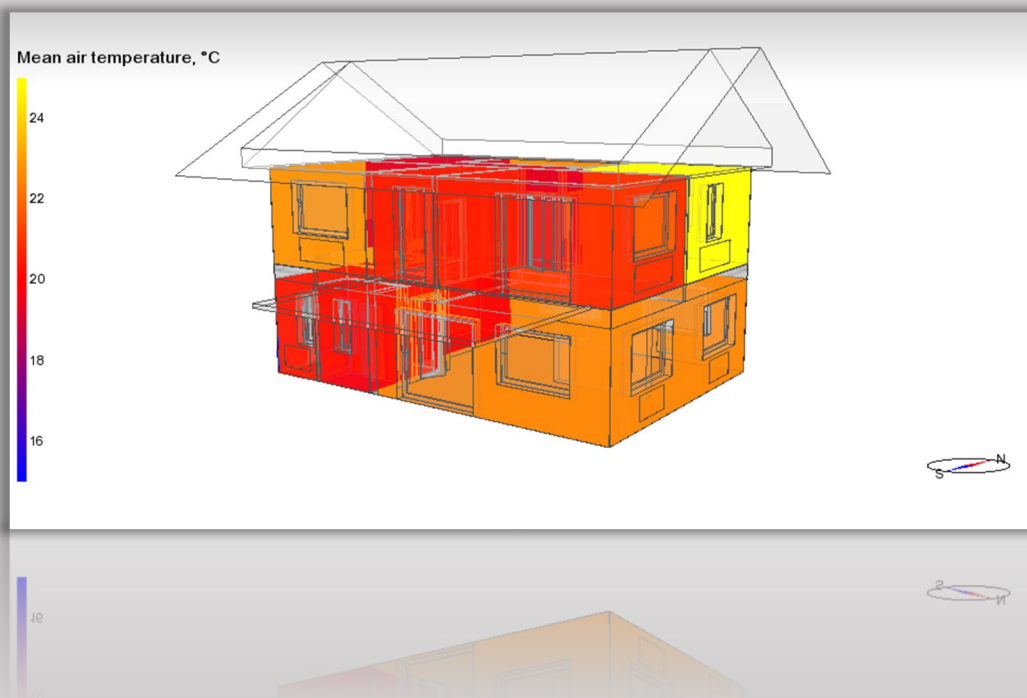




Simulationsstudie HEAT4All Infrarotheizung Einfamilienhaus "Neubau"

Villach, August 2022

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.....	6
1.3 Klimadaten	6
1.4 Zonierung	8
1.5 Gebäudegeometrie	9
1.6 Bauteilaufbauten und Fenster.....	9
1.7 Sonnenschutz und Verschattung.....	10
1.8 Luftwechsel	11
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 Infrarotheizung	15
2.2 System 02: HEAT4All Infrarotheizung + Photovoltaik	16
2.3 System 03: Pelletkessel	18
2.4 System 04: Luft-Wasser-Wärmepumpe	19
2.5 System 05: Sole-Wasser-Wärmepumpe (Tiefenbohrung)	20
2.6 Ergebnisse der Gebäudesimulation	21
3 Wirtschaftlichkeitsrechnung	24
3.1 Berechnungsannahmen	24
3.2 Berechnungsvarianten	25
3.3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	31
3.4 Sensitivitätsanalyse	32
4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	33
Literaturverzeichnis	34
Abbildungsverzeichnis.....	36
Tabellenverzeichnis	37

1 Zielsetzung und Methodik

Ziel des Projektes war die Erstellung einer Simulationsstudie zur Beheizung eines Einfamilienhauses im Neubau 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 des Gebäudes mittels der Simulationssoftware IDA-ICE v 4.8. In Szenarien wurden fünf verschiedene Systemvarianten der Energietechnik simuliert und die Ergebnisse verglichen. Die untersuchten Systemvarianten sind:

- Gebäudehülle: guter Neubaustandard
 - heat4all-Infrarotheizung
 - heat4all-Infrarotheizung + Photovoltaik
 - Pelletkessel
 - Luft-Wasser-Wärmepumpe
 - Sole-Wasser-Wärmepumpe (Tiefenbohrung)

Im Anschluss daran wurde eine betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung der Varianten durchgeführt (Abschnitt 3).

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

1.1 Referenzgebäude

Als Referenzgebäude wurde ein nicht unterkellertes Einfamilienhaus mit 146 m² Wohnnutzfläche definiert.

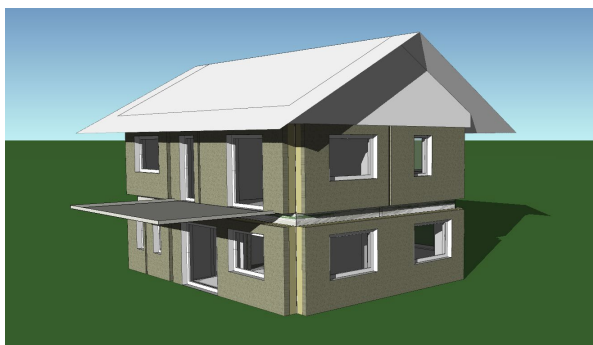


Abbildung 1-1: Referenzgebäude

Für das Gebäude wurde ein Energieausweis erstellt und die Einhaltung der Energiekennzahlen nach OIB-Richtlinie 6 (2019) nachgewiesen. Der Energieausweis wurde mit Infrarotheizung als alleinigem Heizsystem und Brauchwasserwärmepumpe zur Warmwasserbereitung erstellt. In der Simulation und der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden (bis auf Heizungssystem und Photovoltaikanlage) identische Gebäude angenommen. Daher ist die Anlage zur Warmwasserbereitung dort nicht explizit berücksichtigt.

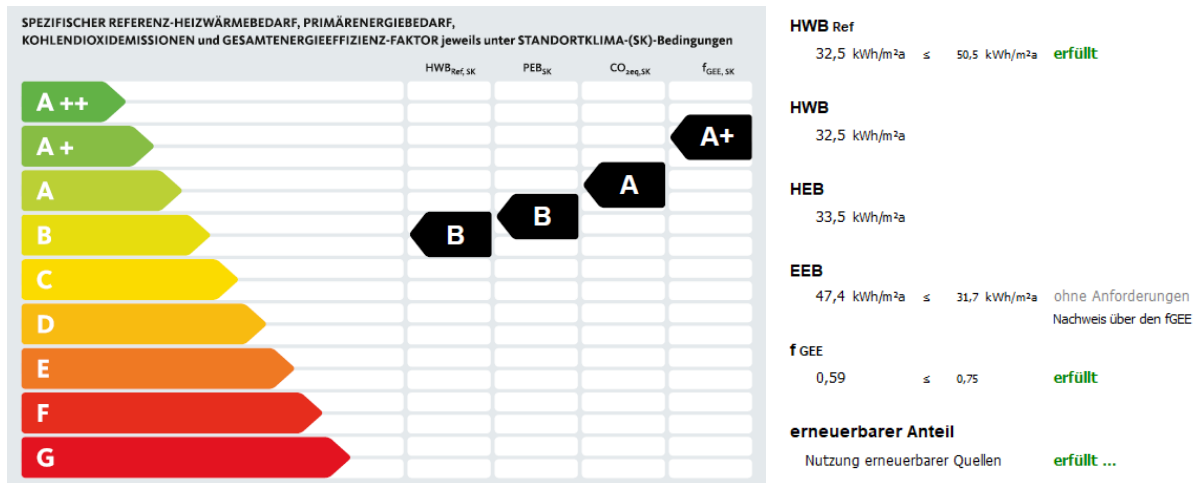


Abbildung 1-2: Energiekennzahlen des Referenzgebäudes

Als Gebäudestandort wurde Wien definiert.

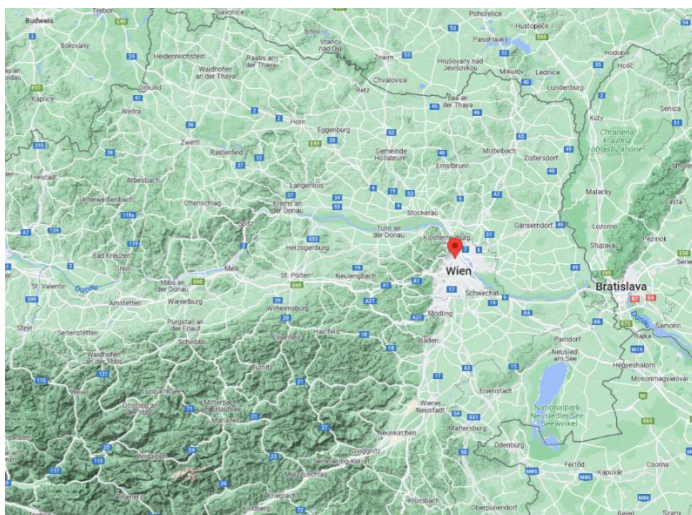


Abbildung 1-3: Gebäudestandort: Wien

1.2 Simulationszeitraum

Für den Vergleich der Heizungssysteme wurde ein ganzes Jahr (01.01.-31.12.) als Simulationszeitraum gewählt.

