1	0.1282	0.445 Innenputz	0.015 HIZ 25 poro	0.25 EPS-F grau	0.18						
Eltern, Wall 2	Ext. wall	10.03	Baukörper 01, f3	AW HLZ+EPS1	0.1282	0.445 Innenputz	0.015 HIZ 25 poro	0.25 EPS-F grau	0.18						
Eltern, Wall 3	Int. wall	7.8	Kind 2	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Eltern, Wall 4	Int. wall	9.87	VR, AR, WC, Kind 1	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Kind 1, Floor	Int. floor	12.63	None	Zwischendecke STB1	0.3225	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.2				
Kind 1, Ceiling	Roof	12.63	Baukörper 01, Roof	Flachdach STB	0.1007	0.5 Stahlbeton 2%	0.2 EPS-W20 grau	0.3							
Kind 1, Wall 1	Ext. wall	10.33	Baukörper 01, f2	AW HLZ+EPS1	0.1282	0.445 Innenputz	0.015 HIZ 25 poro	0.25 EPS-F grau	0.18						
Kind 1, Wall 2	Int. wall	6.5	Eltern	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Kind 1, Wall 3	Int. wall	11.43	VR, AR, WC	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
Kind 1, Wall 4	Int. wall	6.5	None	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Floor	Int. floor	14.31	None	Zwischendecke STB1	0.3225	0.405 Parkett	0.015 Estrich	0.07 TDP	0.03 EPS-Granulat gebunden	0.09 Stahlbeton 2%	0.2				
VR, AR, WC, Ceiling	Roof	14.31	Baukörper 01, Roof	Flachdach STB	0.1007	0.5 Stahlbeton 2%	0.2 EPS-W20 grau	0.3							
VR, AR, WC, Wall 1	Int. wall	11.43	Kind 1	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 2	Int. wall	2.98	Eltern	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 3	Int. wall	2.86	Kind 2	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 4	Int. wall	6.49	Kind 2	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 5	Int. wall	0.9	Wohnen, Essen, Kochen	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 6	Int. wall	4.67	Bad	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 7	Int. wall	7.67	Bad	IWHLZ 12	1.55	0.15 Innenputz	0.05 HIZ 12	0.12 Innenputz	0.015						
VR, AR, WC, Wall 8	Int. wall	4.7	None	TWHLZ 20	1.823	0.23 Innenputz	0.05 HIZ Füllriegel	0.12 Innenputz	0.015						