

Diplomarbeit

**Zur Dimensionierung von thermischen Speichern für Luft-Wasser-Wärmepumpen -
Jahressimulationen zur Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit auf Basis von Testreferenzjahren
mit den Einflussparametern Gebäudetyp, -nutzung, -speicherfähigkeit, Raumwärmeübergabe,
Wärmepumpensteuerung**

eingereicht an der
Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der
Westsächsischen Hochschule Zwickau
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: cand. ing. **S c h u h k n e c h t ,** Geb. am: 20.07.1998
 M i k e T o m

Gebäude-, Energie- und Klimatechnik – Dual (172455)

Ausgegeben von: Prof. Dr.-Ing. C. Ruy
Erstbetreuer/Zweitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. C. Ruy, Prof. Dr.-Ing. M. Reichel

Autorenreferat

In dieser Arbeit wird das Potential der Effizienzsteigerung von modulierenden Luft-Wasser-Wärmepumpen ausgehend von Temperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht untersucht. Es werden Parameter wie Gebäudetyp, Gebäudenutzung, Gebäudespeicherfähigkeit, unterschiedliche Hydraulikschaltungen, Wärmeübergabesysteme, Gebäudestandort und Außentemperaturverläufe variiert. Die Variationen werden mittels Polysun Simulationssoftware ausgewertet und verglichen.

Für die betrachteten Varianten ergaben sich keine signifikanten Effizienzsteigerungen unter Ausnutzung höherer Tagestemperaturen. Es ist jedoch gelungen eine Vielzahl an Testvarianten zu erstellen und die Abhängigkeiten verschiedener Auslegungsparameter für die Auswahl einer geeigneten Wärmepumpe zu beschreiben.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Zwickau, den 02.08.2023

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'M' followed by a large loop and a trailing line.

Mike Tom Schuhknecht

Inhalt

I.	Bilderverzeichnis	I
II.	Tabellenverzeichnis	IV
III.	Anlagenverzeichnis	VI
IV.	Kurzzeichenverzeichnis.....	VII
	Aufgabenstellung	1
1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Hauptteil	3
2.1	Temperaturzeitverläufe	3
2.1.1	Temperaturverlaufsprofile	8
2.1.2	Temperaturprofile nach Tages- und Nachttemperatur	12
2.1.3	Temperaturprofile nach Typtagen	15
2.2	Gebäudeklassifizierung	23
2.2.1	Aktueller Gebäudebestand	23
2.2.2	Deutsche Wohntypologie	26
2.2.3	Wärmeschutz der Gebäudereferenzen	31
2.3	Anlagenkomponenten.....	41
2.3.1	Speichersysteme Heizung.....	41
2.3.2	Warmwasserbereitung	46
2.3.3	Wärmeübergabesysteme	52
2.3.4	Hydraulik, Komponenten	52
2.3.5	Wärmepumpen.....	53
2.3.6	Anlagenschemen und Regelkonzepte	66
2.4	Variationen	74
2.4.1	Überladungstemperatur	74
2.4.2	Leistungsstufe	75
2.4.3	Speichervolumen.....	75
2.4.4	Überladungszeitintervalle	76
2.4.5	Warmwasserzapfprofile	77
2.4.6	Hydraulik-Schemen	77
2.4.7	Regelungslogik.....	78

2.4.8 Zusammenfassung der Grunderkenntnisse durch die Variationen..	78
2.4.8 Festlegung neuer Varianten	79
3. Ergebnisse für das Einfamilienhaus	83
3.1 Betriebsverhalten Gebäudety EFH 2 am Standort Zwickau	83
3.2 Simulationsergebnisse Standortvariationen Gebäudety EFH 2	94
3.3 Simulationsergebnisse Gebäudevariationen Standort Zwickau	99
3.3.1 Speicherverhalten der Gebäudetypen	100
3.3.2 Einfluss der Warmwasserbereitung auf den SCOP	102
3.4 Eigenstromnutzung Gebäudety EFH 2 Standort Zwickau	104
4. Ergebnisse für das Mehrfamilienhaus.....	109
4.1 Betriebsverhalten Gebäudety MFH 2 am Standort Zwickau	109
4.2 Simulationsergebnisse Standortvariationen Gebäudety MFH 2.....	113
4.3 Simulationsergebnisse Gebäudevariation Standort Zwickau	116
5. Herausstellung wesentlicher Simulationserkenntnisse	121
6. Zusammenfassung.....	128

I. Bilderverzeichnis

Abbildung 1: Gradzahlkarte nach VDI 4710 Beiblatt 2	7
Abbildung 2: Jahresganglinie der Temperatur (wöchentlich)	8
Abbildung 3: Absolute Häufigkeit der Außentemperaturen	9
Abbildung 4: Jahresaußentemperaturverteilung	10
Abbildung 5: Tagestemperaturverlauf monatlich gemittelt TRJ2015	11
Abbildung 6: Außentemperaturverteilung je Standort	12
Abbildung 7: Summenhäufigkeit und Einzelhäufigkeit maximaler Tages-Nacht- Temperaturdifferenz (TRJ2015)	13
Abbildung 8: Tagestemperaturdifferenzen gemittelt	14
Abbildung 9: Maximale Tagestemperaturdifferenzen	14
Abbildung 10: Tagestemperaturverlauf, Zwickau, TRJ2015	15
Abbildung 11: Tagestemperaturverlauf, Zwickau, TRJ2015, Winterextrem	17
Abbildung 12: Tagestemperaturverlauf, Zwickau, TRJ2045	18
Abbildung 13: Häufigkeit Tagestemperaturdifferenz Winter TRJ2015	19
Abbildung 14: Häufigkeit Tagestemperaturdifferenz Übergang TRJ2015	20
Abbildung 15: Häufigkeit Tagestemperaturdifferenz Sommer TRJ2015	20
Abbildung 16: Vergleich maximaler Tages-Nachttemperaturdifferenzen nach Wintertagen	21
Abbildung 17: Vergleich maximaler Tages-Nachttemperaturdifferenzen nach Übergangstagen	22
Abbildung 18: Anzahl der Wohngebäude 2021 (dena, 2022-10)	24
Abbildung 19: Anzahl der Wohneinheiten 2021 (dena, 2022-10)	24
Abbildung 20: Wärmeerzeuger im Bestand 2020	25
Abbildung 21: Aufteilung Heizungsbestand nach Alter der Anlage 2019	25
Abbildung 22: Haustypenmatrix (ohne Hochhaus und Sonderfälle) (IWU, 2015-02)	27
Abbildung 23: Häufigkeit Wohnungstypen bis 2009 (IWU, 2015-02)	27
Abbildung 24: Darstellung der Polysun-Speicher	45
Abbildung 25: Trinkwarmwasserzapfprofil Tagesnutzung	48
Abbildung 26: Trinkwarmwasserzapfprofil Morgen- und Abendspitze	48
Abbildung 27: Trinkwarmwasserzapfprofil Morgenspitze	49
Abbildung 28: Trinkwarmwasserzapfprofil Abendspitze	49
Abbildung 29: Trinkwarmwasserzapfprofil MFH	50
Abbildung 30: Warmwasserspeicher	50

