



## Potentialbewertung von Infrarotheizungen als Spitzenlast- abdeckung

- Abschlussbericht -

**Auftraggeber:** IG Infrarot Deutschland e.V  
Alpengartenweg 2  
87459 Pfronten

**Auftragnehmer:** Technische Universität Dresden  
Insitut für Energietechnik  
01062 Dresden

**Autoren:** Dr.-Ing. M. Knorr / Dipl.-Ing. A. Meinzenbach / Dipl.-Ing. L. Schinke  
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Seifert / Dr.-Ing. A. Perschk

**Copyright liegt bei den Autoren**

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Randbedingungen</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	4
2.2	Modellgebäude . . . . .	4
2.3	Wärmeverteilung, Wärmeübergabe und Regelung . . . . .	6
2.4	Wärmeerzeugungssystem . . . . .	7
2.5	Nutzungsprofile, innere Gewinne und Luftwechsel . . . . .	9
2.6	Variantenmatrix . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Numerische Analysen</b>	<b>13</b>
3.1	Niedertemperaturkessel . . . . .	13
3.1.1	Basisvariante: Freie Heizflächen . . . . .	13
3.1.2	Kombination: Freie Heizflächen und Infrarotheizung . . . . .	16
3.1.2.1	Vergleich der Varianten mit und ohne Nachtabschaltung . . . . .	16
3.1.2.2	Vergleich der Varianten mit unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen . . . . .	19
3.1.2.3	Energetischer Vergleich . . . . .	20
3.1.3	100% Infrarotheizung . . . . .	22
3.2	Luft-Wasser-Wärmepumpe . . . . .	24
3.2.1	Basisvariante: Freie Heizflächen . . . . .	24
3.2.2	Kombination: Freie Heizflächen und Infrarotheizung . . . . .	24
3.2.2.1	Vergleich der Varianten mit unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen . . . . .	25
3.2.2.2	Energetischer Vergleich . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Fazit / Ausblick</b>	<b>27</b>
	<b>Literatur</b>	<b>29</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>30</b>
A.1	Innere Gewinne / Luftwechsel . . . . .	30
A.2	Modell des Gebäudes . . . . .	32
A.2.1	Grundrisse und Zonenaufteilung . . . . .	32
A.2.2	Wandkonstruktion . . . . .	33
A.3	Charakteristische Typtage . . . . .	34
A.4	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen . . . . .	36
A.4.1	Basisvarianten . . . . .	36
A.4.2	Variante: NT-K, $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung . . . . .	37
A.4.3	Variante: NT-K, $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung . . . . .	38
A.4.4	Variante: LW-WP, $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit außentemperaturabhängiger Nachtabschaltung . . . . .	40



---

## Symbolverzeichnis

### Lateinische / Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$b$	Koeffizienten	–
$c$	Wärmekapazität	$J/(W \cdot K)$
$P$	elektrische Leistung	W
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{Q}_N$	Wärmestrom (Normbedingungen)	W
$\dot{Q}_{NTK}$	Wärmestrom (Niedertemperaturkessel)	W
$\dot{Q}_{WP}$	Wärmestrom (Wärmepumpe)	W
$V$	Volumen	l
$\varphi$	Belastungsgrad	
$\vartheta$	Temperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_a$	Außentemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_{HGR}$	Heizgrenztemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_i$	Innentemperatur unter Normbedingungen	$^{\circ}C$
$\vartheta_{op}$	operative Raumtemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_V$	Vorlauftemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_{V,N}$	Vorlauftemperatur (Normbedingungen)	$^{\circ}C$
$\vartheta_R$	Rücklauftemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_{R,N}$	Rücklauftemperatur (Normbedingungen)	$^{\circ}C$
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
$\Delta\vartheta_m$	Übertemperatur	K
$\Delta\vartheta_{m,N}$	Übertemperatur unter Normbedingungen	K
$\Delta\vartheta_N$	Temperaturspreizung unter Normbedingungen	K

### Abkürzungen

Index	Bedeutung
FH	Freie Heizflächen
IR	Infrarot
IRH	Infrarotheizung
LW-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
NA	Nachtabstaltung (der zentralen Pumpe)
NT-K	Niedertemperatur-Kessel
TRNSYS	Transient System Simulation Program
TUD	TU Dresden
WP	Wärmepumpe
WSVO	Wärmeschutzverordnung



---

## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund, dass fossile Energieträger zur Versorgung von Gebäuden künftig teurer werden und vielleicht sogar die Verfügbarkeit der Brennstoffe eingeschränkt werden könnte, sind die Nutzer solcher Heizsysteme auf der Suche nach Alternativen. Der IG Infrarot Deutschland e.V. wird zunehmend mit der Frage konfrontiert, ob der Einsatz einer Infrarotheizung einen Lösungsansatz zur Vermeidung des Einsatzes von Gas und Öl liefern kann. In einer Studie soll an einem repräsentativen Einfamilienhaus untersucht werden, ob durch die Absenkung der vorhandenen Systemtemperaturen der bestehenden Anlagentechnik in Gebäuden mit wassergeführten Wärmeübergabesystemen der Einsatz einer Infrarotheizung zur Abdeckung der Spitzenlast eine sinnvolle Systemerweiterung darstellt. Neben den Varianten mit Niedertemperaturkessel soll darüber hinaus die Kombination von Wärmepumpen mit einer Infrarotheizung als Spitzenlastabdeckung betrachtet werden.

Die Untersuchungen werden mit der Gebäude- und Anlagensimulationssoftware TRNSYS-TUD für eine Heizperiode durchgeführt. Im ersten Schritt wurde ein Simulationsmodell für ein charakteristisches Einfamilienhaus mit einem Wärmeschutzniveau nach WSVO 95 entwickelt, um repräsentativ das Potenzial für den Gebäudebestand in Deutschland bestimmbar zu machen. Dieses Gebäude wird mit einer entsprechenden Bestands-Heizungsanlage (Niedertemperaturkessel) sowie einem Wärmeübergabesystem mit Heizkörpern vorgesehen. Das Auslegungstemperaturniveau des Heizsystems beträgt  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ . Das Temperaturniveau des Anlagenbetriebes wird im Laufe der Untersuchungen variiert, um Potenziale bzgl. der Infrarotheizung bei einer Grundtemperierung mit dem Bestandssystem (freie Heizflächen) aufzuzeigen. Darüber hinaus wird ein Ersatzmodell für die Infrarotheizung und das regelungstechnische Konzept zwischen freien Heizflächen (Grundtemperierung) und Infrarotheizung (Spitzenlastdeckung) definiert.

Die Analyse erfolgt in der Reihenfolge, wie in der Praxis eine mögliche Entscheidung bei Hausbesitzern erfolgen kann. Das Gebäude wird mit dem Niedertemperaturkessel anhand einer Stütztemperatur grundtemperiert und durch eine Infrarotheizung ergänzt. Im nächsten Schritt wird der Niedertemperaturkessel durch eine Luft/Wasser-Wärmepumpe ersetzt. An der Dimensionierung des Wärmeübergabesystems der Heizkörper sowie am Gebäudedämmstandard werden keine Änderungen vorgenommen. Anhand verschiedener Betriebsweisen und Regelungsansätze hinsichtlich des Einsatzes der örtlichen Regeleinrichtungen, der Heizgrenztemperatur sowie einer Nachtabschaltung der zentralen Heizungspumpe werden zahlreiche Varianten analysiert.

Anhand der gewonnenen Ergebnisse werden abschließend die berechneten Varianten verglichen und die benötigten Energiebedarfe aufgezeigt, wobei die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit während der Nutzungszeiten Bedingung ist.

## 2 Randbedingungen

### 2.1 Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Studie kommt das numerische Simulationsprogramm TRNSYS-TUD [1] zum Einsatz. Es handelt sich dabei um eine umfassend überarbeitete und erweiterte Programmversion des kommerziellen Simulationsprogrammes TRNSYS, wobei TRNSYS für „*Transient System Simulation Program*“ steht. Das Programm besitzt eine offene und modulare Struktur, wodurch es besonders für Forschungszwecke geeignet ist. Jeder Baustein eines Gebäudes (Gebäudehülle, technische Anlage) kann mittels sogenannter „*Types*“ nachgebildet werden, die miteinander im Informationsaustausch stehen. Die innerhalb der Module hinterlegten Algorithmen basieren dabei auf analytischen bzw. numerischen Verfahren, auf Kennlinienmodellen oder einer Kombination der Möglichkeiten. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Version basiert auf dem Standard Quellcode der Version 14.2. Die Zuverlässigkeit des genannten Quellcodes ist in zahlreichen Arbeiten ausführlich getestet worden [2, 3, 4] und soll daher hier nicht weiter kommentiert werden.

Für die Zielstellung dieser Arbeit ist es notwendig, die realen Verhältnisse in ein numerisches Modell zu überführen, bei dem die wichtigsten Wechselwirkungen dynamisch exakt wiedergegeben werden. Hierzu wird ein Modell eines repräsentativen Einfamilienhauses verwendet, welches nachfolgend beschrieben werden soll.

### 2.2 Modellgebäude

Untersuchungsgegenstand bildet das in den Abb. 2.1 bis 2.5 dokumentierte Einfamilienhaus, welches eine beheizte Grundfläche von  $A = 160 \text{ m}^2$  besitzt. Das Gebäude wurde aus statistischen Daten abgeleitet und kann als repräsentativ für Einfamilienhäuser dieser Klasse angesehen werden. Bei den unterschiedlichen Betrachtungen wurde die Gebäudegeometrie nicht verändert. Weitere detaillierte Angaben bzgl. der Grundrisse und Zonenaufteilung sowie Abmessungen können den Abb. A.9 bis A.11 im Anhang A.2 entnommen werden.

Tab. 2.1 zeigt die Heizlast für die untersuchte wärmetechnische Ausstattungsvariante des Gebäudes. Hinsichtlich der wärmetechnischen Ausstattung des Gebäudes wird ein Wärmedämmstandard nach WSVO95 [5] verwendet. Die zugehörigen definierten Wandaufbauten des Einfamilienhauses dokumentiert die Tab. A.1 im Anhang A.2.

Tabelle 2.1: Energetische Kenndaten für das statistische Einfamilienhaus

wärmetechnische Ausstattung	Heizlast in kW	spez. Heizlast <sup>1</sup> in W/m <sup>2</sup>
WSVO95	9,2	57,20

---

<sup>1</sup>bezogen auf die beheizte Nutzfläche des Einfamilienhauses von  $A = 160 \text{ m}^2$

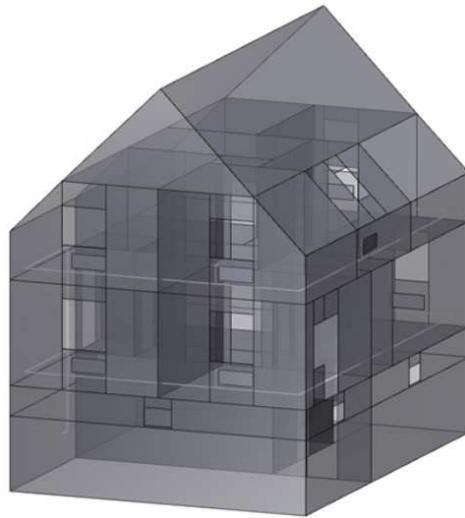


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des statistischen Einfamilienhauses

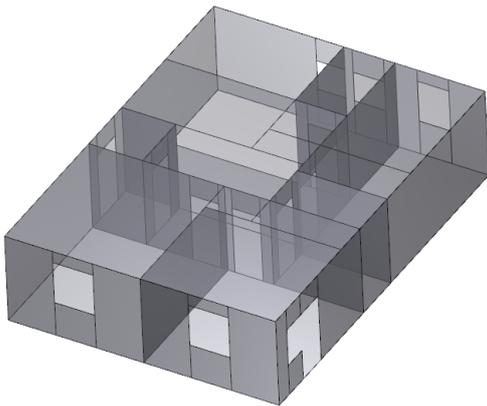


Abb. 2.2: Schematische Darstellung: Erdgeschoss

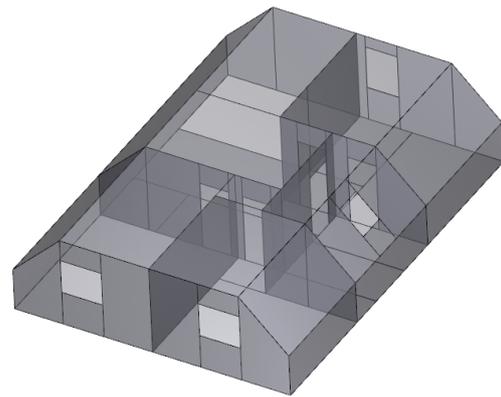


Abb. 2.3: Schematische Darstellung: Obergeschoss

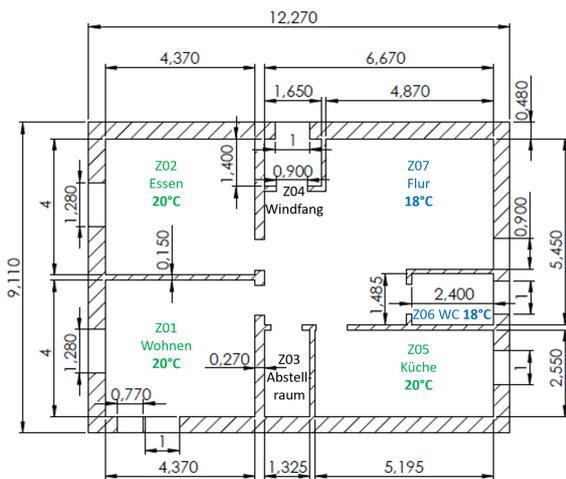


Abb. 2.4: Grundriss: Erdgeschoss

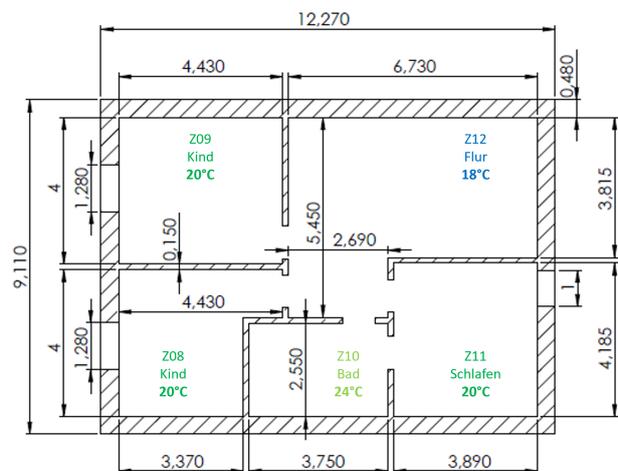


Abb. 2.5: Grundriss: Obergeschoss

### 2.3 Wärmeverteilung, Wärmeübergabe und Regelung

Anlagentechnisch wird das Gebäude mit einem klassischen Zweirohrheizungssystem ausgestattet. Wie in der Abb. 2.6 dokumentiert, gibt es insgesamt 11 freie Heizflächen, welche über eine etagenweise Ringverteilung über eine Steigleitung miteinander verbunden sind. Zusätzlich befindet sich ein Heizkörper im Kellerbereich. Alle Teilstrecken des Heizungsnetzes werden gedämmt mit Ausnahme der Anschlussleitungen der Heizkörper.

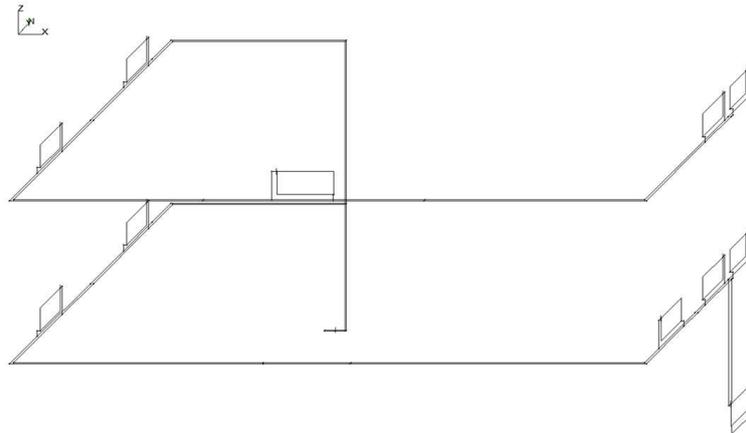


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des hydraulischen Netzes

Die Auslegung der heizungstechnischen Anlage mit Niedertemperaturkessel erfolgt entsprechend des Temperaturniveaus der Aufgabenstellung  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ . Über die Heizperiode wird eine witterungsgeführte Steuerung der Vorlauftemperatur entsprechend Gl. 2.1 vorgenommen.

