



## **Energetische Bewertung des Einsatzes von Infrarotheizungen als Spitzenlastabdeckung in Kombination mit einer Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus verschiedener Baualtersklassen**

- Abschlussbericht -

**Auftraggeber:** IG Infrarot Deutschland e.V.  
Kramergasse 32  
82054 Sauerlach bei München

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

**Autoren:** Dipl.-Ing. A. Meinzenbach / Dipl.-Ing. L. Schinke / Dr.-Ing. M. Knorr  
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>5</b>
<b>2</b>	<b>Randbedingungen</b>	<b>6</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	6
2.2	Modellgebäude . . . . .	6
2.3	Wärmeverteilung, Wärmeübergabe und Regelung . . . . .	9
2.4	Wärmeerzeugungssystem . . . . .	10
2.5	Nutzungsprofile, innere Gewinne und Luftwechsel . . . . .	12
2.6	Wärmephysiologische Auswertung . . . . .	14
2.7	Energetische Auswertung . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Numerische Analysen</b>	<b>17</b>
3.1	Wärmedämmstandard: WSV095 . . . . .	17
3.1.1	Variantenmatrix . . . . .	17
3.1.2	Intermittierende Betriebsweise . . . . .	17
3.1.3	Energetische Übersicht . . . . .	17
3.2	Baualtersklasse: Neubau . . . . .	19
3.2.1	Variantenmatrix . . . . .	19
3.2.2	Durchgehende Betriebsweise . . . . .	19
3.2.3	Intermittierende Betriebsweise . . . . .	20
3.2.4	Energetische Übersicht . . . . .	21
3.3	Wärmedämmstandard: EnEV04 . . . . .	23
3.3.1	Variantenmatrix . . . . .	23
3.3.2	Durchgehende Betriebsweise . . . . .	23
3.3.3	Intermittierende Betriebsweise . . . . .	24
3.3.3.1	Infrartheizung . . . . .	24
3.3.3.2	Freie Heizflächen . . . . .	25
3.3.3.3	Hybrid: Freie Heizflächen und Infrartheizung . . . . .	25
3.3.4	Energetische Übersicht . . . . .	26
3.4	Wärmedämmstandard: WSV077 . . . . .	29
3.4.1	Variantenmatrix . . . . .	29
3.4.2	Durchgehende Betriebsweise . . . . .	29
3.4.3	Intermittierende Betriebsweise . . . . .	30
3.4.4	Energetische Übersicht . . . . .	31
3.5	Wärmedämmstandard: BA1950 . . . . .	34
3.5.1	Variantenmatrix . . . . .	34
3.5.2	Durchgehende Betriebsweise . . . . .	34
3.5.3	Intermittierende Betriebsweise . . . . .	35
3.5.4	Energetische Übersicht . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Fazit / Ausblick</b>	<b>39</b>
	<b>Literatur</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>43</b>
A.1	Innere Gewinne / Luftwechsel . . . . .	43
A.2	Modell des Gebäudes . . . . .	45
A.2.1	Grundrisse und Zonenaufteilung . . . . .	45

A.2.2	Wandkonstruktionen . . . . .	46
A.3	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen . . . . .	51
A.3.1	Energetische Übersicht der Variantenmatrix EnEV04 . . . . .	51
A.3.2	Variante:EnEV04-LWWP-hybrid . . . . .	52
A.3.3	Variante:WSVO77-NTK-hybrid . . . . .	54

# Symbolverzeichnis

## Lateinische / Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$b$	Koeffizienten	–
$c$	Wärmekapazität	$J/(W \cdot K)$
$m$	Exponent	
$q_{\text{Nutz}}$	flächenbezogene Nutzenergie	kWh
$A$	Fläche	$m^2$
$A_U$	Unterschreitung (Fläche unterhalb der Kurve der Summenhäufigkeit)	$K \cdot h$
$H$	relative (Summen-)Häufigkeit	%
$P$	elektrische Leistung	W
$Q_{\text{End}}$	Endenergie (thermisch)	kWh
$Q_{\text{Nutz}}$	Nutzenergie	kWh
$Q_{\text{Nutz,FH}}$	Nutzenergie (freie Heizflächen)	kWh
$Q_{\text{Nutz,IRH}}$	Nutzenergie (Infrarotheizungen)	kWh
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{Q}_N$	Wärmestrom (Normbedingungen)	W
$\dot{Q}_{\text{NTK}}$	Wärmestrom (Niedertemperaturkessel)	W
$\dot{Q}_{\text{WP}}$	Wärmestrom (Wärmepumpe)	W
$S$	Faktor für Steilheit der Heizkurve	
$V$	Volumen	l
$W_{\text{End}}$	Endenergie (elektrisch)	kWh
$W_{\text{End,IRH}}$	Endenergie (Infrarotheizungen)	kWh
$W_{\text{End,WP}}$	Endenergie (Wärmepumpe)	kWh
$\varphi$	Belastungsgrad	
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$W/(mK)$
$\vartheta$	Temperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_a$	Außentemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_{\text{HGR}}$	Heizgrenztemperatur	$^{\circ}C$
$\vartheta_i$	Innentemperatur unter Normbedingungen	$^{\circ}C$
$\vartheta_{\text{op}}$	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)	$^{\circ}C$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\tau_{\text{AZ}}$	Anheizzeit	h
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
$\Delta\vartheta_{\text{HK}}$	Anhebung der Heizkurve	K
$\Delta\vartheta_m$	Übertemperatur	K
$\Delta\vartheta_{m,N}$	Übertemperatur unter Normbedingungen	K
$\Delta\vartheta_N$	Temperaturspreizung unter Normbedingungen	K

---

## Abkürzungen

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
durchg.	durchgehend
interm.	intermittierend
oNA	ohne Nachtabschaltung (der zentralen Pumpe)
AZ	Anheizzeit
BWK	Brennwertkessel
FH	Freie Heizflächen
FHIRH	Kombination aus freien Heizflächen und Infrartheizungen (hybrid)
IR	Infrarot
IRH	Infrartheizung
LW-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
NA	Nachtabschaltung (der zentralen Pumpe)
NTK	Niedertemperatur-Kessel
TRNSYS	Transient System Simulation Program
TUD	TU Dresden
WP	Wärmepumpe
WSVO	Wärmeschutzverordnung







---

# 1 Einleitung

Fossile Energieträger zur Versorgung von Gebäuden sind zuletzt stark im Preis gestiegen und es ist von weiteren Preiserhöhungen auszugehen. Weiterhin wird die Nutzung fossiler Energieträger durch regulatorische Vorgaben wie im Gebäudeenergiegesetz zunehmend eingeschränkt, um Klimaschutzziele auch im Gebäudesektor zu erreichen. Die Nutzer solcher Heizsysteme sind somit vermehrt auf der Suche nach Alternativen. Infrarotheizungen können eine Ergänzung zu bisherigen wasserbasierte Heizsystemen sein und zur Erweiterung des technischen Lösungsraums beitragen.

In einer ersten Studie[1] wurde an einem repräsentativen Einfamilienhaus entsprechend des Wärmeschutzniveaus WSV095 verschiedene Varianten bezüglich des Einsatzes von Infrarotheizungen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass in Gebäuden mit wassergeführten Wärmeübergabesystemen durch den Einsatz von Infrarotheizungen zur Spitzenlastabdeckung die Systemtemperaturen der bestehenden Anlagentechnik deutlich gesenkt werden können und ein monoenergetisch bivalenter Betrieb möglich ist.

In einer zweiten Studie soll nun die Bandbreite der numerischen Untersuchungen erweitert werden. Es werden insgesamt fünf Baualtersklassen (Neubau, EnEV04, WSV095, WSV077 und Baujahr 1950) untersucht. Analog zur ersten Studie werden die Untersuchungen mit der Gebäude- und Anlagensimulationssoftware TRNSYS-TUD für eine Heizperiode durchgeführt. In allen Gebäuden werden eine entsprechende Bestands-Heizungsanlage (Gaskessel bzw. LW-Wärmepumpe) sowie ein Wärmeübergabesystem mit Heizkörpern vorgesehen.<sup>1</sup> Das Temperaturniveau des Anlagenbetriebes wird variiert, um Potenziale durch eine Grundtemperierung mit dem Bestandsystem (freie Heizflächen) und der Infrarotheizung für die Spitzenlastabdeckung aufzuzeigen. Darüber hinaus wird ein Ersatzmodell für die Infrarotheizung und das regelungstechnische Konzept zwischen freien Heizflächen (Grundtemperierung) und Infrarotheizung (Spitzenlastdeckung) definiert.

Die Analyse erfolgte für unterschiedliche Betriebsweisen (durchgehender und intermittierender Betrieb) sowie einer Variation der Wärmezeugung (Niedertemperatur- und Brennwert-Gaskessel, LW-Wärmepumpe und Infrarotheizungen) und der Wärmeübergabe (wasserbasiertes Heizsystem, Infrarotheizungen sowie hybrid). Für jede Baualtersklasse wurde eine entsprechende Variantenmatrix erstellt und ausgewertet. Ein Schwerpunkt lag auf den Analysen der Untersuchungen mit hybrider Wärmeübergabe sowie einer auf ca. 30% der Gebäudeheizlast ausgelegten Luft-Wasser-Wärmepumpe (GEG-konform). Anhand der gewonnenen Ergebnisse wurden abschließend die berechneten Varianten verglichen. Die energetischen Kennwerte wurden in Nutz- und Endenergie unterschieden und detailliert diskutiert, wobei die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit während der Nutzungszeiten die wichtigste Randbedingung war.

---

<sup>1</sup>Das Auslegungstemperaturniveau des Heizsystems beträgt je nach Baualtersklasse  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$  bzw.  $\vartheta_V/\vartheta_R/\vartheta_i = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ .

## 2 Randbedingungen

### 2.1 Grundlagen

Im Rahmen der vorliegenden Studie kommt analog zur ersten Studie [1] das numerische Simulationsprogramm TRNSYS-TUD [2] 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 [3, 4, 5, 6, 7] 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 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.

Innerhalb der Studie wurden fünf verschiedene Baualtersklassen bzw. wärmetechnische Ausstattungen wie folgt untersucht : Neubau<sup>2</sup> / EnEV04 [8] / WSVO95 [9] / WSVO77 [10] sowie BA1950<sup>3</sup>

Tabelle 2.1: Energetische Kenndaten für das statistische Einfamilienhaus in Abhängigkeit der wärmetechnischen Ausstattung

wärmetechnische Ausstattung	Heizlast in kW	spez. Heizlast <sup>4</sup> in W/m <sup>2</sup>
Neubau	4,6	28,9
EnEV04	6,5	40,6
WSVO95	9,2	57,2
WSVO77	13,5	83,9
BA1950	19,0	118,1

<sup>2</sup>In Anlehnung an den KfW 40 - Standard.

<sup>3</sup>In Anlehnung an die TABULA-Datenbank (<https://webtool.building-typology.eu/?c=de>) Baujahr: 1949-1957.

<sup>4</sup>bezogen auf die beheizte Nutzfläche des Einfamilienhauses von  $A = 160 \text{ m}^2$

Tab. 2.1 zeigt die Heizlast für die jeweilige Ausstattungsvariante des Gebäudes. Die zugehörigen definierten Wandaufbauten des Einfamilienhauses dokumentieren die Tab. A.1 bis A.5 im Anhang A.2.

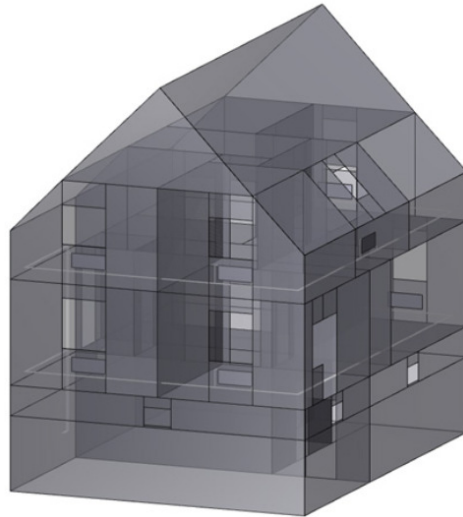


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des statistischen Einfamilienhauses

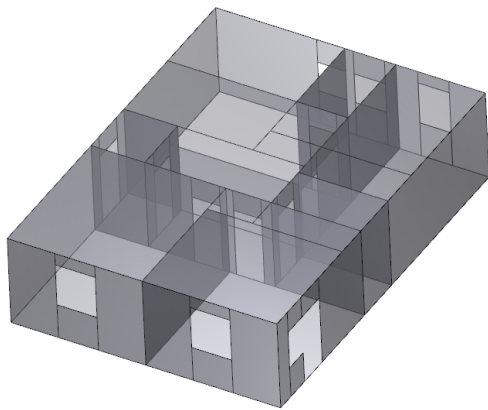


Abb. 2.2: Schematische Darstellung: Erdgeschoss

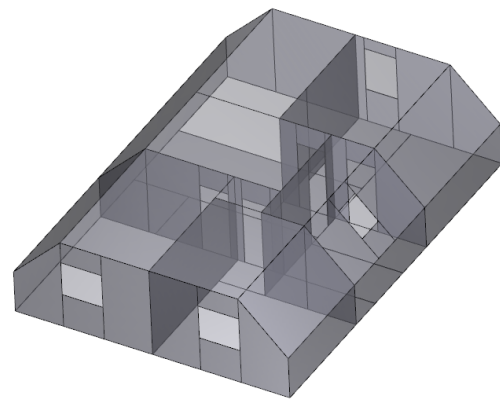


Abb. 2.3: Schematische Darstellung: Obergeschoss

## 2 Randbedingungen

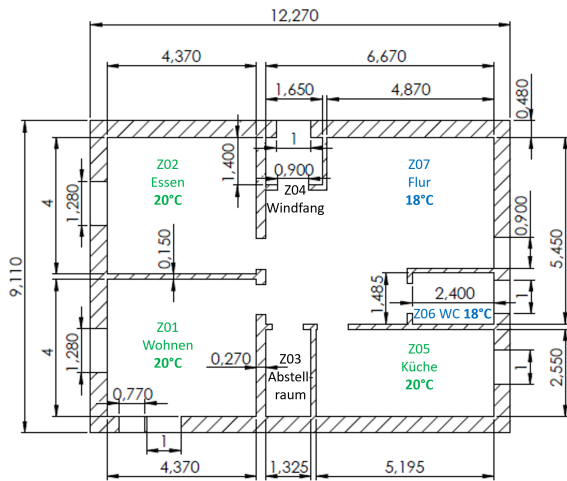


Abb. 2.4: Grundriss: Erdgeschoss

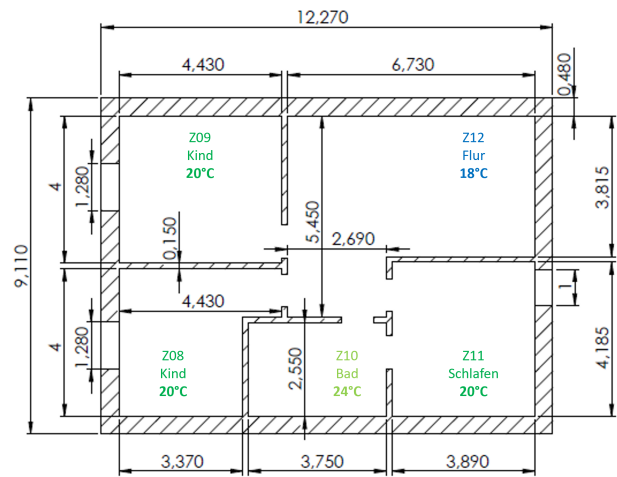


Abb. 2.5: Grundriss: Obergeschoss

## 2.3 Wärmeverteilung, Wärmeübergabe und Regelung

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

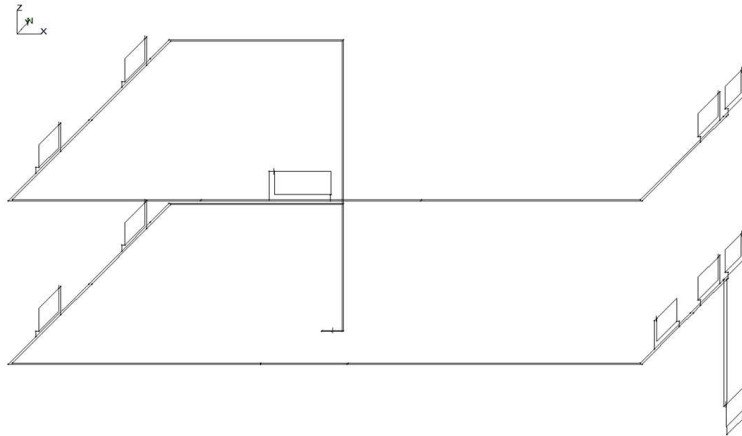


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des hydraulischen Netzes

Die Auslegung der heizungstechnischen Anlage erfolgt in Abhängigkeit der Baualtersklasse. Die Tab. 2.2 dokumentiert die zugrunde gelegten Wärmeerzeuger, die Leistungskennwerte sowie das Auslegungstemperaturniveau der freien Heizflächen. Es wird für das wasserbasierte System in die Wärmeerzeuger Gas-Brennwertkessel (BW-Kessel), Gas-Niedertemperaturkessel (NT-Kessel) sowie die Luft-Wasser-Wärmepumpe (LW-WP) unterschieden. Die Nennleistung der Wärmeerzeuger entspricht einer Überdimensionierung von ca. 20% bezogen auf die Heizlast. Über die Heizperiode wird eine witterungsgeführte Steuerung der Vorlauftemperatur entsprechend Gl. 2.1 vorgenommen.

Im Falle der hybriden Wärmeübergabe, dass heißt einer Kombination aus Infrartheizung und freien Heizflächen, wird für die Wärmepumpen mit einer reduzierten Nennleistung gerechnet. Diese entspricht ca. 30% der Heizlast.

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

Für die numerischen Untersuchungen mit dem hybridem Heizsystem aus Infrartheizungen und konventionellem Heizungssystem erfolgt eine Absenkung des Temperaturniveaus der Heizungsanlage. Die Höhe der Reduzierung der Heizkurve für den Betrieb variiert je nach Baualtersklasse und wird empirisch bestimmt. 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

Tabelle 2.2: Auslegungsparameter der Anlagentechnik (wasserbasiertes Heizsystem)

wärmetechnische Ausstattung	Wärmeerzeuger	Nennleistung in kW	Temperaturniveau $\vartheta_V/\vartheta_R$ in °C
Neubau	LW-WP	5,5	55°C/45°C
EnEV04	BW-Kessel	7,8	55°C/45°C
	LW-WP	7,8	55°C/45°C
	LW-WP <sub>30</sub>	2,0	55°C/45°C
WSVO95	LW-WP	3,0	70°C/55°C
WSVO77	NT-Kessel	16,0	70°C/55°C
	LW-WP	16,0	70°C/55°C
	LW-WP <sub>30</sub>	4,5	70°C/55°C
BA1950	NT-Kessel	23,0	70°C/55°C
	LW-WP <sub>30</sub>	7,0	70°C/55°C

- $\varphi$  - 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.