1.3 Klimadaten

In der Simulation wurden synthetische stündliche Wetterdaten des ASHRAE IWE2 Wetterdatensatzes für den Standort Wien-Hohe Warte verwendet.

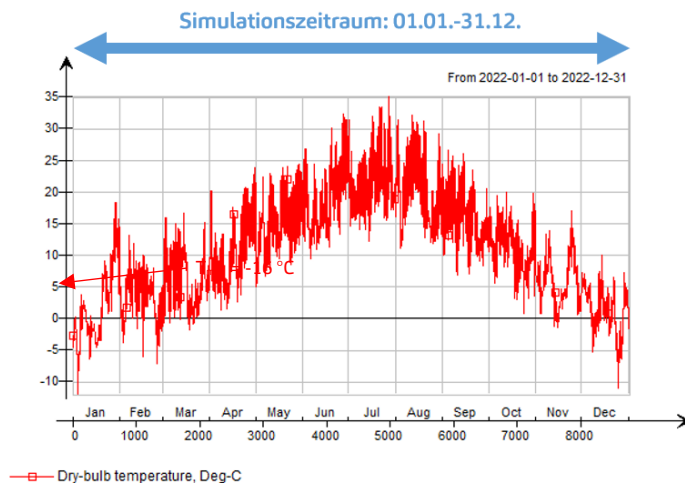


Abbildung 1-4 Außentemperatur

	Variables						
	Dry-bulb temperature, Deg-C	Rel humidity of air, %	Direct normal rad, W/m ²	Diffuse rad on hor surf, W/m ²	Wind speed, x-component, m/s	Wind speed, y-component, m/s	Cloudness, %
January	1.7	76.2	44.2	27.2	2.3	-0.3	69.4
February	3.3	78.8	60.8	47.5	2.2	-0.7	60.8
March	6.0	71.3	107.6	67.1	1.3	-1.0	56.4
April	10.4	71.8	106.8	100.3	1.2	0.0	61.9
May	15.1	68.4	157.8	113.5	1.4	-0.8	51.3
June	19.0	68.3	137.0	132.2	1.8	-0.4	57.3
July	21.5	65.4	165.4	118.7	1.8	-1.1	53.9
August	20.4	69.6	182.7	97.9	1.4	-0.3	45.2
September	15.6	71.7	127.4	77.5	1.3	-0.2	53.7
October	10.9	79.2	80.4	53.8	0.9	0.0	54.4
November	5.8	83.9	44.7	30.2	-1.0	1.3	69.4
December	1.3	81.2	41.0	22.0	1.0	0.3	66.1
January	1.9	92.8	1.1	12.1	2.2	-1.2	98.3
mean	10.9	73.8	104.7	73.9	1.3	-0.3	58.4
mean*8784.0 h	95996.6	648360.5	920093.0	649287.0	11279.0	-2289.4	512775.0
min	1.3	65.4	1.1	12.1	-1.0	-1.2	45.2
max	21.5	92.8	182.7	132.2	2.3	1.3	98.3

Abbildung 1-5: Monatsmittelwerte für Wien-Hohe Warte gemäß ASHRAE IWEC2

1.4 Zonierung

Die Wohnung wurde in nachfolgend angeführte thermische Zonen geteilt.

Tabelle 1-1 Thermische Zonierung

Zone	Fläche [m ²]
Erdgeschoss	
Wohnen, Essen, Kochen	53.3
WC	2.0
Garderobe, Stiege	12.8
Abstellraum	5.5
Obergeschoss	
Schrankraum	6.7
Kind 1	10.5
Kind 2	11.8
Gang, Stiege	14.6
Eltern	16.0
Bad	13.0
GESAMT	146.1

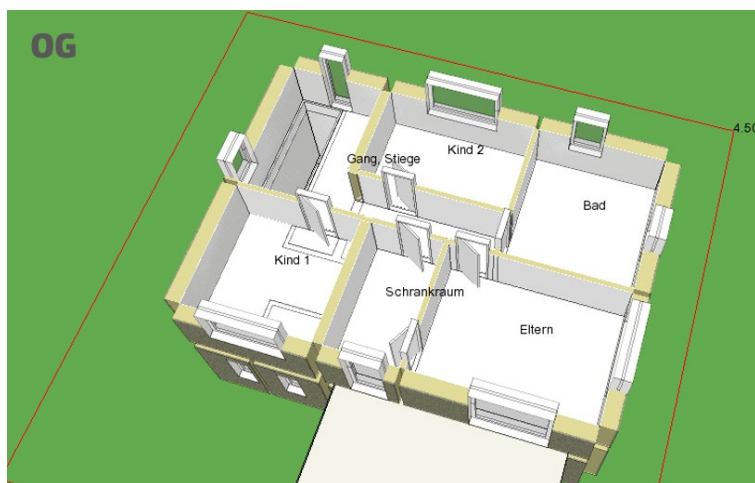
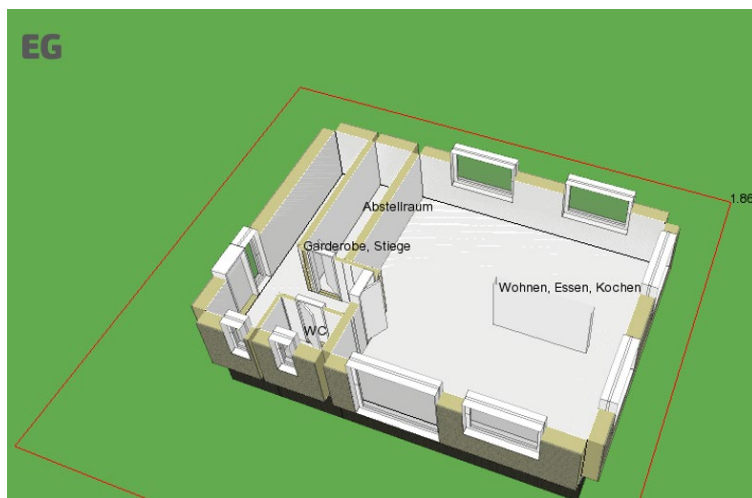


Abbildung 1-6 Thermische Zonierung

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.

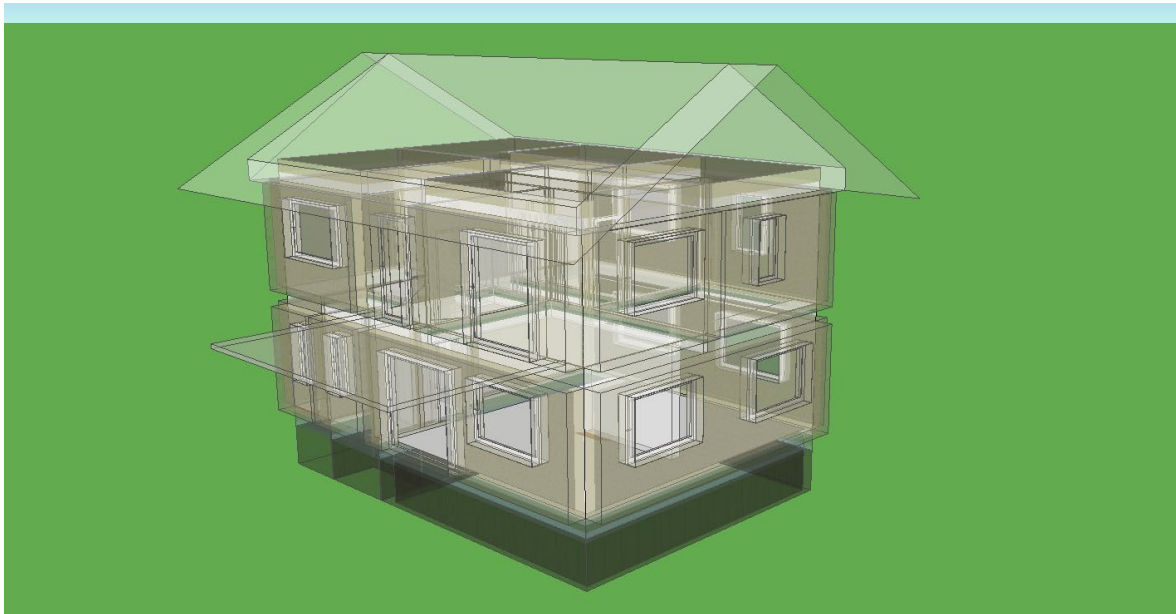


Abbildung 1-7 Gebäudegeometrie

1.6 Bauteilaufbauten und Fenster

Das Referenzgebäude wird in Ziegel-Massivbauweise (HLZ25 + EPS-WDVS) berechnet. Die Dämmstärken ergeben sich aus den Energieeffizienzanforderungen für Neubauten (siehe 1.1). Außenfenster werden mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Die Bauteilaufbauten der Außenbauteile und die Außenfenster sind in nachfolgender Grafik angeführt. Bauphysikalische Kennwerte wurden der Baustoffdatenbank baubook (baubook GmbH 2022) entnommen.