Abbildung 31: Schema Frischwasserstation	51
Abbildung 32: Leistungsstufen VWL 45/6 für Systemtemperatur 35 und 55 °C	55
Abbildung 33: Leistungsstufen VWL 85/6 für Systemtemperatur 35 und 55 °C	56
Abbildung 34: ausgewählte Leistungsstufen VWL 155/6 für Systemtemperatur 35 und 55 °C	57
Abbildung 35: Vergleich Leistungsdaten nach Polysun und DIN EN 14825	58
Abbildung 36: ausgewählte und linearisierte Heizkurve	60
Abbildung 37: COP in Abhängigkeit von der Außentemperatur entsprechend der Leistungsstufe VWL 45/6	61
Abbildung 38: COP in Abhängigkeit von der Außentemperatur entsprechend der Leistungsstufe VWL 85/6	62
Abbildung 39: COP in Abhängigkeit von der Außentemperatur entsprechend der Leistungsstufe VWL 155/6	62
Abbildung 40: Gütegrad in Abhängigkeit zur Außentemperatur je Leistungsstufe (VWL 45/6)	64
Abbildung 41: Gütegrad in Abhängigkeit zur Außentemperatur je Leistungsstufe (VWL 85/6)	65
Abbildung 42: Gütegrad in Abhängigkeit zur Außentemperatur je Leistungsstufe (VWL 155/6)	65
Abbildung 43: Anlagenschema Variante 1	67
Abbildung 44: Anlagenschema Variante 2	69
Abbildung 45: Anlagenschema Variante 3	71
Abbildung 46: Anlagenschema Variante 4	73
Abbildung 47: Einbindung des Zusatzheizstabes mittels Regelung und Dreiwegeschaltventil	81
Abbildung 48: Betriebsverhalten Schema 1	85
Abbildung 49: Speichertemperaturverläufe Schema 1	86
Abbildung 50: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 1	87
Abbildung 51: Betriebsverhalten Schema 1	88
Abbildung 52: Speichertemperaturverläufe Schema 2	89
Abbildung 53: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 2	90
Abbildung 54: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 2 (300 l TWW)	90
Abbildung 55: Betriebsverhalten Schema 4	91
Abbildung 56: erweiterte Raum- und Speichertemperaturverläufe Schema 4	92

Abbildung 57: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 4 (300 l TWW)	93
Abbildung 58: Etot - Verlauf des EFH2 Standortvariabel	94
Abbildung 59: Mitteltemperaturen monatlich Standortspezifisch	95
Abbildung 60: Leistungsstufen-Verlauf standortspezifisch EFH	97
Abbildung 61: Etot-Verlauf gebäudespezifisch EFH	99
Abbildung 62: Leistungsstufen-Verlauf gebäudespezifisch EFH	100
Abbildung 63: Festlegung der Parameter für die PV-Anlage	105
Abbildung 64: Definition Stromnetz	105
Abbildung 65: Variantenvergleich – Eigenverbrauch	107
Abbildung 66: Betriebsverhalten Schema 1	111
Abbildung 67: Speichertemperaturverläufe Schema 1 (MFH)	112
Abbildung 68: standortabhängiger Etot – Verlauf für MFH	113
Abbildung 69: Leistungsstufenverlauf standortspezifisch MFH	115
Abbildung 70: Vergleich Wärmepumpenleistungsstufe Lingen, MFH 2	116
Abbildung 71: gebäudespezifischer Leistungsstufenverlauf (MFH)	116
Abbildung 72: gebäudespezifischer Etot-Verlauf (MFH)	117

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klimazonenübersicht (DIN V 18599-10, 2018-09)	3
Tabelle 2: Abweichung der gemittelten Monatstemperaturen je Klimazone von der gemittelten Klimazone	4
Tabelle 3: Systematik der Typtagkategorien (VDI 4566, 2021-07)	5
Tabelle 4: Abweichung der Klimazonen von der gemittelten Klimazone	6
Tabelle 5: standortabhängige Außentemperaturen, Abhängigkeit von der Heizgrenze	8
Tabelle 6: Tageszahlen und Temperaturdifferenzen der Typtage (TRJ2015, Zwickau)	16
Tabelle 7: Tageszahlen und Temperaturdifferenzen der Typtage (TRJ2015, Zwickau, Winter)	17
Tabelle 8: Tageszahlen und Temperaturdifferenzen der Typtage (TRJ2045, Zwickau)	18
Tabelle 9: Heatmap Gebäudebestand	28
Tabelle 10 - Referenzgebäudegrunddaten ausgewählter Gebäudeklassen	30
Tabelle 11: Luftwechselraten für das vereinfachte Verfahren	34
Tabelle 12: Ermittlung der Gebäudeheizlasten	35
Tabelle 13: Heizlast und spezifische Heizlast der Referenzgebäude	36
Tabelle 14: hüllflächenbezogene U-Werte der Gebäude	37
Tabelle 15: Aufstellung Gebäudevariation	38
Tabelle 16: Speichergrößen	43
Tabelle 17: gewählte Speichergrößen	45
Tabelle 18 - Faktoren Klimazone 09	46
Tabelle 19 - Warmwasserbedarf nach Gebäudeart	47
Tabelle 20: Auswahl Wärmepumpen Vaillant (aroTHERM plus, 2021-03)	53
Tabelle 21: Auswahl der Wärmepumpen für die Gebäudetypen	54
Tabelle 22: Betriebsmodi modulierender Wärmepumpen (Polysun Handbuch, 2022)	59
Tabelle 23: Regelkonzept Variante 1	68
Tabelle 24: Regelkonzept Variante 2	70
Tabelle 25: Regelkonzept Variante 3	72
Tabelle 26: Speichervariationen nach Simulationsergebnis	79

Tabelle 27: Simulationsvarianten.....	80
Tabelle 28: Regelkonzept Zusatzheizstab	81
Tabelle 29: Simulationsergebnis Speicherüberladung EFH	83
Tabelle 30: Auswirkung Anpassung Schaltbedingung	93
Tabelle 31: Simulation Standortvergleich	96
Tabelle 32: Anpassung Wärmepumpenmodell	98
Tabelle 33: Simulation der Gebäudetypen.....	101
Tabelle 34: Vergleich der Gebäudespeicherfähigkeit	102
Tabelle 35: Bereitstellungsdefizit TWW	103
Tabelle 36: Vergleichssimulation mit und ohne Warmwasserbereitung	104
Tabelle 37: Simulationsvarianten Eigenstromnutzung	106
Tabelle 38: Variantenvergleich Eigenstromnutzung.....	107
Tabelle 39: Simulationsergebnis Speicherüberladung MFH	109
Tabelle 40: Simulationsergebnisse MFH 2 Standortvergleich.....	114
Tabelle 41: Simulationsergebnis Gebäudetypenvergleich	118
Tabelle 42: Vergleich MFH 3, 3.1 Erhöhung Wärmepumpenanzahl	119
Tabelle 43: Vergleich Speicherverhalten MFH.....	119
Tabelle 44: Zusammenfassung Gebäudevergleich EFH.....	122
Tabelle 45: Zusammenfassung Gebäudevergleich MFH	123

III. Anlagenverzeichnis

Anlage Titel

1	Excel-Datei: TRY Auswahl
2	Excel-Datei mit Makros: Berechnungstool Zwickau
3	Excel-Datei mit Makros: Berechnungstool Zwickau_45
4	Excel-Datei mit Makros: Berechnungstool Zwickau_Winter
5	Excel-Datei mit Makros: BerechnungstoolZwickau15Jahr
6	Excel-Datei: Zusammenfassung_Zwickau
7	Excel-Datei mit Makros: Berechnungstool Hof15Jahr
8	Excel-Datei mit Makros: Berechnungstool Lingen15Jahr
9	Excel-Datei mit Makros: Berechnungstool Mannheim15Jahr
10	Excel-Datei: Daten_AllerTRY
11	Excel-Datei: Gebäudetypologie
12	PDF-Datei: Polysun-Tutorial_DE
13	Excel-Datei: Speichergrößen
14	Excel-Datei: Zapfprofile
15	Excel-Datei: WPDatenHertseller
16	Excel-Datei: Steuerungslogik
17	Excel-Datei: Varianten
18	PDF-Datei: IWU, Loga et al, Deutsche-Wohngebäudetypologie
19	Excel-Datei: Gradtagzahlen-Deutschland
20	PDF-Datei: IWU, Diefenbach et al, Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand
21	PDF-Datei: Planungsinformationen-Wärmepumpen_Vaillant
22	Zip-Datei: Varianten
23	PDF-Datei: Planungsinformation, Arotherm-plus-LWWP
24	Zip-Datei: TRY Grunddaten Polysun
25	PDF-Datei: Zusammenfassung Sanierungsmaßnahmen IWU