Für die numerischen Untersuchungen mit Wärmepumpe erfolgt eine Absenkung des Temperaturniveaus der Heizungsanlage auf  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ . Eine erneute Auslegung der freien Heizflächen wird nicht vorgenommen. Im Rahmen der Studie wird davon ausgegangen, dass lediglich das Wärmeerzeugersystem (inklusive Speicher) getauscht wird. Sowohl die Gebäudehülle (Wärmedämmstandard) als auch die Heizkörper bleiben unverändert. Die fehlende Heizleistung aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus wird über den Einbau der Infrartheizungssysteme substituiert.

$$\vartheta_V = S \cdot \left( \varphi^{\frac{1}{1+m}} \cdot \Delta\vartheta_{m,N} + 0,5 \cdot \varphi \cdot \Delta\vartheta_N + \vartheta_i \right) + \Delta\vartheta \quad (2.1)$$

- $\varphi$  - Belastungsgrad
- $\vartheta_{m,N}$  - Übertemperatur unter Auslegungsbedingungen
- $\Delta\vartheta_N$  - Temperaturspreizung unter Auslegungsbedingungen
- $\vartheta_i$  - Innentemperatur unter Auslegungsbedingungen
- $m$  - Exponent
- $S$  - Faktor für Steilheit der Heizkurve
- $\Delta\vartheta$  - Parallelverschiebung der Heizkurve.

Neben den bereits genannten Temperaturniveaus der Vorlauftemperaturen der Wärmeerzeuger erfolgten außerdem numerische Untersuchungen mit weiter abgesenkten Vorlauftemperaturen gegenüber den Auslegungsbedingungen der Heizungsanlage. Die Heizkurve wurde auf die Auslegungstemperaturen  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$  reduziert. Innerhalb dieser Varianten wurde im Gegensatz zur Basisvariante in Abstimmung mit dem Auftraggeber auf eine örtliche Regeleinrichtung der freien Heizflächen verzichtet, d.h. die Wärmeübergabe der wasserführenden Heizkörper erfolgt unregelt. Weiterhin wurden drei verschiedene Varianten bezüglich der Regelung der Nachtabschaltung untersucht:

- Keine Nachtabschaltung über die gesamte Heizperiode.
- Mit Nachtabschaltung der zentralen Pumpe im Zeitraum von 22:00 bis 05:00 Uhr über die gesamte Heizperiode.
- Eine Nachtabschaltung der zentralen Pumpe im Zeitraum von 22:00 bis 05:00 Uhr in Abhängigkeit der Außentemperatur. Als Grenztemperatur wurde ein Wert von  $\vartheta_a = 3^\circ\text{C}$  gewählt, d.h. nur wenn die Außentemperatur höher als der definierte Grenzwert ist, erfolgt eine Nachtabschaltung der Pumpe.

## 2.4 Wärmeerzeugungssystem

Als Wärmeerzeugungssystem wird einerseits ein Niedertemperaturkessel ( $\dot{Q}_{\text{NTK},N} = 10 \text{ kW}$ ) verwendet. Alternativ erfolgt die Wärmeerzeugung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{\text{WP},N} = 10 \text{ kW}^2$ ), welche mit einem Parallelpufferspeicher mit einem Volumen von  $V = 200 \text{ l}$  gekoppelt ist. Die hierfür in TRNSYS-TUD verwendeten Modelle werden nachfolgend kurz vorgestellt.

### Gas-Niedertemperaturkessel

Das Simulationsmodell eines Gas-Brennwert- und Niedertemperaturkessels basiert auf einer Entwicklung von Kaiser [6]. Hierbei handelt es sich um ein nichtgeometrisches Modell mit einer vereinfachten Berücksichtigung der Strömungsvorgänge im Wärmeerzeuger. Dies bietet die Möglichkeit, eine wärmeerzeugerinterne Aufteilung des Gesamtmassestromes in einen beheizten und einen unbeheizten Teilstrom vorzunehmen. Die Darstellung des Kesselwirkungsgrades erfolgt als Funktion der mittleren Kessel(-wasser)temperatur. Es handelt sich dabei in erster Näherung um einen linearen Zusammenhang. Für die Betrachtung instationärer Verhältnisse stehen meist keine Angaben zur Verfügung. Im hier beschriebenen Modell wird deshalb für instationäre Betrachtungen von quasistationären Bedingungen innerhalb jedes Simulations-Zeitschrittes ausgegangen. Durch die Angabe der Werte des Kesselwirkungsgrades bei verschiedenen Stütztemperaturen kann durch eine programminterne lineare Approximation in Abhängigkeit der momentanen mittleren Kessel(-wasser)temperatur der zugehörige Wirkungsgrad ermittelt werden. Prinzipiell ist das Auftreten von Verlusten an den Schaltzustand des Brenners gekoppelt. So werden im Zeitraum des Brennerbetriebes folgende Verluste bilanziert:

- freie Wärme im Abgas (sensibler Abgasverlust)
- Strahlungswärmeverlust
- Verlust durch unvollkommene Verbrennung
- gebundene Wärme im Abgas (latenter Abgasverlust)

<sup>2</sup>Die Leistungswerte sind bezogen auf das Temperaturniveau:  $\vartheta_a/\vartheta_V = 7^\circ\text{C}/35^\circ\text{C}$ . Der Modulationsbereich beträgt  $\dot{Q}_{\text{WP},N} = 4, 5, \dots, 10 \text{ kW}$ .

Während der Brennerstillstandszeit treten Betriebsbereitschaftsverluste auf, deren Betrag wesentlich von der mittleren Kesseltemperatur abhängig ist.

Hinsichtlich der Regelung wird ein Kesselwassertempersensor nachgebildet, der eine entsprechende Zeitkonstante aufweist. Grundsätzlich umfasst die Regelung auf Basis des Sensorwertes verschiedene Funktionalitäten, wie z.B. die Regelung des Brennerschaltzustandes (Ein-/Aus-Betrieb, modulierend) sowie verschiedene Schalthysteresemodi.

### Wärmepumpe

Das Modell der Wärmepumpe baut auf das von Afjei [7] entwickelte TRNSYS-TUD Type 201 auf. Die Wärmepumpe wird dabei als Kennlinienmodell berücksichtigt. Das heißt, der eigentliche Kreisprozess wird nicht berechnet, sondern die Ermittlung von Kondensator- und Verdampferleistung erfolgt auf der Grundlage von funktionalen Zusammenhängen. Neben den Parametern der Kennlinien sind die Eingangsgrößen Verdampfer- und Kondensatoreintrittstemperatur sowie Kondensator- und Verdampfermassstrom erforderlich. Die stationäre Leistung des Kondensators und die Leistungsaufnahme des Verdichters werden mit den biquadratischen Polynomen

$$\dot{Q}_{WP} = b_{Q1} + b_{Q2} \cdot \vartheta_{V,e} + b_{Q3} \cdot \vartheta_{K,a} + b_{Q4} \cdot \vartheta_{V,e} \cdot \vartheta_{K,a} + b_{Q5} \cdot \vartheta_{V,e}^2 + b_{Q6} \cdot \vartheta_{K,a}^2 \quad (2.2)$$

$$P_{WP} = b_{P1} + b_{P2} \cdot \vartheta_{V,e} + b_{P3} \cdot \vartheta_{K,a} + b_{P4} \cdot \vartheta_{V,e} \cdot \vartheta_{K,a} + b_{P5} \cdot \vartheta_{V,e}^2 + b_{P6} \cdot \vartheta_{K,a}^2 \quad (2.3)$$

berechnet. Die Bestimmung der Polynom-Koeffizienten erfolgt durch eine Regressionsanalyse unter Nutzung von Herstellerdaten.

Das Type 201 wurde an der Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung angepasst und um Zusatzfunktionen, wie z.B. die Berücksichtigung von Sperrzeiten und die Begrenzung auf eine maximale Anzahl von Schaltzyklen, erweitert. Weiterhin wurde die Nachbildung dynamischer Effekte verbessert und die Bilanzierung so verändert, dass es mit dem Modell möglich ist, eine detaillierte Berücksichtigung der einzelnen Verbraucher in der Wärmepumpe vorzunehmen.

Wärmepumpen werden typischerweise über Parallelpufferspeicher an das Heiznetz angebunden<sup>3</sup>. Somit wird auch die hydraulische Trennung zwischen Verbraucher- und Wärmepumpenkreis direkt über den Speicher hergestellt. Die Regelung der Wärmepumpe erfolgt in Abhängigkeit zweier Temperaturfühler im Speicher. Wird am oberen Temperaturfühler der Sollwert nach Heizkurve unterschritten, erfolgt die Einschaltung der Wärmepumpe solange bis am unteren Speichertemperaturfühler auch der Sollwert erreicht ist.

### Infrarotheizung

Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Einbausituationen der Infrarotheizung zu gewährleisten, wird keine exakte geometrische Position vorgegeben, sondern die Wärmeabgabe der Heizelemente erfolgt konvektiv direkt an den Raumluftknoten und radiativ gleichverteilt auf die Raumumfassungskonstruktion. Der Strahlungsanteil kann hierbei variiert werden. Die thermische Speicherfähigkeit wird berücksichtigt, indem ein PT1-Verhalten modelliert wird. Die leistungsbezogene speicherwirksame Wärmekapazität wird aus mittleren Herstellerwerten berechnet und beträgt  $c = 6,36 \text{ kJ}/(\text{kW} \cdot \text{K})$ .

Infrarotheizungen werden in allen Aufenthaltsräumen (grüne Markierung in Abb. 2.4 und 2.5) im

---

<sup>3</sup>Die hydraulischen Einbindungsmöglichkeiten in das Heiznetz sind vielfältig. Es können auch Reihenpufferspeicher oder bei Flächenheizungen Systeme ohne Pufferspeicher realisiert werden

Modell vorgesehen. Die Leistung der Infrarotheizung wird hierbei jeweils auf die Raumheizlast bemessen.

## 2.5 Nutzungsprofile, innere Gewinne und Luftwechsel

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine intermittierende Betriebsweise für das Nutzerverhalten umgesetzt. Eine Unterscheidung zwischen Wochentagen und Wochenenden wurde nicht vorgenommen.

Die intermittierende Betriebsweise ist dadurch gekennzeichnet, dass für alle Räume individuelle Nutzungsphasen in den Berechnungen hinterlegt wurden. Die einzelnen Profile dokumentieren die Abbildungen 2.7 bis 2.14. Die ebenfalls individuell angepassten Profile der Luftwechselraten bzw. der inneren Gewinne zeigen die Abbildungen im Anhang A.1. Zusätzlich wurde aus Vergleichsgründen eine Simulation mit einer durchgehenden Betriebsweise gerechnet.

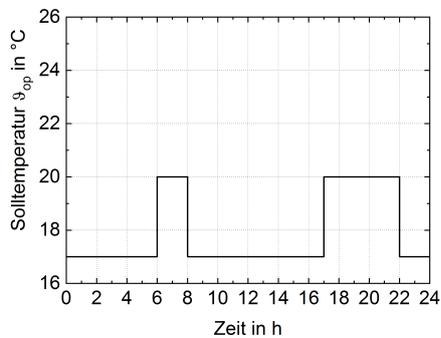


Abb. 2.7: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Wohnzimmer (Zone 1)

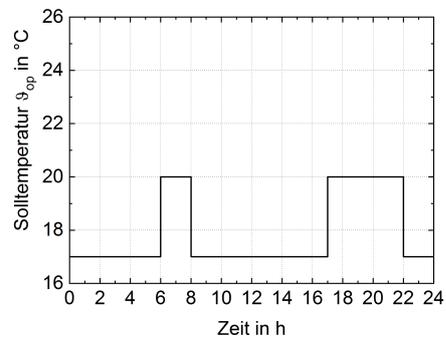


Abb. 2.8: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Esszimmer (Zone 2)

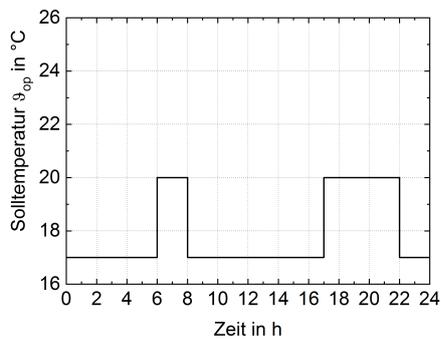


Abb. 2.9: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Küche (Zone 5)

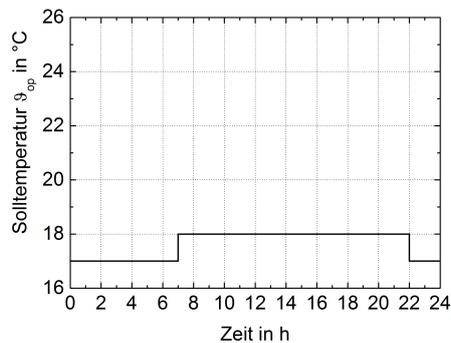


Abb. 2.10: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - WC (Zone 6)

## 2 Randbedingungen

---

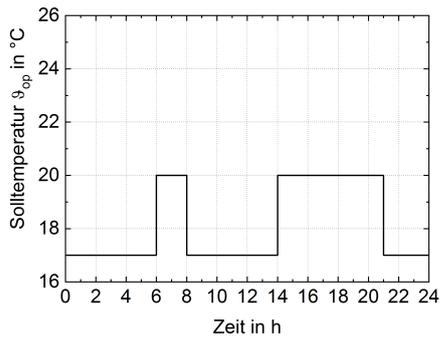


Abb. 2.11: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Kinder 1/2 (Zone 8/9)

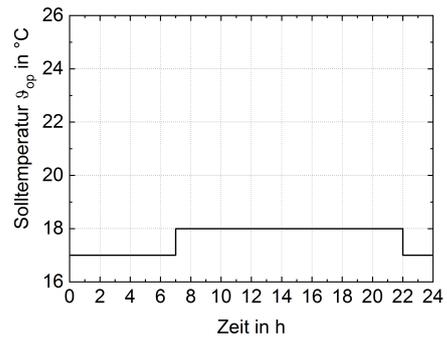


Abb. 2.12: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Schlafzimmer (Zone 11)

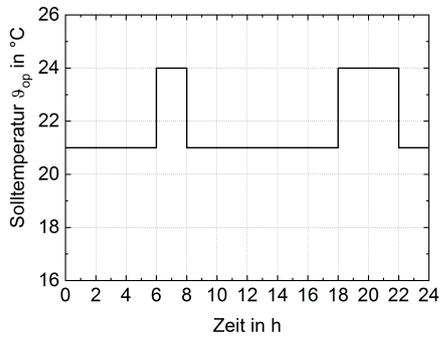


Abb. 2.13: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Bad (Zone 10)

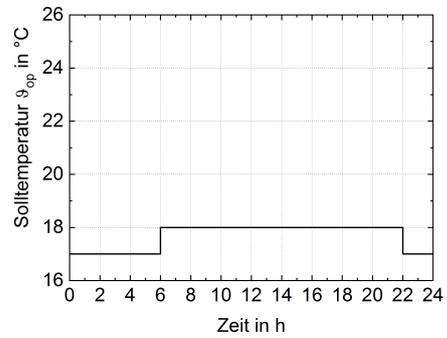


Abb. 2.14: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Flur KG/ EG/ 1.OG (Zonen 7/ 12/ 14)

## 2.6 Variantenmatrix

Entsprechend der Aufgabenstellung wird im Rahmen der Studie folgende Variantenmatrix (siehe Tab. 2.2) umgesetzt.