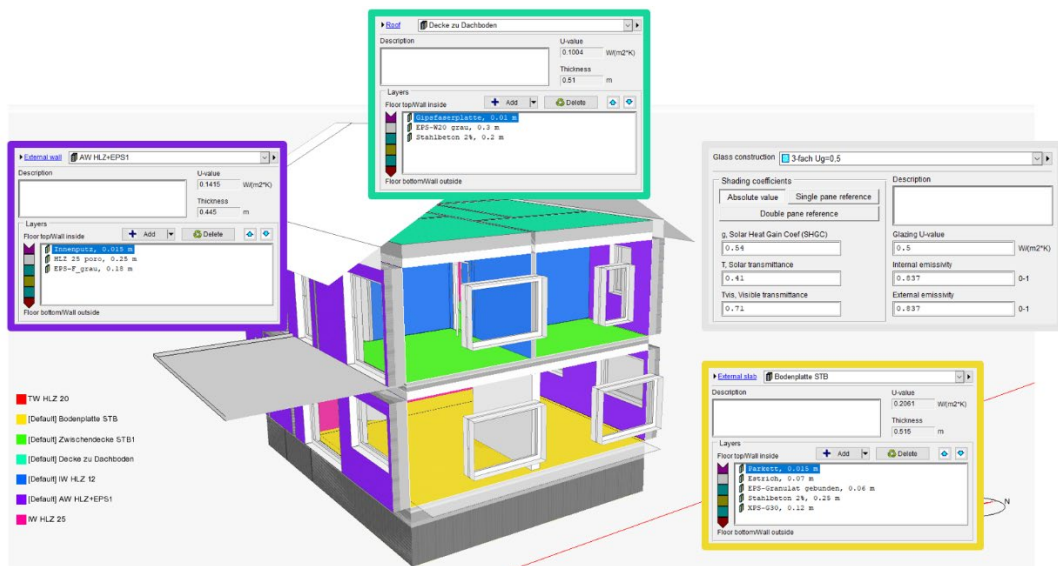


Abbildung 1-8 Zuweisung Bauteilaufbauten

1.7 Sonnenschutz und Verschattung

Der Balkon (OG) und der Dachvorsprung des Satteldaches wird in der Simulation als Fixverschattung berücksichtigt.



Abbildung 1-9: Balkonüberdachung und Dachvorsprung

Darüber hinaus werden bei allen Außenfenstern Außenjalousien eingesetzt.

Parameters for integrated shading (curtains, blinds, etc.)

Multiplier for g (solar gain factor)	0.14	-	Given multipliers modify corresponding parameters for the window when integrated shadings are drawn
Multiplier for T (short-wave shading coefficient)	0.09	-	
Multiplier for U-value	1.0	-	1 = fully diffuse 0 = no diffusion
Diffusion factor	1	-	

Abbildung 1-10 Daten Außenjalousien

Hinsichtlich der Steuerung wurde angenommen, dass bewegliche Sonnenschutzelemente zur Vermeidung von Überhitzung aktiviert werden, wenn die Raumtemperatur 25°C erreicht.

1.8 Luftwechsel

Luftwechsel

Während der Nutzungszeiten 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 2019)
- 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.

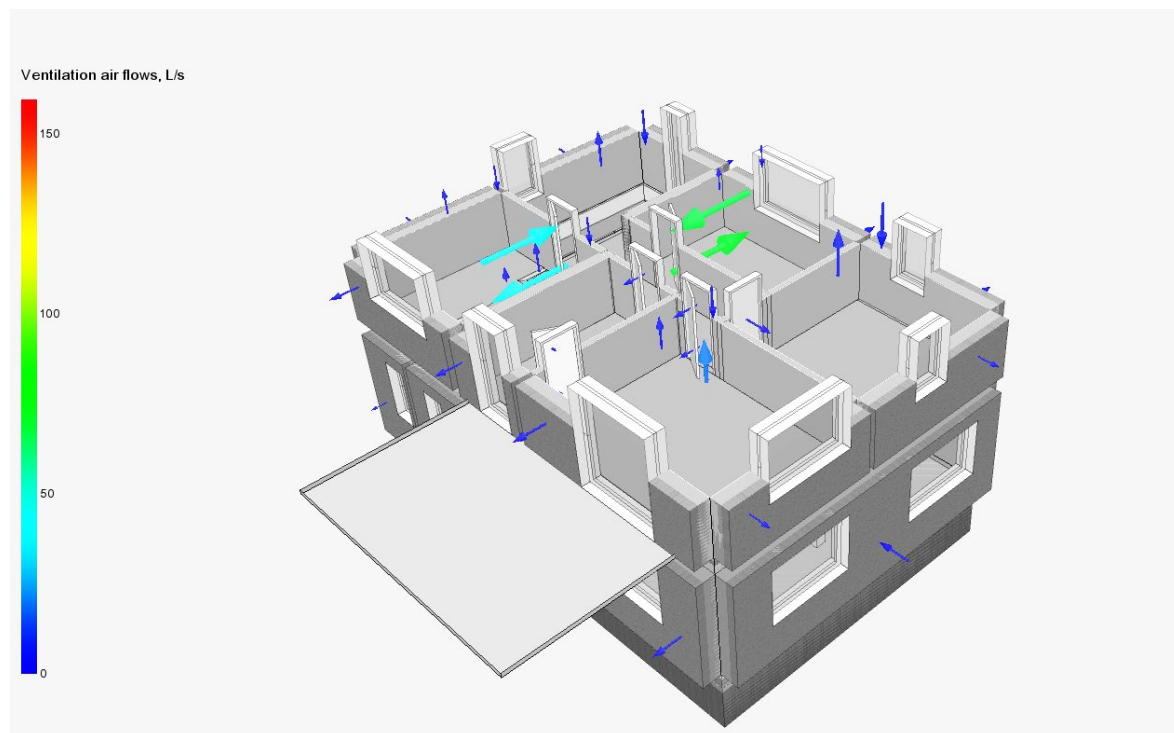


Abbildung 1-11 Beispiel Luftströme

1.9 Anwesenheit

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

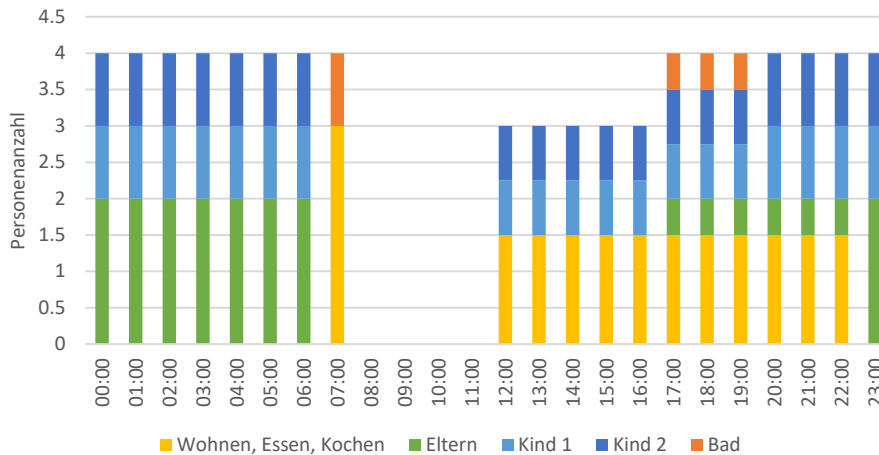


Abbildung 1-12: Anwesenheitsprofil

1.10 Innere Wärmegewinne

Die Inneren Wärmegewinne für Geräte und Beleuchtung wurden auf Basis des durchschnittlichen Stromverbrauches eines Vierpersonenhaushaltes (Statistik Austria 2018) abgeschätzt. Der Stromverbrauch abzüglich der Kategorien Heizen und Warmwasserbereitstellung ergibt sich somit zu 3.374 [kWh/a]. Daraus ergibt sich für E-Geräte und Beleuchtung eine mittlere Wärmeleistung von 2,64 [W/m²]. Diese Wärmeleistung wird jedoch nicht konstant angenommen, sondern mit einem fiktiven Tagesprofil variiert (Abbildung 1-13).

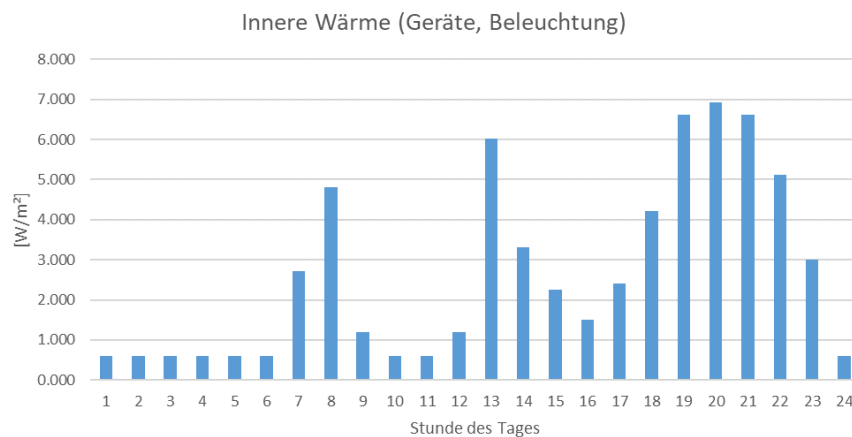


Abbildung 1-13: Tagesprofil für spez. Wärmeleistung von Geräte + Beleuchtung

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 ($0,75 \pm 0,25$ CLO) und der Raumtemperatur berechnet.