IV. Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Bedeutung
AND	Und-Verknüpfung
BDH	Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V.
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
CSV	Comma-separated values (Dateiformat)
dena	Deutsche Energie-Agentur
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFH	Einfamilienhaus
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EZFH	Ein- und Zweifamilienhaus
FBH	Fußbodenheizung
GEG	Gebäude Energie Gesetz
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GWP	Global-Warming-Potential (Treibhauspotenzial)
H...	Hilfsgröße
HH	Hochhaus
HK	Heizkreis
I...	Regelungseingang
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
MFH	Mehrfamilienhaus
NWG	Nichtwohngebäude
OR	Oder-Verknüpfung
PS...	Vorangegangener Betriebszustand
PV	Photovoltaik

R290	Propan (Kältemittel)
RH	Reihenhaus
RL	Rücklauf
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance (Jahresarbeitszahl)
TC	Zeitschaltuhr
TRJ	Testreferenzjahr
TWW	Trinkwarmwasser
VL	Vorlauf
WE	Wohneinheit
WP	Wärmepumpe

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
B, L	m	Breit, Länge
A/V	$\frac{1}{m}$	Flächen-Volumen-Verhältnis
U-Wert	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
$\phi_{V,build}$	W	Norm-Lüftungsverlust Gebäude
V_{build}	m ³	Gebäudevolumen
n_{build}	$\frac{1}{h}$	Luftwechselrate
$\rho_L \cdot c_{p,L}$	$\frac{Wh}{m^3 K}$	Stoffkonstante der Luft (vereinfacht 0,34)
$\theta_{int,build}$	°C	Norminnentemperatur Gebäude
θ_e	°C	Normaußentemperatur (DIN EN 12831-1)
$A_{build, beheizt}$	m ²	Beheizte Wohnfläche
ϕ_T	W	Transmissionswärmeverlust
Q_{Aa}	$\frac{kWh}{m^2 a}$	Flächenbezogener Nettoheizwärmebedarf

b_{VH}	h	Jahresvollbenutzungsstunden
H_T'	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
G-Wert	$\frac{W}{m^2 K}$	Gesamtenergiedurchlassgrad
C_{wirk}		Wirksame Wärmekapazität
A_G	m ²	Nettogrundfläche
c_{eff}	$\frac{Wh}{K \cdot m^3}$	Spezifische Wärmekapazität
$V_{Speicher}$	l	Speichervolumen
Φ_{HL}	W	Gebäudeheizlast
$f_{\frac{V}{kW}}$	$\frac{l}{kW}$	Speichervolumen je kW Wärmepumpenleistung (Faktor)
$P_{WP,A12}$	W	Wärmepumpenleistung im Punkt A12/W35
$t_{mind.Laufzeit}$	min	Kompressormindestlaufzeit
$c_{p,W}$	$\frac{Wh}{kgK}$	Spezifische Wärmekapazität des Wassers
ρ_W	$\frac{kg}{l}$	Dichte des Wassers
$\Delta\theta_{Entnahme}$	K	Zulässige Speichertemperaturerhöhung
$COP_{WP,A12}$		COP Im Punkt A12/W35
$\Delta\theta_{Raum,Vorlauf}$	K	Übertemperatur Vorlauf, Raum
Φ_T	W	Transmissionswärmeverlust
$f_{Geschoss}$		Faktor der Vollgeschossanzahl
f_{Sperr}		Sperrzeitfaktor
$\Delta\theta_{VL,Puffer}$	K	Temperaturdifferenz Vorlauf und Speichermindesttemperatur
$Q_{TWE,TT}$	Wh	Energiebedarf Trinkwassererwärmung je Typtag
$Q_{TWE,a}$	Wh	Jahresenergiebedarf Trinkwassererwärmung
N_{WE}		Anzahl Wohneinheiten

$F_{TWE,TT}$		Faktor, Trinkwassererwärmung je Typtag
$V_{TWE, TT}$	$\frac{l}{d}$	Warmwasservolumen je Typtag
$\dot{Q}$	W	Leistung
$\dot{Q}_{min}$	W	Minimale Leistung
$\dot{Q}_{max}$	W	Maximale Leistung
θ_a	°C	Austrittstemperatur
θ_i	°C	Eintrittstemperatur
$\dot{V}$	$\frac{l}{h}$	Volumenstrom
η_c		Carnotscher Wirkungsgrad
T_h	K	Verflüssigungstemperatur
T_k	K	Verdampfungstemperatur
$\varepsilon_{WP,real}$		Reale Leistungszahl der Wärmepumpe
$\nu_{G,WP}$		Gütegrad der Wärmepumpe
$P_{WP,Carnot}$	W	Theoretische Wärmepumpenleistung nach Carnot
$P_{WP,real}$	W	Reale Wärmepumpenleistung
$\varepsilon_{WP,Carnot}$		Ideale Leistungszahl nach Carnot

Aufgabenstellung

Ausgangspunkt sind die deutlichen Temperaturunterschiede für heitere Tage zwischen Tag und Nacht. Dies führt bei Luft-Wasser-Wärmepumpen zu deutlich verbesserter Effizienz bzw. zu größeren COP-Werten an frühen Nachmittagsstunden. Für die Nutzung ist die passende Dimensionierung eines entsprechenden wasserbasierten thermischen Speichers notwendig. Auch für den optimierten Eigenverbrauch von Photovoltaik-Strom ist ein thermischer Speicher sinnvoll. Bisherige Planungshinweise zur Speichergröße von Herstellern, dem Wärmepumpenverband oder der VDI4645 sehen eine eher knappe Dimensionierung vor für Abtauvorgänge, zur Vermeidung der Taktung, zur Überbrückung von Sperrzeiten. Für eine Überbrückung der temperaturbedingt ungünstigen Frühmorgenstunden wären größere Speicher notwendig. Andererseits sind größere Speicher mit höheren Investitionskosten verbunden. Daher sind in Wirtschaftlichkeitsberechnungen höhere Investitionskosten geringeren Betriebskosten für vorteilhafte Varianten gegenüberzustellen.

Im Nachfolgenden werden zahlreiche Einflussgrößen benannt, die zu einer entsprechenden Variantenvielfalt bei den Simulationen führen würden. Zur Reduktion der Varianten sind für die Einflussgrößen sinnvolle Kategorien mit geeigneten Werteparametern zu bilden.

Die Jahressimulationen sollen mit Hilfe der Software Polysun und typischen Testreferenzjahren durchgeführt werden. Das Programmpaket ermöglicht den Variantenvergleich insbesondere unter den Aspekten Energieeffizienz, Energieverbrauch, Wirtschaftlichkeit. Die Ergebnisse sollen dann, soweit möglich, für Planungsbelange von Luft-Wasser-Wärmepumpen insbesondere zur Dimensionierung der Speicher verallgemeinert werden.

Nachfolgend werden die Haupteinflussgrößen mit stichwortartiger Detaillierung aufgeführt:

Gebäudetyp und -nutzung: Ein- und Mehrfamilienhäuser (evtl. Nichtwohngebäude) hinsichtlich Nutzung, Belegung, Neubau bzw. Modernisierungszustand, typischen flächenbezogen Heizlasten, Heizgrenze

Komfort-Anspruch und Betriebsweise: gewünschte Raumtemperatur, nur teilweise Gebäudebeheizung bzw. Räume mit reduzierter Temperatur, Tagesabwesenheit, Nachtabsenkung

Gebäude-Speicherfähigkeit: Die Wärmekapazität von Decken, Wänden, Heizestrichen beeinflusst die notwendige Speichergröße z.B. für Sperrzeiten, aber auch die Verschiebung der Heizlasten bei Nachtabsenkung.