Tabelle 2.2: Variantenmatrix

Wärmeerzeuger	Wärmeübergabesystem	Heizkurve ( $\vartheta_V/\vartheta_R$ ) u. Anheizzeit	Heizgrenztemperatur	Nachtab-schaltung (NA)	örtliche Regeleinrichtung	
					Heizkörper	IRH
Nieder-temperatur-kessel	Freie Heizflächen (Basisvariante)	70°C/55°C Anheizzeit: 3 h	15°C	ohne NA	ja	-
		70°C/55°C durchgehend	15°C	ohne NA	ja	-
	Freie Heizflächen + Infrarotheizung	40°C/30°C	15°C	ohne NA	nein	ja
		40°C/30°C	15°C	mit NA	nein	ja
		40°C/30°C	15°C	mit NA ( $f(\vartheta_a)$ )	nein	ja
		40°C/30°C	10°C	ohne NA	nein	ja
		40°C/30°C	10°C	mit NA	nein	ja
		40°C/30°C	10°C	mit NA ( $f(\vartheta_a)$ )	nein	ja
	Infrarotheizung	Stützttemp. 17°C	-	-	-	ja
		Stützttemp. 18°C	-	-	-	ja
Stützttemp. 19°C		-	-	-	ja	
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Freie Heizflächen	55°C/45°C Anheizzeit: 3 h	15°C	ohne NA	ja	-
		40°C/30°C	15°C	ohne NA	nein	ja
	Freie Heizflächen + Infrarotheizung	40°C/30°C	15°C	mit NA	nein	ja
		40°C/30°C	15°C	mit NA ( $f(\vartheta_a)$ )	nein	ja
		40°C/30°C	10°C	ohne NA	nein	ja
		40°C/30°C	10°C	mit NA	nein	ja
		40°C/30°C	10°C	mit NA ( $f(\vartheta_a)$ )	nein	ja

Alle Variantenrechnungen werden für das beschriebene repräsentative Einfamilienhauses mit dem Wärmeschutzniveau WSVO95 realisiert. Es erfolgt eine Unterscheidung:

- des Wärmeerzeugungssystems in Niedertemperaturkessel und Luft-Wasser-Wärmepumpe,
- des Wärmeübergabesystems in freie Heizflächen mit und ohne Infrarotheizung sowie nur Infrarotheizung,
- der Vorlauftemperatur des Heizungsnetzes,
- der Heizgrenztemperatur sowie
- der Regelung der Nachtab-schaltung.

Zusätzlich erfolgte aus Vergleichsgründen eine Simulation der Basisvariante<sup>4</sup> im durchgehenden Betrieb. Des weiteren wurde zu Beginn der Studie eine Voruntersuchung zum Einfluss der Strahlungswirkungsgrad durchgeführt. Diese wurden variiert zwischen 40 % und 60 %. Aufgrund des

<sup>4</sup>Basisvariante: NT-Kessel, ausschließlich freie Heizflächen bei  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 70\text{ °C}/55\text{ °C}/20\text{ °C}$ , Heizgrenztemperatur:  $\vartheta_{HGR} = 15\text{ °C}$

verwendeten Knotenmodells ist der Einfluss jedoch sehr gering, deshalb wurde in den weiteren numerischen Untersuchungen auf diese zusätzliche Unterscheidung verzichtet. Für die oben beschriebene Matrix wurde ein Strahlungswirkungsgrad der Infrarotheizungen von 50 % zugrunde gelegt. Der Fokus der Auswertung der Varianten liegt auf der Analyse der energetischen Kennwerte und natürlich insbesondere auf der wärmephysiologischen Bewertung der operativen Raumtemperaturen.

## 3 Numerische Analysen

### 3.1 Niedertemperaturkessel

#### 3.1.1 Basisvariante: Freie Heizflächen

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der Basisvariante sowohl für den intermittierenden Betrieb als auch für den durchgehenden Betrieb dokumentiert. Zugrundegelegt ist die Heizkurve entsprechend Kapitel 2.3 für das Temperaturniveau  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ . Innerhalb der Varianten erfolgt die Wärmeübergabe ausschließlich mit freien Heizflächen. Die Ergebnisse dienen in den weiteren Betrachtungen als Referenz- bzw. Vergleichswerte.

Die Abb. 3.1 und 3.2 zeigen die Summenhäufigkeit der operativen Raumtemperatur während der Nutzungszeit für die gesamte Heizperiode am Beispiel der Zone 2 (Esszimmer). Diese Auswertung bildet die Grundlage für die Einschätzung der energetische Vergleichbarkeit der verschiedenen Variantenrechnungen. Innerhalb der Basisvarianten ist die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit gegeben. Leicht erhöhte operative Raumtemperaturen können auf innere und solare Gewinne zurückgeführt werden.

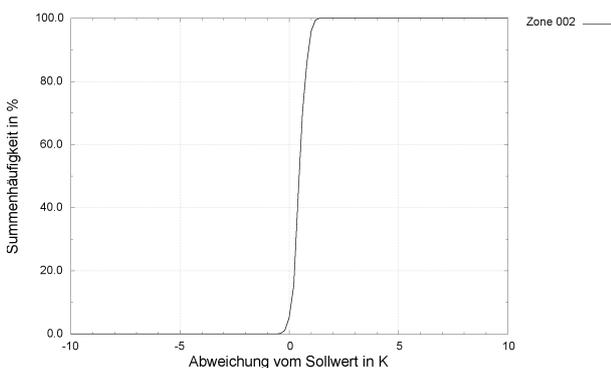


Abb. 3.1: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , intermittierender Betrieb

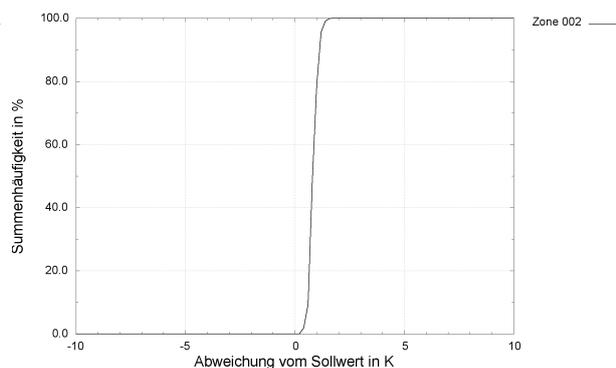


Abb. 3.2: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , durchgehender Betrieb

Detaillierte Temperaturverläufe der Raumtemperaturen enthalten die Abb. 3.3 sowie 3.4 für einen Tag mit mittleren Außentemperaturen<sup>5</sup>. Die Variante mit intermittierendem Betrieb enthält eine Anheizzeit von  $\tau = 3$  h jeweils vor den Nutzungszeiten. Neben den Empfindungstemperaturen (Empf.) werden die Lufttemperaturen (Luft), die Schließtemperaturen der Thermostatregelventile (Soll TRV) sowie die definierten Solltemperaturen (Nutz) während der Nutzungszeit bzw. die Stütztemperatur außerhalb der Nutzungszeit dargestellt. Beide Diagramme belegen, dass die gewünschte Solltemperatur während der Nutzungszeit eingehalten werden kann. Die zugehörige Wärmeabgabe der freien Heizflächen innerhalb der Zone 2 dokumentieren die Abb. 3.5 und 3.6. Während im durchgehenden Betrieb eine fast konstante Wärmeabgabe der Heizfläche zu verzeichnen ist, treten im intermittierenden Betrieb deutlich höhere Werte innerhalb der Nutzungszeit auf während die Wärmeabgabe im Stützbetrieb sehr gering ist. Ein Absenken der Wärmeabgabe auf 0 wird nicht erreicht, da innerhalb des Einfamilienhauses für die einzelnen Räume unterschiedliche Nutzungszeiten definiert wurden so dass es trotz geschlossenen Thermostatventilen der Zone 02 zur Wärmeabgabe über das Rohrleitungsnetz kommt.

<sup>5</sup>Die Tagesgänge der Außentemperaturen für die gewählten Typtage können den Abb. A.12 bis A.14 entnommen werden

Die Auswertung der Temperaturverläufe sowie der Wärmeabgaben der freien Heizflächen für den kalten Typtag während der Heizperiode können dem Anhang A.4.1 Abb. A.15 bis A.18 entnommen werden<sup>6</sup>.

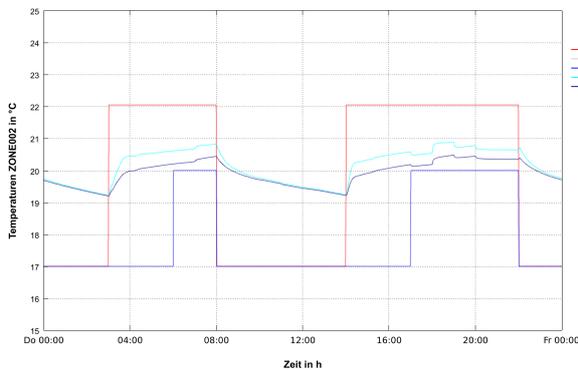


Abb. 3.3: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , intermittierender Betrieb

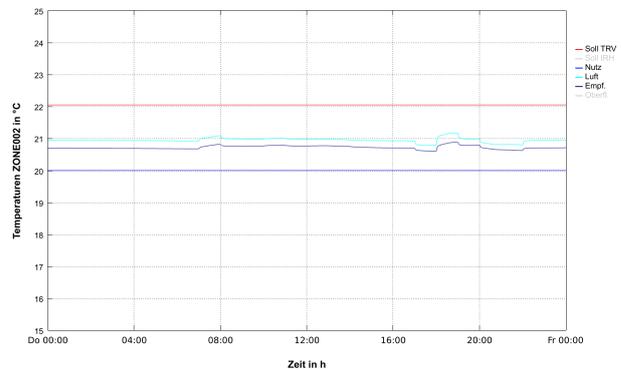


Abb. 3.4: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , durchgehender Betrieb

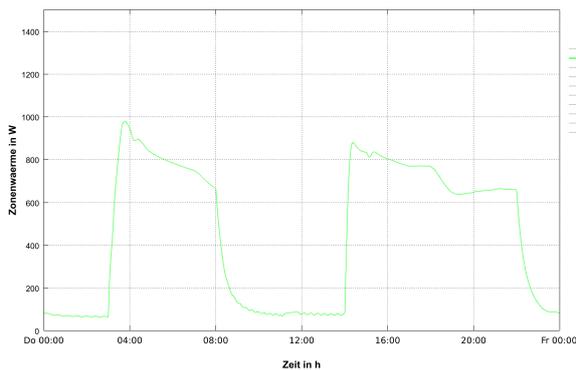


Abb. 3.5: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , intermittierender Betrieb

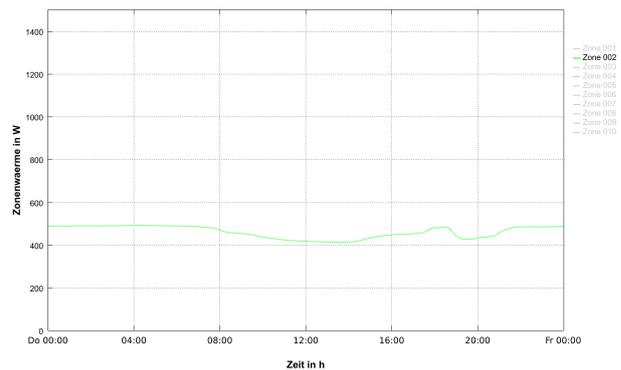


Abb. 3.6: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , durchgehender Betrieb

Die energetische Auswertung der Basisvarianten enthält Tabelle 3.1. Es wird in die Größen unterschieden: Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz},\text{FH}}$  und die Endenergie  $Q_{\text{End}}$ . Unter Nutzenergie ist die Summe der Wärmeübergabe aller Zonen ohne Erzeugungsverluste zu verstehen, während die Endenergie alle Verluste beinhaltet.

<sup>6</sup>In den Abb. 3.3 und 3.4 ist als "rote" Kurve die Schließtemperatur des TRV dokumentiert. Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit wird die Empfindungstemperatur verwendet. Der Sollwert stellt die Kurve mit der Bezeichnung "Nutz" dar.

Tabelle 3.1: End- und Nutzenergie der Basisvarianten mit NT-Kessel

Wärme- erzeugung	Wärme- übergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$	$\vartheta_{HGR}$	Nachtab- schaltung	Betriebsweise	$Q_{Nutz, FH}$ kWh	$Q_{End}$ kWh
NT	freie Heizfläche	70/55 °C	15 °C	ohne	intermittierend (Anheizzeit: 3 h)	14608	15152
NT	freie Heizfläche	70/55 °C	15 °C	ohne	durchgehend	17633	18231

### 3.1.2 Kombination: Freie Heizflächen und Infrarotheizung

#### 3.1.2.1 Vergleich der Varianten mit und ohne Nachtabschaltung

Die Abb. 3.7 bis 3.9 dokumentieren die Summenhäufigkeit der einzelnen Varianten während der Nutzungszeit über die gesamte Heizperiode am Beispiel der Zone 02. In den Varianten wird in Absprache mit dem Auftraggeber auf eine örtliche Regeleinrichtung der freien Heizflächen verzichtet. Insbesondere in der Variante ohne Nachtabschaltung können keine signifikanten Auskühlphasen identifiziert werden. Die thermische Behaglichkeit, d.h. das Einhalten der Solltemperaturen während der Nutzungszeit, ist in den Varianten ohne Nachtabschaltung und mit Nachtabschaltung in Abhängigkeit der Außentemperatur weitestgehend erfüllt. Allerdings treten geringe Unterschreitungen der Solltemperaturen innerhalb der Nutzungszeit auf. In der Variante mit Nachtabschaltung treten höhere und längere Unterschreitungen der Solltemperaturen im Bereich von bis zu  $\Delta\vartheta_{op} = 2$  K auf.

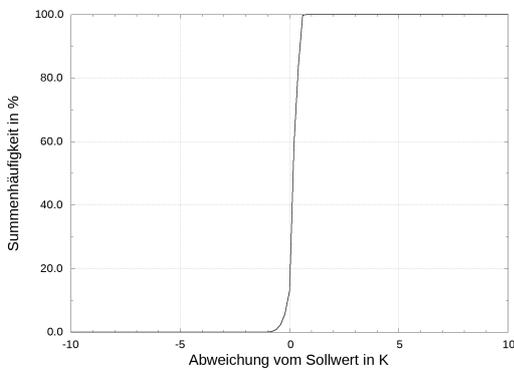


Abb. 3.7: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

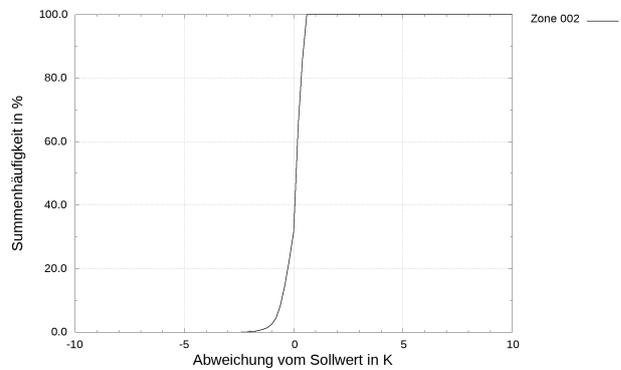


Abb. 3.8: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

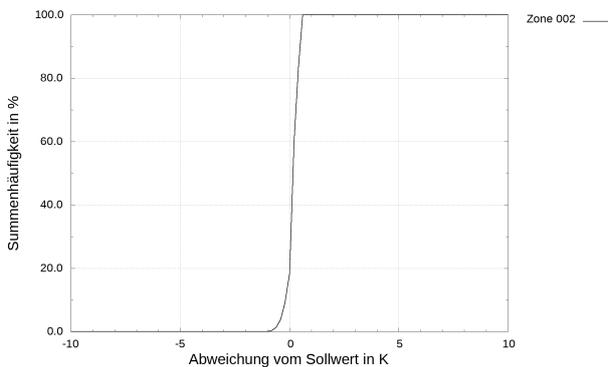


Abb. 3.9: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung ( $f(\vartheta_a)$ )

Die Abb. 3.10 bis 3.12 zeigen die Auswertung der Temperatur- und Leistungsverläufe für den Tag mit mittleren Außentemperaturen und ohne Nachtabschaltung. Die Abb. 3.10 belegt die Ergebnisse der Summenhäufigkeit. Jeweils zu Beginn der Nutzungszeit kommt es zu einer Unterschreitung der Solltemperatur. Innerhalb der beheizten Zonen kommt es aufgrund der fehlenden Thermostatregelventile und der daraus resultierenden „Dauerbeheizung“ der Räume (siehe Abb. 3.12) nur zu einer geringen Abkühlung während der Nichtnutzungsphasen. Die Empfindungstemperatur fällt nicht unter  $\vartheta_{op} = 19^\circ\text{C}$ . Die Wärmeabgabe über die Infrarotheizung dokumentiert Abb. 3.11.