1.11 Thermische Randbedingungen

An Außenwand, Oberster Geschossdecke und Fensterflächen liegen die thermischen Randbedingungen lt. Klimadatensatz an (siehe Abschnitt 1.1).

Die Wärmeflüsse der erdberührenden Bauteile (Boden im EG) wurden mithilfe des Bodenmodells der ISO 13370 (implementiert in IDA-ICE v 4.8) berechnet.

1.12 Temperaturregelung

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

Für eine möglichst gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen 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 tatsächliche 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 Infrarotheizungen in vergleichenden Studien messtechnisch belegt werden (AEE INTEC 2018).

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

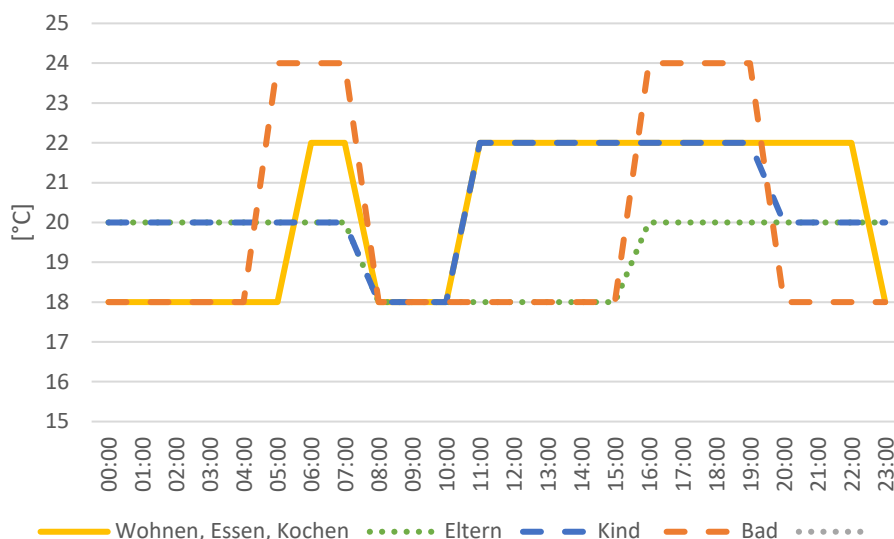


Abbildung 1-14: Solltemperaturen

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.

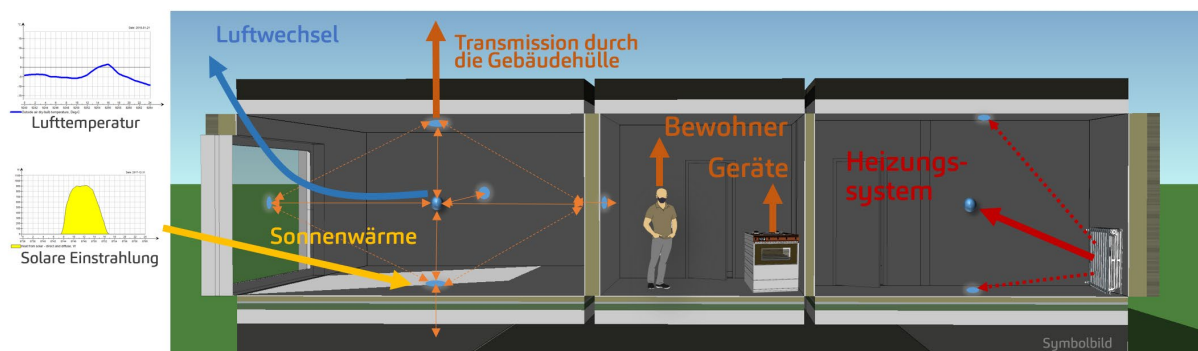


Abbildung 1-15 Symbolbild thermische Gebäudesimulation

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 $\varepsilon = 0,96$.

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%

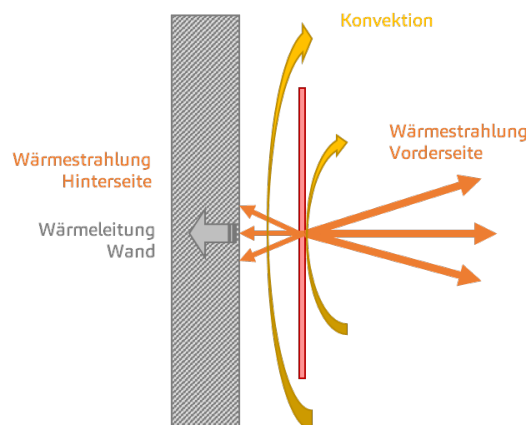


Abbildung 2-1 Systembild: Wärmeübertragung Infrarotheizung (Wandmontage)

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

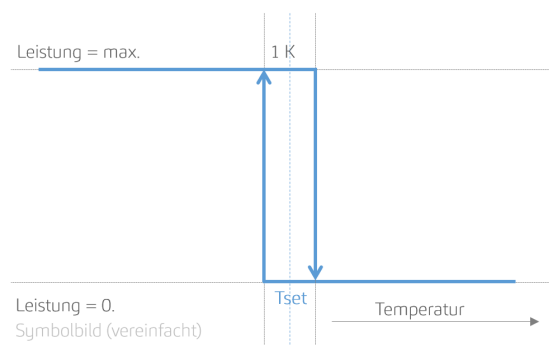


Abbildung 2-2 Symbolbild Temperaturregelung Infrarotheizung

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

Tabelle 2-2 Auslegungsleistungen der Infrarotheizung

NEUBAU	[W]
Wohnen, Essen, Kochen	2000
Kind 2	520
Bad	700
Eltern	1000
Kind 1	700
WC	0
Abstellraum	0
Garderobe, Stiege	700
Gang, Stiege	0
Schrankraum	320

2.2 System 02: HEAT4All Infrarotheizung + Photovoltaik

Die Heiztechnik von System 02 ist identisch mit System 01 (siehe 2.1). Ergänzend wird in der Dachebene eine Photovoltaikanlage installiert.

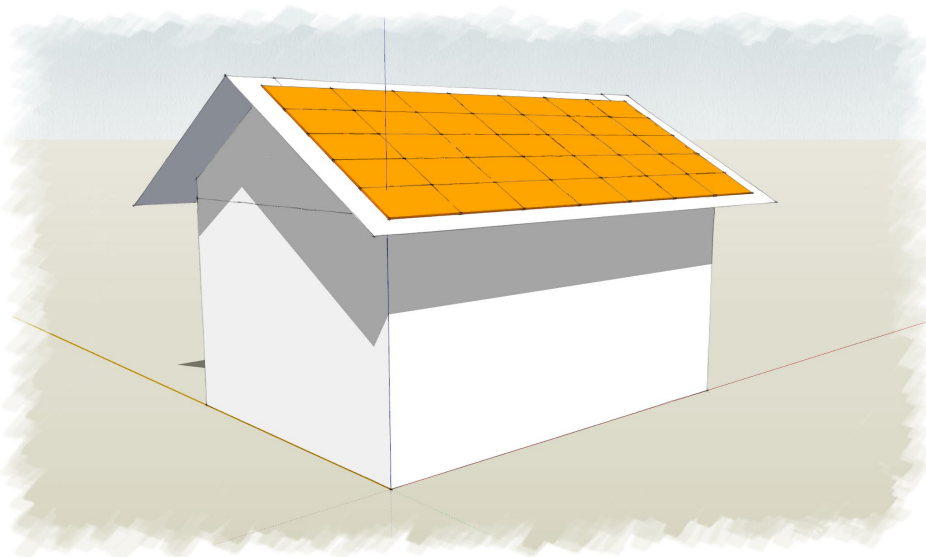


Abbildung 2-3 Photovoltaikanlage

In Tabelle 2-3 sind die Modellparameter PV-Anlage angeführt.

Tabelle 2-3 Modellparameter PV-Anlage

PV-Anlage	
Ausrichtung [°]	180 (=Süd)
Neigung [°]	30
Anzahl Module []	35
Modulwirkungsgrad [%]	20.54
Performance Ratio []	0.85
Systemwirkungsgrad [%]	17.46
Peakleistung je Modul [Wp]	380
Peakleistung GESAMT [kWp]	13.3

Der erzeugte PV-Strom wird auf Basis der Sonneneinstrahlung aus den Wetterdaten (Stundendaten), der Dachneigung und dem (konstanten) Systemwirkungsgrad ermittelt. Daraus ergibt sich ein jährlicher Nutzertrag (Wechselstromertrag) von 13.357 [kWh] (siehe Abbildung 2-4).