Warmwasser- und Heizungspufferspeicher-Systeme: getrennte Warmwasser- und Heizungspufferspeicher, Pufferspeicher mit trinkwasserdurchströmter Innenwendel, Pufferspeicher mit Frischwasserstation, (Solar unterstützte Pufferspeicher), Variation Speichergröße; für den Warmwasserbedarf. Verwendung der bekannten Lastprofile z.B. DIN EN 12831, evtl. angepasst

Raum-Wärmeübergabe: Fußbodenheizung, Heizkörperheizung, gemischte Systeme, typische Vor-, Rücklauf-Temperaturpaare

Außenlufttemperatur – Jahres und Tagesverlauf: Basis DWD-Testreferenzjahre TRJ2015, Extrem-Winter 2015 (reduzierte Variation), Zukunfts-TRJ (nur exemplarisch)

Elektro-Versorgungsnetz-Einfluss: Sperrzeiten, schaltbarer Verbraucher, Wärmepumpentarife, Tarife mit HT-, NT-Unterscheidung,

Photovoltaik-Nutzung: optimierte Eigenbedarf-Nutzung ohne / mit Batterie

Wärmepumpen-Einfluss: Nur Leistung regelbare Luft-Wasser-Wärmepumpen sollen betrachtet werden. Für die marktverfügbaren Wärmepumpen sollen das Außenluft-abhängige Leistungs- bzw. COP-Verhalten in Abhängigkeit von typischen Kältemitteln und typischen Nennleistungsstufen evtl. in Qualitätsstufen kategorisiert

werden. Auch die lärmbedingte Nacht-Leistungsreduktion ist zu berücksichtigen. Daten insbesondere die Pflicht-ErP-Herstellerdaten nach DIN EN 14825 sowie die Nennangaben nach DIN EN 14511. Diese Datenbasis ist in das entsprechende WP-Geräte-Modul von Polysun einzupflegen.

Steuerungsvorgaben Wärmepumpe: Welche Ein- bzw. Vorgabe-Steuerungs-Werte ermöglichen die Regelungslogiken marktverfügbarer Geräte? PV-, Smart-Ready, HEMS, nur Schaltsignal oder auch verfügbare PV-Leistung

Vorgenannte Einflussgrößen mit den dazu erarbeiteten Kategorisierungen sind systematisch zu erläutern. Für Simulationsvarianten mit prägnanten Ergebnissen sind diese auch anhand kürzerer Zeitabschnitte (Tag, Woche) zu veranschaulichen.

Die für Polysun vorgenommenen Anpassungen der Eingabefiles der verschiedenen Module, wie auch die Simulationsergebnisse sind in einem elektronischen Verzeichnis zu dokumentieren und zu übergeben.

Aufgrund der notwendigen Reduktion der Variantenvielfalt ist regelmäßig Rücksprache mit dem betreuenden Professor zu nehmen.

Professor Dr.-Ing. Clemens Ruy

1 Einleitung

Angesichts der immer weiter voranschreitenden Klimakrise und dem Fokus auf erneuerbare Energien im Bereich der Gebäudeheizung von Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden in Form von Wärmepumpen, sollen für die Dimensionierung und das Betriebsverhalten von Wärmepumpen alternative Lösungen aufgezeigt, bewertet und überprüft werden. Entsprechend der Ausgabe Heizen in bestehenden Wohngebäuden des BDH ((Hrsg.), Interessengemeinschaft Energie Umwelt, 2021-03) entfallen rund 40 % des Energieverbrauchs in Europa auf den Gebäudebestand. Davon dienen rund 85 % der Deckung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden und der Erwärmung von Trinkwasser. Einen großen Zuspruch bei der Nutzung von erneuerbaren Energien erhielten, vor allem durch geringere Anschaffungskosten, Luft-Wasser-Wärmepumpen.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Untersuchung ist es, das Potential von unterschiedlichen Tagestemperaturverläufen zu ermitteln und mittels Simulationen zu prüfen, ob eine Effizienzsteigerung der Wärmepumpe zu verzeichnen ist. Ein besonderes Augenmerk soll dabei auf die Abdeckung eines möglichst großen Einsatzbereiches innerhalb Deutschlands gelegt werden. Hierfür sind geeignete Klassifizierungen zu erstellen und mittels weiterer Parameter zu variieren. Eine große Rolle spielen dabei die Außentemperaturverläufe verschiedener Standorte, das Speicherverhalten von Gebäuden sowie nutzerspezifische Betriebsweisen.

Nach der Untersuchung zahlreicher Parameter sind geeignete Vergleichssimulationen zu erstellen und im Nachgang auszuwerten. Es sollen Rückschlüsse auf das Einsparpotential der Wärmepumpe durch eine geeignete Regellogik und die Ausnutzung höherer Tagestemperaturen getroffen werden. Des Weiteren ist zu ermitteln, welche Parameter für eine geeignete Auswahl der Wärmepumpenleistung herangezogen werden sollten. Die Untersuchung der verschiedenen Varianten erfolgt mittels Polysun Simulationssoftware. Auf Grund geringer energetischer Unterschiede wird auf eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verzichtet.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel zwei werden die Grundlagen und gesetzten Parameter für die Simulation der verschiedenen Varianten ermittelt und erläutert. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Erstellung geeigneter Gebäudetypen, die den Großteil der deutschen Wohntypologie abdecken und verschiedene Sanierungsstufen abbilden. Diese wird ergänzt durch die Auswahl geeigneter Anlagenkomponenten, die die Klassifizierung der modulierenden Wärmepumpen, sowie die Konzeption verschiedener hydraulischer Verschaltungen, der Auslegung von Puffer- und Trinkwarmwasserspeichern und die Erstellung eines Regelkonzeptes beinhaltet. Die unterschiedlichen Variationen werden für einen Gebäudetyp an einem Standort untersucht und eingegrenzt, sodass die Variantenvielfalt auf Grund der zeitlichen Begrenzung reduziert werden kann.

Die Auswirkungen und Ergebnisse, resultierend aus den Simulationen mit Hilfe des Programmes Polysun. Diese werden in Kapitel drei für das Einfamilienhaus und in Kapitel vier für das Mehrfamilienhaus genauer beschrieben und zusammengefasst. Es werden auffällige Gegebenheiten explizit betrachtet und in einzelnen Fällen auf Grund neuer Erkenntnisse abgewandelt und erneut simuliert. Neben der Betrachtung des Einsparpotentials außen temperaturabhängiger Wärmepumpenbetriebsweisen werden Rückschlüsse auf Vor- und Nachteile verschiedener hydraulischer Verschaltungen herausgestellt. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Gewinnung von Erkenntnissen zur Dimensionierung von Wärmepumpen entsprechend der baulichen und standortabhängigen Gegebenheiten, diese werden kurz für jeden Parameter in Kapitel fünf betrachtet. Eine Zusammenfassung aller relevanten Punkte erfolgt in Kapitel sechs.

2 Hauptteil

In diesem Abschnitt werden die zu bestimmenden Parameter entsprechend der Vorgaben und Ergebnisse aus Recherchen eingegrenzt und bewertet. Es werden erste Simulationen zur Validierung geeigneter Simulationsparameter erstellt, sowie alle betreffenden Komponenten beschrieben.

2.1 Temperaturzeitverläufe

Für die Simulation der Anlagenkonfiguration und Betrachtung der Tagestemperaturverläufe werden Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) herangezogen. In Bezug auf die Testreferenzjahre (TRJ) des DWD ergeben sich für ausgewählte Standorte klimatische Bedingungen, sowie Prognosen über die Wetterdatenentwicklung. Anhand der DIN 4710 und VDI 4710 kann Deutschland in 15 Klimazonen eingeteilt werden.