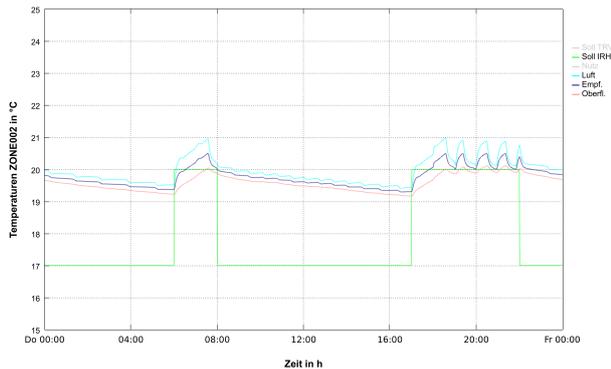


Abb. 3.10: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

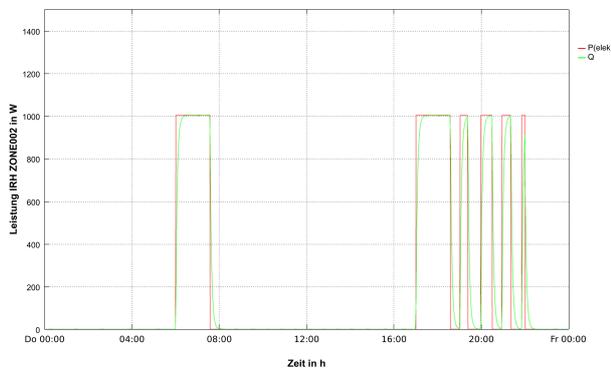


Abb. 3.11: Wärmeabgabe der Infrarotheizung (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

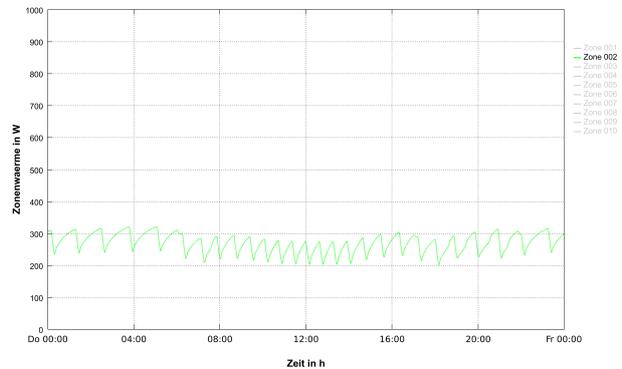


Abb. 3.12: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

Analog zu den Diagrammen bei mittleren Außentemperaturen dokumentieren die Abb. 3.13 bis 3.15 die Verläufe der Variante ohne Nachtabschaltung bei kalten Außentemperaturen. Hier zeigt die Abb. 3.14, dass aufgrund der sehr niedrigen Außentemperaturen der Einsatz der Infrarotheizung nahezu ununterbrochen notwendig ist. Der Verlauf der Raumtemperaturen kann der Abb. 3.13 entnommen werden. Auch hier zeigt sich die Unterschreitung der Solltemperatur zu Beginn der Nutzungszeit. Die Abb. A.19 bis A.21 im Anhang A.4.2 zeigen die Verläufe bei warmen Außentemperaturen.

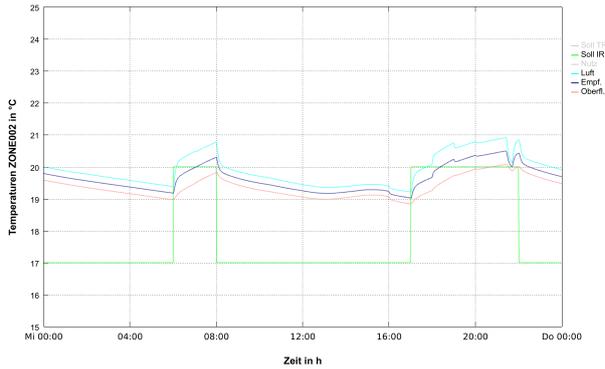


Abb. 3.13: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

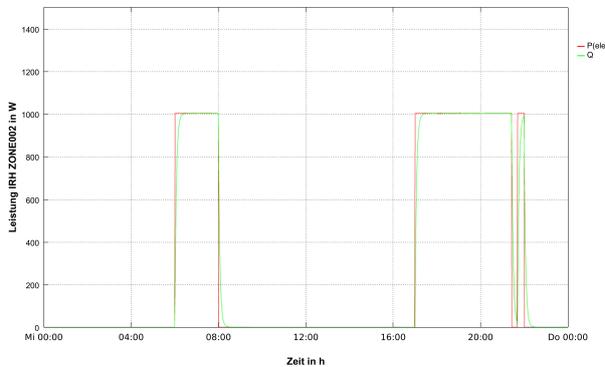


Abb. 3.14: Wärmeabgabe der Infrarotheizung (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

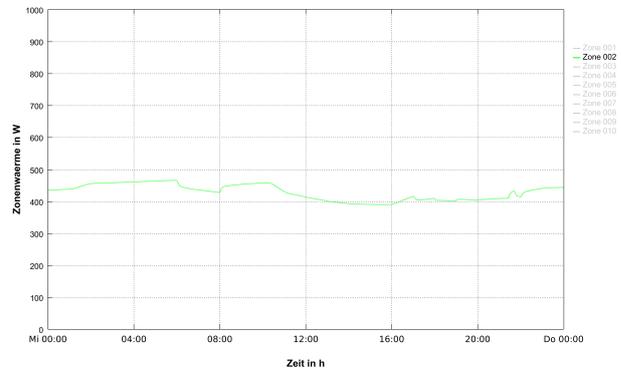


Abb. 3.15: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

Des weiteren erfolgte die Auswertung der Verläufe mit Nachtabschaltung bei mittleren Außentemperaturen. Die Ergebnisse zeigen die Abb. 3.16 bis 3.18. Aufgrund der Nachtabschaltung kommt es zu einer stärkeren Abkühlung der Raumtemperaturen während der Nachtstunden, bereits bei mittleren Außentemperaturen ist folglich ein nahezu permanenter Betrieb der Infrarotheizungen während der Nutzungszeit nötig. Wie in Abb. 3.16 zu sehen, kommt es zu Beginn der Nutzungszeit zu einer deutlichen Unterschreitung der Solltemperatur. Die gewünschte operative Raumtemperatur stellt sich erst zum Ende der morgendlichen Nutzungszeit ein. Die Ergebnisse der Typtage „kalt“ und „warm“ sind im Anhang zu finden (A.4.3 Abb. A.22 bis A.27). Wie bereits zu erwarten, sind die auftretenden Effekte (Höhe und Dauer der Sollwertunterschreitungen) an Tagen mit sehr niedrigen Außentemperaturen stärker ausgeprägt.

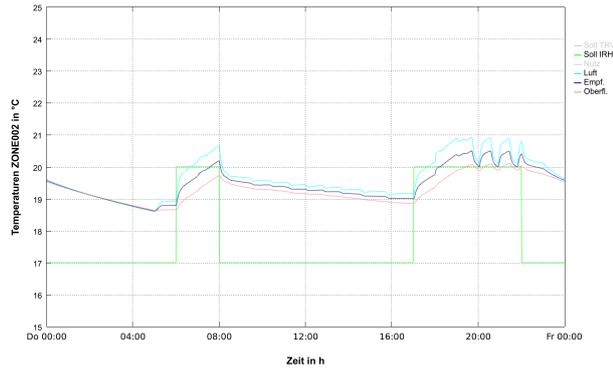


Abb. 3.16: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

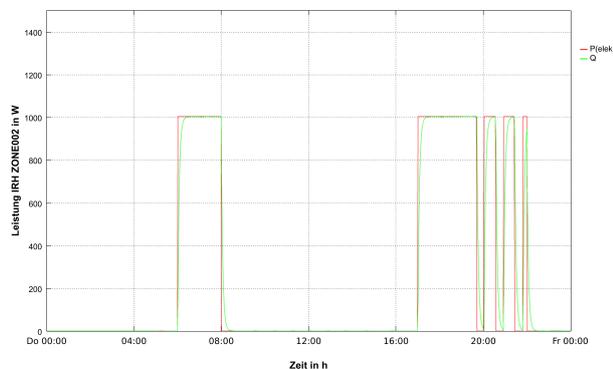


Abb. 3.17: Wärmeabgabe der Infrartheizung (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

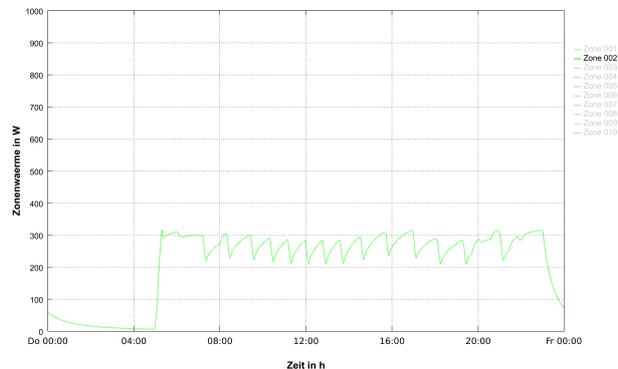


Abb. 3.18: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

### 3.1.2.2 Vergleich der Varianten mit unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen

Die oben beschriebenen Varianten wurden alle mit einer Heizgrenztemperatur von  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$  gerechnet. Den Vergleich der Summenhäufigkeit mit einer Heizgrenztemperatur von  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$  dokumentieren die Abb. 3.19 und 3.20. Den Vergleich der Raumtemperaturverläufe zeigen die Abb. 3.21 und 3.22. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einfluss der Heizgrenztemperatur unter den definierten Randbedingungen gering ist. Die auftretenden Tendenzen stimmen für alle Varianten überein:

- Es ergeben sich identische Temperaturverläufe.
- Der Anteil der Infrartheizung steigt leicht an.
- Die Endenergie sinkt geringfügig.

Bei gegebenem Wärmeschutzniveau ist eine Absenkung der Heizgrenztemperatur folglich auf  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$  möglich.

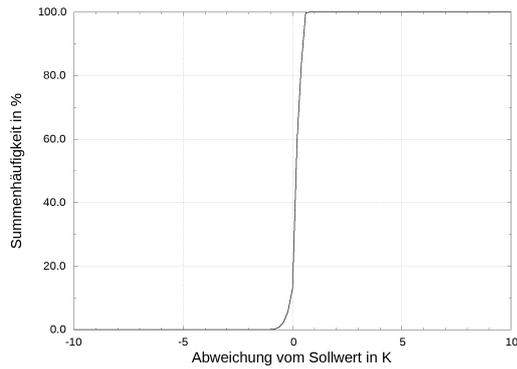


Abb. 3.19: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

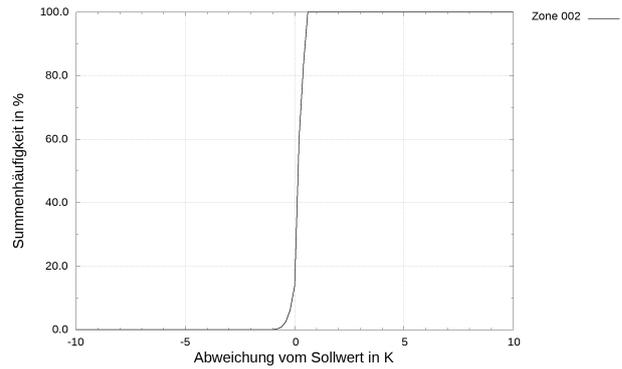


Abb. 3.20: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$

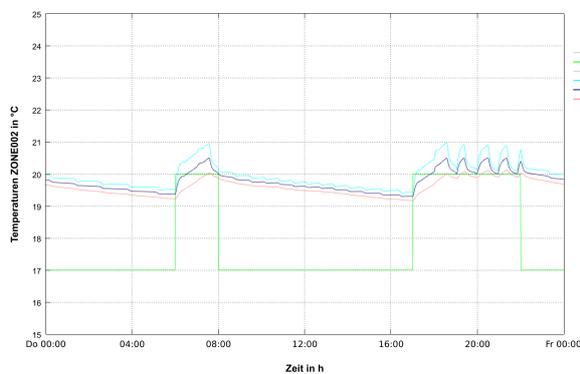


Abb. 3.21: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

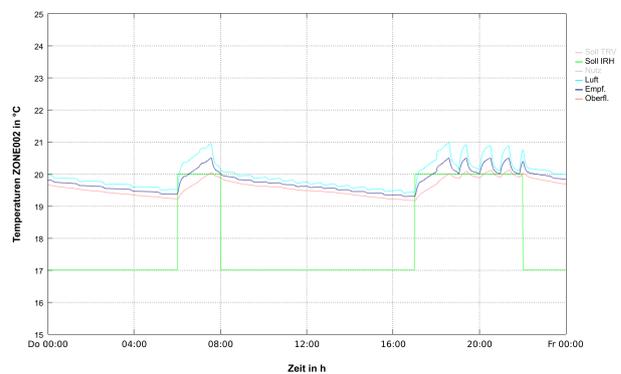


Abb. 3.22: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$

### 3.1.2.3 Energetischer Vergleich

Die Tabelle 3.2 fasst die energetischen Kennwerte der Varianten mit NT-Kessel und Berücksichtigung einer Infrartheizung in den Aufenthaltsräumen zusammen. Zusammenfassend lassen sich für die Varianten mit NT-Kessel und dem kombinierten Betrieb der freien Heizflächen und Infrartheizung folgende Aussagen treffen:

- Die Absenkung der Heizgrenztemperatur bei dem vorhandenen Wärmedämmstandard ist möglich.
- Die Nachtabschaltungen während der gesamten Heizperiode führen (bei den untersuchten Vorlauftemperaturen) zu deutlichen Unterschreitungen der Solltemperaturen während der Nutzungszeiten. Eine Verbesserung der Einhaltung der thermischen Behaglichkeit kann durch außentemperaturabhängige Abschaltung der zentralen Heizungspumpe realisiert werden. Allerdings treten auch dann geringe Unterschreitungen der Solltemperaturen zu Beginn der Nutzungszeiten auf.
- Der Anteil der Infrartheizung an der Nutzenergie liegt bei 26,2 – 37,9 % bzw. 25,5 bis 37,0 % bezogen auf die Endenergie.

Tabelle 3.2: End- und Nutzenergie der Varianten mit NT-Kessel, IR-Heizung in Aufenthaltsräumen (intermittierende Betriebsweise)

WE	WÜ	$\vartheta_V/\vartheta_R$	$\vartheta_{HGR}$	NA	$Q_{Nutz,FH}$ kWh	$Q_{IRH}$ kWh	$Q_F$ kWh	$Q_{Nutz}$ kWh	$Q_{End}$ kWh	$\frac{Q_{IRH}}{Q_{Nutz}}$ %	$\frac{Q_{IRH}}{Q_{End}}$ %
NT	FH & IRH	40°C/30°C	15°C	ohne	10959	3892	11351	14851	15243	26,2	25,5
				mit f( $\vartheta_a$ )	8840	5043	9162	13883	14205	36,3	35,5
			10°C	ohne	10649	4075	11030	14724	15105	27,7	27,0
				mit f( $\vartheta_a$ )	8552	5219	8868	13771	14087	37,9	37,0
					9796	4591	10150	14387	14741	31,9	31,1

### 3.1.3 100% Infrarotheizung

Um das maximale Potential abzuschätzen, welches die stark bedarfsgeführte Beheizung mit Infrarotheizung ermöglicht, wurden Vergleichsvarianten berechnet, bei denen die Raumbeheizung ausschließlich mit der Infrarotheizung erfolgt. Hierbei wurden neben den Aufenthaltsräumen auch die Nebenräume mit einer Infrarotheizung ausgestattet, da keine Grundbeheizung durch ein anderes System erfolgt. Wie die Abb. 3.23 zeigt, werden bei einer Stütztemperatur von  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 17^\circ\text{C}$ , die wärmephysiologischen Anforderungen während der Nutzungszeit nur unzureichend eingehalten. Eine Verbesserung kann durch die Anhebung der Stütztemperatur auf  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 18^\circ\text{C}$  bzw.  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 19^\circ\text{C}$  erreicht werden, wie die Abb. 3.24 und 3.25 belegen.