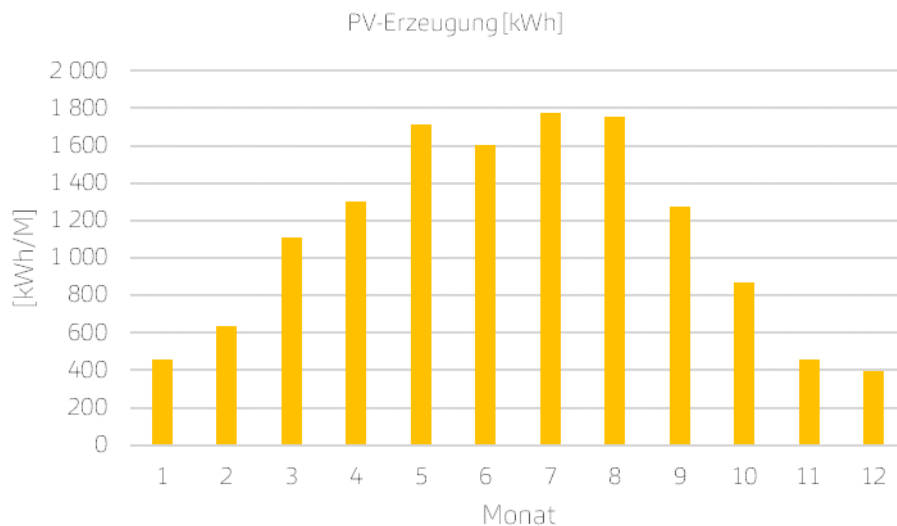


Abbildung 2-4 Photovoltaik Nutzertrag, in kWh je Monat

Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung ist auch der Anteil der Eigennutzung bzw. der Netzeinspeisung des Photovoltaik-Stroms abzuschätzen. Dazu wurden die Stundenwerte der PV-Produktion den Stundenwerten des Strombedarfes gegenübergestellt (siehe Abbildung 2-5). Der Strombedarf des Gebäudes ergibt sich aus dem Haushaltsstrom (Elektrogeräte, Beleuchtung, etc.), der Warmwasserbereitung und der Infrarotheizung. Der Verlauf des Heizungsstromes wurde aus der thermischen Gebäudesimulation (Abschnitt 2.1) übernommen. Der Haushaltsstrom basiert auf dem durchschnittlichen Stromverbrauch eines Vierpersonenhaushaltes (Statistik Austria 2018) abzüglich der Verbrauchskategorien Heizen und Warmwasserbereitstellung (Tagesprofil siehe Abbildung 1-13). Der Stromverbrauch für die Warmwasserbereitung wurde separat berechnet (Annahmen: Warmwasserbedarf 40 l/Person.d; 300 l Warmwasserspeicher; nachheizen bevorzugt tagsüber).

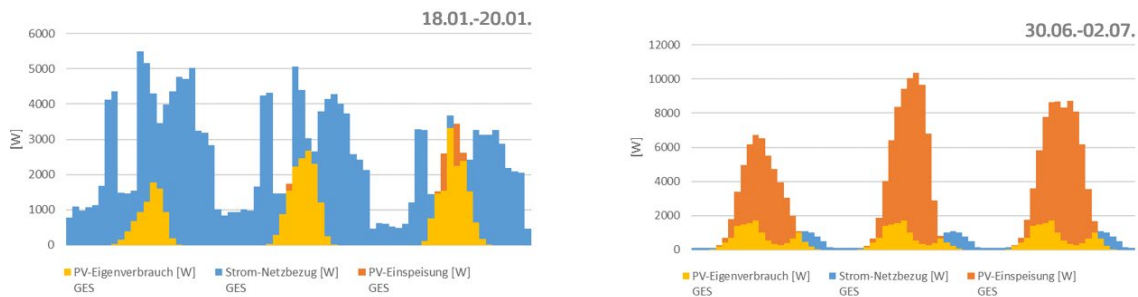


Abbildung 2-5 PV-Produktion und Stromverbrauch an drei Tagen im Winter bzw. Sommer.

2.3 System 03: Pelletkessel

Die Wärmebereitstellung in System 03 erfolgt mittels Pelletkessel, welcher in der Simulation mit dem IDA-ICE Standard-Boiler-Modell und nachfolgend angeführten Modellannahmen abgebildet wurde.

Tabelle 2-4 Modellannahmen Pelletkessel

	NEUBAU
Nennwärmeleistung [kW]	7.7
Kesselwirkungsgrad [%]	90%
Wasserinhalt [Liter]	27
Elektrische Leistungsaufnahme Last/Bereitschaft [W]	60/12

Pelletkessel und Pelletlager sind in einem nordost-seitig angebauten Heizraum (15 m²) angeordnet. Die Wärmeverteilverluste wurden anhand der Leitungslängen und Wassertemperaturen mit 8% abgeschätzt.

Die Wärmeabgabe erfolgt über Flachheizkörper ($T_v/T_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$). Die Auslegungsleistungen der Heizkörper sind in Tabelle 2-5 angegeben.

Tabelle 2-5 Auslegungsleistungen der Heizkörper

NEUBAU	[W]
Wohnen, Essen, Kochen	2334
Kind 2	622
Bad	704
Eltern	778
Kind 1	622
WC	0
Abstellraum	0
Garderobe, Stiege	864
Gang, Stiege	0
Schrankraum	311

Die Regelung erfolgt wasserseitig über ein Thermostatventil (Proportionalregler).

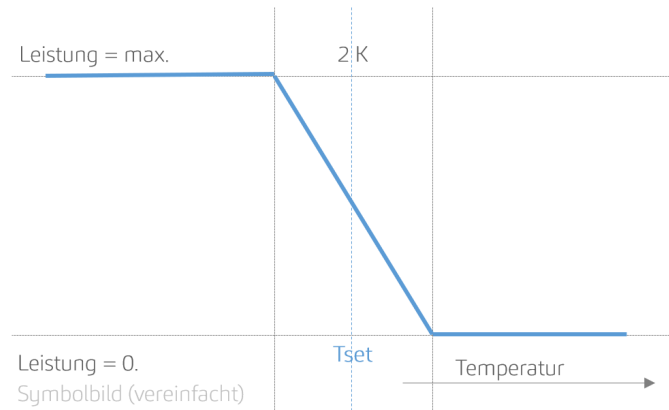


Abbildung 2-8 Symbolbild Temperaturregelung Fußbodenheizung

Die Wärmeverteilungsverluste wurden anhand der Leitungslängen und Wassertemperaturen mit 5 % abgeschätzt.

2.5 System 05: Sole-Wasser-Wärmepumpe (Tiefenbohrung)

Die Wärmeerzeugung in System 04 erfolgt mittels Sole-Wasser-Wärmepumpe, welche in der Simulation mit dem IDA-ICE Modell SWC 120H 8kW abgebildet wurde. Die Tiefenbohrung wurde mit dem IDA-ICE single-hole Bohrlochmodell abgebildet. Die Länge der Erdwärmesonden wurde mit 2x70m angenommen.

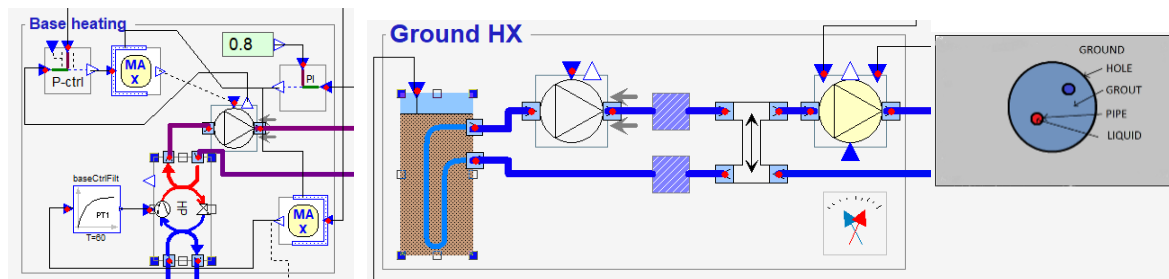


Abbildung 2-9 Symbolbild Wärmepumpenmodell bzw. Bohrlochmodell

Die Wärmepumpe ist in einem nordost-seitig angebauten Heizraum (10 m²) angeordnet.

Die Wärmeabgabe in System 05 erfolgt, identisch dem System 04, über Fußbodenheizung ($T_V/T_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$).

Für weitere Details siehe Abschnitt 2.4.

2.6 Ergebnisse der Gebäudesimulation

Abbildung 2-10 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 Heizkörper weisen einen geringfügig höheren Nutzenergiebedarf auf (ca. +3%). Die Systeme mit Fußbodenheizung weisen mit +18% einen merklich höheren Energiebedarf gegenüber dem Infrarotheizsystem auf.