Tabelle 1: Klimazonenübersicht (DIN V 18599-10, 2018-09)

Tabelle E.1 — Mittlere Außenlufttemperaturen der Referenzorte

Region	Referenzort	Mittlere monatliche Außenlufttemperatur θ_a in °C												Jahreswert in °C Jan bis Dez
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
1	Bremerhaven	2,9	3,2	5,4	9,0	13,1	16,0	17,9	18,2	15,0	10,6	6,1	3,2	10,1
2	Rostock	2,3	2,4	4,3	8,0	12,4	15,6	18,0	18,0	14,7	10,2	5,5	2,6	9,5
3	Hamburg	2,5	2,7	4,9	8,5	12,8	15,5	17,8	17,8	14,1	9,8	5,1	2,3	9,5
4	Potsdam	1,0	1,9	4,7	9,2	14,1	16,7	19,0	18,6	14,3	9,5	4,1	0,9	9,5
5	Essen	3,1	3,5	6,6	9,5	13,7	15,9	18,2	18,2	14,6	10,8	6,1	3,5	10,4
6	Bad Marienberg	0,1	0,5	3,6	7,0	11,5	14,0	16,1	16,0	12,3	8,1	3,2	0,6	7,8
7	Kassel	1,0	2,1	5,2	8,8	13,3	15,9	18,1	17,8	13,7	9,5	4,5	1,7	9,3
8	Braunlage	-0,8	-0,3	2,1	5,7	10,5	12,9	15,0	15,0	11,1	7,1	2,3	-0,2	6,7
9	Chemnitz	0,5	1,0	3,9	8,2	12,9	15,5	17,5	17,6	13,2	9,2	3,8	0,8	8,7
10	Hof	-1,2	-0,4	2,8	6,6	11,7	14,5	16,3	16,6	12,0	7,6	2,3	-0,7	7,4
11	Fichtelberg	-3,3	-3,5	-1,3	2,3	7,4	9,8	12,2	12,4	8,1	4,4	-0,6	-2,8	3,8
12	Mannheim	2,4	3,6	7,1	10,6	15,6	18,1	20,1	20,2	15,7	11,0	5,7	3,1	11,1
13	Passau	-1,2	0,4	4,3	8,2	13,7	16,4	18	17,8	13,1	8,7	3	-0,2	8,6
14	Stötten	-0,5	0,3	3,4	6,8	11,8	14,4	16,6	16,7	12,3	8,5	2,6	-0,2	7,8
15	Garmisch- Partenkirchen	-2,3	-0,5	3,2	7,0	11,8	14,8	16,6	16,4	12,3	8,4	1,9	-1,8	7,4

Mit Hilfe der meteorologischen Informationen ist es notwendig ein mittleres Referenzprofil zu ermitteln und die Auswertung um je eine weitere abweichende Klimazone zu ergänzen. Für die jeweiligen Ergänzungen werden entsprechende Orte

markanter Klimazonen ausgewählt, die nicht mit den Standorten der Messstationen übereinstimmen müssen. Maßgebend für die weitere Betrachtung werden die stündlich gemessenen Außentemperaturen des DWD, neben den Daten zu Feuchte, Strahlung und Bewölkung herangezogen. Anhand der nachfolgenden Tabelle wird eine Referenzklimazone gewählt.

Tabelle 2: Abweichung der gemittelten Monatstemperaturen je Klimazone von der gemittelten Klimazone

Mittelwert Klimazonen	0,4	1,1	4,0	7,7	12,4	15,1	17,2	17,2	13,1	8,9	3,7	0,9	Differenz kumuliert in K
Klimazone	Abweichung in K												
1	2,5	2,1	1,4	1,3	0,7	0,9	0,7	1,0	1,9	1,7	2,4	2,3	19,0
2	1,9	1,3	0,3	0,3	0,0	0,5	0,8	0,8	1,6	1,3	1,8	1,7	12,4
3	2,1	1,6	0,9	0,8	0,4	0,4	0,6	0,6	1,0	0,9	1,4	1,4	12,2
4	0,6	0,8	0,7	1,5	1,7	1,6	1,8	1,4	1,2	0,6	0,4	0,0	12,4
5	2,7	2,4	2,6	1,8	1,3	0,8	1,0	1,0	1,5	1,9	2,4	2,6	22,1
6	0,3	0,6	0,4	0,7	0,9	1,1	1,1	1,2	0,8	0,8	0,5	0,3	8,6
7	0,6	1,0	1,2	1,1	0,9	0,8	0,9	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	10,0
8	1,2	1,4	1,9	2,0	1,9	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,4	1,1	21,2
9	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,1	0,3	0,1	0,1	3,1
10	1,6	1,5	1,2	1,1	0,7	0,6	0,9	0,6	1,1	1,3	1,4	1,6	13,5
11	3,7	4,6	5,3	5,4	5,0	5,3	5,0	4,8	5,0	4,5	4,3	3,7	56,5
12	2,0	2,5	3,1	2,9	3,2	3,0	2,9	3,0	2,6	2,1	2,0	2,2	31,6
13	1,6	0,7	0,3	0,5	1,3	1,3	0,8	0,6	0,0	0,2	0,7	1,1	9,2
14	0,9	0,8	0,6	0,9	0,6	0,7	0,6	0,5	0,8	0,4	1,1	1,1	8,9
15	2,7	1,6	0,8	0,7	0,6	0,3	0,6	0,8	0,8	0,5	1,8	2,7	13,8

Für die allgemeine Betrachtung der Variantenvielfalt wird das Klimaprofil neun, Thüringer Becken und sächsisches Hügelland herangezogen. Entscheidend für die Auswahl sind geringe Abweichungen der Jahresmitteltemperatur, sowie der Mitteltemperaturen für die entsprechenden Monate eines Jahres. Vor allem für die Winter- und Übergangsmonate sind geringe Temperaturdifferenzen der Mitteltemperaturen von 0,1 bis 0,3 Kelvin zu verzeichnen.

Als Repräsentationsstandort dient die Stadt Zwickau. Die Jahresmitteltemperatur des Klimaprofils neun beträgt 8,7 °C. Die Jahresmitteltemperatur aller Klimaprofile beträgt 8,5 °C. Die jährliche Einstrahlung für den gewählten Standort entspricht ebenfalls dem deutschen Mittelwert.

Unter Berücksichtigung der VDI 4655 für die Einteilung der Jahresstunden in verschiedene Typtage, ergeben sich Varianten entsprechend der nachfolgenden Tabelle.

Tabelle 3: Systematik der Typtagkategorien (VDI 4566, 2021-07)

Jahreszeit	Werktag (W)		Sonntag (S)	
	heiter (H)	bewölkt (B)	heiter (H)	bewölkt (B)
Übergang (Ü)	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer (S)	SWH	SWB	SSH	SSB
Winter (W)	WWH	WWB	WSH	WSB

Hintergrund der Unterteilung in Typtage sind verschiedene Temperaturverlaufsmuster für heitere und bewölkte Tage, sowie Referenzlastprofile für Strom, Heizung, Trinkwassererwärmung und Erzeugerprofile für Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen). Anhand der entsprechenden Tagesreferenzlastprofile können Regellogiken der Wärmepumpe für einen energieeffizienteren Betrieb und die Ausnutzung von Speicherkapazitäten oder Stromüberschüssen genutzt werden.

Für die Unterteilung wurden bestimmte Parameter der einzelnen Typtagklassen Sommer, Winter, Übergang, heiter und bewölkt festgelegt. Für die Art der Bewölkung dienen die Vorgaben der VDI 4655.

- Bewölkt: Bedeckungsgrad, dessen Tagesmittel über einen Zeitraum von 24 Stunden größer-gleich 5/8 ist
- Heiter: Bedeckungsgrad, dessen Tagesmittel über einen Zeitraum von 24 Stunden kleiner 5/8 ist

Die Einteilung der Perioden Winter, Übergang und Sommer erfolgt anhand der täglich, innerhalb von 24 h gemessenen Tagesmitteltemperatur. Die Einteilung entsprechend der Temperaturgrenzen kann nachfolgender Aufzählung entnommen werden.