Heizkörper bleiben unverändert. Die fehlende Heizleistung aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus wird über den Einbau der Infrarotheizungssysteme substituiert. 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 ungeregelt. Eine Nachtabschaltung der zentralen Pumpe wird im Zeitraum von 22:00 bis 05:00 Uhr in Abhängigkeit der Außentemperatur umgesetzt. 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 des Wärmeerzeugers.

### 2.4 Wärmeerzeugungssystem

Als Wärmeerzeugungssysteme werden innerhalb der Studie je nach Variation unterschiedliche Wärmeerzeuger verwendet. Grundsätzlich werden vier Varianten gegenübergestellt:

- monovalenter Betrieb: Gaskessel
- monovalenter Betrieb: Luft-Wasser-Wärmepumpe
- hybrider Betrieb: Luft-Wasser-Wärmepumpe und Infrarotheizungen
- monovalenter Betrieb: Infrarotheizung

In Abhängigkeit der Baualtersklasse werden Brennwertkessel bzw. Niedertemperaturkessel in unterschiedlichen Leistungsklassen für die „Basisvarianten“ definiert. Alternativ erfolgt die Wärmeerzeugung mit Luft-Wasser-Wärmepumpen ( $\dot{Q}_{WP,N} = 5,5 \dots 23 \text{ kW}^5$ ), welche mit einem Parallelpufferspeicher mit einem Volumen von  $V = 200 \text{ l}$  gekoppelt sind. Für den hybriden Betrieb

<sup>5</sup>Die Leistungswerte sind bezogen auf das Temperaturniveau:  $\vartheta_a/\vartheta_V=7^\circ\text{C}/35^\circ\text{C}$ . Der Modulationsbereich beträgt ca. 45 ... 100 % der Nennleistung

kommt eine Luft-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{WP,N} \approx 30\% \dot{Q}_{HL}$ ) in Kombination mit Infrarotheizungen zum Einsatz. Weiterhin erfolgen Variantenrechnungen, in welchen die Beheizung der Räume ausschließlich über Infrarotheizungen erfolgt.

Die hierfür in TRNSYS-TUD verwendeten Modelle werden nachfolgend kurz vorgestellt.

### Gaskessel

Das Simulationsmodell eines Gas-Brennwert- und Niedertemperaturkessels basiert auf einer Entwicklung von Kaiser [11]. 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)

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

Hinsichtlich der Regelung wird ein Kesselwassertemperatursensor 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 [12] 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 Verdampfermassestrom 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>6</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 Strahlungswirkungsgrad kann hierbei variiert werden. Für die unten beschriebene Matrix wurde ein Strahlungswirkungsgrad der Infrarotheizungen von 50 % zugrunde gelegt. 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 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.

---

<sup>6</sup>Die hydraulischen Einbindungsmöglichkeiten in das Heiznetz sind vielfältig. Es können auch Reihenspufferspeicher oder bei Flächenheizungen Systeme ohne Pufferspeicher realisiert werden



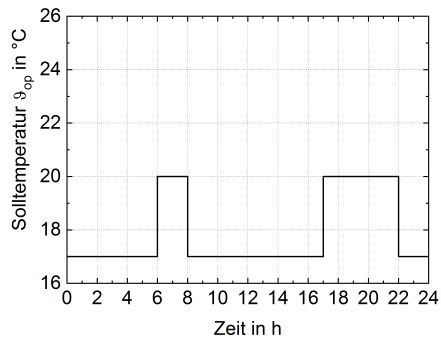


Abb. 2.7: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Wohnzimmer (Zone 1)

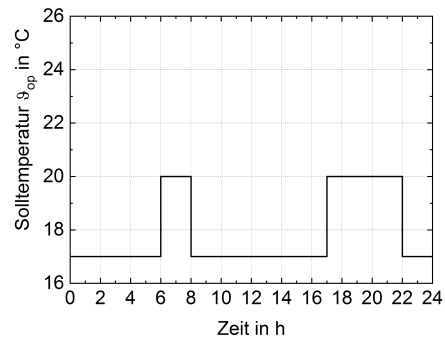


Abb. 2.8: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Esszimmer (Zone 2)

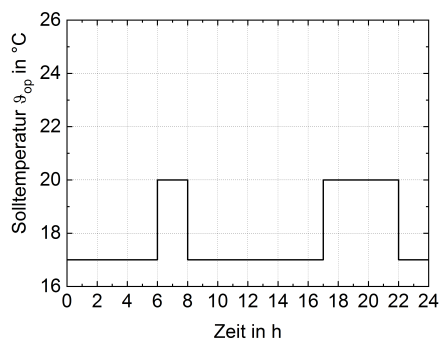


Abb. 2.9: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Küche (Zone 5)

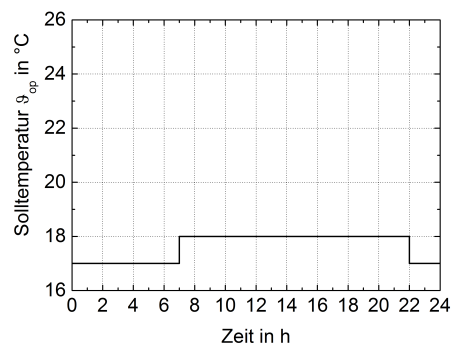


Abb. 2.10: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - WC (Zone 6)

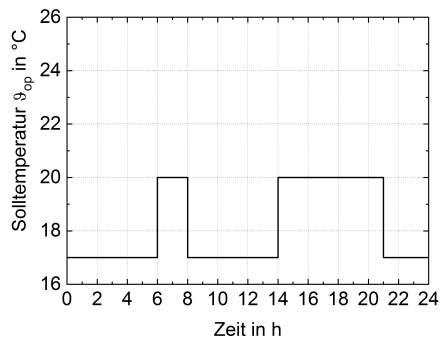


Abb. 2.11: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Kinder 1/2 (Zone 8/9)

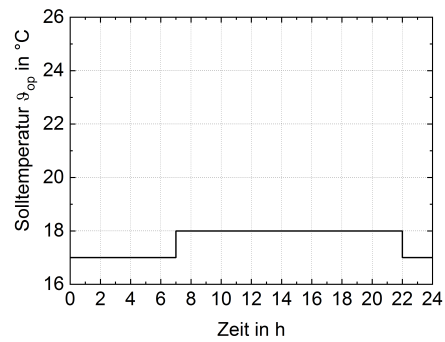


Abb. 2.12: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Schlafzimmer (Zone 11)

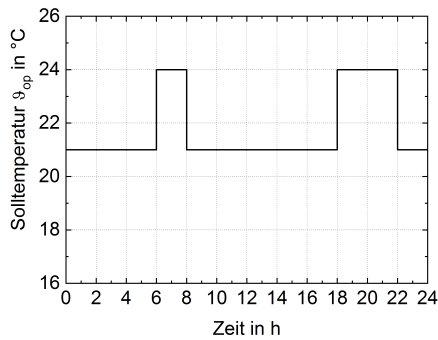


Abb. 2.13: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Bad (Zone 10)

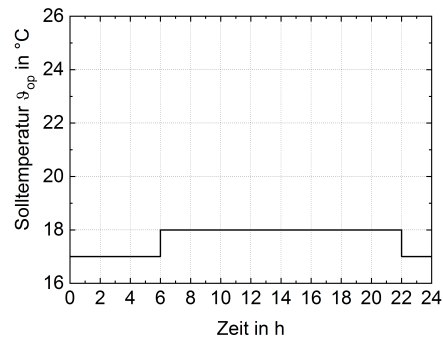


Abb. 2.14: Sollwert  $\vartheta_{op}$  - Flur KG/ EG/ 1.OG (Zonen 7/ 12/ 14)

## 2.6 Wärmephysiologische Auswertung

Neben der energetischen Auswertung der numerischen Simulationen erfolgte auch die Auswertung der thermischen Behaglichkeit. Die detaillierte Analyse erfolgte für alle Varianten exemplarisch an der Zone 2. Der Raum befindet sich im Erdgeschoss und hat eine Nord-West-Ausrichtung. Als Kriterium für die thermische Behaglichkeit wird die operative Raumtemperatur gewählt. Die Auswertung der operativen Raumtemperatur erfolgt mit Hilfe der relativen Summenhäufigkeit für die Nutzungszeit der gesamten Heizperiode. Per Definition [13] gilt: „die relative Summenhäufigkeit gibt die kumulierte prozentuale Zahl der Merkmalsausprägungen bis zu einer bestimmten Merkmalsausprägung an. Dazu sind die Prozentsätze der jeweiligen Merkmalsausprägungen nach ihrer Reihenfolge zu kumulieren (aufzuaddieren)“. Zum besseren Verständnis dokumentiert Abb. 2.15 den idealen Verlauf der Kurve der Summenhäufigkeit sowie einen realen Verlauf der Untersuchungen. Am Beispiel des idealen Verlaufes sieht man, dass es zu keinem Zeitpunkt zu Über- bzw. Unterschreitungen der gewählten Solltemperatur kommt. Die Solltemperatur wird exakt eingehalten. Einen realen Verlauf der Summenhäufigkeit zeigt die blaue Kurve. Hier wird die Solltemperatur zu 10 % der Nutzungszeit unterschritten. Die maximale Unterschreitung wird mit ca.  $\Delta\vartheta_{op} = -0,5$  K ausgewiesen.

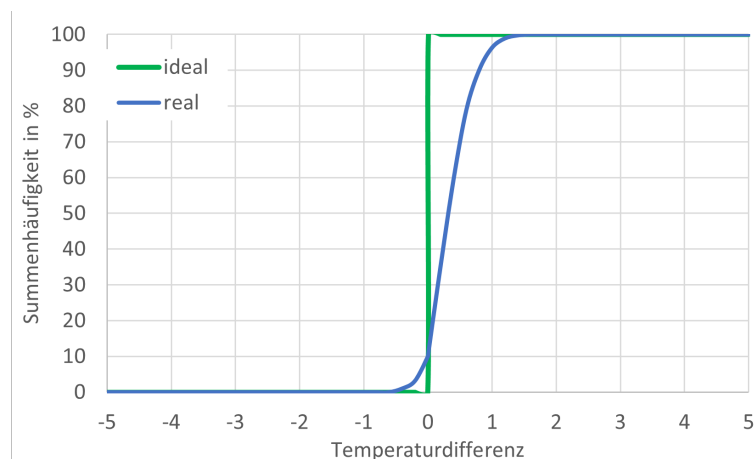


Abb. 2.15: Schematische Darstellung der prozentualen Summenhäufigkeit

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden maximale bzw. minimale Grenzen der Unterschreitung der Solltemperatur definiert. Dies dient zum einen der Sicherstellung der thermischen Be-

haglichkeit und zum anderen ist dies ein wichtiges Kriterium für die energetische Vergleichbarkeit der einzelnen Variantenrechnungen. Als Kriterien wurden folgende Grenzen definiert (siehe auch Abb. 2.16):

- eine minimale Unterschreitung von  $\Delta\vartheta_{\text{op}} = -1 \text{ K}$
- eine maximale Häufigkeit der Unterschreitung von  $H = 10\%$
- eine maximale Unterschreitung von  $A_U = 75,6 \text{ Kh}$  (Fläche unterhalb der Kurve der Summenhäufigkeit, exemplarisch für Zone 2)

Um die thermische Behaglichkeit zu erfüllen, müssen mindestens zwei der drei Kriterien eingehalten werden.

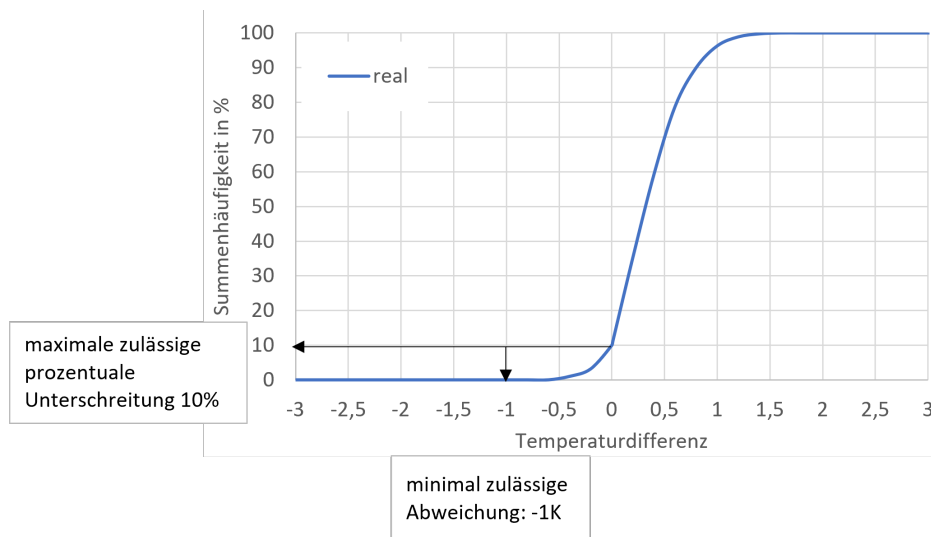


Abb. 2.16: Schematische Darstellung der definierten Grenzen der zulässigen thermischen Behaglichkeit

Als Zusatzinformation kann weiterhin die Fläche unterhalb der Kurve des Summenhäufigkeitsverlaufes, also die Unterschreitung des Sollwertes in Kh (Kelvin · Stunden) ausgewiesen werden. Der Zeitraum der Heizperiode beträgt dabei 216 Tage und die gesamte Nutzungszeit 1512 h. Theoretisch wäre folglich ein Wert von  $A_U = 151,2 \text{ Kh}$  zulässig (siehe Abb. 2.17). Dieser Bereich der Unterschreitung stellt jedoch einen theoretischen Verlauf dar, da dies nur mit einer absolut exakten Regelung sowie einem trägheitslosem System umsetzbar wäre. Im Rahmen der Studie wurde für die Bewertung der Sollwert-Unterschreitung diese Fläche halbiert, so dass eine zulässige Unterschreitung von  $A_{U,\text{max}} = 75,6 \text{ Kh}$  definiert wird. Exemplarisch für einen möglichen Kurvenverlauf zeigt Abb. 2.18 die grafische Auswertung. Für das gewählte Beispiel beträgt der Wert:  $A_U = 27,9 \text{ Kh}$ .

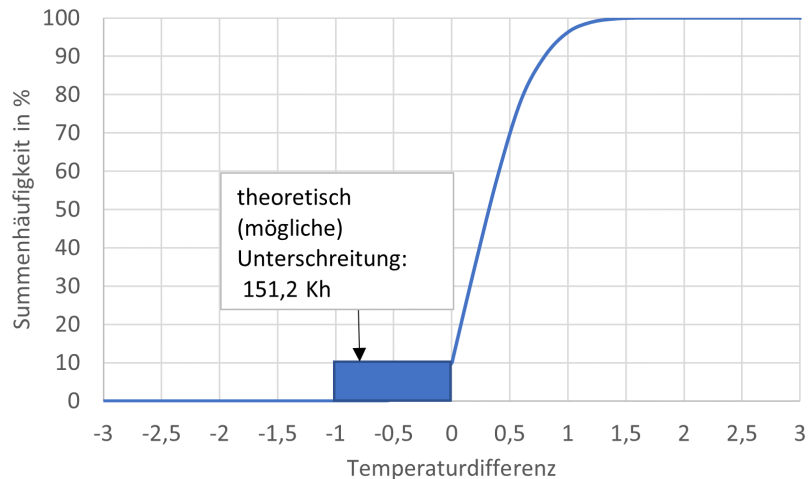


Abb. 2.17: Schematische Darstellung der theoretisch möglichen Unterschreitung der Solltemperatur in Kh

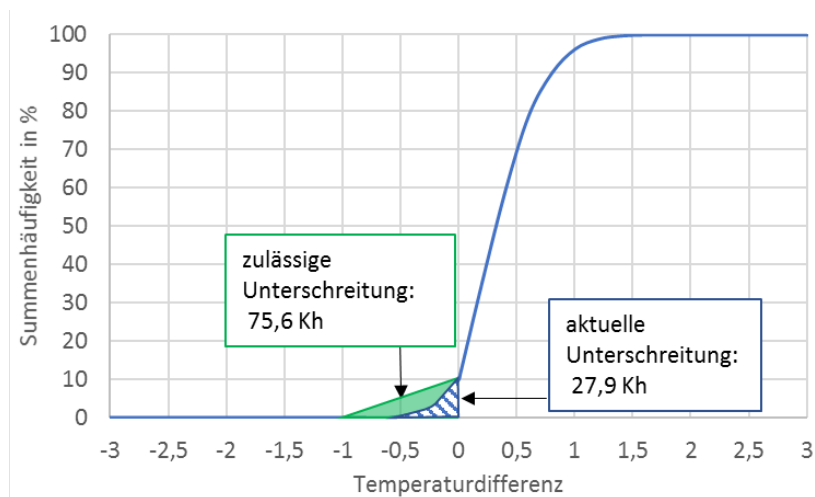


Abb. 2.18: Schematische Darstellung der zulässigen Unterschreitung der Solltemperatur in Kh

## 2.7 Energetische Auswertung

Für die energetische Auswertung bzw. den Vergleich der verschiedenen Varianten innerhalb einer Baualtersklasse werden folgende Größen unterschieden: Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz}}$ , flächenbezogene Nutzenergie  $q_{\text{Nutz}}$  und die Endenergie  $W_{\text{End}}$ . Dabei werden folgende Definitionen getroffen:

- Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz}}$ : Summe der Energien der Wärmeübergabe aller Zonen im Gebäude ohne Erzeugungsverluste
- flächenbezogene Nutzenergie  $q_{\text{Nutz}}$ : Nutzenergie bezogen auf die Grundfläche des Gebäudes
- Endenergie  $W_{\text{End}}$  bzw.  $Q_{\text{End}}$ : Summe aus Nutzenergie und allen auftretenden Verlusten bei Energieverteilung und -umwandlung durch den Wärmeerzeuger. Alle Werte der Endenergien mit Gas als Energieträger beziehen sich im Rahmen der Studie auf den Heizwert.

---

## 3 Numerische Analysen

### 3.1 Wärmedämmstandard: WSVO95

#### 3.1.1 Variantenmatrix

Die Ergebnisse einer umfangreichen Variantenmatrix für das repräsentative Einfamilienhaus mit einem Wärmedämmstandard entsprechend WSVO 95 lieferte bereits die vorangegangene Studie [1]. Ergänzend wurde im Rahmen der vorliegenden Studie die noch offene hybride Variante mit Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer Nennleistung von  $\dot{Q}_{WP} = 3 \text{ kW}$ , dies entspricht ca. 30% der Heizlast des Einfamilienhauses, umgesetzt. Die Wärmeübergabe erfolgt hybrid, dass heißt zur Raumheizung werden Infrarotheizungen während der Nutzungszeit verwendet und parallel beheizt das wasserbasierende konventionelle Heizsystem die Räume durchgehend. Auf örtliche Regeleinrichtungen der freien Heizflächen wurde verzichtet. Das Temperaturniveau der hinterlegte Heizkurve wurde deutlich reduziert auf  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40/30^\circ\text{C}$ .

#### 3.1.2 Intermittierende Betriebsweise

Die wärmephysiologische Auswertung zeigt Abb. 3.1. Die definierten Kriterien für die Einhaltung der Solltemperatur bzw. der zulässigen Unterschreitung werden eingehalten.