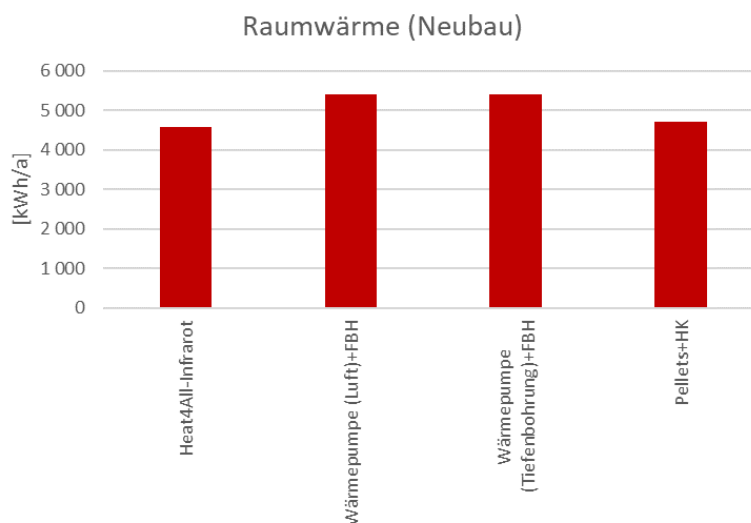


Abbildung 2-10 Wärmeabgabe in die zu beheizenden Räume

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

Grundsätzlich lässt eine Regelung nach der operativen Temperatur für Systeme mit höherem Strahlungsanteil (Infrarotheizung, Fußbodenheizung) bei vergleichbarem Temperaturempfinden eine niedrigere Raumlufttemperatur zu. In der Praxis kommt es regelungs- und systembedingt (thermische Trägheit, bleibende Regelabweichung der Thermostatventile, etc.) zu entsprechenden Abweichungen von der Ziel-Temperatur.

Bei primär konvektionsbasierten Wärmeabgabesystemen (z.B. Heizkörper) schlägt sich die, im Vergleich zur operativen Temperatur erhöhte Raumlufttemperatur, in höheren Wärmeverlusten durch Lüftung und Infiltration nieder. Bei der Fußbodenheizung liegt die Raumlufttemperatur konstant unter der operativen Temperatur. Der Mehrverbrauch ergibt sich hier in erster Linie durch die trägere Regelung (keine Temperaturabsenkung). Unter den gewählten Annahmen weist die Fußbodenheizung auch eine geringere solarenergienutzung 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 Nachtabenkung etwas stärker ausgekühlt und können tagsüber mit Solarenergie beladen werden.

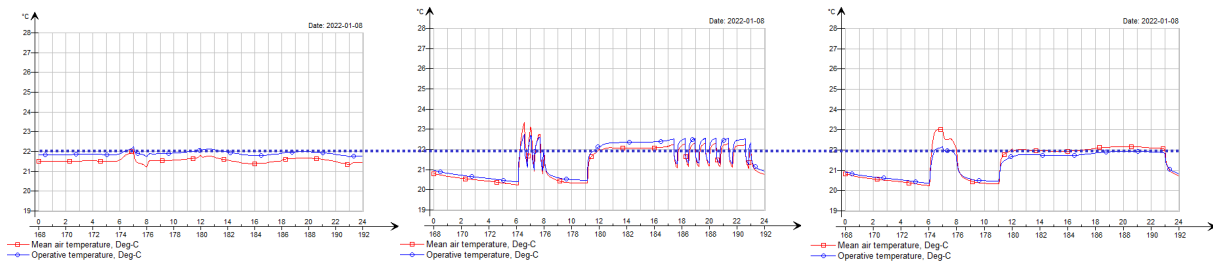


Abbildung 2-11 Beispielhafter Tagesverlauf der operativen Temperatur und der Raumlufttemperatur für Fußbodenheizung (links), Infrarotheizung (Mitte), und Heizkörper (rechts).

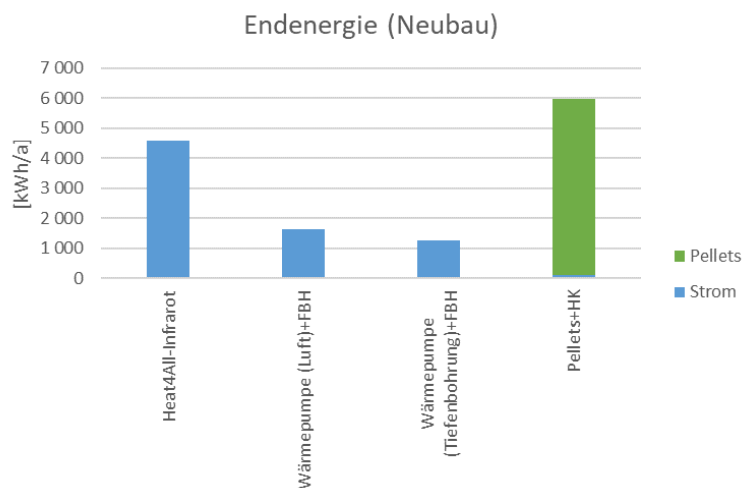


Abbildung 2-12 Endenergieverbrauch der betrachteten Varianten

Auch bezogen auf die Systemgrenze Gebäude (Endenergie) treten die Unterschiede der Heizungssysteme sehr deutliche zutage. Bei allen wasserführenden Systemen müssen Wärmeverluste der Rohrleitungen bzw. der Wärmeerzeugung ausgeglichen werden, was zu entsprechenden Mehrverbräuchen führt. Darüber hinaus sind noch die entsprechenden Hilfsenergieverbräuche zu berücksichtigen (z.B. Strombedarf für den Betrieb von Ventilatoren, Umwälzpumpen etc.). Die Heizungs-Wärmepumpen erreichen unter den gegebenen Bedingungen Jahresarbeitszahlen zwischen 3,3 (Luft-Wasser-Wärmepumpe) und 4,3 (Sole-Wasser-Wärmepumpe), womit diese Systemvarianten mit Abstand den niedrigsten Endenergiebedarf aufweisen. Die Pellets-Varianten erreichen einen Jahresnutzungsgrad von etwa 0,80 und weisen damit den höchsten Endenergiebedarf auf.

Abbildung 2-13 stellt die PV-Produktion und den Stromverbrauch (Haushaltsstrom, Heizen, Warmwasserbereitung) von System 02 (HEAT4All Infrarotheizung + Photovoltaik) gegenüber. Im Neubau kann 39% des Strombedarfs durch die Photovoltaikanlage gedeckt werden. Etwa 30% des produzierten PV-Stroms kann als Eigenverbrauch genutzt werden, der Rest wird ins Netz eingespeist. Daran ist erkennbar, dass die PV-Anlage nicht in der Lage ist den Strombedarf vollständig zu decken, auch wenn die Jahresproduktion den Jahresverbrauch übersteigt. Dies ergibt sich aus den gegenläufigen Profilen für den Stromverbrauch (primär Heizungsstrom) und die Photovoltaik-Produktion. Die Infrarotheizung liefert jedoch einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils (und damit zur Wirtschaftlichkeit des Systems).

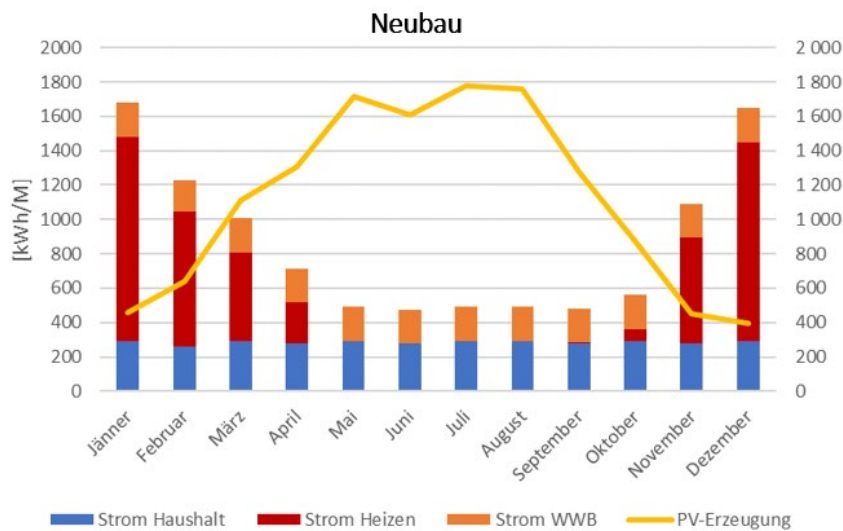


Abbildung 2-13 Monatssummen von PV-Produktion und Stromverbrauch

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, Wärmeverteilverluste, ...), eine Änderung der Rangfolge ist dadurch allerdings nicht zu erwarten.

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Photovoltaik-Anlage ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei nicht um eine elektrotechnische Anlagensimulation, sondern um eine Berechnung mit dem Charakter einer Abschätzung handelt. Bestimmte Effekte (z.B. Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades, Teilverschattungsverhalten, Schneebedeckung, ...) bleiben dadurch unberücksichtigt. Zudem wird die Gegenüberstellung von Erzeugung und Verbrauch auf Basis von Stunden-Mittelwerten durchgeführt. Dadurch wird der Eigenverbrauch tendenziell überschätzt, da kurzfristige Schwankungen wie z.B. Lastspitzen durch die relativ langen Zeitschritte geglättet werden.