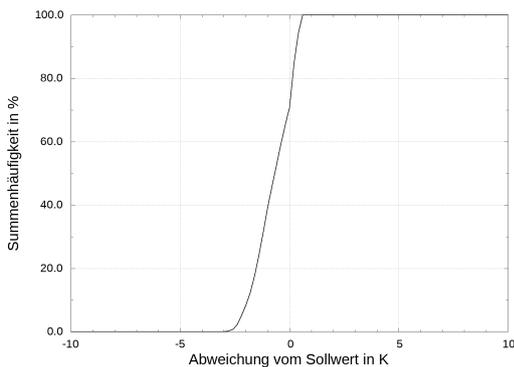


Abb. 3.23: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 17^\circ\text{C}$

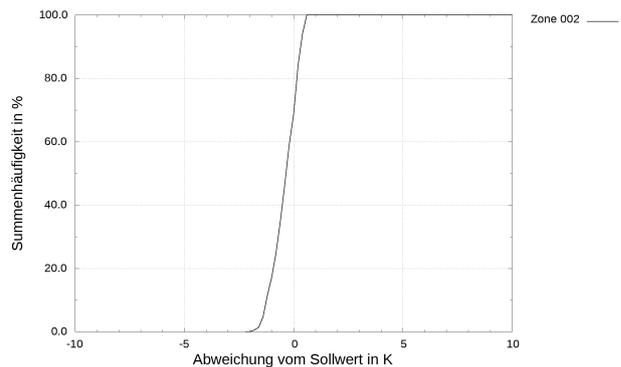


Abb. 3.24: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 18^\circ\text{C}$

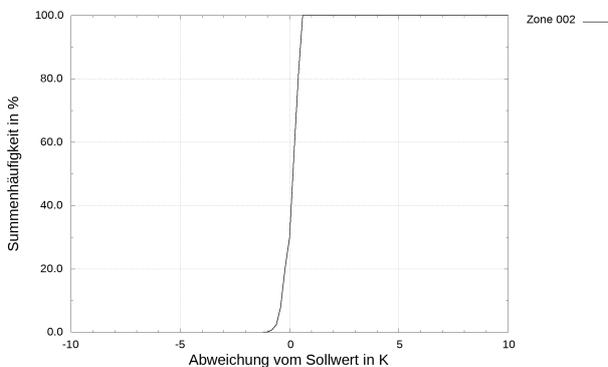


Abb. 3.25: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: Nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 19^\circ\text{C}$

Die Abb. 3.26 verdeutlicht, dass bei mittleren Temperaturen mit einer Stütztemperatur von  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 17^\circ\text{C}$  die Solltemperatur während der Nutzungszeit nicht erreicht wird. Erwartungsgemäß verschärft sich das Temperaturdefizit bei kälteren Außentemperaturen (Abb. 3.27). Bei einer erhöhten Stütztemperatur von  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 19^\circ\text{C}$  wird bei mittleren Außentemperaturen der Sollwert mit Verzögerung erreicht (Abb. 3.28). Bei kalten Außentemperaturen wird der Sollwert am Vormittag aufgrund der kurzen Nutzungszeit nicht erreicht (Abb. 3.29).

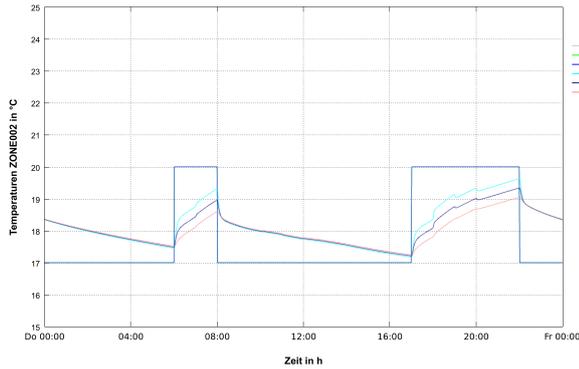


Abb. 3.26: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 17^\circ\text{C}$

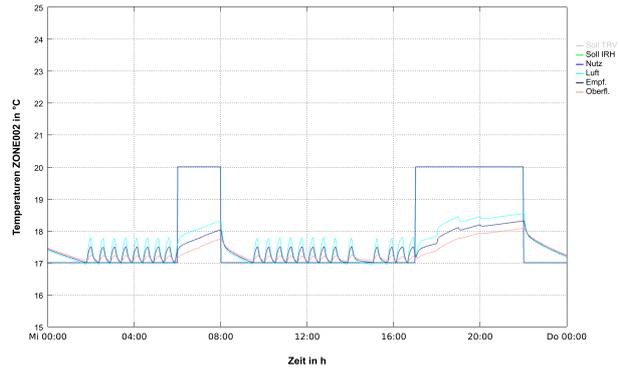


Abb. 3.27: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 17^\circ\text{C}$

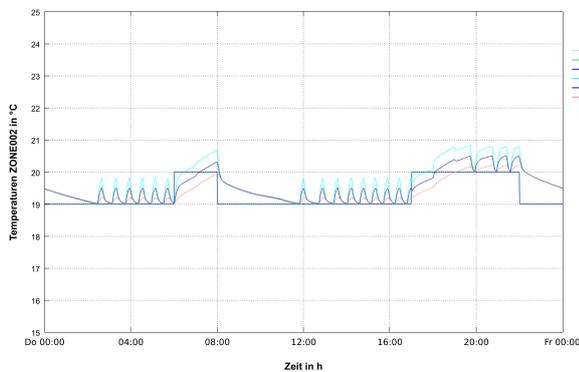


Abb. 3.28: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 19^\circ\text{C}$

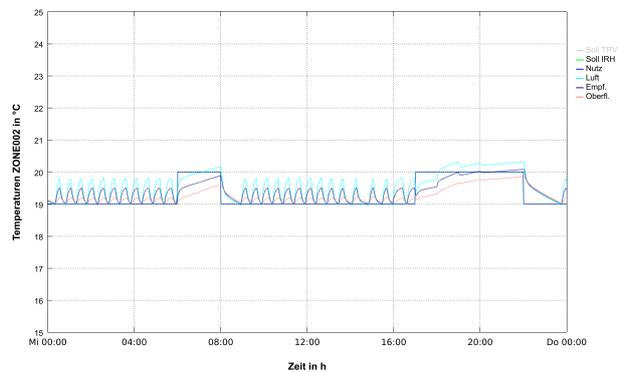


Abb. 3.29: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: nur Infrarotheizung,  $\vartheta_{\text{Stütz}} = 19^\circ\text{C}$

Die Tabelle 3.3 fasst die energetischen Kennwerte der Untersuchungen mit ausschließlicher Infrarotheizung zusammen. Wie oben dargelegt, bieten die Ergebnisse jedoch lediglich eine Orientierung, da ein direkter Vergleich mit anderen Varianten aufgrund teilweise eingeschränkter wärmephysiologischer Verhältnisse nicht zulässig ist. Erwartungsgemäß steigt mit zunehmender Stütztemperatur der Energieaufwand für die Beheizung der Räume an.

Tabelle 3.3: Endenergie, intermittierender Betrieb, ausschließlich Infrarotheizung

Wärmeübergabe	Stütztemperatur	Summe Endenergie in kWh
Infrarotheizung	17°C	14671
	18°C	14871
	19°C	15173

## 3.2 Luft-Wasser-Wärmepumpe

### 3.2.1 Basisvariante: Freie Heizflächen

Der Einsatz von Wärmepumpen bedingt gegenüber konventionellen Erzeugern wie z.B. Heizkesseln eine Reduktion der Systemtemperaturen. Dies hat zum einen funktionelle Gründe, da in vielen Fällen die Wahl des Kältemittels und die Auslegung der Komponenten auf tiefere Temperaturen optimiert ist und höhere Temperaturen (geräteabhängig ca.  $\vartheta_{V,\max} = 55^\circ\text{C}$ ) nicht erreicht werden können und die Geräte in die Hochdruckabschaltung gehen. Zum anderen begründen nicht zuletzt Aspekte der Energieeffizienz die Wahl geringer Systemtemperaturen, da die Arbeitszahlen von Wärmepumpen mit geringerem Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke bedingt durch den Carnot-Wirkungsgrad steigen. Dementsprechend wurde zunächst eine Variante mit Wärmeübergabe ausschließlich über freien Heizflächen untersucht, in welcher die Heizkurve auf ein maximales Temperaturniveau von  $\vartheta_V/\vartheta_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$  abgesenkt wurde. Die Größe bzw. Auslegung der freien Heizflächen wurde jedoch gegenüber der Variante mit  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$  nicht verändert.

Die Abb. 3.30 zeigt die Summenhäufigkeit der operativen Raumtemperatur während der Nutzungszeit für die gesamte Heizperiode am Beispiel der Zone 2 (Esszimmer). Es wird deutlich dass die nicht auf die geringen Systemtemperaturen angepasste Dimensionierung der Heizflächen zu einem Leistungsdefizit bei der Wärmeübergabe führt und die geforderten Raumsollwerte während der Nutzungszeit nicht erreicht werden können. Wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, wird das Leistungsdefizit daher mit einem ergänzendem Infrarotheizungssystem kompensiert.

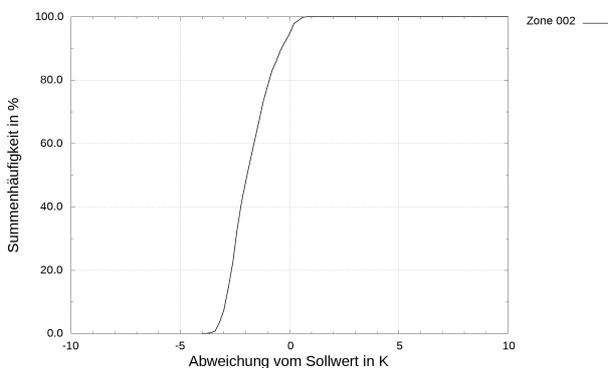


Abb. 3.30: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante:  
WP nur freie Heizflächen,  $\vartheta_V/\vartheta_R =$   
 $55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ , intermittierender Betrieb

### 3.2.2 Kombination: Freie Heizflächen und Infrarotheizung

Grundsätzlich werden die wärmephysiologischen Verhältnisse in den Räumen durch die Art der Wärmeerzeugung nur im geringen Maße beeinflusst, da im Vergleich zum NT-Kessel mit identischen Maximalleistungen sowie Sollwerten für die Vorlauftemperaturregelung gearbeitet wird. Kleine Differenzen ergeben sich nur aufgrund hydraulischer und regelungstechnischer Spezifika (Taktverhalten, Modulation, Speichereinbindung). Nachfolgend werden die Auswirkungen der variierten Parameter auf die Verläufe und Summenhäufigkeiten der Temperatur daher nur für ausgewählte Aspekte dargestellt. Weitere grundsätzliche Tendenzen lassen sich vom NT-Kessel auf die Wärmepumpe übertragen (entsprechend Kap. 3.1.2).

### 3.2.2.1 Vergleich der Varianten mit unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen

Analog der Varianten für den NT-Kessel werden nachfolgend die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen bei unterschiedlichen Heizgrenztemperaturen gegenüber gestellt. Anhand der Summenhäufigkeit der Raumtemperaturen in Zone 02 erfolgt der Vergleich für die Heizgrenztemperaturen von  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$ . Die Vorlauftemperaturen entsprechen der Heizkurve mit dem Temperaturniveau  $\vartheta_{\text{V}}/\vartheta_{\text{R}} = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$  für die 3 Varianten: ohne Nachtabschaltung (Abb. 3.31 und Abb. 3.32), mit Nachtabschaltung (Abb. 3.33 und Abb. 3.34) und der außentemperaturabhängigen Nachtabschaltung bis  $\vartheta_{\text{a}} = 3^\circ\text{C}$  (Abb. 3.35 und Abb. 3.36).

Es zeigen sich im Vergleich zu den Varianten mit NT-Kessel vergleichbare Tendenzen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einfluss der Heizgrenztemperatur unter den definierten Randbedingungen gering ist. Es ergeben sich identische Temperaturverläufe. Die Varianten ohne Nachtabschaltung sowie die Varianten mit außentemperaturabhängiger Nachtabschaltung können weitestgehend die Solltemperaturen innerhalb der Nutzungszeiten gewährleisten. Innerhalb der Simulationen mit einer fixen Nachtabschaltung treten jedoch signifikante Beeinträchtigungen der thermischen Behaglichkeit auf.

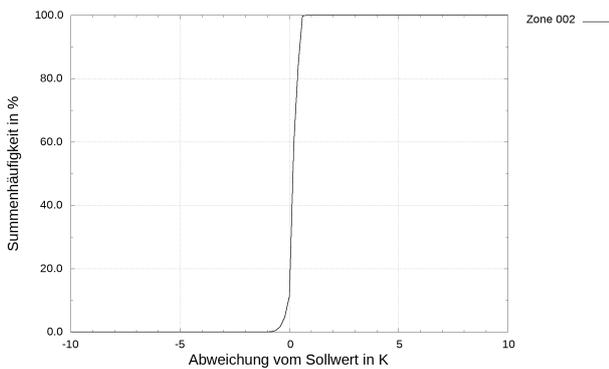


Abb. 3.31: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: LWWP,  $\vartheta_{\text{V}}/\vartheta_{\text{R}} = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

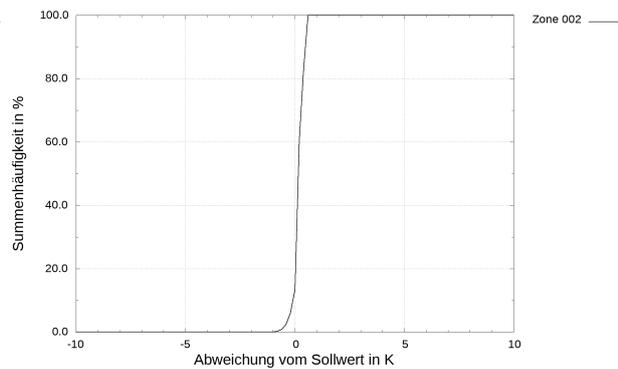


Abb. 3.32: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: LWWP,  $\vartheta_{\text{V}}/\vartheta_{\text{R}} = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$

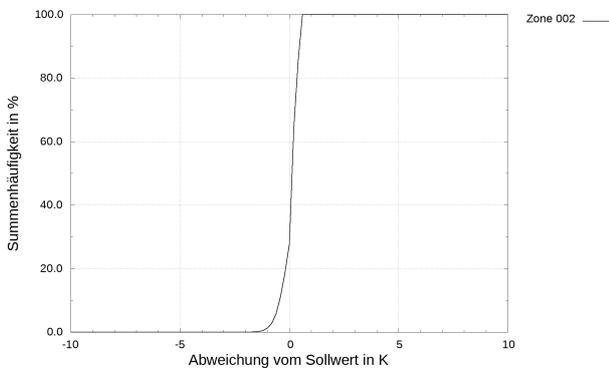


Abb. 3.33: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: LWWP,  $\vartheta_{\text{V}}/\vartheta_{\text{R}} = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