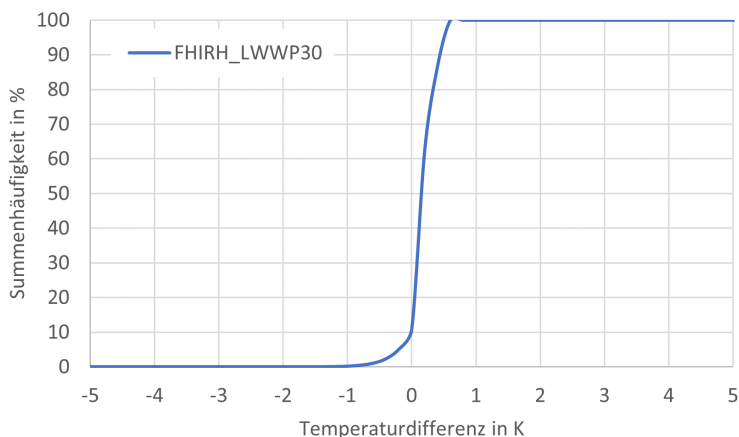


Abb. 3.1: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: intermittierender Betrieb: LW-WP mit hybrider Wärmeübergabe, WSVO 95

#### 3.1.3 Energetische Übersicht

Die energetische Auswertung dokumentiert Tab. 3.1. Die Ergebnisse zeigen, dass die installierten Infrarotheizungen unter den gegebenen Randbedingungen 27% der Raumheizaufgabe übernehmen. Bezogen auf die Endenergie ergibt sich ein Anteil der Infrarotheizungen von 61%.

Weiterhin erfolgte die Auswertung der Ergebnisse der hybriden Variante mit einer geordneten Jahresdauerlinie. Die Abb. 3.2 zeigt die tägliche Nutzenergie aller 216 Tage der Heizperiode geordnet von hoch nach niedrig und unterschieden in die Anteile der Infrarotheizungen und freien Heizflächen. Zusätzlich zeigt Abb. 3.3 die Ergebnisse der stündlich gemittelten Heizleistung der freien Heizflächen sowie der IR-Heizungen ebenfalls geordnet von Maximal- nach Minimalwert.

Innerhalb des Diagramms ist der Wert von  $\dot{Q} = 3000 \text{ W}$  gekennzeichnet, dies entspricht der Nennleistung der LW-Wärmepumpe.

Tabelle 3.1: End- und Nutzenergie der Variante WSV095

Wärme- erzeugung	Wärme- übergabe	Betriebs- weise	$Q_{\text{Nutz},\text{FH}}$ kWh	$Q_{\text{Nutz},\text{IRH}}$ kWh	$W_{\text{End},\text{WP}}$ kWh	$W_{\text{End},\text{IRH}}$ kWh	$\sum W_{\text{End}}$ kWh	$A_U$ Kh
LW-WP	FH+IRH	interm.	11258	4127 (27%)	2658	4132 (61%)	6790	43,9

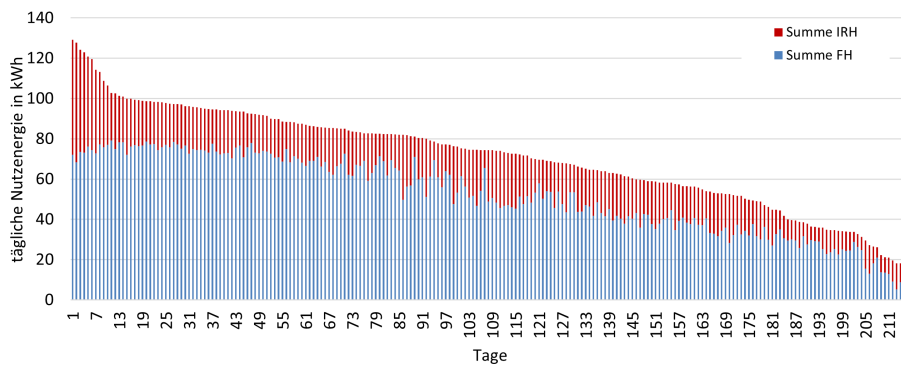


Abb. 3.2: Geordnete Jahresdauerlinie - Tagesmittelwerte der Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz},d}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, WSV095

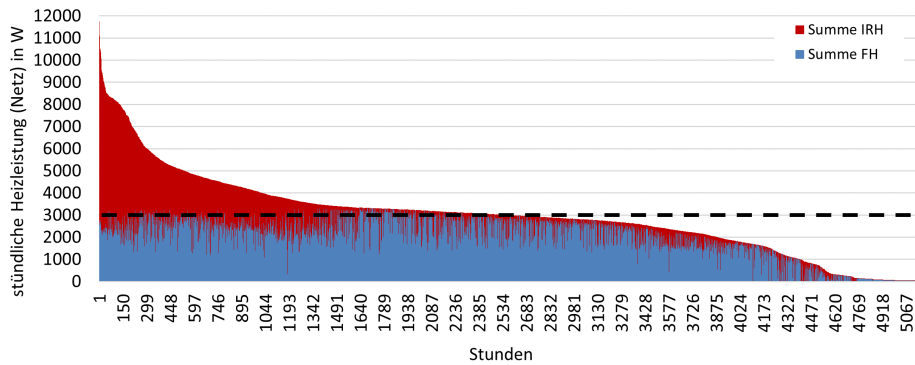


Abb. 3.3: Geordnete Jahresdauerlinie - Stundenmittelwerte der Heizleistung (Raum)  $\dot{Q}_{\text{Nutz},h}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, WSV095

Die gezeigten Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung wie die Resultate der vorangegangenen Studie [1] und vervollständigen folglich die Variantenmatrix des Wärmeschutzniveaus nach WSV0 95 schlüssig. Die Simulation belegt weiterhin die Aussage, dass es grundsätzlich möglich ist, das Einfamilienhaus mit einer Kleinst-Wärmepumpe von  $\dot{Q}_{N,WP} = 3 \text{ kW}$  mit hybrider Wärmeübergabe und einem reduzierten Temperaturniveau des wasserbasierten Systems zu beheizen. Die Nennleistung der Luft-Wasser-Wärmepumpe entspricht circa 30% der Gebäudeheizlast.

## 3.2 Baualtersklasse: Neubau

### 3.2.1 Variantenmatrix

Im Rahmen der Studie wird folgende Variantenmatrix für das Einfamilienhaus entsprechend der Baualtersklasse Neubau in Anlehnung an den KfW40-Standard (siehe Tab. 3.2) umgesetzt. Dieser Wärmedämmstandard ist durch eine sehr gute wärmetechnische Ausstattung gekennzeichnet. Für dieses Szenario wurde aufgrund der geringen Heizlast auf ein hybrides System, d.h. der Kombination aus Infrarotheizungen und einem wasserbasierten Heizsystem verzichtet. Des Weiteren erfolgen keine numerischen Untersuchungen mit Gaskesseln. Es wird zwischen dem wasserbasierten Heizsystem mit Radiatoren in Kombination mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und einer Beheizung mit Infrarotheizungen unterschieden. Beide Varianten wurden mit den gleichen Leistungskennwerten von ca.  $\dot{Q}_N = 5,5$  kW ausgestattet.

Neben der Art der Raumheizung erfolgte eine Unterscheidung des zeitlichen Betriebes. Es wird zwischen der durchgehenden und der intermittierenden Betriebsweise variiert. Für den intermittierenden Betrieb wurden die Nutzungsprofile aus Kap. 2.5 zugrunde gelegt, während im durchgehenden Betrieb 24 h am Tag der definierte Sollwert eingehalten werden soll. Es gibt folglich keine zeitliche Unterbrechung.

Tabelle 3.2: Variantenmatrix Neubau (KfW 40)

Wärmeerzeuger	Wärmeübergabesystem	Heizkurve ( $\vartheta_V/\vartheta_R$ )	Betrieb	Anheizzeit	örtliche Regeleinrichtung	
					Heizkörper	IRH
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C	durchgehend		ja	-
-	Infrarotheizung	-	durchgehend		-	ja
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C	intermittierend		ja	-
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C	intermittierend	1 h	ja	-
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C	intermittierend	2 h	ja	-
-	Infrarotheizung	-	intermittierend		-	ja
-	Infrarotheizung	-	intermittierend	1 h	-	ja

### 3.2.2 Durchgehende Betriebsweise

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse der durchgehenden Betriebsweise sowohl für das wasserbasierte Heizsystem mit Radiatoren und Wärmepumpe als auch für die Beheizung mit Infrarotheizungen dokumentiert. Zugrunde gelegt ist die Heizkurve entsprechend Kapitel 2.3 für das Temperaturniveau  $\vartheta_V/\vartheta_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ .

Die Abb. 3.4 zeigt den Vergleich der Summenhäufigkeiten 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 energetischen Vergleichbarkeit der verschiedenen Variantenrechnungen. Innerhalb beider Varianten mit durchgehender Betriebsweise ist die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit gegeben. Die Sollwerte werden zu keinem Zeitpunkt unterschritten. Deutlich zu erkennen ist, dass die Variante mit Infrarotheizungen gegenüber den Thermostatregelventilen der Radiatoren eine exaktere Einhaltung des Sollwertes aufweist. Die örtliche Regeleinrichtung des wasserbasierten Systems führt zu einer bleibenden Regelabweichung und folglich zu höheren Raumtemperaturen. In beiden Varianten werden außerdem innere

und solare Gewinne berücksichtigt. Diese können ebenfalls zu erhöhten operativen Raumtemperaturen führen.

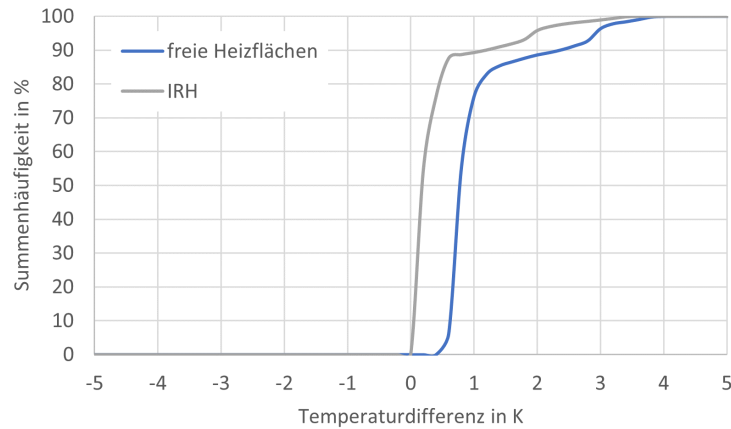


Abb. 3.4: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: durchgehender Betrieb: LW-WP mit freien Heizflächen im Vergleich zu Infrartheizungen, Neubau (KfW 40)

### 3.2.3 Intermittierende Betriebsweise

Die folgenden Diagramme zeigen die Auswertung der Summenhäufigkeiten der Zone 2 für die intermittierende Betriebsweise. Abb. 3.5 enthält die Kurven für die Varianten mit Radiatoren in Kombination mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Anheizzeit sowie mit 1 bzw. 2 h Anheizzeit vor Nutzungsbeginn. Es ist gut erkennbar, dass die thermische Behaglichkeit unter den gegebenen Randbedingungen nur in der Variante mit 2 Stunden Anheizzeit erfüllt werden kann. Die relative Abweichung (Sollwertunterschreitung) beträgt hier 9,8 % und die Temperaturdifferenz maximal  $\Delta\vartheta_{op} = -0,4$  K. Die Unterschreitung der Solltemperatur beträgt  $A_U = 19,3$  Kh und liegt somit in den definierten zulässigen Grenzen.

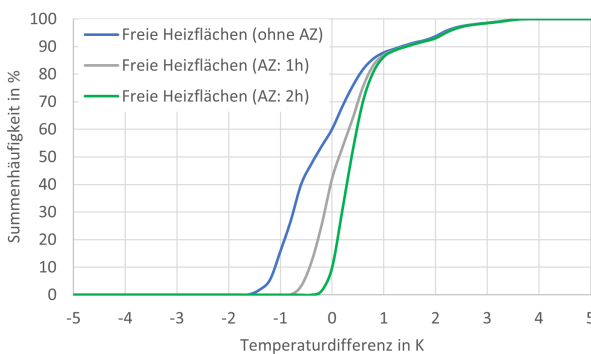


Abb. 3.5: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: intermittierender Betrieb: LW-WP mit freien Heizflächen mit variierenden Anheizzeiten, Neubau (KfW 40)

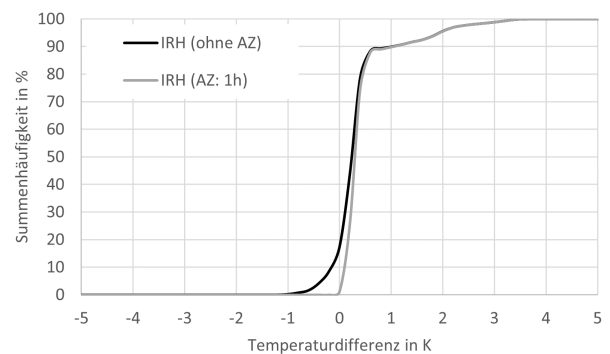


Abb. 3.6: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: intermittierender Betrieb: Infrartheizungen mit variierenden Anheizzeiten, Neubau (KfW 40)

Die Abb. 3.6 enthält die Summenhäufigkeit der operativen Temperatur für die Varianten mit Infrartheizungen. Erfolgt die Raumheizung ohne Anheizzeiten, kommt es zu einer Unterschreitung



der Solltemperatur in 17 % der Nutzungszeit. Die maximale Abweichung beträgt dabei  $\Delta\vartheta_{\text{op}} = -1$  K. Die Unterschreitung der Solltemperatur beträgt  $A_U = 72,4$  Kh und liegt somit noch knapp im zulässigen Toleranzbereich der maximalen Unterschreitung. Werden die Infrarotheizungen mit einer Anheizzeit von 1 h betrieben, können die Solltemperaturen während der Nutzungszeit zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden. Es zeigt sich folglich, dass für die freien Heizflächen die Einhaltung der Sollwerte ohne Anheizzeiten unter den Randbedingungen nicht möglich ist. Deutlich wird weiterhin, dass das System der Infrarotheizungen schneller die Sollwerte erreicht, so dass hier kürzere Anheizzeiten nötig sind.

### 3.2.4 Energetische Übersicht

Die energetische Auswertung der Varianten der Baualtersklasse: Neubau enthält Tabelle 3.3. Weiterhin enthält die Tabelle eine Aussage über die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit. Dargestellt ist die Unterschreitung der Sollwerte in Kelvinstunden. Als Grenzwert wurde  $A_{U,\text{max}} = 75,6$  Kh definiert. Die grafische Auswertungen der energetischen Kennwerte (Nutz- und Endenergie) zeigen die Abb. 3.7 und 3.8. Es werden nur die Varianten grafisch dargestellt, die den Wert von  $A_{U,\text{max}} = 75,6$  Kh unterschreiten.

Tabelle 3.3: End- und Nutzenergie der Varianten Neubau (KfW 40)

Wärmeerzeugung	Wärmeübergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$	Betriebsweise	$\tau_{AZ}$ h	$Q_{\text{Nutz}}$ kWh	$q_{\text{Nutz}}$ kWh/m <sup>2</sup>	$W_{\text{End}}$ kWh	$A_U$ Kh	therm. behaglich
LW-WP	FH	55/45 °C	durchg.	-	5541	34,6	1698	0	ja
	IRH	-	durchg.	-	5106	31,9	5106	0	ja
LW-WP	FH	55/45 °C	interm.	-	4000	25,0	1178	668,1	nein
LW-WP	FH	55/45 °C	interm.	1	4127	25,8	1219	185,7	nein
LW-WP	FH	55/45 °C	interm.	2	4204	26,3	1252	19,3	ja
-	IRH	-	interm.	-	4314	27,0	4314	72,4	ja
-	IRH	-	interm.	1	4368	27,3	4368	1,7	ja

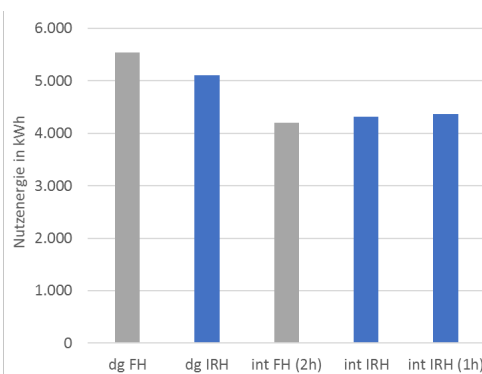


Abb. 3.7: Nutzenergien, Neubau (KfW 40)

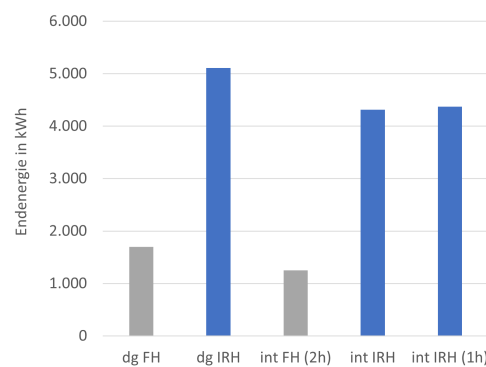


Abb. 3.8: Endenergien, Neubau (KfW 40)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im durchgehenden Betrieb das System mit Infrarotheizungen eine genauere Sollwertehaltung gegenüber dem wasserbasierten System mit Thermostatregelventilen ermöglicht. Daraus resultiert eine geringere Nutzenergie der Infrarotheizungen gegenüber den freien Heizflächen.

Im intermittierenden Betrieb zeigt sich, dass Anheizzeiten für das wasserbasierte Heizsystem

notwendig sind, um die thermische Behaglichkeit zu realisieren. Aufgrund der schnellen Reaktionszeiten der Infrarotheizungen kann auf eine Anheizzeit bei der Variante Neubau verzichtet werden. Alternativ könnten über die Anpassung der Stütztemperaturen die Anheizzeiten reduziert werden. Die energetischen Kennwerte der Nutzenergien weisen im intermittierenden Betrieb minimal höhere Werte auf, dies kann mit der komfortableren Einhaltung der Sollwerte insbesondere zu Beginn der Nutzungszeit begründet werden.

### 3.3 Wärmedämmstandard: EnEV04

#### 3.3.1 Variantenmatrix

Im Rahmen der Untersuchungen wurde folgende Variantenmatrix für das Einfamilienhaus in der Baualtersklasse EnEV04, siehe Tab. 3.4, umgesetzt.