- Sommer: Tag an dem die Tagesmitteltemperatur über einen Zeitraum von 24 h über der Heizgrenze liegt, gewählt wurden für die Betrachtung 12 °C (in Abwandlungen 15 °C)
- Wintertag: Tag an dem die Tagesmitteltemperatur über einen Zeitraum von 24 h unter 5 °C liegt
- Übergangstag: Tag an dem die Tagesmitteltemperatur über einen Zeitraum von 24 h größer-gleich 5 °C und kleiner-gleich der gewählten Heizgrenztemperatur von 12 °C (15 °C) ist

- Mit der Mittelung der Betrachtungstemperatur über 24 h ist zu berücksichtigen, dass Übergangstage auch in den Winter und Sommermonaten auftreten können

Die Heizgrenztemperatur ergibt sich für Gebäude, die den Anforderungen des geltenden Energieeinsparrechtes in der gültigen Fassung an Gebäude mit normalen Innentemperaturen entsprechen (DIN V 18599-5, 2018-09).

Vergleicht man die aus der VDI 4566 hervorgehende Anzahl der Typtage nach Klimazone entsprechend der DIN 4710 und VDI 4710 mit den gemittelten Tageswerten aller Klimazonen, so ergibt sich ein Klimaprofil mit der geringsten Abweichung zum gemittelten Durchschnitt. Anhand dieser überschlägigen Betrachtung soll ein passendes Referenzklima, ergänzend zu den oben ermittelten Monatstemperaturen, für Deutschland ausgewählt oder bestätigt werden. Die Abweichungen zum Durchschnitt der einzelnen Typtagkategorien lassen sich der nachfolgenden Tabelle entnehmen.

Tabelle 4: Abweichung der Klimazonen von der gemittelten Klimazone

Klimaprofil	UWH	UWB	USH	USB	SWX	SSX	WWH	WWB	WSH	WSB	Differenz Anzahl der Heiztage	Tages- differenz
Gemittelt	46	75	11	16	73	14	28	80	6	16	278	0
Delta TRY01	1	1	2	3	22	3	11	9	3	1	25	81
Delta TRY02	10	11	5	3	9	1	2	9	0	2	8	60
Delta TRY03	4	3	1	2	8	2	2	15	0	3	10	50
Delta TRY04	11	12	0	4	26	5	3	5	4	6	31	107
Delta TRY05	7	20	5	5	25	6	16	22	3	3	31	143
Delta TRY06	9	9	0	3	23	3	5	10	0	0	26	88
Delta TRY07	6	15	1	2	5	3	10	3	2	1	8	56
Delta TRY08	6	11	3	3	26	7	4	27	2	3	33	125
Delta TRY09	9	11	3	2	2	2	0	4	2	1	0	36
Delta TRY10	1	10	5	4	17	5	4	21	2	3	22	94
Delta TRY11	7	11	1	2	53	10	11	24	5	4	63	191
Delta TRY12	4	5	3	2	37	7	7	30	1	6	44	146
Delta TRY13	5	5	2	3	5	0	1	3	3	5	5	37
Delta TRY14	1	9	1	3	2	3	2	7	1	3	5	37
Delta TRY15	4	4	5	2	11	0	21	3	4	0	11	65

Für die allgemeine Betrachtung der Variantenvielfalt wird das Klimaprofil neun, Thüringer Becken und sächsisches Hügelland auch anhand der Verteilung der Typtage bestätigt. Im Nachfolgenden werden für dieses Profil das Standard-, Zukunfts- und Extremwinterreferenzjahr betrachtet. Für die Klimazone neun, mit dem Standort Zwickau, sind typische Normauslegungstemperaturen nach DIN EN 12831 im Bereich von -12 bis -13 °C zu erwarten.

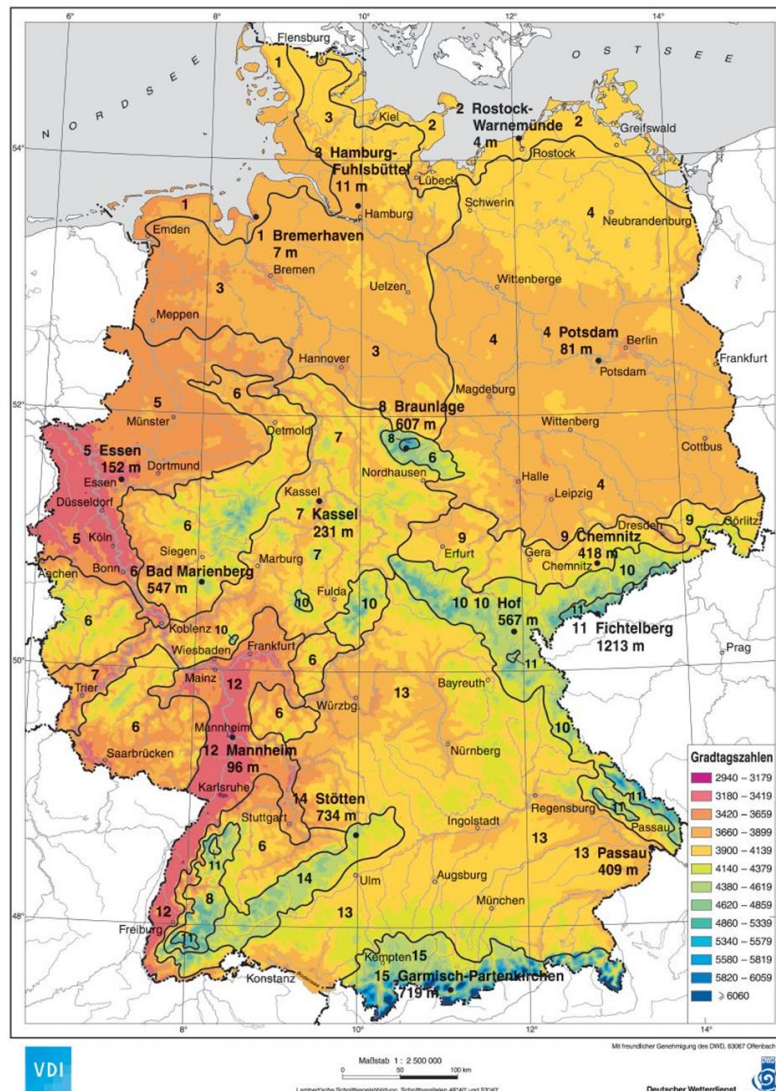


Abbildung 1: Gradzahlkarte nach VDI 4710 Beiblatt 2

Für die Auswahl weiterer Klimazonen wird die Gradzahlkarte entsprechend der VDI 4710 Beiblatt 2 herangezogen. Die Klimazone neun repräsentiert den gelben Bereich der Karte. Als weiterer wichtiger Bereich für die Betrachtung der Typtage ergibt sich der orange Bereich, für den auf Grund des Atlantikeinflusses höhere Wintertemperaturen im Bereich von -8 bis -10 °C zu verzeichnen sind. Repräsentativ für die Klimazonen 1, 3, 4, 5 wird der Standort Lingen (oranger Bereich) gewählt. Für kältere Klimazonen 6, 8, 10, 14 wird der Standort Hof (blau-grüner Bereich) herangezogen. Für die warmen Klimazonen 12, 13 wurde der Standort Mannheim (roter Bereich) gewählt, da hier auch parallelen zu im Verlauf näher betrachteten Literaturen gezogen werden können. Die Klimazonen 11 und 15 sind für die Betrachtung monovalenter, beziehungsweise monoenergetisch betriebener Luft-Wasser-Wärmepumpen nicht repräsentativ und werden unter Unterstellung sehr kalter Außentemperaturen und daraus resultierender niedriger Jahresarbeitszahlen in

dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Anhand der Gradtageszahlen der letzten 20 Jahre für die gewählten Referenzstandorte ergeben sich nachfolgende Außentemperaturen und Außentemperaturen für Heiztage in Abhängigkeit der Heizgrenztemperatur.