3 Wirtschaftlichkeitsrechnung

3.1 Berechnungsannahmen

Im Anschluss an die Simulation wurde eine betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung der fünf Heizungsvarianten durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde in Anlehnung an die 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.	2.5%
Preissteigerungsrate	% p.a.	3.0%
Angabe aller Kosten		brutto

In Tabelle 3-2 sind die angesetzten **Energiepreise** für Strom und Pellets sowie der Einspeisetarif für Photovoltaikstrom angegeben. Der Ertrag der PV-Anlage ergibt sich aus dem Eigenverbrauch und der Einspeisung des Überschusses. Es ist anzumerken, dass sich die Energiemärkte zum Zeitpunkt der Studiererstellung in einer sehr dynamischen Phase befunden haben, was entsprechend große Unsicherheiten in den Preisansätzen mit sich bringt. Zur Interpretation wird auf die Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.4 verwiesen, wo die Auswirkungen der Energiepreise auf die Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

Tabelle 3-2: Energiepreise

ENERGIE	€/kWh
Pellets	0.080
Strom	0.300
Stromerlös PV Einspeisung	0.120

Die Ansätze für die **Nutzungsdauer** der einzelnen Anlagenteile wurden in Anlehnung an die der Richtwerte der Norm getroffen.

Tabelle 3-3: Berechnungsansätze Nutzungsdauer

Anlagenteil	Nutzungsdauer
Baumaßnahmen (Heizraum, Rauchfang,...)	50 Jahre
Installationen (Elektro,...)	30 Jahre
Wärmeerzeugung (Heizkessel,...)	20 Jahre
div. Komponenten der Heizungsanlage (Pumpen,...)	20 Jahre
PV-Anlage	20 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
Pelletkessel	3 % p.a.
Wärmepumpe	2 % p.a.
Photovoltaik	1 % p.a.

Die **Investitionskosten** für die HEAT4ALL-Infrarotheizung wurden durch den Auftraggeber bereitgestellt. Die Investitionskosten für die wasserführenden Heizungsvarianten wurden aus tatsächlichen Angeboten vergleichbarer Objekte aus den Jahren 2021 bzw. 2022 abgeleitet. Die Berechnungsansätze für bauliche Maßnahmen wurden von einem externen Experten (Baumeister) bereitgestellt. Auch bei den Investitionskosten ist anzumerken, dass sich die Märkte für Energieanlagen zum Zeitpunkt der Studiienerstellung in einer sehr dynamischen Phase befunden haben, was entsprechend große Unsicherheiten in den Preisansätzen mit sich bringt.

Beim Neubau wird angenommen, dass bei den Varianten mit Pelletkessel und Wärmepumpe nordostseitig ein Heizraum (15 m² bzw. 10 m²) angebaut wird. Für die Photovoltaikanlage wird eine Förderung angesetzt (OeMAG Investitionszuschuss, Kategorie B: 250 €/kWp).

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.

Tabelle 3-5 Berechnungsvariante NEUBAU-System 01: HEAT4All Infrarotheizung

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	AI €	j Jahr	N a	a %/a
Infrarot-Heizungspaneele	4 580 €	0	20	3%
E-Installationen	800 €	0	30	3%
Steuerung, programmierbarer Thermostat	749 €	0	10	3%
Summe der Anfangsinvestitionen	6 129 €			

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	VKj €/a	j Jahr	N a	a %/a
Strom	1 372 €	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	1 372 €			

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	BKj €	j Jahr	N a	a %/a
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	- €			

Tabelle 3-6 Berechnungsvariante NEUBAU-System 02: HEAT4All Infrarotheizung + Photovoltaik

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>AI</i> €	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Infrarot-Heizungspaneele	4 580 €	0	20	3%
E-Installationen	800 €	0	30	3%
Steuerung, programmierbarer Thermostat	749 €	0	10	3%
Photovoltaik Anlage	23 940 €	0	20	3%
Förderung (Jahr 1-10)				0%
Förderung (Jahr 1)	- 3 325 €			0%
Summe der Anfangsinvestitionen	30 069 €			

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>VKj</i> €/a	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Strom	1 372 €	1	20	3%
Ertrag PV-Anlage	- 2 332 €	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	- 960 €			

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>BKj</i> €	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Instandhaltung PV-Anlage	239 €	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	239 €			

Tabelle 3-7 Berechnungsvariante NEUBAU-System 03: Pelletkessel

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>AI</i> €	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Pelletsessel, Regelung, Saugsystem, Lagerraumzubehör	17 600 €	0	20	3%
Pumpen, Ausdehnungsgefäß, Armaturen	4 900 €	0	20	3%
Inbetriebnahme, Heizungswasser-Aufbereitung	800 €	0	20	3%
Heizungsverrohrung, Heizungsverteiler, Heizkörper	8 760 €	0	20	3%
Rauchfang	3 150 €	0	50	3%
Heizraum+Pelletslageraum, 15 m ²	22 500 €	0	50	3%
Summe der Anfangsinvestitionen	57 710 €			

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>VKj</i> €/a	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Pellets	469 €	1	20	3%
Strom	30 €	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	499 €			

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>BKj</i> €	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Rauchfangkehrer	150 €	1	20	3%
Instandhaltung Pelletsheizung	528 €	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	678 €			

Tabelle 3-8 Berechnungsvariante NEUBAU-System 04: Luft-Wasser-Wärmepumpe

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	AI €	j Jahr	N a	a %/a
Wärmepumpe, Regelung	16 000 €	0	20	3%
Pumpen, Ausdehnungsgefäß, Armaturen	4 900 €	0	20	3%
Inbetriebnahme, Heizungswasser-Aufbereitung	800 €	0	20	3%
Heizungsverrohrung, Heizungsverteiler, Fußbodenheizung	9 490 €	0	20	3%
Heizraum 10 m²	15 000 €	0	50	3%
Summe der Anfangsinvestitionen	46 190 €			

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	VKj €/a	j Jahr	N a	a %/a
Strom	490 €	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	490 €			

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	BKj €	j Jahr	N a	a %/a
Instandhaltung Wärmepumpe	320 €	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	320 €			

Tabelle 3-9 Berechnungsvariante NEUBAU-System 05: Sole-Wasser-Wärmepumpe (Tiefenbohrung)

Systemkomponenten und Leistungen	Anfangsinvestitionen	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>AI</i> €	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Wärmepumpe, Regelung	16 000 €	0	20	3%
Pumpen, Ausdehnungsgefäß, Armaturen	4 900 €	0	20	3%
Inbetriebnahme, Heizungswasser-Aufbereitung	800 €	0	20	3%
Heizungsverrohrung, Heizungsverteiler, Fußbodenheizung	9 490 €	0	20	3%
Heizraum 10 m ²	15 000 €	0	50	3%
Tiefenbohrung, Soleleitungen	10 000 €	0	40	3%
Summe der Anfangsinvestitionen	56 190 €			

Energie, Brennstoffe, Hilfsstoffe und Zusatzkosten	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>VKj</i> €/a	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Strom	379 €	1	20	3%
Summe der jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten VK	379 €			

Betriebliche Aufwendungen	Kosten im Rechenjahr	Nutzung ab Rechenjahr	Nutzungs-dauer	Preis-steigerungs-rate
	<i>BKj</i> €	<i>j</i> Jahr	<i>N</i> <i>a</i>	<i>a</i> %/a
Instandhaltung Wärmepumpe	320 €	1	20	3%
Summe der jährlichen betriebsgebundenen Kosten BK	320.00 €			

3.3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung.

Tabelle 3-10 Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum

	Heat4All-Infrarot	Heat4All-Infrarot + 13.3 kWp PV	Pellets+ Heizkörper	Wärmepumpe (Luft) + Fußbodenheizung	Wärmepumpe (Sole) + Fußbodenheizung
Kapitalgebundene Kosten BKK	6 620 €	27 316 €	40 747 €	36 270 €	40 759 €
Verbrauchsgebundene Kosten BVK	28 894 €	20 211 €	10 500 €	10 308 €	7 972 €
Betriebsgebundene Kosten BBK	- €	5 041 €	14 276 €	6 738 €	6 738 €
	35 514 €	12 147 €	65 524 €	53 316 €	55 469 €
Rang	2	1	5	3	4
Differenz (20a) in €	23 368 €	- €	53 377 €	41 169 €	43 322 €

Abbildung 3-1 zeigt die Entwicklung der Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum. Die Anfangsinvestitionen markieren den Ausgangspunkt im Jahr 0, Förderungen werden im zweiten Jahr abgezogen, 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.

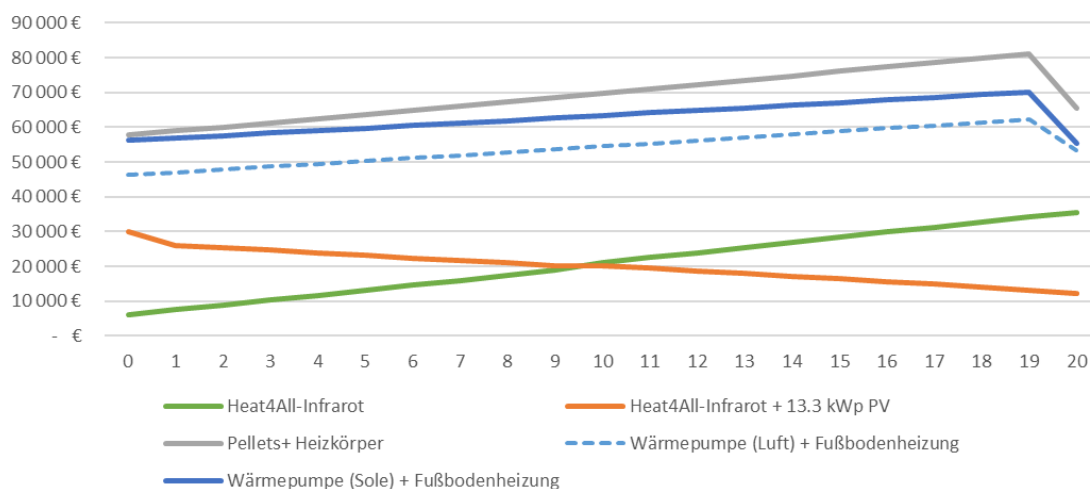


Abbildung 3-1 Reale Gesamtkostenentwicklung aller Komponenten sowie jahresbezogene Kapitalbewegungen und Restwerte im letzten Jahr

3.4 Sensitivitätsanalyse

In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss des Strompreises und des Photovoltaik-Einspeisetarifs auf die Gesamtkosten untersucht. In der linken Grafik werden niedrige Strompreise angenommen, in der rechten Grafik hohe Strompreise. Innerhalb einer Grafik wird jeweils der PV-Einspeisetarif von niedrig (links) zu hoch (rechts) variiert.