Tabelle 3.4: Variantenmatrix: EnEV04

Wärmeerzeuger	Wärmeübergabe-system	Heizkurve ( $\vartheta_V/\vartheta_R$ )	Betrieb	Anheizzeit	örtliche Regeleinrichtung	
					Heizkörper	IRH
BWK	freie Heizflächen	55°C/45°C	durchgehend		ja	-
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C	durchgehend		ja	-
BWK	freie Heizflächen	55°C/45°C	intermittierend	3 h	ja	-
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C	intermittierend	3 h	ja	-
BWK	freie Heizflächen	55°C/45°C + 4K	intermittierend	3 h	ja	-
LW - WP	freie Heizflächen	55°C/45°C + 4K	intermittierend	3 h	ja	-
BWK	hybrid (FH + IRH)	40°C/30°C	intermittierend		-	ja
LW - WP	hybrid (FH + IRH)	40°C/30°C	intermittierend		-	ja
BWK	hybrid (FH + IRH)	35°C/28°C	intermittierend		-	ja
LW - WP	hybrid (FH + IRH)	35°C/28°C	intermittierend		-	ja
-	Infrartheizung	-	intermittierend		-	ja
-	Infrartheizung	-	intermittierend	1 h	-	ja
-	Infrartheizung	-	intermittierend	2 h	-	ja
-	Infrartheizung	-	intermittierend	3 h	-	ja

#### 3.3.2 Durchgehende Betriebsweise

Die Abb. 3.9 zeigt den Vergleich der Summenhäufigkeiten der operativen Raumtemperatur während der Nutzungszeit für die gesamte Heizperiode am Beispiel der Zone 2 (Esszimmer) für die durchgehende Betriebsweise. Unterschieden wird zwischen dem wasserbasierten Heizsystem mit Radiatoren und Brennwertkessel bzw. mit Luft-Wasser-Wärmepumpe. Zugrunde gelegt ist in beiden Varianten die Heizkurve entsprechend Kapitel 2.3 für das Temperaturniveau  $\vartheta_V/\vartheta_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ .

Innerhalb beider Varianten mit durchgehender Betriebsweise ist die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit gegeben. Die Sollwerte werden zu keinem Zeitpunkt unterschritten. Beide Verläufe weisen nahezu identische Ergebnisse auf. Deutlich zu erkennen ist, dass die Varianten mit Thermostatregelventilen ausgestattet sind. Die typische bleibende Regelabweichung ist gut erkennbar. In beiden Varianten werden außerdem innere und solare Gewinne berücksichtigt, diese können ebenfalls zu erhöhten operativen Raumtemperaturen führen.

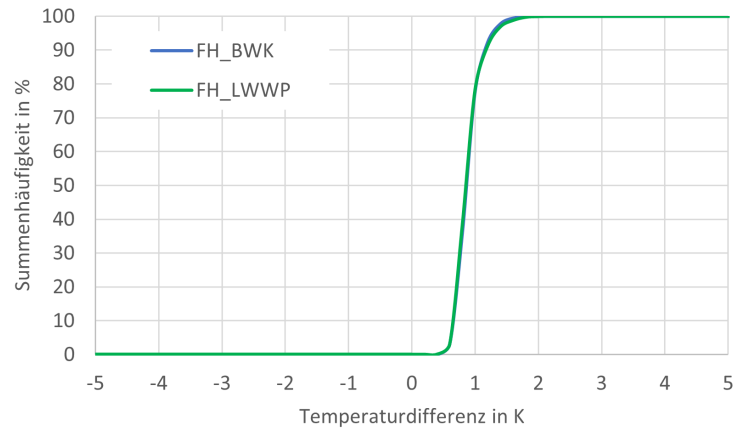


Abb. 3.9: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: durchgehender Betrieb: Brennwertkessel bzw. LW-Wärmepumpe mit freien Heizflächen, ENEV04

### 3.3.3 Intermittierende Betriebsweise

#### 3.3.3.1 Infrarotheizung

Die Ergebnisse der Summenhäufigkeit der operativen Raumtemperatur bei einer intermittierenden Betriebsweise, wenn die Raumheizung komplett über die Infrarotheizungen erfolgt, zeigt Abb. 3.10. Gegenübergestellt werden die Verläufe ohne Anheizzeit sowie einem Beginn der Raumbeheizung 1, 2 und 3 Stunden vor der definierten Nutzungszeit. Die Varianten mit 2 bzw. 3 Stunden Anheizzeit liefern nahezu gleiche Verläufe und gewährleisten die thermische Behaglichkeit zu Nutzungsbeginn. Bei kürzeren Vorlaufzeiten der Infrarotheizungen muss mit einer Nichteinhaltung der thermischen Behaglichkeit gerechnet werden.

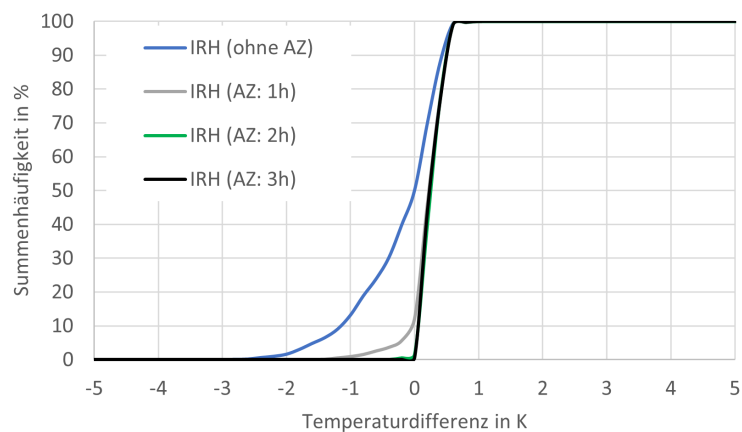


Abb. 3.10: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: intermittierender Betrieb: 100 %Infrarotheizung, ENEV04

### 3.3.3.2 Freie Heizflächen

Zunächst erfolgten numerische Untersuchungen mit den Wärmeerzeugern Brennwertkessel bzw. Luft-Wasser-Wärmepumpe und freien Heizflächen für die intermittierende Betriebsweise. Die Systemtemperaturen der Heizkurve wurden mit  $\vartheta_V/\vartheta_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$  definiert. Die Ergebnisse der Summenhäufigkeit sind am Beispiel der charakteristischen Zone 2 dokumentiert (vgl. Abb. 3.11). Es zeigt sich, dass in beiden Varianten Unterschreitungen des Sollwertes auftreten. Die thermische Behaglichkeit ist insbesondere in der Variantenrechnung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe nicht erfüllt. Als Maßnahme zur Verbesserung der Behaglichkeit erfolgte die Anhebung der Heizkurve um ein Offset von 4 K. Das heißt die ursprünglich gewählte Heizkurve wird in allen Betriebspunkten um 4 K angehoben (Parallelverschiebung der Heizkennlinie). Das Resultat zeigt die Abb. 3.12. Die thermische Behaglichkeit wird somit erreicht.

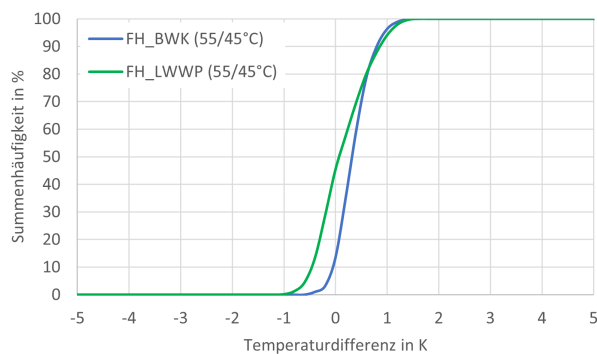


Abb. 3.11: Summenhäufigkeit (Zone 2): Brennwertkessel und LW-Wärmepumpe mit freien Heizflächen  $\vartheta_V/\vartheta_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ , intermittierend, ENEV04

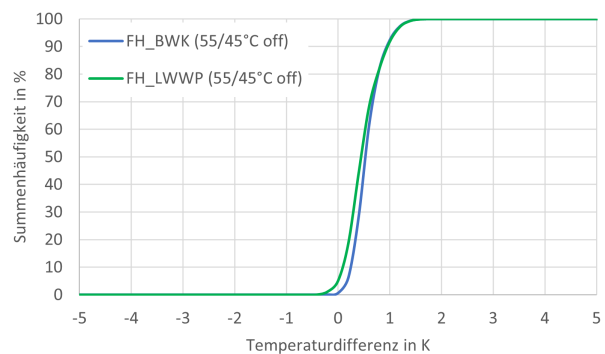


Abb. 3.12: Summenhäufigkeit (Zone 2): Brennwertkessel und LW-Wärmepumpe mit freien Heizflächen  $\vartheta_V/\vartheta_R = 55^\circ\text{C}/45^\circ\text{C} + 4\text{K}$ , intermittierend, ENEV04

### 3.3.3.3 Hybrid: Freie Heizflächen und Infrarotheizung

Alternativ zu den oben beschriebenen monovalenten Varianten wurden außerdem Varianten mit einem hybriden System zur Raumbeheizung untersucht. Für die Wärmeübergabe im Raum bedeutet das, dass sowohl die Bestandsradiatoren als auch (neu) integrierte Infrarotheizungen verwendet werden. An den Radiatoren wird die örtliche Regeleinrichtung entfernt, so dass ein permanenter Wärmeeintrag erfolgen kann. Die Infrarotheizungen werden entsprechend der definierten Nutzungsprofile geregelt. Als Wärmeerzeuger für das wasserbasierte System wird unterschieden zwischen dem (Bestands)Kessel und einer LW-Wärmepumpe mit einer Nennleistung von ca. 30% der Heizlast des Gebäudes ( $\dot{Q}_{N,WP,ENEV04} = 2\text{ kW}$ ). In Anlehnung an die vorangegangene Studie [1] erfolgt zunächst eine Reduzierung des Temperaturniveaus der definierten Heizkurve auf  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ . Die Ergebnisse der Summenhäufigkeit enthält Abb. 3.13. Die operative Raumtemperatur wird zu keinem Zeitpunkt unterschritten. Aufgrund des steten Wärmeeintrag über die freien Heizflächen treten zum Teil deutlich wärmere Raumtemperaturen auf. In einer weiteren Untersuchung wurde deshalb das Temperaturniveau weiter auf  $\vartheta_V/\vartheta_R = 35^\circ\text{C}/28^\circ\text{C}$  reduziert. Wie in Abb. 3.14 deutlich wird, reicht das Temperaturniveau aus und Einschränkungen der thermischen Behaglichkeit werden vermieden.

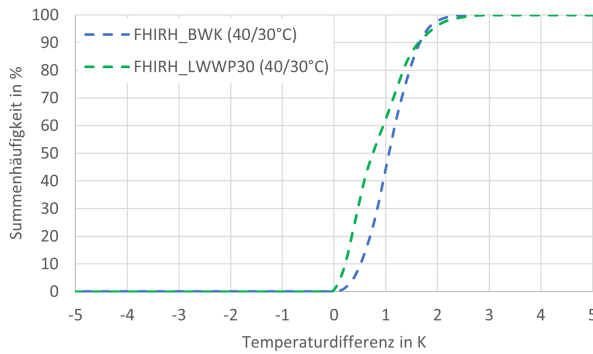


Abb. 3.13: Summenhäufigkeit (Zone 2): BW-K und LW-WP mit freien Heizflächen und IRH  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40^\circ\text{C}/30^\circ\text{C}$ , intermittierend, ENEV04

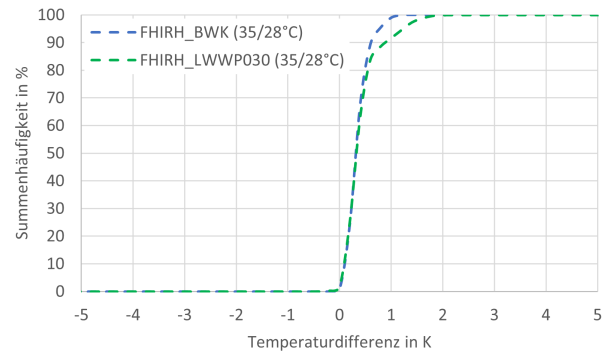


Abb. 3.14: Summenhäufigkeit (Zone 2): BW-K und LW-WP mit freien Heizflächen und IRH  $\vartheta_V/\vartheta_R = 35^\circ\text{C}/28^\circ\text{C}$ , intermittierend, ENEV04

### 3.3.4 Energetische Übersicht

Die energetische Auswertung aller Varianten der Baualtersklasse EnEV04 enthält Tabelle 3.5. Dokumentiert werden die energetischen Kenngrößen: Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz}}$  unterschieden nach den Anteilen der freien Heizflächen und der Infrarotheizungen sowie die Endenergien  $Q_{\text{End}}$  bzw.  $W_{\text{End}}$  in Abhängigkeit des Wärmeerzeugers. Die Energiekennwerte der Endenergie für die Gaskessel beziehen sich auf den Heizwert. Exemplarisch für den Wärmedämmstandard können die Werte der Endenergie bezogen auf den Brennwert dem Anhang unter Kap. A.3.1 entnommen werden.

Die Varianten LW-WP mit freien Heizflächen sowie der Raumbeheizung mit ausschließlich Infrarotheizungen ohne Anheizzeit weisen eine deutliche Unterschreitung der Sollwerte der operativen Raumtemperaturen im intermittierenden Betrieb auf. Die Variante ausschließlich mit Infrarotheizungen und 1h Anheizzeit befindet sich im Grenzbereich bezogen auf die thermische Behaglichkeit. Die Unterschreitungshäufigkeit liegt bei 12% und die maximale Abweichung bei  $\Delta\vartheta_{\text{op}} = 1,2$  K. Der definierte Grenzwert von  $A_{\text{U,max}} = 75,6$  Kh wird jedoch nicht überschritten. Alle anderen Varianten der Tabelle erfüllen die Kriterien der thermischen Behaglichkeit innerhalb der definierten Grenzen.

Die grafische Auswertungen der energetischen Kennwerte der Nutz- und Endenergie im intermittierenden Betrieb zeigen die Abb. 3.15 und 3.16. Auch hier erfolgt eine Unterscheidung der Wärmeübergabe im Raum zwischen dem wasserbasierten System mit Radiatoren und dem Anteil der Infrarotheizungen. Den höchsten Anteil der Infrarotheizungen mit ca. 13% verzeichnet die Variante mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und den Systemtemperaturen  $\vartheta_V/\vartheta_R = 35/28$  °C. Hinsichtlich der Endenergie wird unterschieden in die Wärmeerzeuger: Niedertemperaturkessel, Luft-Wasser-Wärmepumpe und der Infrarotheizungen.

<sup>7</sup>Die energetischen Kennwerte der Endenergie beziehen sich auf den Heizwert.

Tabelle 3.5: End- und Nutzenergie der Varianten EnEV04

Wärme- erzeugung	Wärme- übergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$ °C	$\tau_{AZ}$ h	$Q_{Nutz,FH}$ kWh	$Q_{Nutz,IRH}$ kWh	$Q_{End}^7$ kWh	$W_{End}$ kWh	$A_U$ Kh	therm. behagl.
durchgehende Betriebsweise									
BWK	FH	55/45	-	10115	-	9507	-	0	ja
LWWP	FH	55/45	-	10152	-	-	2963	0	ja
intermittierende Betriebsweise									
BWK	FH	55/45	3	8118	-	7702	-	33	ja
LWWP	FH	55/45	3	8036	-	-	2229	213	nein
BWK	FH	55/45+4K	3	8253	-	7865	-	1	ja
LWWP	FH	55/45+4K	3	8212	-	-	2357	11	ja
BWK	FH+IRH	40/30	-	9658	295(3%)	9051	295(3%)	0	ja
LWWP <sub>30%</sub>	FH+IRH	40/30	-	9085	578(6%)	-	2722(21%)	2	ja
BWK	FH+IRH	35/28	-	8061	1055(12%)	7526	1055(12%)	1	ja
LWWP <sub>30%</sub>	FH+IRH	35/28	-	7879	1186(13%)	-	3014(39%)	4	ja
-	IRH	-	-	-	8262	-	8262	537	nein
-	IRH	-	1	-	8422	-	8422	63	(ja)
-	IRH	-	2	-	8504	-	8504	4	ja
-	IRH	-	3	-	8560	-	8560	1	ja

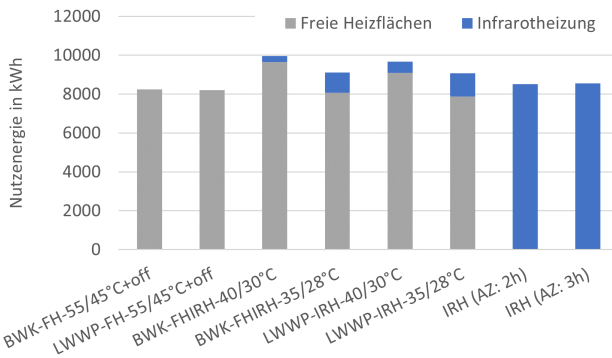


Abb. 3.15: Nutzenergien, intermittierender Betrieb, EnEV04

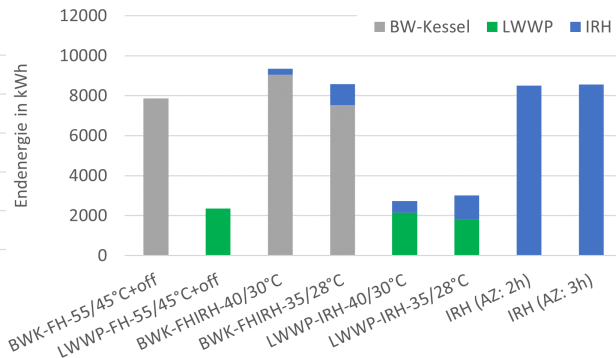


Abb. 3.16: Endenergien, intermittierender Betrieb, EnEV04

Weiterhin erfolgte die Auswertung der Ergebnisse der hybriden Variante mit LW-Wärmepumpe mit einer geordneten Jahresdauerlinie. Die Abb. 3.17 zeigt die tägliche Nutzenergie der gesamten Heizperiode (216 Tage) geordnet von Maximal- nach Minimalwert und unterschieden in die Anteile Infrarotheizungen und freie Heizflächen. Zusätzlich zeigt Abb. 3.18 die Ergebnisse der stündlich gemittelten Heizleistung der freien Heizflächen sowie der IRH ebenfalls geordnet von Maximal- nach Minimalwert. Innerhalb des Diagramms ist der Wert von  $\dot{Q} = 2000$  W gekennzeichnet, dies entspricht der Nennleistung der LW-Wärmepumpe. Im Anhang (siehe Kap. A.3.2) sind außerdem die Diagramme der Jahresdauerlinien der Tagesmittelwerte (Abb. A.13) sowie der Stundenmittelwerte (Abb. A.14) in chronologischer Reihenfolge der Heizperiode dargestellt.