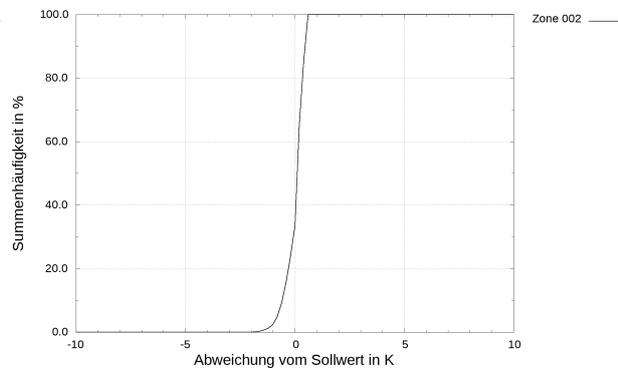


Abb. 3.34: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: LWWP,  $\vartheta_{\text{V}}/\vartheta_{\text{R}} = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA,  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$

Tabelle 3.4: End- und Nutzenergie der Varianten mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, IR Heizung in Aufenthaltsräumen (intermittierende Betriebsweise)

WE	WÜ	$\vartheta_V/\vartheta_R$	$\vartheta_{HGR}$	NA	$Q_{Nutz,FH}$	$Q_{IRH}$	$Q_F$	$Q_{Nutz}$	$Q_{End}$	$\frac{Q_{IRH}}{Q_{Nutz}}$	$\frac{Q_{IRH}}{Q_{End}}$
					kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	%
LW-WP	FH & IRH	40°C/30°C	15°C	ohne	11039	3812	2921	14851	6733	25,7	56,6
				mit $f(\vartheta_a)$	8796	5045	2290	13841	7335	36,4	68,8
			10°C	ohne	10727	3997	2879	14724	6876	27,1	58,1
				mit $f(\vartheta_a)$	8504	5223	2251	13727	7474	38,0	69,9
					9839	4534	2687	14373	7221	31,5	62,8

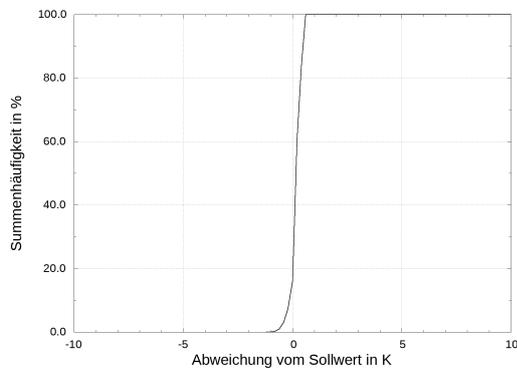


Abb. 3.35: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: LWWP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{HGR} = 15^\circ\text{C}$

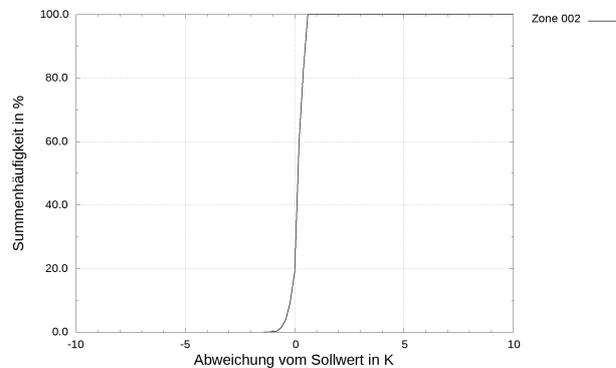


Abb. 3.36: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: LWWP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{HGR} = 10^\circ\text{C}$

Die zugehörigen Diagramme der Temperaturverläufe, Wärmeabgaben der Infrarotheizung sowie der freien Heizflächen für mittlere und kalte Außentemperaturen am Beispiel der Variante mit außentemperaturabhängiger Nachtabschaltung können dem Anhang A.4.4 entnommen werden (Abb. A.28 bis A.33).

### 3.2.2.2 Energetischer Vergleich

Der Vergleich der energetischen Kennwerte entsprechend der Tab. 3.4 zeigt, dass die grundsätzlichen Tendenzen, welche bereits für die Varianten mit NT-Kessel in Kap. 3.1.2.3 diskutiert wurden, auf die Wärmepumpen-Varianten übertragbar sind. Im Vergleich zu den Basisvarianten (Kap. 3.1) ist eine Reduktion der Endenergie von bis zu 62 % möglich. An dieser Stelle wird das Potenzial für den Einsatz einer Wärmepumpe in Kombination mit einer Infrarotheizung ohne umfassende Sanierung der Gebäudehülle sowie Veränderungen am Wärmeübergabesystem aufgezeigt.

## 4 Fazit / Ausblick

Die durchgeführten numerischen Analysen bewerten den ergänzenden Einsatz von Infrarotheizungen unter funktionellen, wärmephysiologischen und energetischen Gesichtspunkten anhand einer Heizperiodenbilanz für ein repräsentatives Einfamilienhaus. Basis für die Vergleichbarkeit energetischer Kennwerte bildet in diesem Kontext die Prämisse, dass die aus den Sollwertprofilen resultierenden Mindestanforderungen an die operative Raumtemperatur während der Nutzungszeit eingehalten werden müssen. Geringfügige aus den Regelungsvorgängen resultierende Abweichungen können für kurze Zeiträume zugelassen werden. Die aufgestellte Variantenmatrix hat zum Ziel, wesentliche Einflussgrößen auf den Betrieb der Infrarotheizung abzubilden und die Bewertbarkeit von Einzeleffekten zu ermöglichen.

Die Tabelle 4.1 fasst an dieser Stelle die grundlegenden Ergebnisse nochmal zusammen.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung End- und Nutzenergie der Varianten mit Niedertemperaturkessel (NT), Wärmepumpe (LW-WP) und IR-Heizung in den Aufenthaltsräumen bei intermittierender Betriebsweise (außer 1. Zeile NT)

Wärmeerzeuger	Wärmeübergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$	Heizgrenztemperatur	Nachtab-schaltung	$Q_{\text{Nutz, FH}}$ in kWh	$Q_{\text{IRH}}$ in kWh	$Q_{\text{Nutz}}$ in kWh	$Q_{\text{End}}$ in kWh
NT (durchgehende Betriebsweise)	freie Heizfläche	70°C/55°C	15°C	ohne	17633	0	17633	18231
NT	freie Heizfläche	70°C/55°C	15°C	ohne	14608	0	14068	15152
NT	freie Heizfläche & IR-Heizung	40°C/30°C	15°C	ohne	10959	3892	14851	15243
				mit $f(\vartheta_A)$	8840	5043	13883	14205
			10°C	ohne	10649	4075	14724	15105
				mit $f(\vartheta_A)$	8552	5219	13771	14087
LW-WP	freie Heizfläche & IR-Heizung	40°C/30°C	15°C	ohne	11039	3812	14851	6733
				mit $f(\vartheta_A)$	8796	5045	13841	7335
			10°C	ohne	10727	3997	14724	6876
				mit $f(\vartheta_A)$	8504	5223	13727	7474
					9839	4534	14373	7221

Zunächst kann anhand der Simulationsergebnisse die Energieeinsparung infolge der intermittierenden Betriebsweise aufgezeigt werden. Grundsätzlich lässt sich diese Betriebsweise mit vielen Heizsystemen realisieren, die Infrarotheizung eignet sich durch die kurzen Reaktionszeiten hierfür jedoch besonders gut. Neben der Länge der Nichtnutzungszeiten, welche für eine Temperaturabsenkung zur Verfügung stehen, beeinflussen auch weitere Größen, wie das Wärmeschutzniveau des Gebäudes, die Luftdichtheit, die Bauschwere oder die zur Verfügung stehende Heizleistungsreserve das Niveau der erzielbaren Einsparung. Das Niveau der Einsparungen kann somit für andere Situationen variieren.

Der Einfluss des Strahlungswirkungsgrad auf die energetischen Kennwerte und die Raumtemperaturdynamik kann bedingt durch das gewählte Simulationsmodell nicht detailliert untersucht werden. Um zunächst system- und geometrieunabhängige Aussagen abzuleiten, wurde ein Modell mit einem Raumluftknoten verwendet. Die Strahlung der Infrarotheizung wird hierbei auf

alle Raumumfassungsflächen aufgeteilt. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde daher der Strahlungswirkungsgrad für die weiterführenden Untersuchungen nicht weiter variiert, sondern mit einem Mittelwert von 50 % festgelegt. Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss des Strahlungswirkungsgrades erfordern ein geometrisch höher aufgelöstes Modell.

Die erstellte Variantenmatrix greift die Zielstellung auf, ein vorhandenes wasserführendes Heizsystem durch Kombination mit der Infrarotheizung für einen Niedertemperatureinsatz zu ertüchtigen. Ausgehend von einem auf  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$  ausgelegten System wurde die Maximaltemperatur der Heizkurve somit auf  $\vartheta_V = 40^\circ\text{C}$  abgesenkt, die Heizflächengrößen wurden nicht an die reduzierte Temperatur angepasst und die Raumtemperaturregelung mit Thermostatregelventilen in den Räumen mit geregelter Infrarotheizung deaktiviert. Zunächst wurde davon ausgegangen, dass kein Erzeugertausch erfolgt und als Wärmeerzeuger ein NT-Kessel zur Verfügung steht. Die Ergebnisse zeigen, dass das entstehende Leistungsdefizit durch die Infrarotheizung kompensiert werden kann. Erfolgt eine Nachtabschaltung der wasserführenden Heizung kommt es an kälteren Tagen zu unzureichenden Raumtemperaturen. Diese könnten durch entsprechende Stütztemperaturen der Infrarotheizung vermieden werden, was aber nicht näher betrachtet wurde. Eine deutliche Verbesserung der wärmephysiologischen Verhältnisse lässt sich auch erzielen, wenn eine Abschaltung der Heizungspumpe nur bei Außentemperaturen größer  $\vartheta_a = 3^\circ\text{C}$  erfolgt.

Eine Reduktion der Heizgrenztemperatur für das wasserführende System von  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$  auf  $\vartheta_{\text{HGR}} = 10^\circ\text{C}$  ist für das gewählte Gebäude möglich. Im Bereich über  $\vartheta_a = 10^\circ\text{C}$  kann die Infrarotheizung die Heizaufgabe übernehmen.

Mit den gewählten Parametern deckt die Infrarotheizung den Nutzenergieaufwand anteilig in einem Bereich von 25,7% - 37,9%. Wesentliche Einflussgrößen auf den Anteil wurden in der Studie abgebildet und diskutiert. Auf die Wärmeübergabe bezogene Tendenzen unterscheiden sich zwischen den Wärmeerzeugern Niedertemperaturkessel und Wärmepumpe nur geringfügig.

Insgesamt zeigt die Studie, dass durch die Ergänzung eines wasserbasierten Heizsystems mit einer Infrarotheizung ein vorhandenes, für höhere Temperaturen ausgelegtes Heizsystem ohne Austausch der Heizflächen mit niedrigen Systemtemperaturen verwendet werden kann und sich somit gut für eine Kombination mit einer Wärmepumpe eignet. Die Analysen haben gezeigt, dass im Vergleich zur Basisvariante die Endenergie um bis zu 62% durch diesen kombinierten Einsatz reduziert werden kann. Diese energetische Einsparung kann bei unveränderter Gebäudehülle sowie gleichbleibenden hydraulischen Wärmeübergabesystem erreicht werden. Die Kombination aus geregelter Infrarotheizung und unregelter Grundbeheizung durch das wassergeführte Heizsystem zur Spitzenlastabdeckung bedarf einer Prüfung, inwiefern eine Konformität zu den Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes, § 63 (Raumweise Regelung der Raumtemperatur)<sup>7</sup> hinsichtlich der Pflicht zu Einzelraumregelung besteht. Weiterführend können hier auch geeignete Strategien zur regelungstechnischen Vernetzung von wasserbasierter Heizung und Infrarotheizung einen positiven Beitrag leisten. Wie bereits beschrieben, bewertet die Untersuchung die Auswirkungen des Einsatzes einer Infrarotheizung mittels eines Modells, welches keine ortsscharfen Analysen der thermischen Behaglichkeit vorsieht, sondern den Raum in der Gesamtheit bewertet. Grundsätzlich eignet sich eine Infrarotheizung jedoch gut, um auch Konzepte thermischer Behaglichkeit in ausgewählten Bereichen des Raumes<sup>8</sup> umzusetzen, welche eine weitere Reduktion des Energieaufwandes zum Ziel haben. Hierfür wären weitere Untersuchungen mit geometrisch höher aufgelösten Modellen sowie probandengestützte Untersuchungen im Labor oder in der Praxis zwingend erforderlich.

---

<sup>7</sup>GEG - § 63: "Wird eine heizungstechnische Anlage mit Wasser als Wärmeträger in ein Gebäude eingebaut, hat der Bauherr oder der Eigentümer dafür Sorge zu tragen, dass die heizungstechnische Anlage mit einer selbsttätig wirkenden Einrichtung zur raumweisen Regelung der Raumtemperatur ausgestattet ist."

<sup>8</sup>sogenannte zonale Klimatisierungskonzepte

---

## Literatur

- [1] PERSCHK, A.: Gebäude und Anlagensimulation - Ein "Dresdner Modell". In: *Gesundheitsingenieur* (2010), August, Nr. 4
- [2] FELSMANN, C.: *Ein Beitrag zur Optimierung der Betriebsweise heizungs- und raumlufttechnischer Anlagen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2002
- [3] PERSCHK, A.: *Gebäude-Anlagen-Simulation unter der Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden*, Fakultät für Maschinenwesen, TU Dresden, Diss., 2000
- [4] SEIFERT, J.: *Zum Einfluss von Luftströmungen auf die thermischen und aerodynamischen Verhältnisse in und an Gebäuden*, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, Diss., Oktober 2005
- [5] WSVO 1995: *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung)*. August 1995. Berlin: Bundesregierung
- [6] KAISER, J.: Weiterentwicklung und Validierung des Softwaremodells zur Nachbildung von konventionellen Wärmeerzeugern - TYPE07 / Institut für Thermodynamik und TGA, TU Dresden. 2006. – Forschungsbericht
- [7] AFJEL, Th. ; WETTER, M.: Kompressionswärmepumpe inklusive Frost- und Taktverluste / Zentralschweizerisches Technikum Luzern. 1996. – Forschungsbericht
- [8] SEIFERT, J. ; KNORR, M. ; RICHTER, W.: Energetische Analyse von Systemen mit Wärmepumpen für hochwärmedämmte Gebäude. In: *Heizung/Lüftung/Klima/Haustechnik Bd.60* 60 (2009), Nr. 5, S. 20–27

## A Anhang

### A.1 Innere Gewinne / Luftwechsel

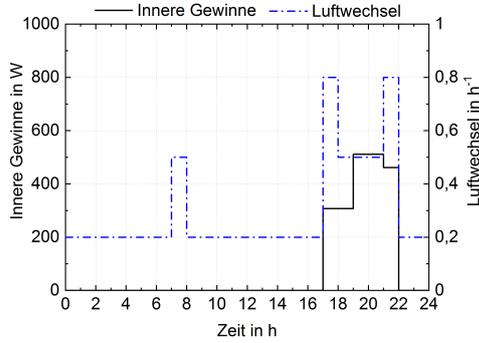


Abb. A.1: Innere Gewinne / Luftwechsel - Wohnzimmer (Zone 1)

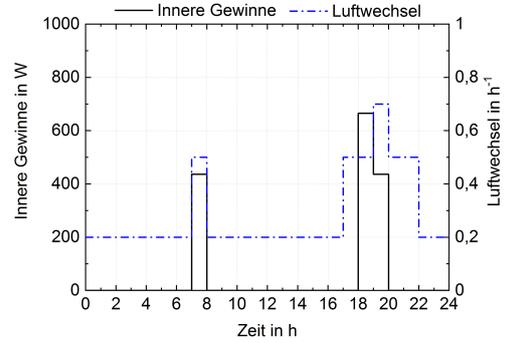


Abb. A.2: Innere Gewinne / Luftwechsel - Esszimmer (Zone 2)