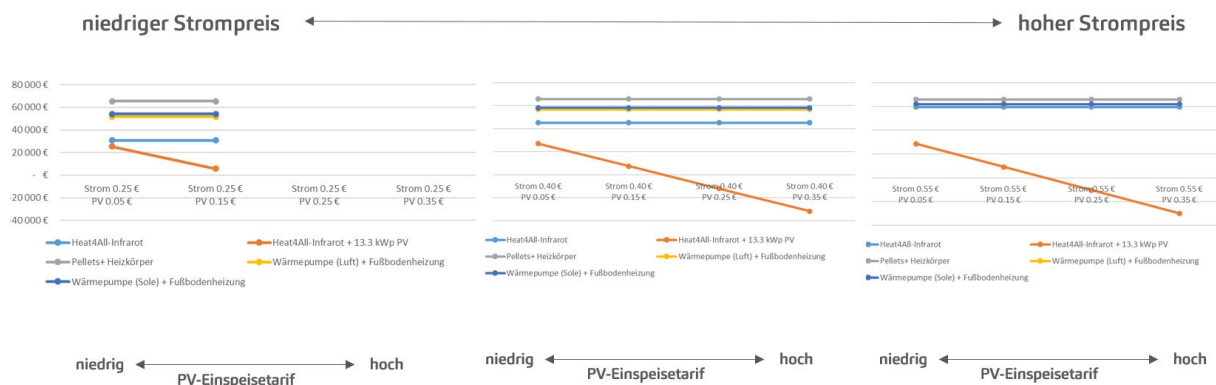


Abbildung 3-2 Sensitivitätsanalyse

Für den Neubau zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass unter den gewählten Randbedingungen (sehr hohe Energieeffizienz, Zubau für Heizraum erforderlich, Nutzerverhalten...) die Varianten mit „HEAT4ALL-Infrarotheizung“ auch unter ungünstigen Bedingungen (hoher Strompreis, niedriger PV-Einspeisetarif) in wirtschaftlicher Hinsicht am günstigsten abschneiden. Durch die Kombination der Infrarotheizung mit einer Photovoltaikanlage können die höheren Energiekosten kompensiert werden, so dass dieses System in allen betrachteten Fällen die günstigste Variante darstellt.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend können nachfolgend angeführte Ergebnisse und Schlussfolgerungen festgehalten werden.

Energie:

- Bezogen auf die Systemgrenze Raum (Nutzenergie) weisen die Systeme mit „HEAT4ALL-Infrarotheizung“ den geringsten Energiebedarf auf. Die Systeme mit Heizkörper weisen einen geringfügig höheren Nutzenergiebedarf auf (+3%). Die Systeme mit Fußbodenheizung weisen mit +18% 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 Wärmeerzeugung ausgeglichen werden, was zu entsprechenden Mehrverbräuchen führt. Darüber hinaus sind noch die entsprechenden Hilfsenergieverbräuche zu berücksichtigen (z.B. Strombedarf für den Betrieb von Ventilatoren, Umwälzpumpen etc.). Die Heizungs-Wärmepumpen erreichen unter den gegebenen Bedingungen Jahresarbeitszahlen zwischen 3,3 (Luft-Wasser-Wärmepumpe) und 4,3 (Sole-Wasser-Wärmepumpe), womit diese Systemvarianten mit Abstand den niedrigsten Endenergiebedarf aufweisen. Die Pellets-Varianten erreichen einen Jahresnutzungsgrad von etwa 0,80 und weisen damit den höchsten Endenergiebedarf auf.
- Wird eine „HEAT4ALL-Infrarotheizung“ mit einer Photovoltaikanlage (13,3 kWp) kombiniert, dann kann etwa 39% des gesamten Strombedarfs durch die Photovoltaikanlage gedeckt werden. Etwa 30% des produzierten Sonnenstroms kann als Eigenverbrauch genutzt werden, der Rest wird ins Netz eingespeist.

Wirtschaftlichkeit:

- Durch den sehr hohen thermischen Standard der Gebäudehülle im *Neubau* 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-, und Wartungskosten der Vergleichssysteme in Summe das kostengünstigste. Die Kombination von Infrarotheizung und Photovoltaik schneidet in wirtschaftlicher Hinsicht besonders gut ab. Trotz der Mehrkosten für die Photovoltaik ist die Anschaffung weit günstiger als bei Systemen mit Zentralheizung. Durch die Erträge der Photovoltaikanlage können darüber hinaus noch jährliche Gewinne erwirtschaftet werden.

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 (schlechtere thermische Gebäudehülle, 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*. 2022. <https://www.baubook.info/> (Zugriff am Juni 2022).
- 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-Leitfaden OIB-RL6, Energietechnisches Verhalten von Gebäuden*. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2019.
- OIB. *OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz*. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2019.
- ON. *ÖNORM B 8110 Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile*. Wien: Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut (ON), 2012.
- ON. *ÖNORM EN 15251 Eingangsparameter 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.

Statistik Austria. *Energiestatistik: Strom- und Gastagebücher 2008/2012/2016, Durchschnittlicher Stromverbrauch eines Haushalts in den Gesamtjahren 2008, 2012 und 2016 nach Verbrauchskategorien und Haushaltsgröße*. Wien, 2018.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Referenzgebäude	5
Abbildung 1-2: Energiekennzahlen des Referenzgebäudes.....	6
Abbildung 1-3: Gebäudestandort: Wien	6
Abbildung 1-4 Außentemperatur	7
Abbildung 1-5: Monatsmittelwerte für Wien-Hohe Warte gemäß ASHRAE IWEC2.....	7
Abbildung 1-6 Thermische Zonierung	8
Abbildung 1-7 Gebäudegeometrie	9
Abbildung 1-8 Zuweisung Bauteilaufbauten.....	10
Abbildung 1-9: Balkonüberdachung und Dachvorsprung	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 Photovoltaikanlage.....	16
Abbildung 2-4 Photovoltaik Nutzertrag, in kWh je Monat.....	17
Abbildung 2-5 PV-Produktion und Stromverbrauch an drei Tagen im Winter bzw. Sommer.....	18
Abbildung 2-6 Symbolbild Temperaturregelung Heizkörper.....	19
Abbildung 2-7 Symbolbild Wärmepumpenmodell	19
Abbildung 2-8 Symbolbild Temperaturregelung Fußbodenheizung.....	20
Abbildung 2-9 Symbolbild Wärmepumpenmodell bzw. Bohrlochmodell.....	20
Abbildung 2-10 Wärmeabgabe in die zu beheizenden Räume	21
Abbildung 2-11 Beispielhafter Tagesverlauf der operativen Temperatur und der Raumlufttemperatur für Fußbodenheizung (links), Infrarotheizung (Mitte), und Heizkörper (rechts).	22
Abbildung 2-12 Endenergieverbrauch der betrachteten Varianten	22
Abbildung 2-13 Monatssummen von PV-Produktion und Stromverbrauch	23
Abbildung 3-1 Reale Gesamtkostenentwicklung aller Komponenten sowie jahresbezogene Kapitalbewegungen und Restwerte im letzten Jahr.....	31
Abbildung 3-2 Sensitivitätsanalyse	32

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1-1 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 Modellparameter PV-Anlage.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 2-4 Modellannahmen Pelletkessel.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 2-5 Auslegungsleistungen der Heizkörper</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 3-1 Allgemeine Berechnungsannahmen</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 3-2: Energiepreise.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 3-3: Berechnungsansätze Nutzungsdauer</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 3-4 Berechnungsansätze Wartung und Instandhaltung.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3-5 Berechnungsvariante NEUBAU-System 01: HEAT4All Infrarotheizung.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 3-6 Berechnungsvariante NEUBAU-System 02: HEAT4All Infrarotheizung + Photovoltaik</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 3-7 Berechnungsvariante NEUBAU-System 03: Pelletkessel.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 3-8 Berechnungsvariante NEUBAU-System 04: Luft-Wasser-Wärmepumpe</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 3-9 Berechnungsvariante NEUBAU-System 05: Sole-Wasser-Wärmepumpe (Tiefenbohrung)</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 3-10 Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum</i>	<i>31</i>