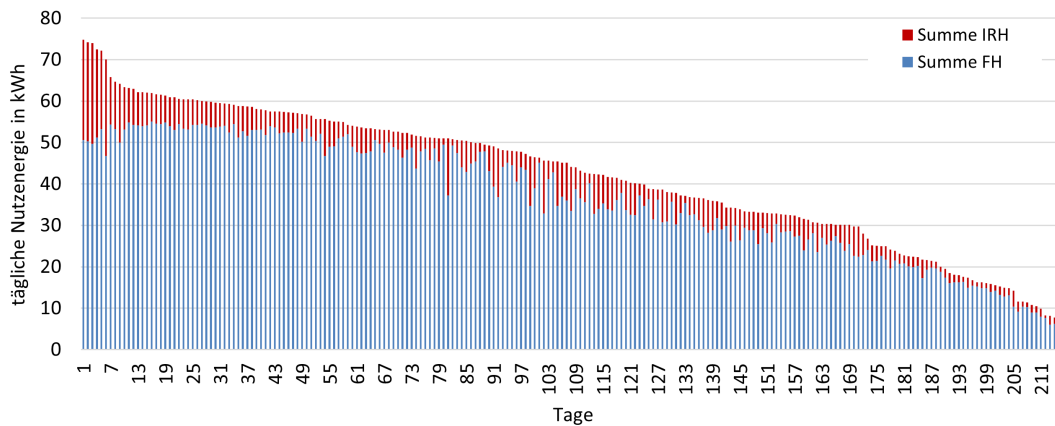


Abb. 3.17: Geordnete Jahresdauerlinie - Tagesmittelwerte der Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz,d}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, ENEV04

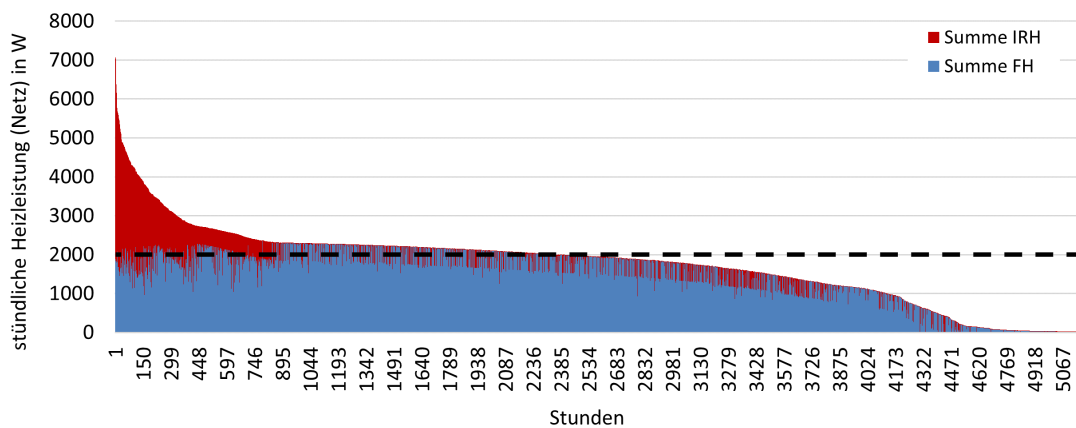


Abb. 3.18: Geordnete Jahresdauerlinie - Stundenmittelwerte der Heizleistung (Raum)  $\dot{Q}_{\text{Nutz,h}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, ENEV04

Zusammenfassend für das Einfamilienhaus entsprechend dem Wärmedämmstandard EnEV04 sind im (stark) intermittierenden Betrieb Anheizzeiten notwendig, um die thermische Behaglichkeit einzuhalten. Gegenüber dem sehr gut gedämmten Neubau (KfW40) erhöhen sich die Anheizzeiten um ca. 1 Stunde. Alternativ könnte über die Anpassung der Stütztemperaturen auf Anheizzeiten verzichtet werden.

Die Varianten mit hybrider Wärmeübergabe erfüllen die thermische Behaglichkeit unter den definierten Randbedingungen deutlich besser. Es treten zu keinem Zeitpunkt Unterschreitungen des Sollwertes auf. Aufgrund der fehlenden Thermostatregelventile und dem damit verbundenen unregelmäßigen Wärmeeintrag treten höhere Energiewerte auf. Dieser Effekt konnte durch das Absenken der Systemtemperaturen deutlich reduziert werden.



### 3.4 Wärmedämmstandard: WSV077

#### 3.4.1 Variantenmatrix

Die umgesetzte Variantenmatrix des Einfamilienhauses des Wärmedämmstandards WSV077 fasst Tab. 3.6 zusammen. In allen intermittierenden Varianten mit dem wasserbasierten Heizsystem wird auf die außentemperaturabhängige Nachtschaltung verzichtet.

Tabelle 3.6: Variantenmatrix: WSV077

Wärmeerzeuger	Wärmeübergabesystem	Heizkurve ( $\vartheta_V/\vartheta_R$ )	Betrieb	Anheizzeit	örtliche Regeleinrichtung	
					Heizkörper	IRH
NTK LW - WP	freie Heizflächen	70°C/55°C	durchgehend		ja	-
	freie Heizflächen	70°C/55°C	durchgehend		ja	-
NTK LW - WP	freie Heizflächen	70°C/55°C + 4K	intermittierend	4 h	ja	-
	freie Heizflächen	70°C/55°C + 4K	intermittierend	4 h	ja	-
NTK LW - WP	hybrid (FH + IRH)	45°C/35°C	intermittierend		-	ja
	hybrid (FH + IRH)	45°C/35°C	intermittierend		-	ja
-	Infrartheizung	-	intermittierend	4 h	-	ja
-	Infrartheizung	-	intermittierend	3 h	-	ja

#### 3.4.2 Durchgehende Betriebsweise

Die Abb. 3.19 zeigt den Vergleich der Summenhäufigkeiten der operativen Raumtemperatur während der Nutzungszeit für die gesamte Heizperiode am Beispiel der Zone 2 (Esszimmer) für die durchgehende Betriebsweise. Unterschieden wird zwischen dem wasserbasierten Heizsystem mit Radiatoren und einem Niedertemperaturkessel bzw. mit Luft-Wasser-Wärmepumpe. Zugrunde gelegt ist in beiden Varianten die Heizkurve entsprechend Kapitel 2.3 für das Temperaturniveau  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ .

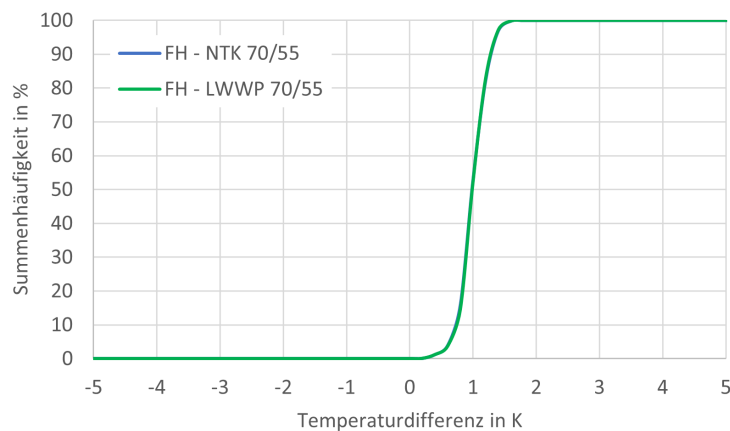


Abb. 3.19: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: durchgehender Betrieb: Niedertemperaturkessel bzw. LW-Wärmepumpe mit freien Heizflächen, WSV077

Innerhalb beider Varianten mit durchgehender Betriebsweise ist die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit gegeben. Die Sollwerte werden zu keinem Zeitpunkt unterschritten. Beide Verläufe weisen nahezu identische Ergebnisse auf. Deutlich zu erkennen ist, dass die Varianten mit Thermostatregelventilen ausgestattet sind. Die typische bleibende Regelabweichung ist gut sichtbar. In beiden Varianten werden außerdem innere und solare Gewinne berücksichtigt, diese können ebenfalls zu erhöhten operativen Raumtemperaturen führen.

### 3.4.3 Intermittierende Betriebsweise

Zunächst werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit Niedertemperaturkessel ausgewertet. Die Nennleistung beträgt in allen Varianten  $\dot{Q}_{NTK,N} = 16 \text{ kW}$ . Wie die Abb. 3.20 zeigt, führt die intermittierende Betriebsweise mit Nachtabschaltung und der Heizkurve nach  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70/55^\circ\text{C}$  trotz einer gewählten Anheizzeit von 4 h zu wesentlichen Unterschreitungen der Sollwerte (durchgezogene blaue Kurve). Deshalb wurden die numerischen Simulationen schrittweise angepasst, das heißt es wurde zunächst auf die Nachtabschaltung verzichtet. Dies führt zu einer sichtbaren Verbesserung (graue Kurve), reicht allerdings nicht aus. Zusätzlich erfolgte die Anhebung der Heizkurve um  $\Delta\vartheta = 4 \text{ K}$ . Das Ergebnis zeigt die schwarze Kurve. Die thermische Behaglichkeit ist erfüllt.

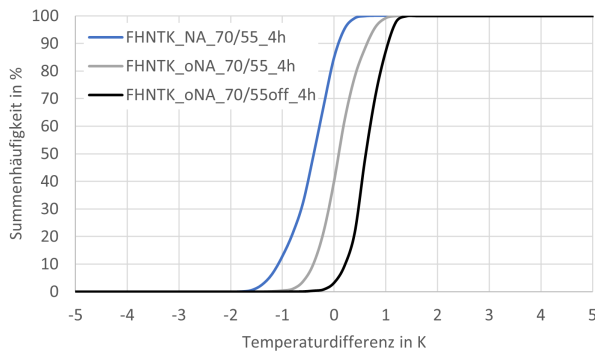


Abb. 3.20: Summenhäufigkeit (Zone 2): NT-K mit freien Heizflächen, intermittierend, WSV077

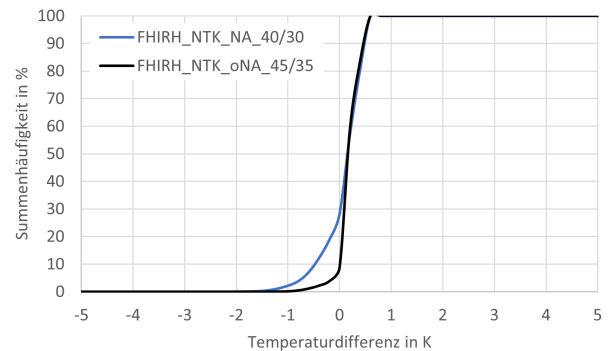


Abb. 3.21: Summenhäufigkeit (Zone 2): NT-K mit hybrider WÜ, intermittierend, WSV077

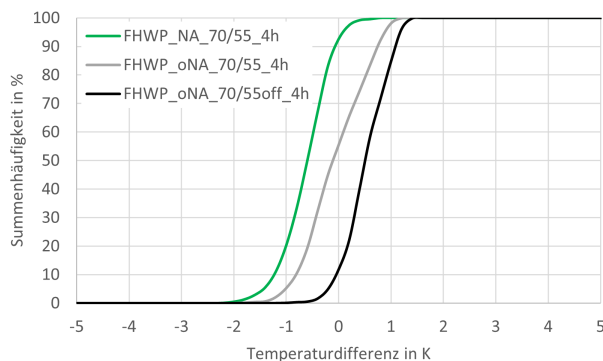


Abb. 3.22: Summenhäufigkeit (Zone 2): LW-WP mit freien Heizflächen, intermittierend, WSV077

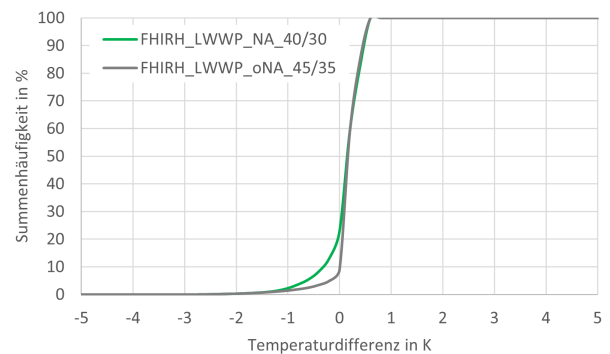


Abb. 3.23: Summenhäufigkeit (Zone 2): LW-WP (30%) mit hybrider WÜ, intermittierend, WSV077

Abb. 3.21 dokumentiert die Summenhäufigkeit der hybriden Varianten mit NT-Kessel. Auch hier

zeigt sich, dass das zunächst gewählte Temperaturniveau von  $\vartheta_V/\vartheta_R = 40/30^\circ\text{C}$  nicht ausreicht, um die Einhaltung der Sollwerte im intermittierenden Betrieb zu gewährleisten. Auch hier wurde auf die Nachtabstaltung verzichtet und die Heizkurve um  $\Delta\vartheta = 5\text{ K}$  angehoben. Mit den getroffenen Maßnahmen liegen die Ergebnisse innerhalb der definierten (zulässigen) Kriterien. Die Abb. 3.22 sowie Abb.3.23 stellen die Ergebnisse der Untersuchungen mit Luft-Wasser-Wärmepumpe dar. Innerhalb der Simulationen mit freien Heizflächen entspricht die Nennleistung der Wärmepumpe der Leistung des Niedertemperaturkessels ( $\dot{Q}_{\text{LWWP,N}} = 16\text{ kW}$ ). In den Untersuchungen mit der hybriden Wärmeübergabe aus Radiatoren und Infrarotheizungen erfolgte eine Reduzierung der Nennleistung auf ca. 30% der Gebäude-Heizlast ( $\dot{Q}_{\text{LWWP,30\%}} = 4,5\text{ kW}$ ). Die Tendenzen und Verläufe der Kurven der Summenhäufigkeiten entsprechen den Ergebnisse der Untersuchungen mit NT-Kessel. Die Einhaltung der Solltemperaturen bei den Varianten für die monovalente Beheizung mit Infrarotheizungen dokumentiert Abb. 3.24. Als Anheizzeit wurden 3 bzw. 4 Stunden definiert. Die Verläufe sind aufgrund der Regelung der Infrarotheizung nahezu identisch. Analog zu den vorangegangenen Untersuchungen zeigt sich, dass die Anheizzeiten mit Infrarotheizungen minimiert werden können.

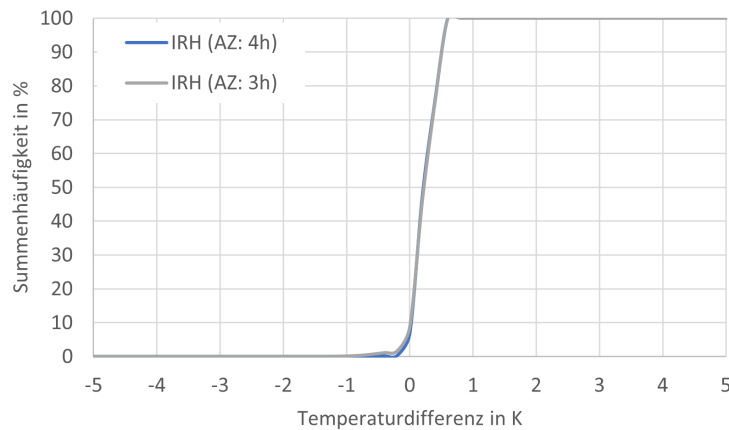


Abb. 3.24: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: intermittierender Betrieb: Infrarotheizungen mit 3 bzw. 4 h Anheizzeit, WSV077

### 3.4.4 Energetische Übersicht

Die energetische Auswertung der Varianten der Baualterklasse WSV077 enthält Tabelle 3.7. Dokumentiert werden die energetischen Kenngrößen: Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz}}$ , unterschieden nach den Anteilen der freien Heizflächen und der Infrarotheizung sowie die Endenergien  $Q_{\text{End}}$  bzw.  $W_{\text{End}}$  in Abhängigkeit des Wärmeerzeugers. Alle Varianten innerhalb der Tabelle erfüllen die Kriterien der thermischen Behaglichkeit innerhalb der definierten Grenzen. Bei der hybriden Variante mit Wärmepumpe wird darauf verwiesen, dass in dieser Variante „nur“ zwei der drei definierten Kriterien eingehalten werden. Die maximale Abweichung der Solltemperatur beträgt  $\Delta\vartheta_{\text{op}} = 2\text{ K}$ . Die grafische Auswertungen der energetischen Kennwerte der Nutz- und Endenergien im intermittierenden Betrieb zeigen die Abb. 3.25 und 3.26. Auch hier erfolgt eine Unterscheidung der Wärmeübergabe im Raum zwischen dem wasserbasierten System mit Radiatoren und dem Anteil der Infrarotheizungen. Den höchsten Anteil der Infrarotheizungen bezogen auf die Wärmeübergabe im Raum weist mit ca. 24% die Variante mit NT-Kessel und den Systemtemperaturen  $\vartheta_V/\vartheta_R = 45/35^\circ\text{C}$  auf. Hinsichtlich der Endenergie wird unterschieden in die Wärmeerzeuger: Niedertemperaturkessel, Luft-Wasser-Wärmepumpe und den Infrarotheizungen. Die geringsten

Werte bezogen auf die Endenergie treten bei den Varianten mit den Luft-Wasser-Wärmepumpen auf.

Tabelle 3.7: End- und Nutzenergie der Varianten WSV077

Wärme- erzeugung	Wärme- übergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$ °C	$\tau_{AZ}$ h	$Q_{\text{Nutz, FH}}$ kWh	$Q_{\text{Nutz, IRH}}$ kWh	$Q_{\text{End}}^8$	$W_{\text{End}}$ kWh	$A_U$ Kh	therm. beagl.
durchgehende Betriebsweise									
NTK	FH	70/55	-	30270	-	31382	-	0	ja
LWWP	FH	70/55	-	30307	-	-	10494	0	ja
intermittierende Betriebsweise									
NTK	FH	70/55+4K	4	25384	-	26394	-	9	ja
LWWP	FH	70/55+4K	4	25224	-	-	9300	41	ja
NTK	FH+IRH	45/35	-	20265	6382(24%)	21038	6382 (23%)	37	ja
LWWP <sub>30%</sub>	FH+IRH	45/35	-	21194	5621(21%)	-	10646 (53%)	68	ja
-	IRH	-	4	-	26823	-	26823	11	ja
-	IRH	-	3	-	26568	-	26568	25	ja

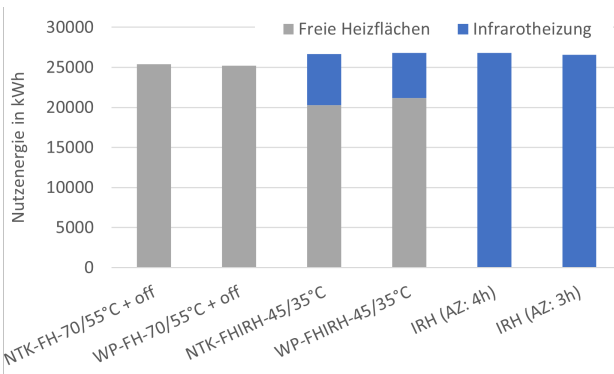


Abb. 3.25: Nutzenergien, intermittierender Betrieb, WSV077

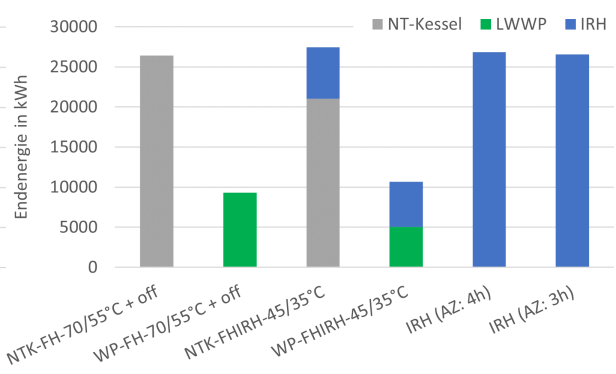


Abb. 3.26: Endenergien, intermittierender Betrieb, WSV077

Die Diagramme der geordneten Jahresdauerlinien der Tagesmittelwerte der Nutzenergie sowie der Stundenmittelwerte der Heizleistung zeigen die Abb. 3.27 und Abb. 3.28 für die hybride Variante mit LW-Wärmepumpe. Die Anteile der Infrarotheizungen liegen bei 21% bezogen auf die Nutzenergie und 53% bezüglich der Endenergie.