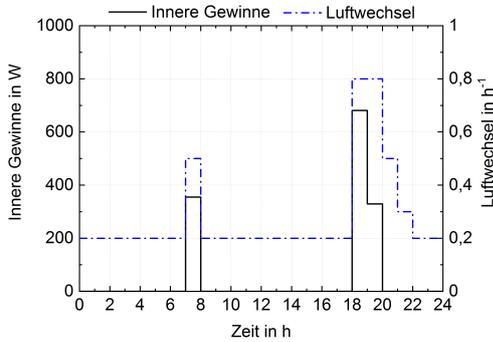


Abb. A.3: Innere Gewinne / Luftwechsel - Küche (Zone 5)

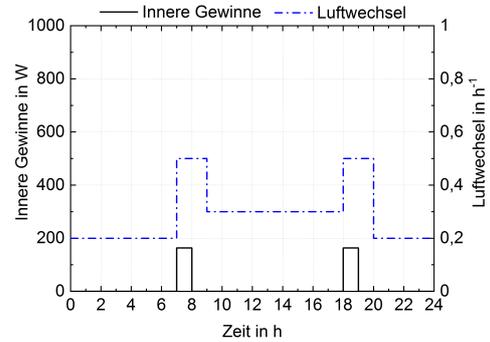


Abb. A.4: Innere Gewinne / Luftwechsel - WC (Zone 6)

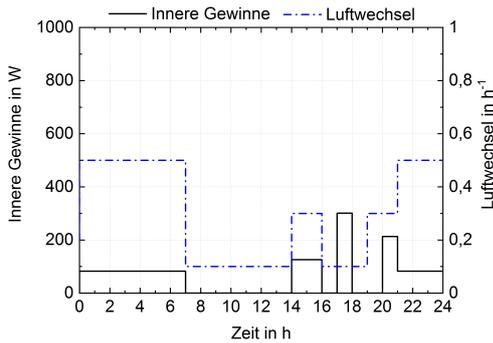


Abb. A.5: Innere Gewinne / Luftwechsel - Kinder 1/2 (Zone 8/9)

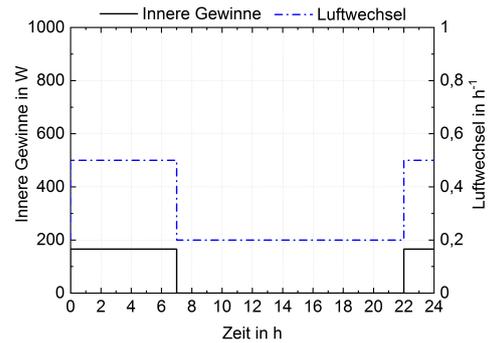


Abb. A.6: Innere Gewinne / Luftwechsel - Schlafzimmer (Zone 11)

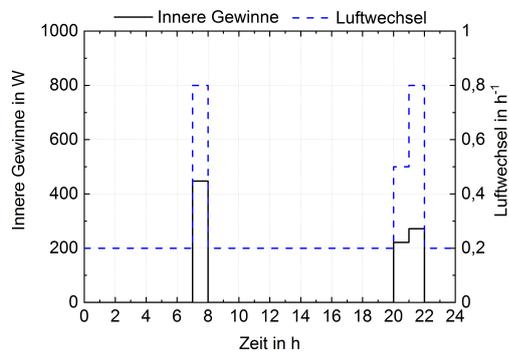


Abb. A.7: Innere Gewinne / Luftwechsel - Bad (Zone 10)

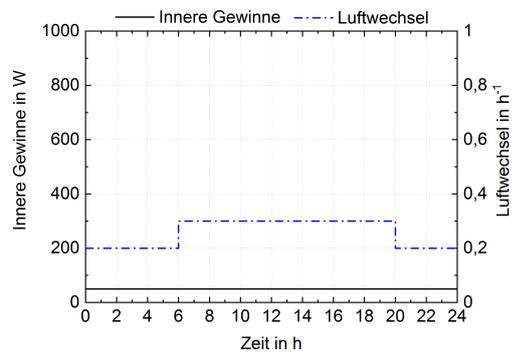


Abb. A.8: Innere Gewinne / Luftwechsel - Flur KG/EG /1.OG / KG (Zone 7/12/14)

## A.2 Modell des Gebäudes

### A.2.1 Grundrisse und Zonenaufteilung

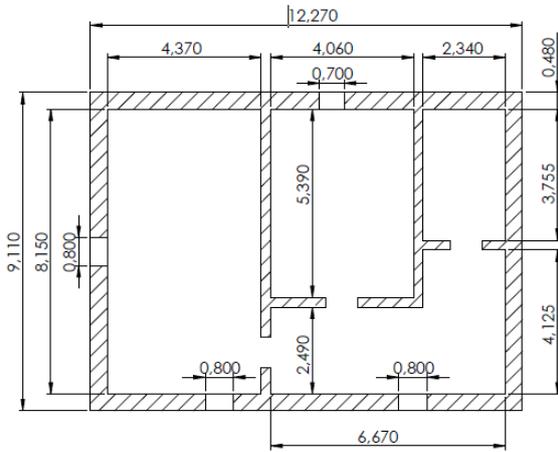


Abb. A.9: Grundriss: Keller

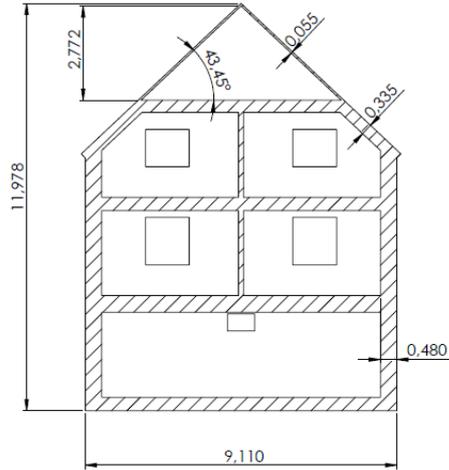


Abb. A.10: Querschnitt des Einfamilienhauses

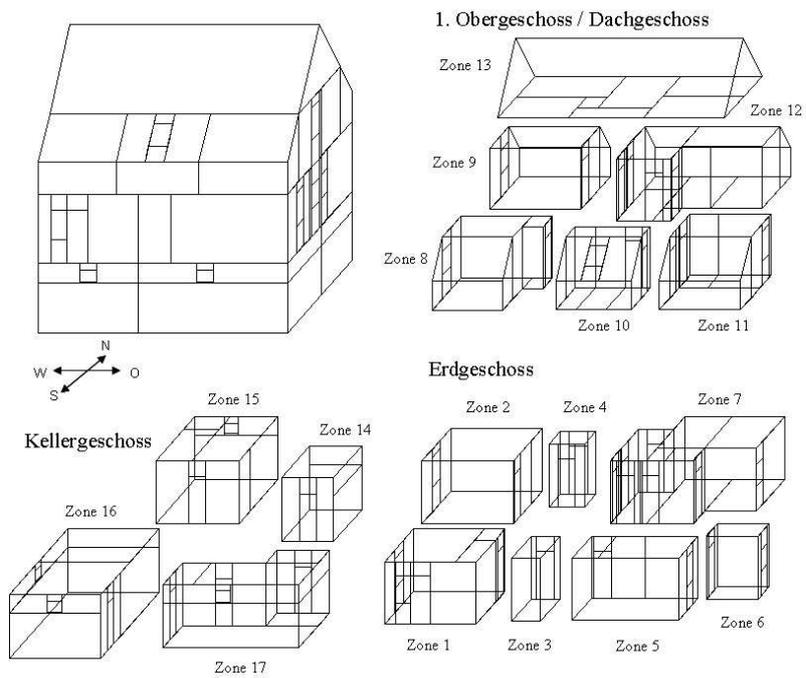


Abb. A.11: Einfamilienhaus mit allen signifikanten Zonen (Räumen) nach [8]

## A.2.2 Wandkonstruktion

Tabelle A.1: Konstruktionsdaten des Einfamilienhauses - WSV095 [5]

Wandart	Aufbau	Dicke m	Stoffeigenschaften			$u_{\text{ges}}$ -Wert W/(m <sup>2</sup> K)
			$\lambda$ W/(m K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/(kg K)	
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>0,59</b>
	Porenhochlochziegel	0,300	0,200	700,0	1000,0	
	Außenputz	0,020	1,400	2000,0	1000,0	
Dach (gedämmt)	Gips	0,025	0,210	900,0	1090,0	<b>0,27</b>
	Mineralwolle	0,100	0,040	150,0	1000,0	
	Luft	0,020	0,023	1,0	1000,0	
	Dachziegel	0,010	0,890	1800,0	1100,0	
Dach (ungedämmt)	Gips	0,025	0,210	900,0	1090,0	<b>0,86</b>
	Luft	0,020	0,023	1,0	1000,0	
	Dachziegel	0,010	0,890	1800,0	1100,0	
Innenwand-1	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>0,91</b>
	Gasbeton	0,120	0,150	400,0	1000,0	
	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	
Innenwand-2	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>0,53</b>
	Gasbeton	0,240	0,150	400,0	1000,0	
	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	
Fußboden/ Decke EG/OG	Linoleum	0,005	0,170	1000,0	1500,0	<b>2,24</b>
	Estrich	0,050	1,400	2200,0	1000,0	
	Stahlbeton	0,220	2,100	2400,0	1000,0	
	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	
Fußboden Decke OG/DG	Dielen	0,030	0,130	600,0	2100,0	<b>0,28</b>
	Luft	0,010	0,023	1,0	1000,0	
	Mineralwolle	0,100	0,040	150,0	1000,0	
	Gips	0,025	0,210	900,0	1090,0	
Bodenplatte	Estrich	0,050	1,400	2200,0	1000,0	<b>0,37</b>
	BASF-Styrodurdämmung	0,080	0,035	35,0	1000,0	
	Stahlbeton	0,200	2,100	2400,0	1000,0	
	Kalkgipsmörtel	0,025	0,700	1400,0	1000,0	
Außentür	Holz	0,050	0,150	700,0	2100,0	<b>1,99</b>
Innentür	Holz	0,030	0,150	700,0	2100,0	<b>2,17</b>
Fenster						<b>1,40</b>

### A.3 Charakteristische Typtage

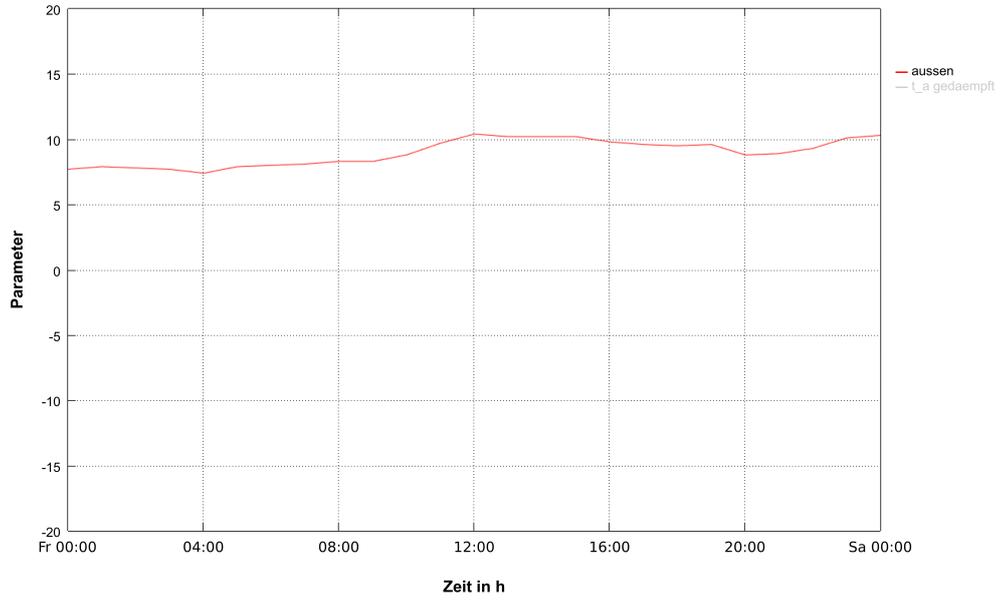


Abb. A.12: Charakteristischer Temperaturverlauf der Außentemperatur - „warmer“ Tag

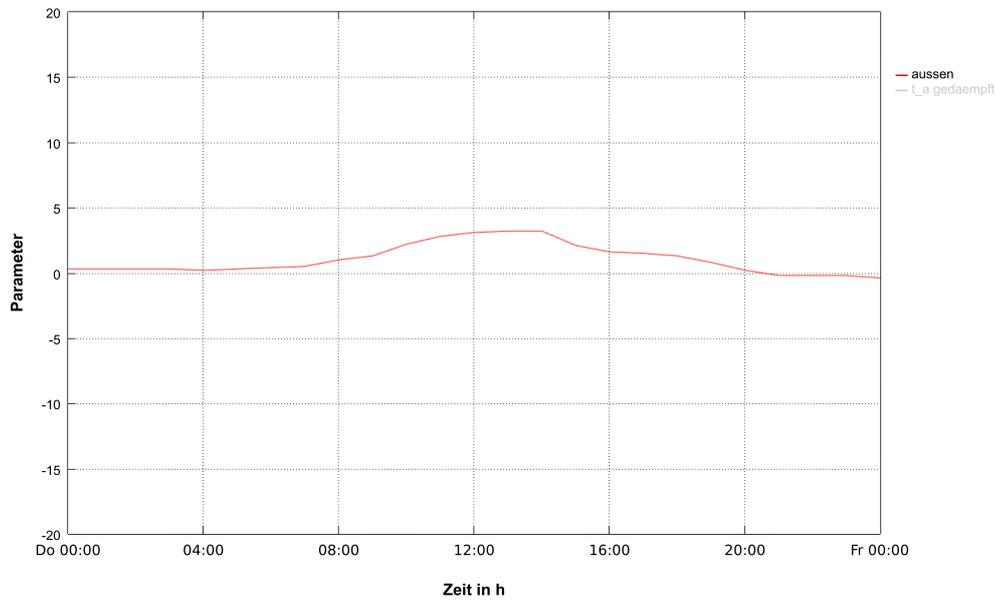


Abb. A.13: Charakteristischer Temperaturverlauf der Außentemperatur - „mittlerer“ Tag

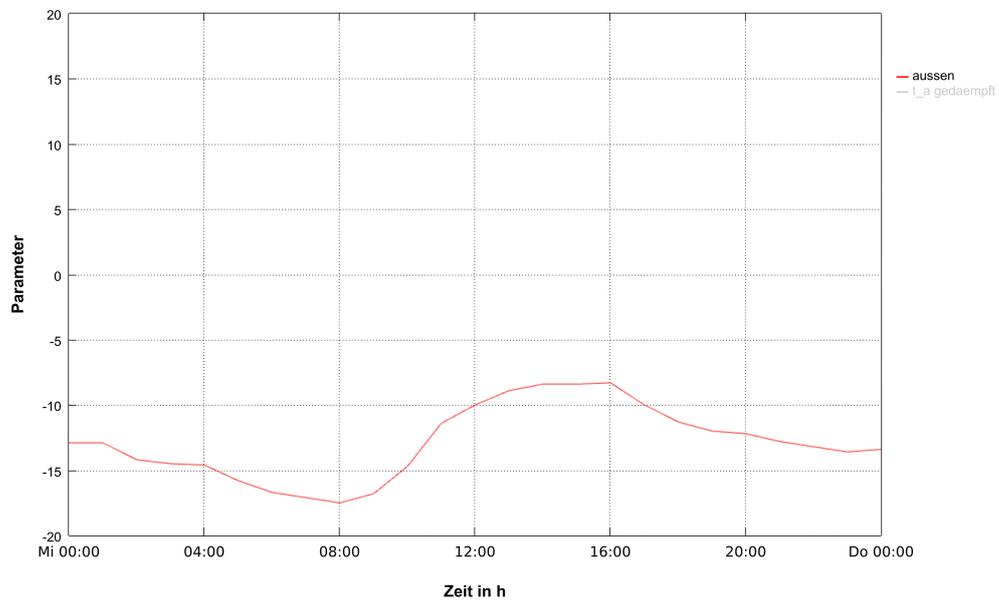


Abb. A.14: Charakteristischer Temperaturverlauf der Außentemperatur - „kalter“ Tag