Tabelle 5: standortabhängige Außentemperaturen, Abhängigkeit von der Heizgrenze

Heizgrenze in °C	Hof	Zwickau	Mannheim	Lingen
Außentemperatur	8	9,5	11,5	10,3
Außentemperatur an Heiztagen (Heizgrenze 10 °C)	2,5	3,3	4,4	4,7
Außentemperatur an Heiztagen (Heizgrenze 12 °C)	3,5	4,3	5,4	5,7
Außentemperatur an Heiztagen (Heizgrenze 15 °C)	5,2	6	6,9	7,3

Anhand der Temperaturunterschiede der einzelnen Standorte lässt sich mittels Simulation die Wirkungsweise der Wärmepumpenschemen für unterschiedliche Temperaturniveaus ermitteln, die ein gesamtheitliches deutsches Klima darstellen sollen. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [1, 19].

2.1.1 Temperaturverlaufsprofile

In diesem Abschnitt sollen die Temperaturverläufe über bestimmte Zeiträume betrachten werden. Als Grundlage werden die Testreferenzjahresdaten des DWD für den Standort Zwickau als Standard, winter-fokussiertes, extrem kaltes Referenzjahr und Zukunftsszenario verwendet.

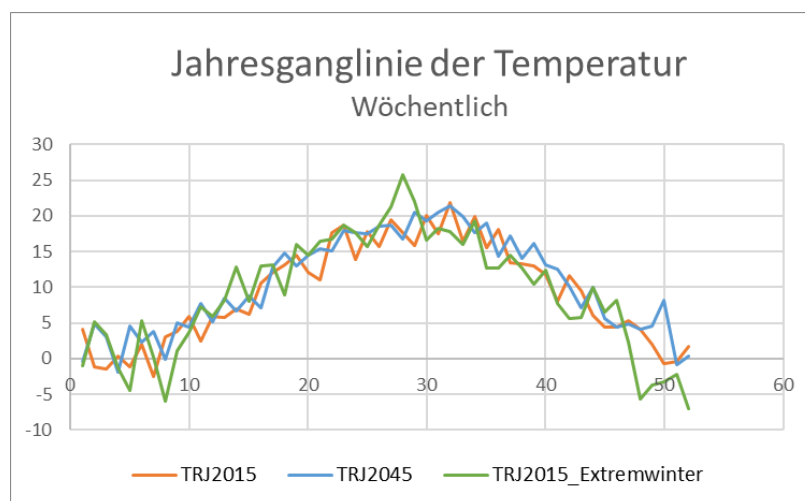


Abbildung 2: Jahresganglinie der Temperatur (wöchentlich)

Anhand der Jahresganglinie für die wöchentlich gemittelte Außentemperatur für die verschiedenen Szenarien lässt sich erkennen, dass die Differenz zwischen den Tagesmitteltemperaturen aufeinanderfolgender Wochen für die Zukunft zu größeren Extremen neigen kann. Deutlich geringere Temperaturen im Winter, als auch höhere Temperaturen im Sommer sind für das Referenzjahr „TRJ2015 Extremwinter“ zu erkennen.

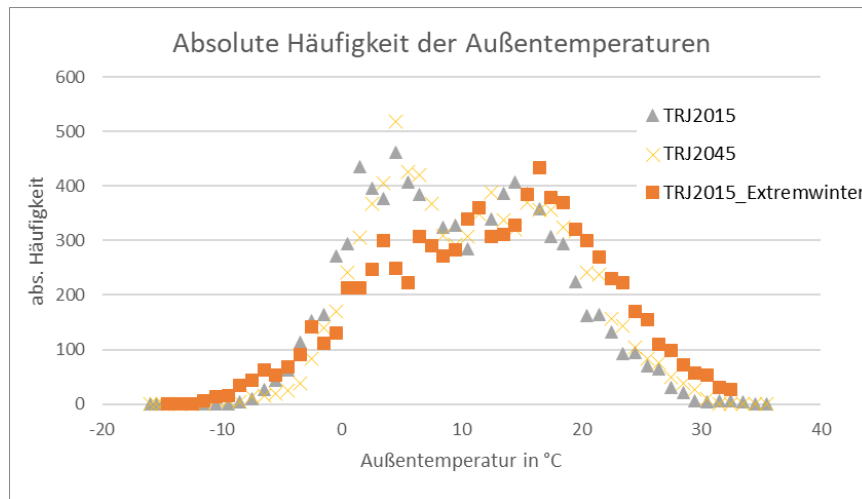


Abbildung 3: Absolute Häufigkeit der Außentemperaturen

Die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Wochenmitteltemperaturen ist hoch. Für das Standard-Referenzjahr und die Temperaturprognose sind verringert Mitteltemperaturen unter -5 °C zu erwarten.

Betrachtet man die absoluten Häufigkeiten der Außentemperatur anhand der verschiedenen Szenarien, so lassen sich deutliche Unterschiede erkennen. In Bezug auf das Standard-Referenzjahr für den Standort Zwickau lassen sich für das Winterextrem eine höhere Anzahl an Tagesstunden geringer Außentemperatur ermitteln. Vermehrt treten Temperaturen unter -5 °C auf. Der Bereich zwischen -5 und 10 °C ist jedoch weniger stark ausgeprägt. Für das zu erwartende Referenzjahr als Prognose sind deutlich geringere Häufigkeiten für Temperaturen unter 0 °C zu erwarten. Diese kommen dem Temperaturbereich von 0 bis 10 °C zugute. Dies bestätigt das Resultat aus der vorhergehenden Abbildung. Es sind höhere Mitteltemperaturen zu erwarten. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [2, 3, 4, 5, 6].

2.1.1.1 Wahl des Bivalenzpunktes

Für eine genauere Möglichkeit des Vergleiches bietet sich die Darstellung der Außentemperaturhäufigkeit in Form eines Kreisdiagramms an.

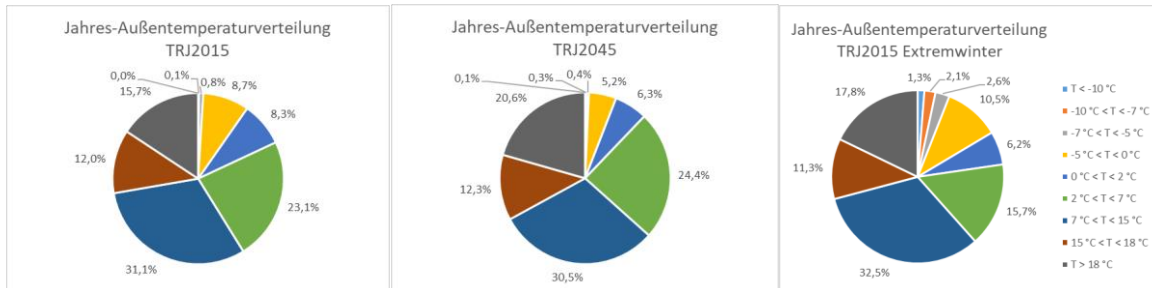


Abbildung 4: Jahresaußentemperaturverteilung

Für die Dimensionierung einer Wärmepumpe sind die Temperaturen der Winter- und Übergangsperiode zu betrachten. Anhand dieser Werte lassen sich einerseits Schlussfolgerungen über die Wahl des Bivalenzpunktes und die Betriebsweise der Wärmepumpe ableiten. Temperaturen unter -7 °C sind für Standard und Zukunftsprofile zu weniger als einem Prozent zu erwarten, dies bedeutet im Umkehrschluss, dass eine Auslegung auf den Bivalenzpunkt -7 °C eine Deckung von 99 % der Temperaturfälle zur Folge hat. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [2, 3, 4, 5, 6].