Es erfolgte auch eine analoge Auswertung der hybriden Variante mit Niedertemperaturkessel. Die Diagramme können dem Anhang unter Kap. A.3.3 entnommen werden (Abb. A.15 und A.16).

Zusammenfassend lässt sich für das Einfamilienhaus entsprechend der WSV0 77 festhalten, dass für den intermittierenden Betrieb die Randbedingungen der „besseren“ Wärmeschutzniveaus angepasst werden müssen. Ausgehend von einem Temperaturniveau der Vor- bzw. Rücklauftemperatur von  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70/55^\circ\text{C}$  sowie der Implementierung einer witterungsgeführten Nachtabschaltung des Wärmeerzeugers konnten die Sollwerte nicht gewährleistet werden. Als Maßnahmen erfolgte die Anhebung der Heizkurve sowie das Weglassen der Nachtabschaltung. Diese Anpassungen wurden auch auf die hybriden Varianten übertragen.

<sup>8</sup>Die energetischen Kennwerte der Endenergie beziehen sich auf den Heizwert.

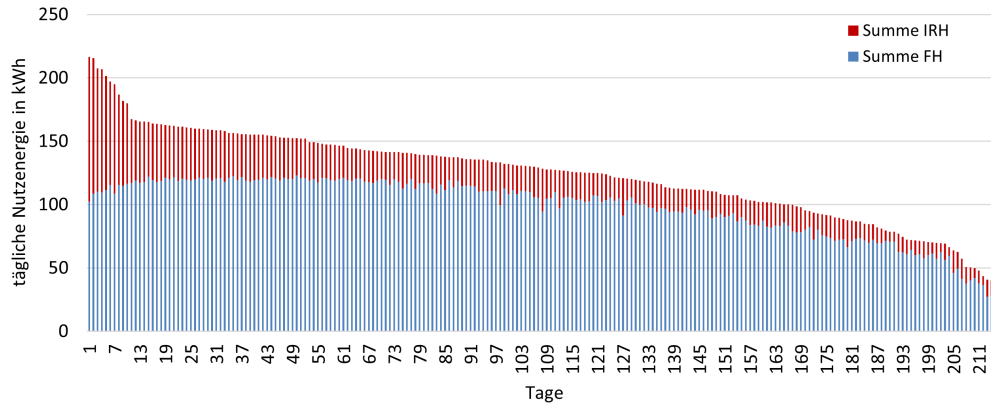


Abb. 3.27: Geordnete Jahresdauerlinie - Tagesmittelwerte der Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz,d}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, WSV077

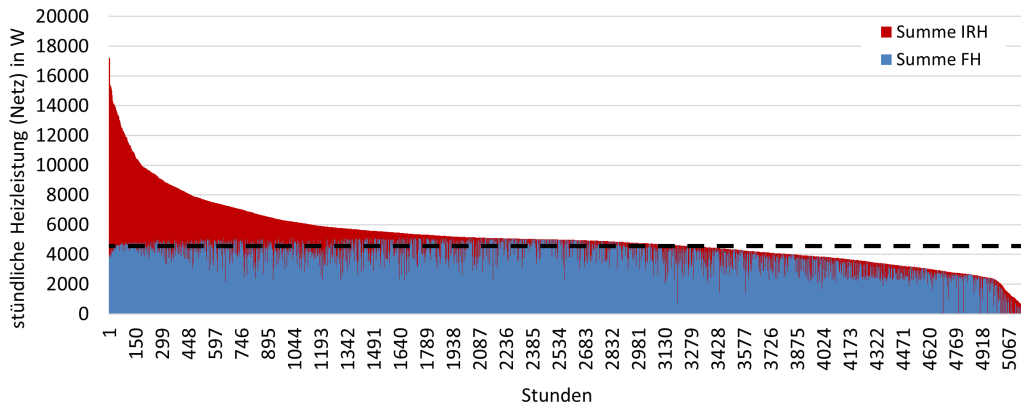


Abb. 3.28: Geordnete Jahresdauerlinie - Stundenmittelwerte der Heizleistung (Raum)  $\dot{Q}_{\text{Nutz,h}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, WSV077

### 3.5 Wärmedämmstandard: BA1950

#### 3.5.1 Variantenmatrix

Die Tab. 3.8 gibt eine Übersicht der umgesetzten Variantenmatrix des „ältesten“ Einfamilienhauses. Es entspricht in etwa der Baualtersklasse des Jahres 1950. Auch hier wurde in allen intermittierenden Varianten mit dem wasserbasierten Heizsystem auf die außentemperaturabhängige Nachtabschaltung verzichtet.

#### 3.5.2 Durchgehende Betriebsweise

Die Auswertung der Summenhäufigkeit der operative Raumtemperatur am Beispiel der Zone 2 enthält Abb. 3.29 für die Variante im durchgehenden Betrieb. Hinterlegt ist die Heizkurve

Tabelle 3.8: Variantenmatrix: BA1950

Wärmeerzeuger	Wärmeübergabe-system	Heizkurve ( $\vartheta_V/\vartheta_R$ )	Betrieb	Anheizzeit	örtliche Regeleinrichtung	
					Heizkörper	IRH
NTK	freie Heizflächen	70°C/55°C	durchgehend		ja	-
NTK	freie Heizflächen	70°C/55°C + 4K	intermittierend	4 h	ja	-
NTK	hybrid (FH + IRH)	50°C/40°C	intermittierend		-	ja
LW - WP	hybrid (FH + IRH)	50°C/40°C	intermittierend		-	ja
-	Infrarotheizung	-	intermittierend	4 h	-	ja

entsprechend Kapitel 2.3 für das Temperaturniveau  $\vartheta_V/\vartheta_R = 70^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$ . Die Sollwerttemperatur von  $\vartheta_{\text{op}} = 20^\circ\text{C}$  wird zu keinem Zeitpunkt unterschritten. Das Überschreiten des Sollwertes ist auf die bleibende Regelabweichung des Thermostatregelventils sowie auf die inneren und solaren Gewinne zurückzuführen.

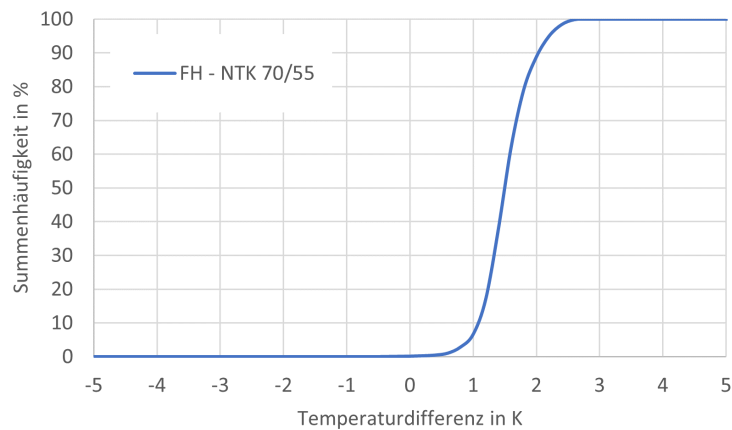


Abb. 3.29: Summenhäufigkeit (Zone 2), Variante: durchgehender Betrieb: Niedertemperaturkessel mit freien Heizflächen, BA1950

### 3.5.3 Intermittierende Betriebsweise

Zunächst zeigt Abb. 3.30 die Gegenüberstellung der Summenhäufigkeit bei einer Raumbeheizung mit dem wasserbasierten System und der ausschließlichen Beheizung mit Infrarotheizungen. In beiden Varianten kann für die Heizperiode von der Einhaltung der thermischen Behaglichkeit ausgegangen werden. Die Variante mit Infrarotheizungen weist zwar eine Unterschreitungshäufigkeit von 15 % auf, allerdings liegt die maximale Unterschreitung bei lediglich  $\Delta\vartheta_{\text{op}} = 0,2 \text{ K}$ . Abb. 3.31 dokumentiert die Auswertung der Summenhäufigkeit für die hybriden Varianten sowohl mit Niedertemperaturkessel als auch mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe. Die Ergebnisse belegen, dass der Einsatz einer LW-WP mit nur 30% Nennleistung bezogen auf die Heizlast des Gebäudes in Verbindung mit Infrarotheizungen funktioniert und zu behaglichen operativen Raumtemperaturen während der Nutzungszeit führt. Das Temperaturniveau der hinterlegten Heizkurve des wasserbasierten Systems beträgt in den numerischen Untersuchungen  $\vartheta_V/\vartheta_R = 50/40^\circ\text{C}$ .

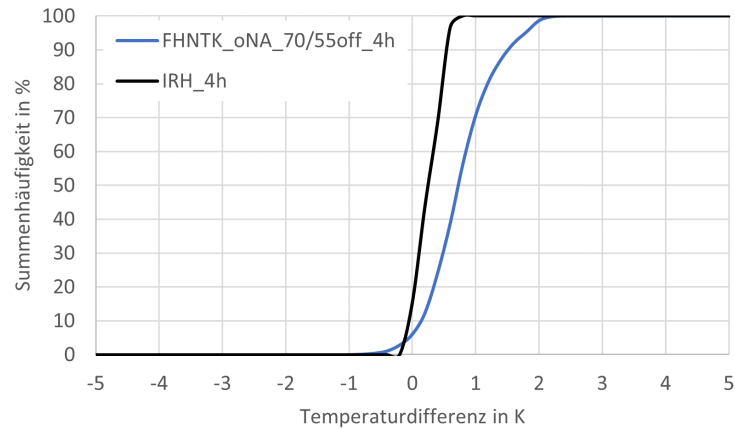


Abb. 3.30: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: intermittierender Betrieb: Niedertemperaturkessel mit freien Heizflächen im Vergleich zu Infrarotheizungen, BA1950

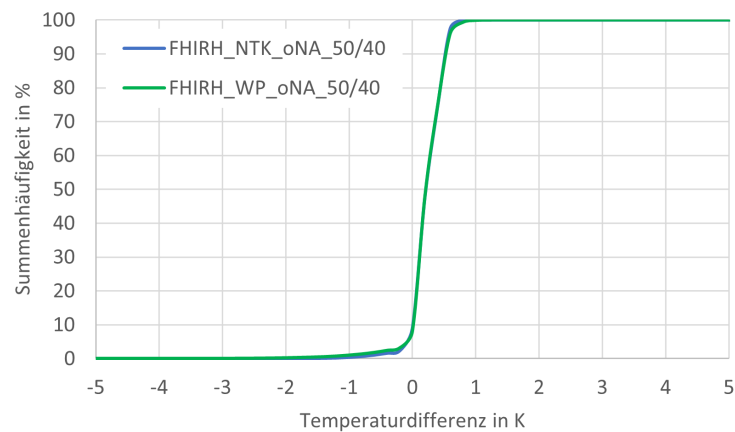


Abb. 3.31: Summenhäufigkeit (Zone 2), Varianten: intermittierender Betrieb: NT-Kessel und LW-WP<sub>30%</sub> mit hybrider WÜ, BA1950

### 3.5.4 Energetische Übersicht

Die energetischen Kennwerte der Untersuchungen gemäß dem Baujahr um 1950 beinhaltet die Tab. 3.9. In allen Varianten kann von thermisch behaglichen Raumtemperaturen während der definierten Nutzungszeit ausgegangen werden. Wie bereits in den vorangegangenen Tabellen werden die Werte der Nutzenergie (unterschieden in Infrarotheizungen und freie Heizflächen) sowie die Endenergien ausgewiesen.

Innerhalb der hybriden Varianten ergeben sich 15% bzw. 17% Deckungsanteile über die Infrarotheizungen bezogen auf die Nutzenergie der Raumheizung. Die relativen Anteile bezüglich der Endenergie betragen 17% kombiniert mit dem Niedertemperaturkessel und 42% für die Kombination mit Luft-Wasser-Wärmepumpe.



Tabelle 3.9: End- und Nutzenergie der Varianten BA1950

Wärme- erzeugung	Wärme- übergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$ °C	$\tau_{AZ}$ h	$Q_{Nutz,FH}$ kWh	$Q_{Nutz,IRH}$ kWh	$Q_{End}^9$	$W_{End}$ kWh	$A_U$ Kh	therm. beagl.
durchgehende Betriebsweise									
NTK	FH	70/55	-	46148	-	47907	-	0	ja
intermittierende Betriebsweise									
NTK	FH	70/55+4K	4	39045	-	40628	-	23	ja
NTK	FH+IRH	50/40	-	32951	6970(17%)	34200	6970 (17%)	31	ja
LWWP <sub>30%</sub>	FH+IRH	50/40	-	34446	5923(15%)	-	14217 (42%)	48	ja
-	IRH	-	4	-	40350	-	40350	23	ja

Die grafische Auswertungen der energetischen Kennwerte der Nutz- und Endenergien für den intermittierenden Betrieb zeigen die Abb. 3.32 und 3.33. Die Diagramme der geordneten Jahresdauerlinien der Tagesmittelwerte der Nutzenergie sowie der Stundenmittelwerte der Heizleistung zeigen, analog zu den vorangegangenen Untersuchungen die Abb. 3.34 und Abb. 3.35 für die hybride Variante mit LW-Wärmepumpe.

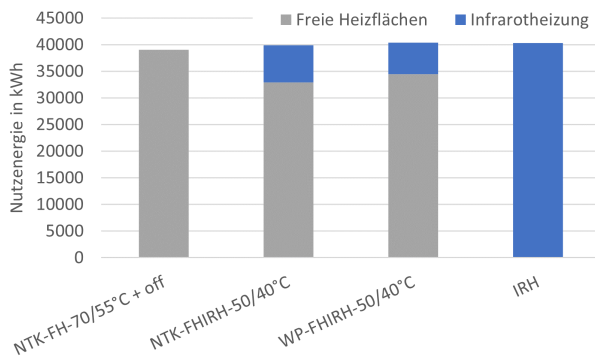


Abb. 3.32: Nutzenergien, intermittierender Betrieb, BA1950

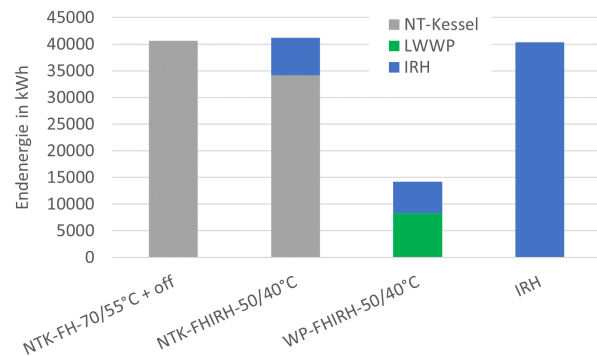


Abb. 3.33: Endenergien, intermittierender Betrieb, BA1950

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auch für die älteste Baualtersklasse die thermische Behaglichkeit innerhalb der durchgeführten Varianten gewährleistet werden kann. Sowohl in der durchgehenden Betriebsweise als auch im intermittierenden Betrieb können die Sollwerte eingehalten werden. Die definierten Randbedingungen beinhalteten bei einer intermittierenden Betriebsweise Anheizzeiten von 4h. Für das wasserbasierte System wurde außerdem die Heizkurve um 4K angehoben und auf die Nachtabschaltung des zentralen Wärmereizers verzichtet. Das Temperaturniveau der hinterlegten Heizkurve bei hybrider Wärmeübergabe im Raum beträgt  $\vartheta_V/\vartheta_R = 50/40$  °C.

<sup>9</sup>Die energetischen Kennwerte der Endenergie beziehen sich auf den Heizwert.

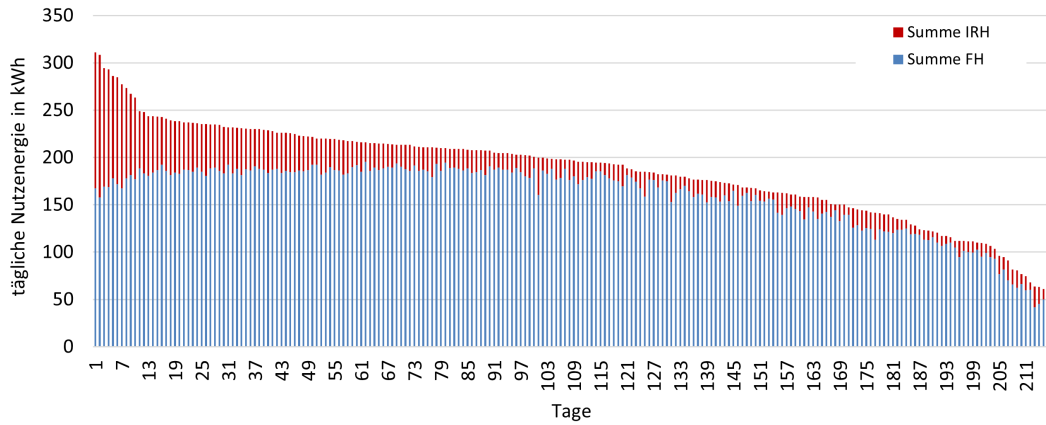


Abb. 3.34: Geordnete Jahresdauerlinie - Tagesmittelwerte der Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz,d}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, BA1950

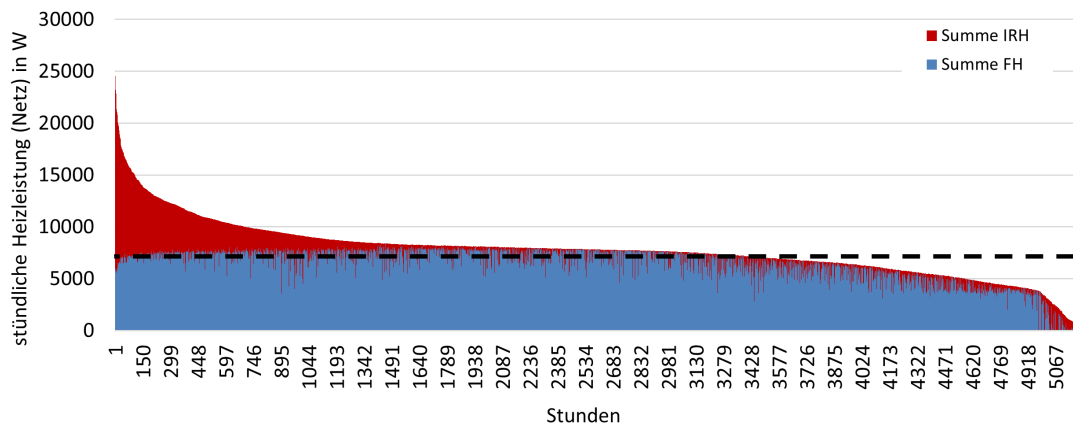


Abb. 3.35: Geordnete Jahresdauerlinie - Stundenmittelwerte der Heizleistung (Raum)  $\dot{Q}_{\text{Nutz,h}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, BA1950

---

## 4 Fazit / Ausblick

Die vorliegende Studie untersucht den Einsatz von Infrartheizungssystemen in Gebäuden mit verschiedenen Wärmeschutzniveaus und stellt somit eine Erweiterung der bereits veröffentlichten Untersuchung für ein Gebäude nach WSV095 dar (vgl. [1]). Neben der energetischen Bilanzierung wird sehr großer Wert auf die Analyse der wärmephysiologischen Kennwerte gelegt, da somit die Basis für vergleichende Betrachtungen gelegt wird. Die numerischen Analysen zeigen, dass die Dynamik des gekoppelten Systems aus Gebäude/ Wärmeübergabe und Wärmezeugung insbesondere im intermittierenden Betrieb signifikant vom Wärmeschutzniveau beeinflusst wird. Mit sinkendem Wärmeschutzniveau sind grundsätzlich zunehmende Anheizzeiten oder alternativ Stütztemperaturen erforderlich, um im intermittierenden Betrieb behagliche Temperaturen während der Nutzungszeit zu erreichen. Hierbei können Anheizzeiten durch höhere Leistungsreserven und schnell reagierende Systeme wie Infrartheizungen reduziert werden.