## A.4 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

### A.4.1 Basisvarianten

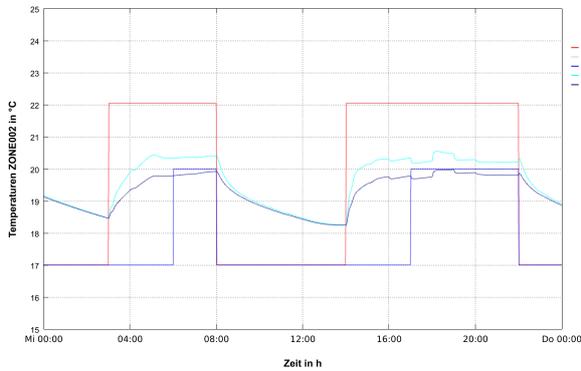


Abb. A.15: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , intermittierender Betrieb

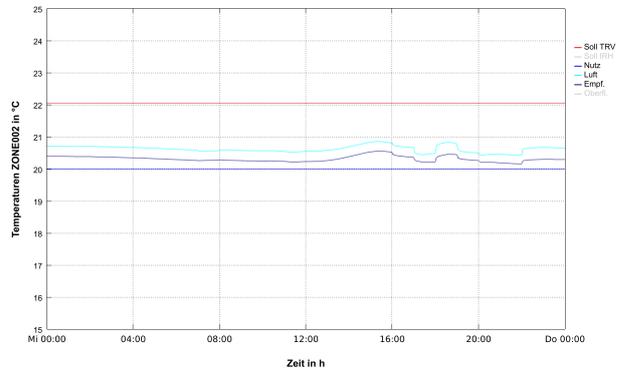


Abb. A.16: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , durchgehender Betrieb

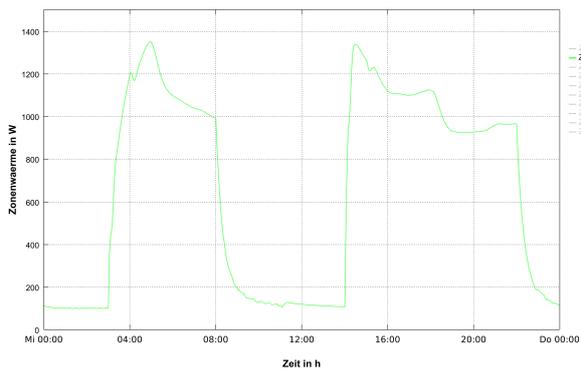


Abb. A.17: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , intermittierender Betrieb

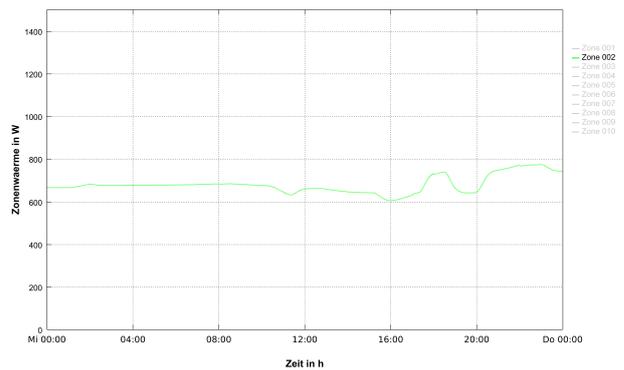


Abb. A.18: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ , durchgehender Betrieb

**A.4.2 Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung**

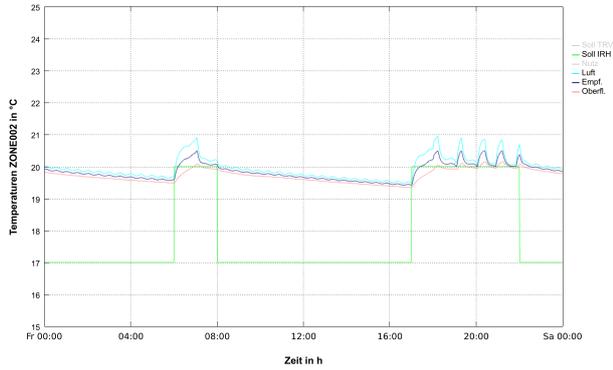


Abb. A.19: Raumtemperaturen (Zone 2) bei warmen Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

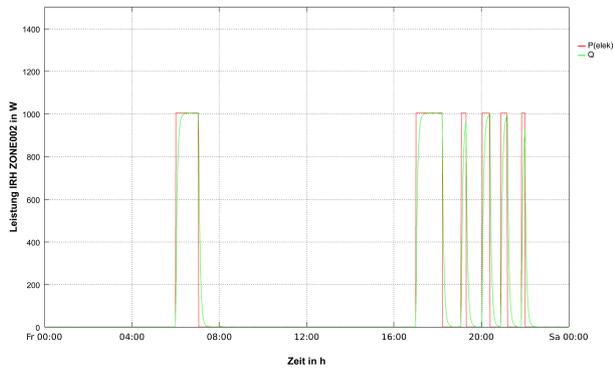


Abb. A.20: Wärmeabgabe der Infrarotheizung (Zone 2) bei warmen Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

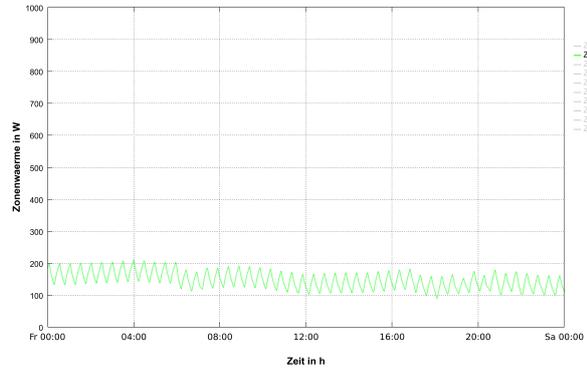


Abb. A.21: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei warmen Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , ohne Nachtabschaltung

**A.4.3 Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung**

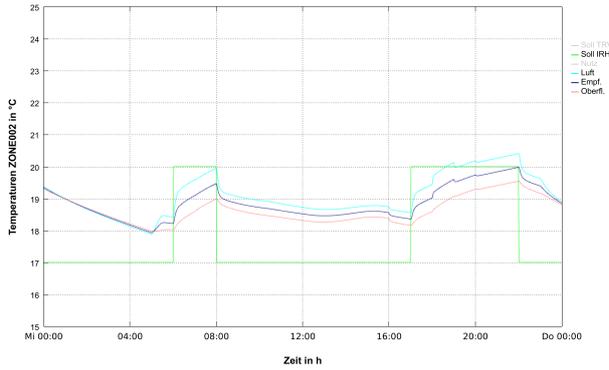


Abb. A.22: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

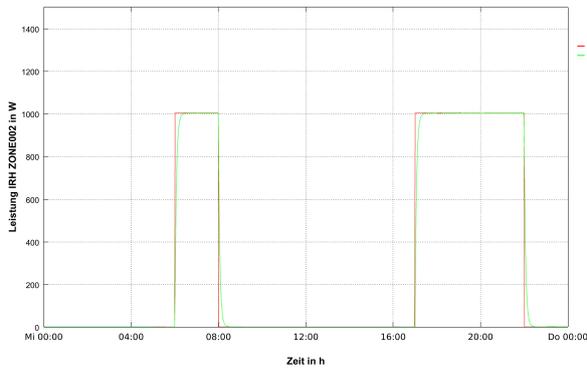


Abb. A.23: Wärmeabgabe der Infrartheizung (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

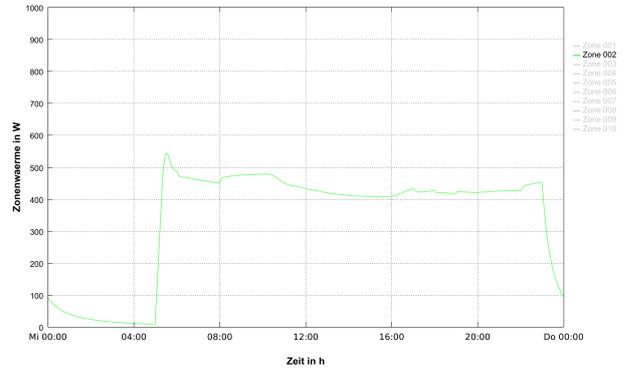


Abb. A.24: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

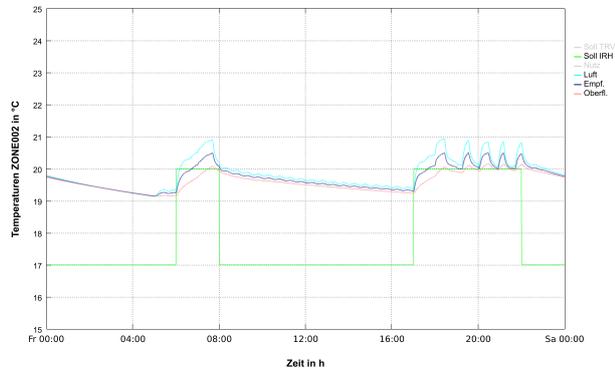


Abb. A.25: Raumtemperaturen (Zone 2) bei warmen Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

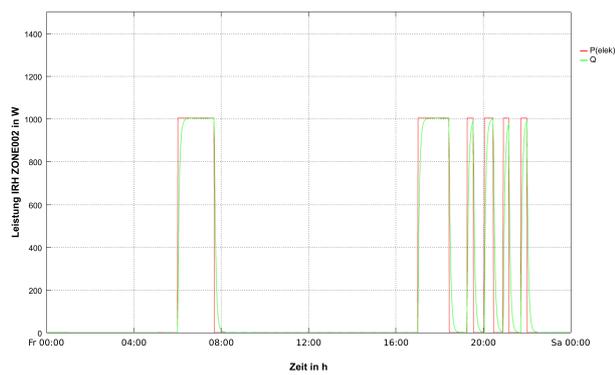


Abb. A.26: Wärmeabgabe der Infrarotheizung (Zone 2) bei warmen Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

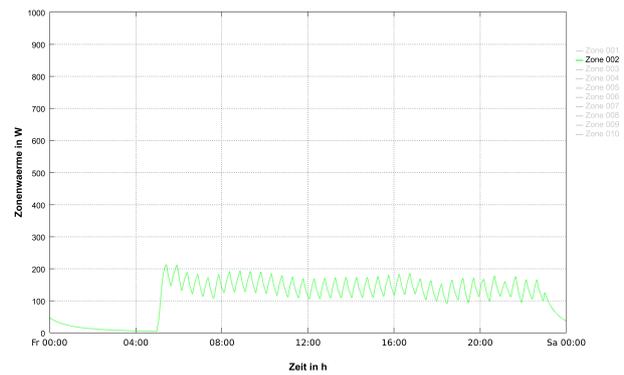


Abb. A.27: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei warmen Außentemperaturen, Variante: NT-K,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit Nachtabschaltung

**A.4.4 Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit außentemperaturabhängiger Nachtabschaltung**

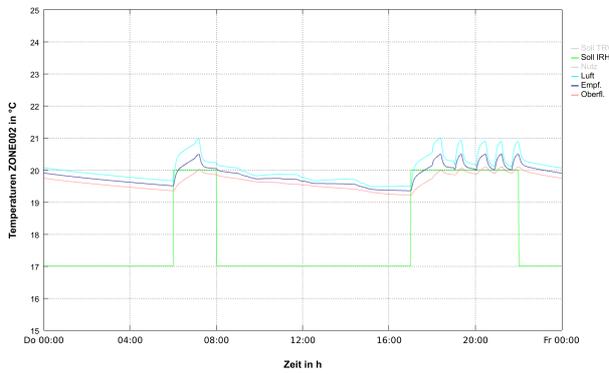


Abb. A.28: Raumtemperaturen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

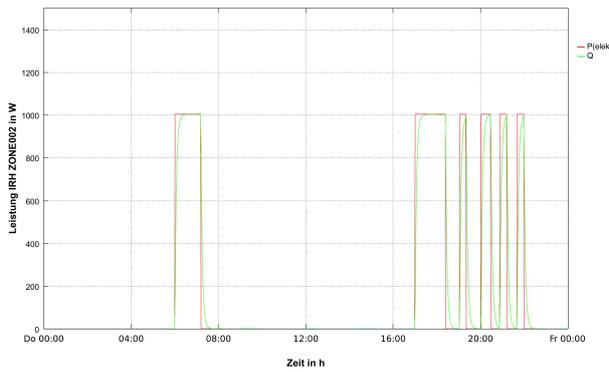


Abb. A.29: Wärmeabgabe der Infrarotheizung (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

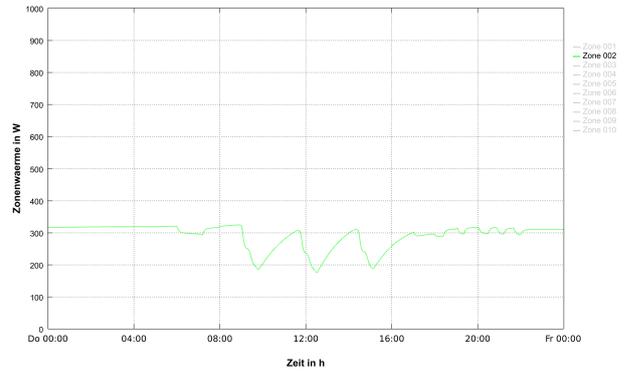


Abb. A.30: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei mittleren Außentemperaturen, Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

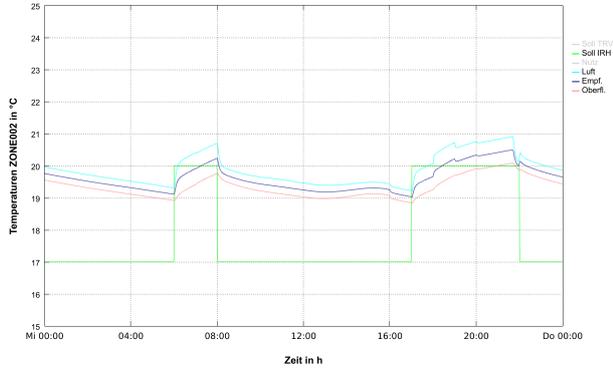


Abb. A.31: Raumtemperaturen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

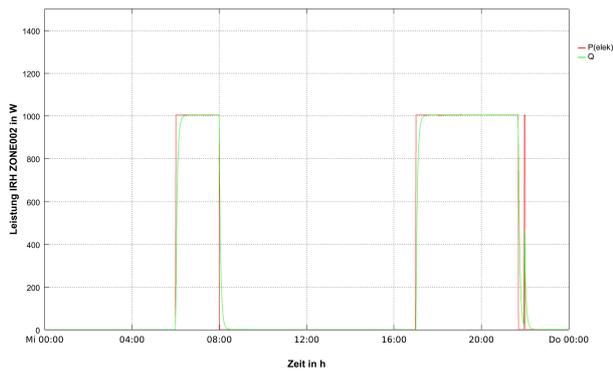


Abb. A.32: Wärmeabgabe der Infrarotheizung (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$

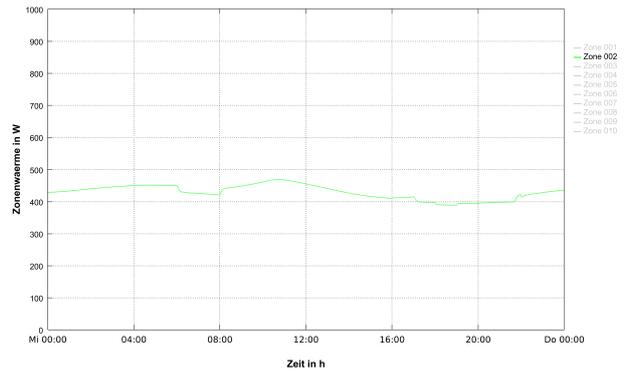


Abb. A.33: Wärmeabgabe der freien Heizflächen (Zone 2) bei kalten Außentemperaturen, Variante: LW-WP,  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , mit NA ( $f(\vartheta_a)$ ),  $\vartheta_{\text{HGR}} = 15^\circ\text{C}$