Für hybride Systeme, welche eine Grundtemperierung über freie Heizflächen realisieren und die die Spitzenlasten über Infrartheizungen kompensieren, wird das erforderliche Systemtemperaturniveau vom Wärmeschutzniveau bestimmt. Hierbei ist es zulässig, die Leistung des Wärmezeugers des wasserbasierten Heizungssystems zu reduzieren, so dass für alle Wärmeschutzniveaus eine Wärmepumpe ausreicht, die auf ca. 30% der Heizlast dimensioniert ist.

Im Rahmen der Studie erfolgte die Bearbeitung der einzelnen Schwerpunkte wie folgt. Zunächst wurden ergänzende Untersuchungen zum Wärmeschutzniveau WSV095 umgesetzt. Hierbei lag der Fokus auf der Variation der hybriden Wärmeübergabe in Kombination mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ausgelegt auf ca. 30% der Heizlast (entspricht  $\dot{Q}_{N,WP,WSV095} = 3 \text{ kW}$ ). Die Ergebnisse zeigen, dass analog zur bereits durchgeführten Studie [1] die thermische Behaglichkeit gewährleistet werden kann.

Des weiteren folgten die Untersuchungen des Einfamilienhauses in der Neubau-Variante. Für diesen Fall wurde nur die monovalente Wärmeübergabe untersucht, d.h. es wurden die Varianten Luft-Wasser-Wärmepumpe mit freien Heizflächen und die Raumbeheizung komplett über Infrartheizungen gegenübergestellt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im durchgehenden Betrieb das System mit Infrartheizungen eine genauere Sollwertehaltung gegenüber dem wasserbasierten System mit Thermostatregelventilen ermöglicht. Daraus resultiert ein geringerer Nutzenergieaufwand der Infrartheizungen gegenüber den freien Heizflächen. Im intermittierenden Betrieb zeigt sich, dass Anheizzeiten für das wasserbasierte Heizsystem notwendig sind, um die thermische Behaglichkeit zu realisieren. Aufgrund der schnellen Reaktionszeiten der Infrartheizungen kann auf eine Anheizzeit bei der Variante Neubau verzichtet werden. Die energetischen Kennwerte der Nutzenergien unterscheiden sich nur minimal. Im Bereich der Endenergie weisen die Wärmepumpen-Varianten aufgrund der Jahresarbeitszahlen niedrigere Werte aus.

Eine umfangreiche Variantenmatrix wurde auch für das Wärmeschutzniveau EnEV04 umgesetzt. Der Fokus der Untersuchungen lag insbesondere auf der hybriden Wärmeübergabe. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer Kleinst-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{N,WP,EnEV04} = 2 \text{ kW}$ ) in Kombination mit dem Infrartheizungssystem die Erfüllung der thermischen Behaglichkeit auch im intermittierenden Betrieb umgesetzt werden kann. Energetisch werden für die hybriden Varianten höhere Kennwerte ausgewiesen. Dies kann mit der exakten Sollwertehaltung sowie dem unregelmäßigen Wärmeeintrag über das wasserbasierte System begründet werden.

Für die Untersuchungen der Wärmeschutzniveaus WSV077 und BA1950 war es notwendig, Anpassungen für die intermittierende Betriebsweise vorzunehmen, um auch hier die thermische Behaglichkeit zu gewährleisten. Die Anheizzeit wurde auf  $\tau = 4 \text{ h}$  erhöht und die Heizkurve um  $\Delta\vartheta_{HK} = 4 \text{ K}$  angehoben. Zusätzlich wurde die außentemperaturabhängige Nachtabschaltung des

Wärmeerzeugers ausgesetzt. Mit der Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen konnte für die Vergleichsvariante Wärmeerzeuger mit freien Heizflächen die thermische Behaglichkeit bezogen auf die operative Raumtemperatur während der Nutzungszeit erfüllt werden. Für den hybriden Betrieb wurden zum einen die Niedertemperaturkessel um das Infrarotheizungssystem erweitert und die Heizkurve auf  $\vartheta_V/\vartheta_R = 45/40^\circ\text{C}$  (WSVO77) bzw.  $\vartheta_V/\vartheta_R = 50/45^\circ\text{C}$  (BA1950) reduziert. Innerhalb der Varianten mit Luft-Wasser-Wärmepumpe erfolgte ein Austausch des Wärmeerzeugers auf deutlich kleinere Wärmepumpen hinsichtlich deren Leistung. Die Nennleistungen lauten  $\dot{Q}_{N,WP,WSVO77} = 4,5 \text{ kW}$  und  $\dot{Q}_{N,WP,BA1950} = 7 \text{ kW}$ . Alle Varianten erfüllen die Kriterien der thermischen Behaglichkeit. Die relativen Abweichungen der energetischen Kennwerte der Nutzenergie sind mit max. 3 % bzw. 6% eher gering, während der Vergleich der Endenergien deutlich niedrigere Werte für die Untersuchungen mit Wärmepumpe aufgrund der Jahresarbeitszahlen ergibt.

Die Analysen haben gezeigt, dass in allen untersuchten Wärmeschutzniveaus der Einsatz von Infrarotheizungen als Spitzenlastabdeckung insbesondere in Kombination mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe eine gute Alternative darstellt. Zusammenfassend dokumentiert die Abb. 4.1 den Anteil der Infrarotheizungen an der Endenergie der untersuchten Baustandards für die untersuchten Varianten mit hybrider Wärmeübergabe.

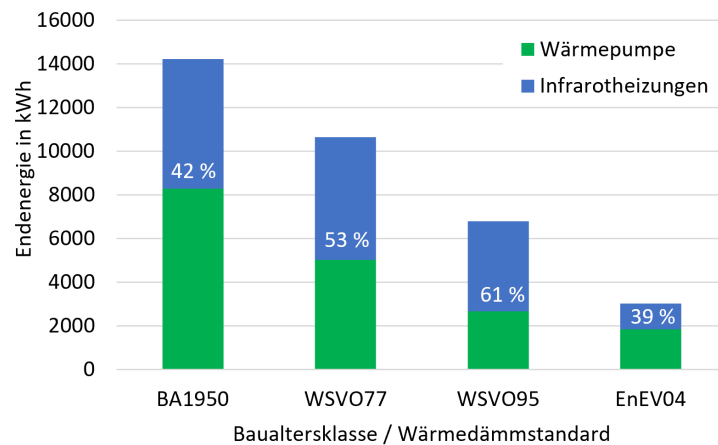


Abb. 4.1: Anteile der Infrarotheizungen an der Endenergie für verschiedene Baustandards (Varianten: hybrid mit LWWP<sub>30%</sub>)

Grundsätzlich zeigen die durchgeführten Analysen, dass die Kombination einer Wärmepumpe mit einer Leistung von ca. 30% der Heizlast des Gebäudes und Infrarotheizungen die Umstellung bestehender Warmwasserheizungen auf Niedertemperatursysteme ermöglicht. In den Analysen wurde die Leistung der Infrarotheizungen auf die Heizlast des Gebäudes ausgelegt, um ausreichend Leistungsreserve zu haben.

Abschließend wird darauf verwiesen, dass im Rahmen der Studie keine ökonomische Bewertung der umgesetzten Varianten vorgenommen wurde. Des Weiteren bedarf die Kombination aus geregelten Infrarotheizungen und un geregelter Grundbeheizung durch das wassergeführte Heizsystem einer Prüfung, inwiefern eine Konformität zu den Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes, § 63 (Raumweise Regelung der Raumtemperatur)<sup>10</sup> hinsichtlich der Pflicht zu Einzelraumregelung besteht. Wie bereits beschrieben, bewertet die Untersuchung die Auswirkungen des Einsatzes von Infrarotheizungen mittels eines Modells, welches keine ortsscharfen Analysen der thermischen Be-

<sup>10</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."

---

haglichkeit vorsieht, sondern den Raum in der Gesamtheit bewertet. Grundsätzlich eignen sich Infrarotheizungen gut, um auch Konzepte thermischer Behaglichkeit in ausgewählten Bereichen des Raumes<sup>11</sup> umzusetzen, welche eine 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>11</sup>sogenannte zonale Klimatisierungskonzepte

## Literatur

- [1] KNORR, M. ; MEINZENBACH, A. ; SCHINKE, L. ; SEIFERT, J. ; PERSCHK, A.: Potentialbewertung von Infrarotheizungen als Spitzenlastabdeckung / Institut für Energietechnik, TU Dresden. 2023. – Forschungsbericht
- [2] PERSCHK, A.: Gebäude und Anlagensimulation - Ein "Dresdner Modell". In: *Gesundheitsingenieur* (2010), August, Nr. 4
- [3] FELSMANN, C.: *Ein Beitrag zur Optimierung der Betriebsweise heizungs- und raumlufttechnischer Anlagen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2002
- [4] PERSCHK, A.: *Gebäude-Anlagen-Simulation unter der Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden*, Fakultät für Maschinenwesen, TU Dresden, Diss., 2000
- [5] 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
- [6] SEIFERT, J. ; KNORR, M. ; SCHINKE, L. ; BEYER, M.: Instationäre, energetische Bewertung von Wärmepumpen und Mikro-KWK-Systemen / Technische Universität Dresden. 2017. – Forschungsbericht
- [7] SEIFERT, J. ; KNORR, M. ; SCHINKE, L. ; BEYER, M. ; RÖSCHKE, M. ; VALENTIN, F. ; BEEK, T.A. van: EnOB: (PL-Reg) - Bewertung hybrider Energieerzeuger inklusive eines plattformübergreifenden Systemreglers für den Gebäudebereich; Teilprojekt: TU Dresden - Plattformkonzept für einen Systemregler / Technische Universität Dresden. 2022. – Forschungsbericht
- [8] ENEV 2004: *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden*. November 2004. Berlin: Bundesregierung
- [9] WSV0 1995: *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung)*. August 1995. Berlin: Bundesregierung
- [10] WSV0 1977: *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung)*. August 1977. Bonn: Bundesregierung
- [11] KAISER, J.: Weiterentwicklung und Validierung des Softwaremodells zur Nachbildung von konventionellen Wärmeerzeugern - TYPE07 / Institut für Thermodynamik und TGA, TU Dresden. 2006. – Forschungsbericht
- [12] AFJEL, Th. ; WETTER, M.: Kompressionswärmepumpe inklusive Frost- und Taktverluste / Zentralschweizerisches Technikum Luzern. 1996. – Forschungsbericht
- [13] HAGEN, Fernuni: *Summenhäufigkeit - Grundlagen der Statistik*. Internet, März 2024. – <https://www.fernstudium4you.de/summenhaeufigkeit.html>
- [14] SEIFERT, J. ; KNORR, M. ; RICHTER, W.: Energetische Analyse von Systemen mit Wärmepumpen für hochwärmegeämmte Gebäude. In: *Heizung/Lüftung/Klima/Haustechnik Bd.60* 60 (2009), Nr. 5, S. 20–27

# A Anhang

## A.1 Innere Gewinne / Luftwechsel

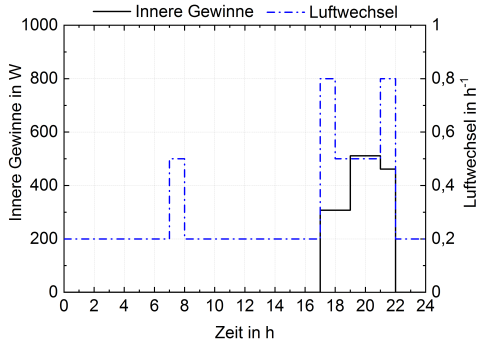


Abb. A.1: Innere Gewinne / Luftwechsel - Wohnzimmer (Zone 1)

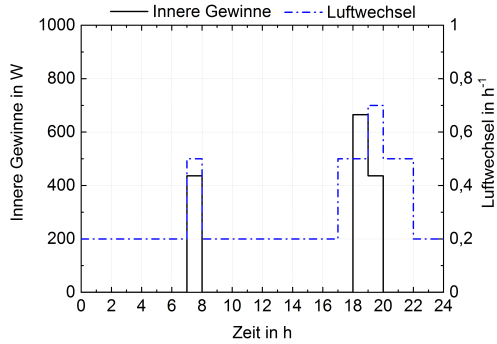


Abb. A.2: Innere Gewinne / Luftwechsel - Esszimmer (Zone 2)

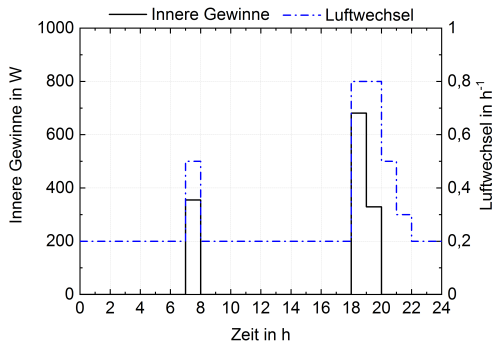


Abb. A.3: Innere Gewinne / Luftwechsel - Küche (Zone 5)

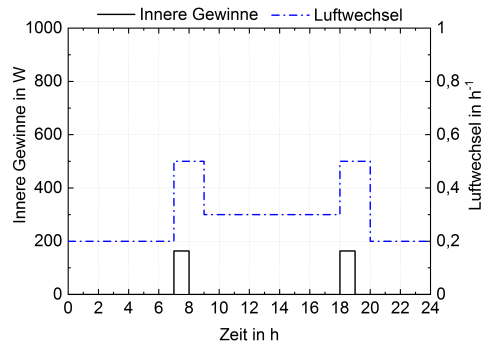


Abb. A.4: Innere Gewinne / Luftwechsel - WC (Zone 6)

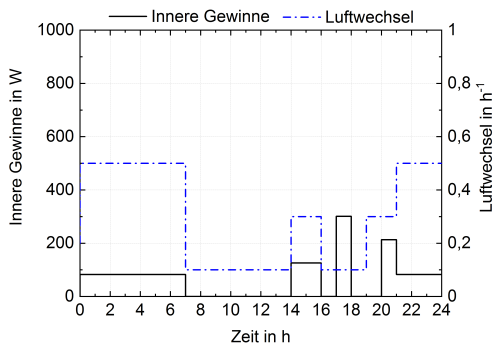


Abb. A.5: Innere Gewinne / Luftwechsel - Kinder 1/2 (Zone 8/9)

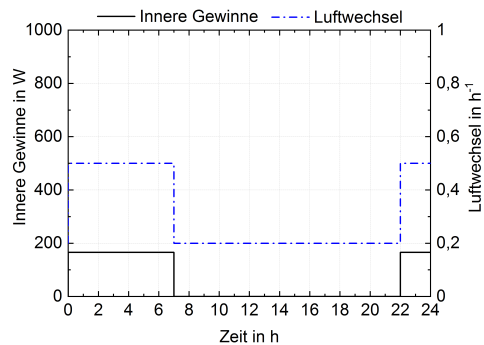


Abb. A.6: Innere Gewinne / Luftwechsel - Schlafzimmer (Zone 11)

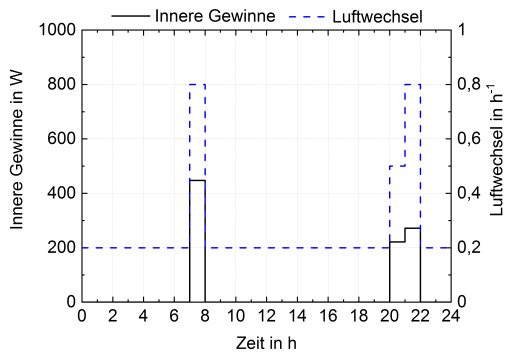


Abb. A.7: Innere Gewinne / Luftwechsel - Bad (Zone 10)

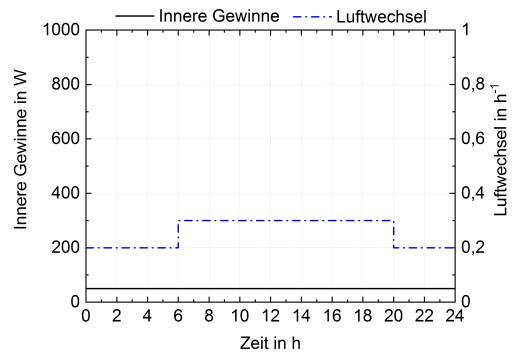


Abb. A.8: Innere Gewinne / Luftwechsel - Flur KG/EG /1.OG / KG (Zone 7/12/14)



## A.2 Modell des Gebäudes

### A.2.1 Grundrisse und Zonenaufteilung

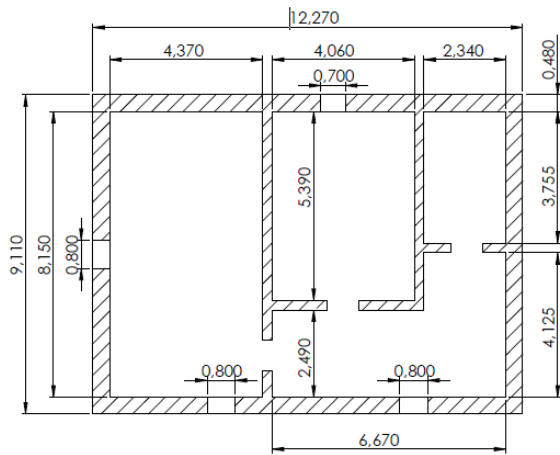


Abb. A.9: Grundriss: Keller

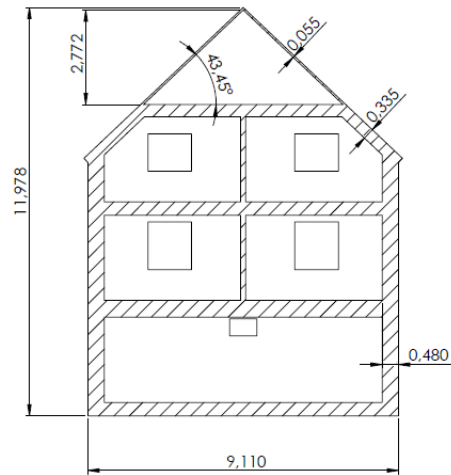


Abb. A.10: Querschnitt des Einfamilienhauses

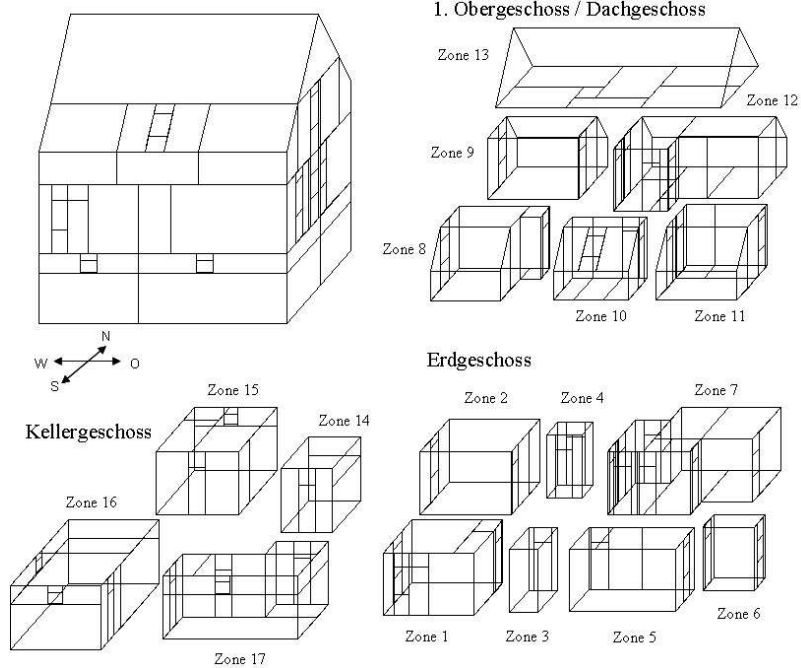


Abb. A.11: Einfamilienhaus mit allen signifikanten Zonen (Räumen) nach [14]

**A.2.2 Wandkonstruktionen**

Tabelle A.1: Konstruktionsdaten des Einfamilienhauses - WSVO95 [9]

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>

Tabelle A.2: Konstruktionsdaten des Einfamilienhauses - Neubau

Wandart	Aufbau	Dicke m	Stoffeigenschaften			$u_{\text{ges}}$ -Wert
			$\lambda$ W/(m K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/(kg K)	W/(m <sup>2</sup> K)
Außenwand	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>0,11</b>
	Hochlochziegel	0,365	0,200	700,0	1000,0	
	Mineralwolle	0,320	0,040	150,0	1000,0	
	Außenputz	0,020	1,400	2000,0	1000,0	
Dach (gedämmt)	Gips	0,025	0,210	900,0	1090,0	<b>0,097</b>
	Mineralwolle2	0,320	0,035	150,0	1000,0	
	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>0,34</b>
	Estrich	0,050	1,400	2200,0	1000,0	
	Styropor	0,100	0,040	40,0	1380,0	
	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>0,10</b>
	Luft	0,100	0,023	1,0	1000,0	
	Mineralwolle	0,200	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>0,26</b>
	BASF-Styrodurdämmung	0,160	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	0,060	0,150	700,0	2100,0	<b>1,75</b>
Innentür	Holz	0,030	0,150	700,0	2100,0	<b>2,17</b>
Fenster						<b>0,50</b>

Tabelle A.3: Konstruktionsdaten des Einfamilienhauses - EnEV04 [8]

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>0,29</b>
	Hochlochziegel	0,365	0,200	700,0	1000,0	
	Mineralwolle	0,080	0,040	150,0	1000,0	
	Außenputz	0,020	1,400	2000,0	1000,0	
Dach (gedämmt)	Gips	0,025	0,210	900,0	1090,0	<b>0,11</b>
	Mineralwolle2	0,280	0,035	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>0,34</b>
	Estrich	0,050	1,400	2200,0	1000,0	
	Styropor	0,100	0,040	40,0	1380,0	
	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>0,10</b>
	Luft	0,100	0,023	1,0	1000,0	
	Mineralwolle	0,200	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>0,26</b>
	BASF-Styrourdämmung	0,120	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	0,060	0,150	700,0	2100,0	<b>1,75</b>
Innentür	Holz	0,030	0,150	700,0	2100,0	<b>2,17</b>
Fenster						<b>1,40</b>

Tabelle A.4: Konstruktionsdaten des Einfamilienhauses - WSV077 [10]

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>1,08</b>
	Hochlochziegel	0,240	0,330	800,0	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>2,34</b>

Tabelle A.5: Konstruktionsdaten des Einfamilienhauses - BA1950

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>1,38</b>
	Vollziegel	0,115	0,580	1400,0	1000,0	
	Luft korr	0,080	0,620	1,00	1000,0	
	Vollziegel	0,115	0,580	1400,0	1000,0	
	Außenputz	0,020	1,400	2000,0	1000,0	
Dach (ungedämmt)	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>1,49</b>
	Holzsparren	0,024	0,130	600,0	1700,0	
	Bimsvollstein	0,015	0,470	1300,0	1000,0	
	Dachziegel	0,010	0,890	1800,0	1100,0	
Innenwand-1	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>2,26</b>
	Ziegel	0,120	0,810	1800,0	1000,0	
	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	
Innenwand-2	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	<b>1,69</b>
	Ziegel	0,240	0,810	1800,0	1000,0	
	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	
Fußboden Decke	Dielen	0,020	0,130	600,0	2100,0	<b>0,81</b>
	Holzsparren	0,024	0,130	600,0	1000,0	
	Luft korr	0,010	0,023	1,00	1000,0	
	Holzsparren	0,024	0,130	600,0	1000,0	
	Innenputz	0,015	0,870	1800,0	1000,0	
Bodenplatte	Estrich	0,040	1,400	2200,0	1000,0	<b>0,88</b>
	Schlacke	0,120	0,160	2800,0	1000,0	
	Stahlbeton	0,180	2,100	2400,0	1000,0	
Außentür	Holz	0,060	0,350	700,0	2100,0	<b>2,93</b>
Innentür	Holz	0,030	0,350	700,0	2100,0	<b>2,89</b>
Fenster						<b>2,86</b>

### A.3 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

#### A.3.1 Energetische Übersicht der Variantenmatrix EnEV04

Die Tabelle A.6 dokumentiert die energetische Auswertung der Varianten EnEV04. Anders als im Kap. 3.3.4 werden innerhalb der Tabelle die Endenergien des Brennwertkessels brennwertbezogen ausgewiesen. Folglich erhöhen sich die Werte um einen Faktor von circa 1,11. Dieser Wert entspricht dem Verhältnis Brennwert  $H_s$  zu Heizwert  $H_i$  von Erdgas E.<sup>12</sup>

Tabelle A.6: End- und Nutzenergie der Varianten EnEV04

Wärme- erzeugung	Wärme- übergabe	$\vartheta_V/\vartheta_R$ °C	$\tau_{AZ}$ h	$Q_{Nutz,FH}$ kWh	$Q_{Nutz,IRH}$ kWh	$Q_{End}^{13}$ kWh	$W_{End}$ kWh	$A_U$ Kh	therm. beagl.
durchgehende Betriebsweise									
BWK	FH	55/45	-	10115	-	10553	-	0	ja
LWWP	FH	55/45	-	10152	-	-	2963	0	ja
intermittierende Betriebsweise									
BWK	FH	55/45	3	8118	-	8549	-	33	ja
LWWP	FH	55/45	3	8036	-	-	2229	213	nein
BWK	FH	55/45+4K	3	8253	-	8730	-	1	ja
LWWP	FH	55/45+4K	3	8212	-	-	2357	11	ja
BWK	FH+IRH	40/30	-	9658	295(3%)	10047	295(3%)	0	ja
LWWP <sub>30%</sub>	FH+IRH	40/30	-	9085	578(6%)	-	2722(21%)	2	ja
BWK	FH+IRH	35/28	-	8061	1055(12%)	8354	1055(11%)	1	ja
LWWP <sub>30%</sub>	FH+IRH	35/28	-	7879	1186(13%)	-	3014(39%)	4	ja
-	IRH	-	-	-	8262	-	8262	537	nein
-	IRH	-	1	-	8422	-	8422	63	(ja)
-	IRH	-	2	-	8504	-	8504	4	ja
-	IRH	-	3	-	8560	-	8560	1	ja

Die grafische Auswertung der brennwertbezogenen Endenergie-Werte zeigt Abb. A.12. Alle grundsätzlichen Tendenzen bleiben identisch. Der direkte Vergleich der Varianten mit Infrartheizungen und dem wasserbasierten System mit Brennwertkessel im intermittierenden Betrieb ergibt aufgrund des Brennwertbezuges eine Verschiebung zugunsten der Infrartheizungen. Die energetische Einsparung liegt bei ca. 3% bezogen auf die Endenergie.

<sup>12</sup>Mittlere Kennwerte des Misch-Erdgases H entspricht E nach DIN EN 437:  $H_s = 11,38 \text{ kWh/m}^3$ ;  $H_i = 10,27 \text{ kWh/m}^3$  (Quelle: Energiekennwerte 2020 DEW21)

<sup>13</sup>Die energetischen Kennwerte der Endenergie beziehen sich auf den Brennwert.

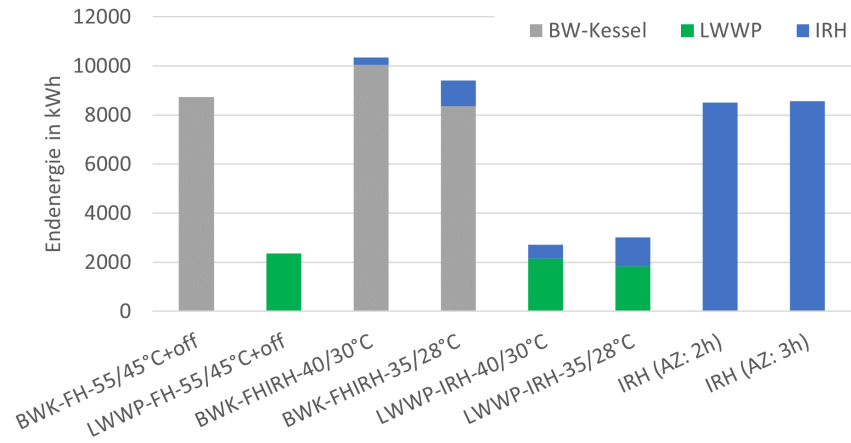


Abb. A.12: Endenergien (brennwertbezogen), intermittierender Betrieb, ENEV04

### A.3.2 Variante: EnEV04-LWWP-hybrid

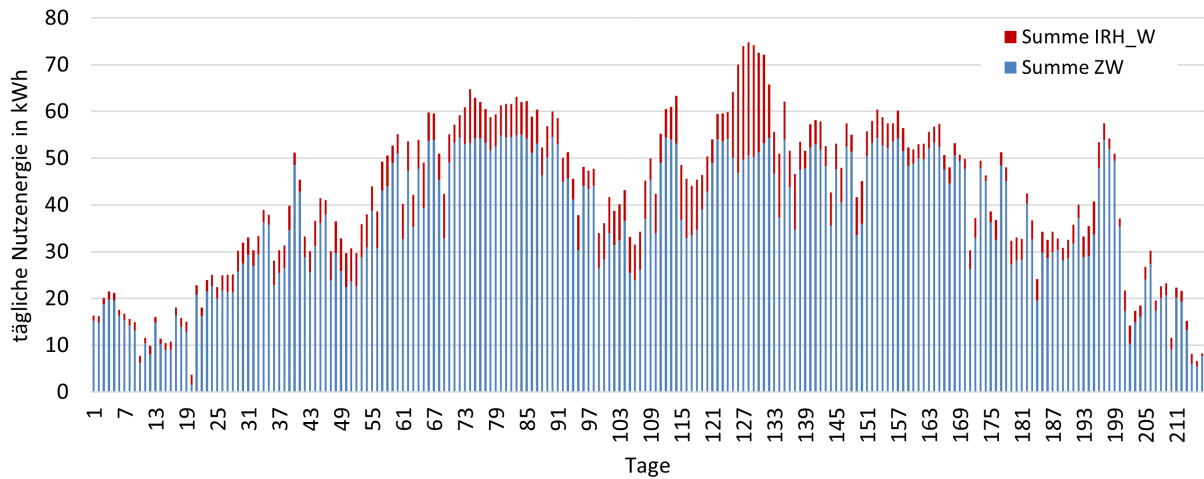


Abb. A.13: Jahresdauerlinie - Tagesmittelwerte der Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz,d}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, ENEV04



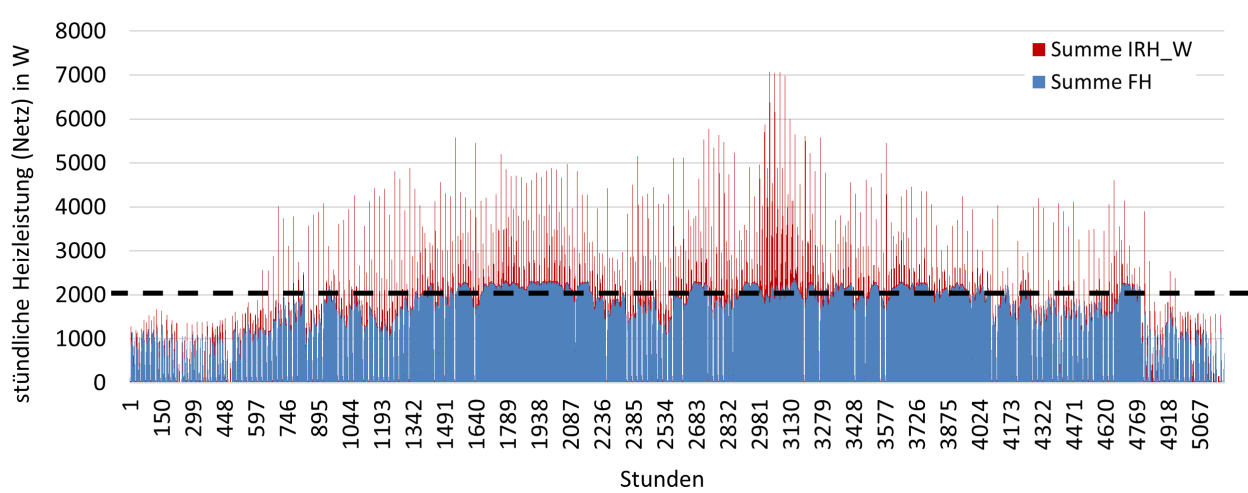


Abb. A.14: Jahresdauerlinie - Stundenmittelwerte der Heizleistung (Raum)  $\dot{Q}_{\text{Nutz},h}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: LWWP (30%), hybrid, ENEV04

A.3.3 Variante:WSVO77-NTK-hybrid

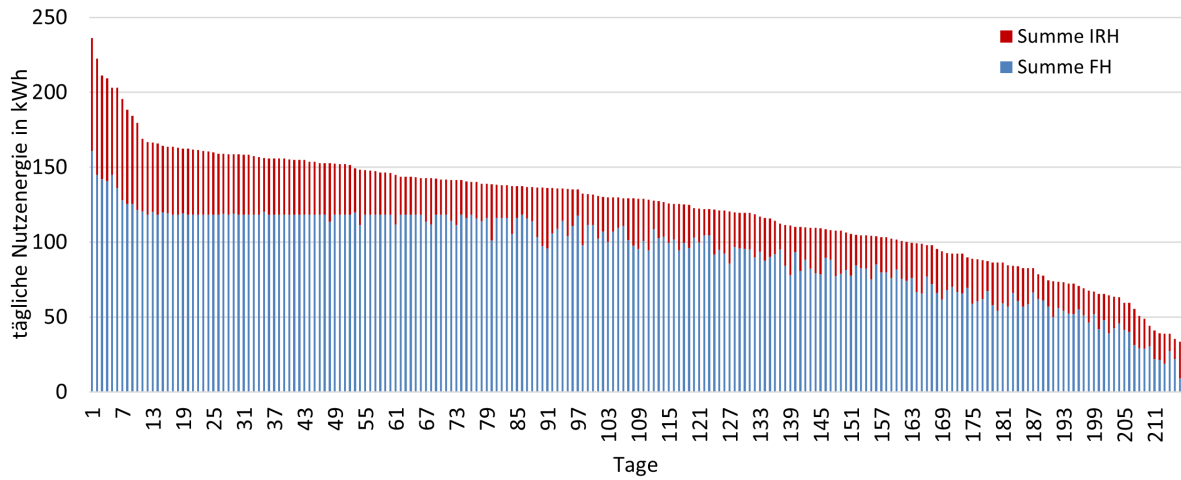


Abb. A.15: Geordnete Jahresdauerlinie - Tagesmittelwerte der Nutzenergie  $Q_{\text{Nutz,d}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: NT-Kessel, hybrid, WSV077

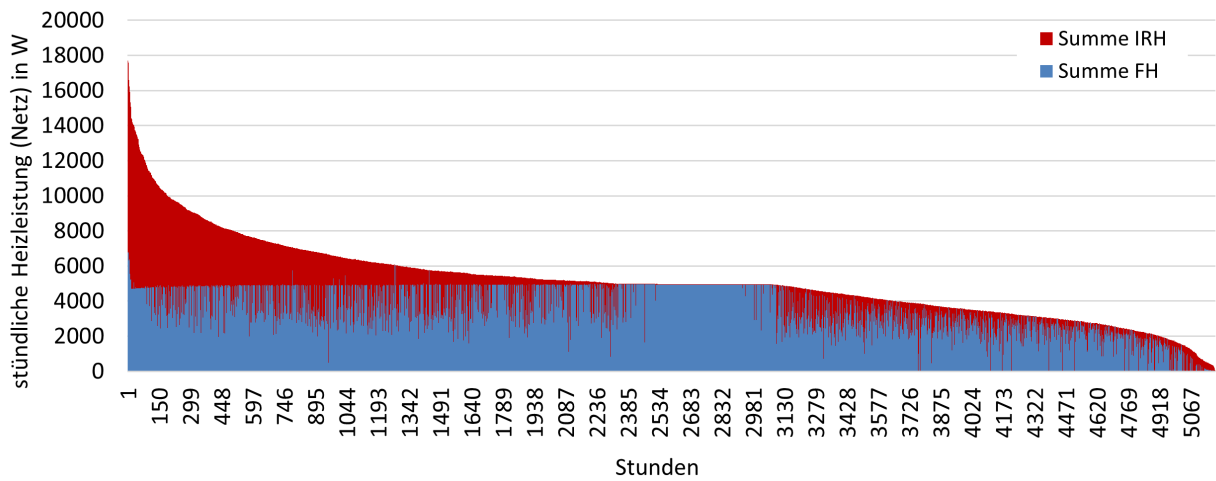


Abb. A.16: Geordnete Jahresdauerlinie - Stundenmittelwerte der Heizleistung (Raum)  $\dot{Q}_{\text{Nutz,h}}$  (rot: Anteil IRH, blau: Anteil der freien Heizflächen), Varianten: intermittierender Betrieb: NT-Kessel, hybrid, WSV077