2.1.1.2 Wahl der Betriebszeiten

Für die Betrachtung der Betriebszeiten in Abhängigkeit von der Außentemperatur sollen die nachfolgenden Abbildungen betrachtet werden. Entscheidend für die Betrachtung einer kurzzeitigen Wärmespeicherung über einen Tagesverlauf sind Tagestemperaturspitzen und Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht. Diese werden veranschaulicht über Tagestemperaturverläufe.

Als Beispiel dient hier das TRJ2015 entsprechend nachfolgender Abbildung. Die Jahrestemperaturverläufe wurden für die 12 Monate eines Jahres zusammengefasst und gemittelt.

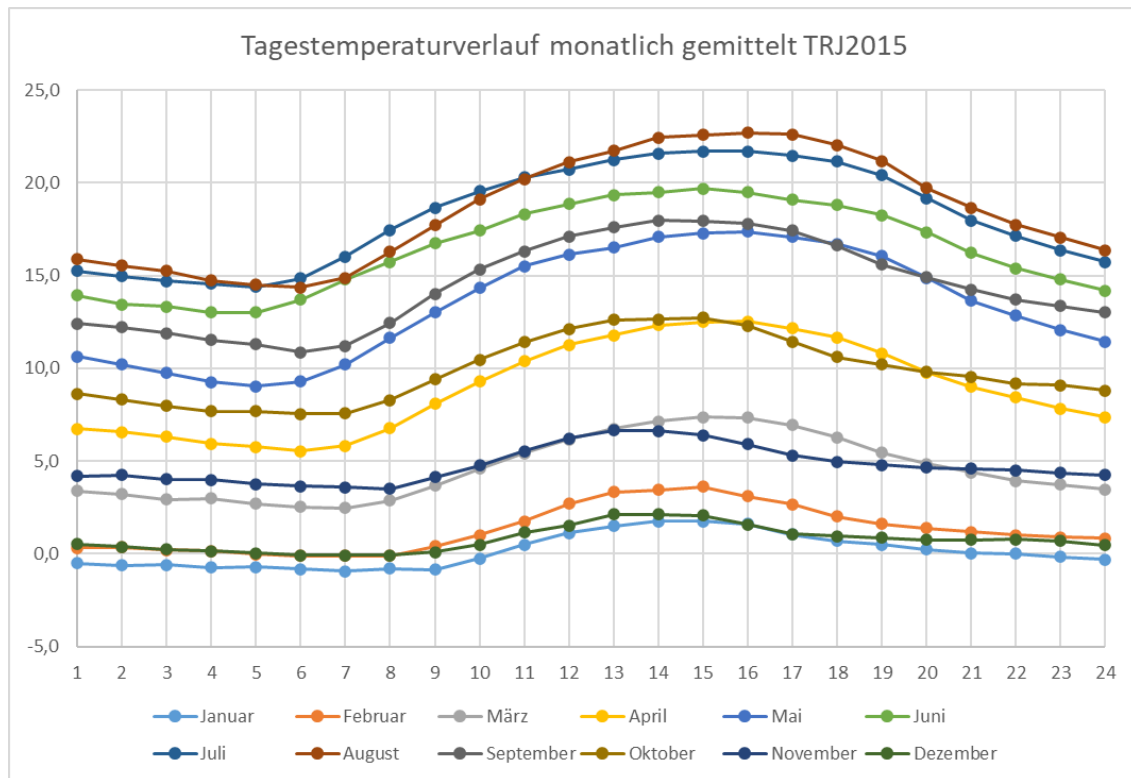


Abbildung 5: Tagestemperaturverlauf monatlich gemittelt TRJ2015

Anhand der Betrachtung eines Graphen ist zu erkennen, dass Tages- und Nachtunterschiede für die unterschiedlichen Betrachtungsmonate auftreten. Des Weiteren lässt sich eine maximale Außentemperatur im Zeitbereich von 14 bis 16 Uhr erkennen. Ebenso lässt sich ein Minimum oder Temperaturabfall im Zeitbereich von 4 bis 7 Uhr erkennen.

Dieser Zeitbereich ist für die Bereitstellung von Warmwasser und Heizenergie an Wochentagen entscheidend. Diese Aussage stützt sich auf die üblichen Betriebsweisen fossiler Wärmeerzeuger, beispielsweise eines Gaswärmeerzeugers. Die Bereitstellung der Wärmeenergie erfolgt wenige Stunden bevor der entsprechende Bedarf erwartet wird. Somit überschneiden sich erhöhte Bedarfsanforderungen in den Morgenstunden mit dem kältesten Außentemperaturniveau eines Tageszeitraumes. Diese als Quellentemperatur fungierende Temperatur der Luft-Wasser-Wärmepumpe beeinflusst die Effizienz dieser. Demnach soll betrachtet werden, ob eine Energieeinsparung mit einer gezielten Bereitstellung und anschließender Speicherung erzielt werden kann. Für die Winter- und Übergangsmonate verlaufen die Graphen tendenziell flacher. Gemittelt über einen Monat sind demnach geringere Temperaturdifferenzen im Tagesverlauf zu erwarten. Für die Betrachtung der weiteren Standorte werden die nachfolgenden

Kreisdiagramme mit der Außentemperaturverteilung entsprechend des TRY2015 herangezogen und mit den bereits betrachteten Ergebnissen für den Standort Zwickau verglichen.

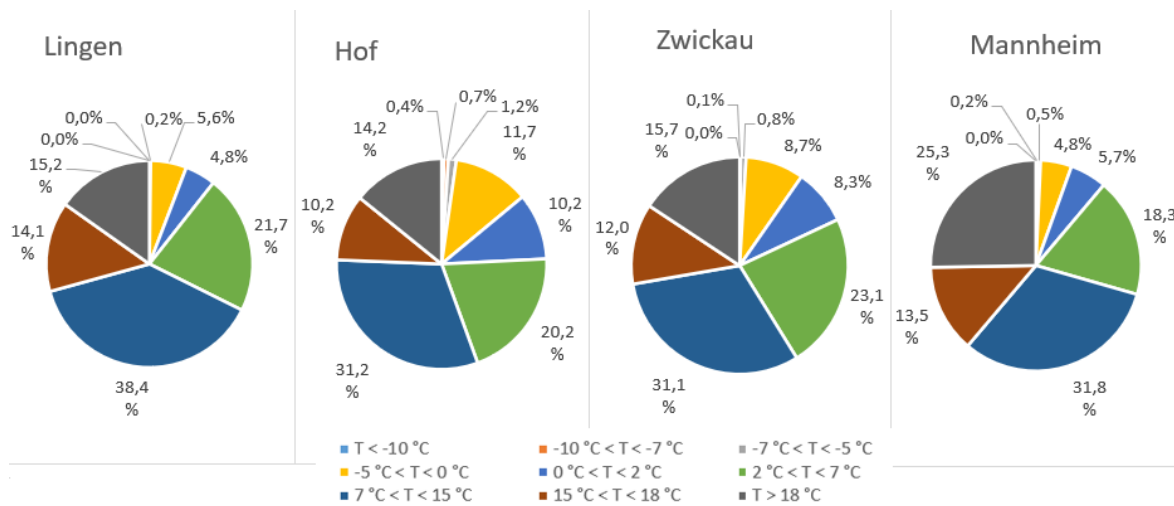


Abbildung 6: Außentemperaturverteilung je Standort

Für die einzelnen Standorte sind deutliche Unterschiede der Temperaturverteilungen zu verzeichnen. Für alle Profile lässt sich der größte Anteil auf den Temperaturbereich 7 – 15 °C festlegen. Für den Standort Mannheim sind deutlich vermehrt Temperaturen über 18 °C zu erwarten, auch Temperaturen unter 2 °C treten verringert auf. Lingen weist ähnliche Verteilungen auf, wobei der Bereich größer 18 °C geringer ausfällt. Der Standort Hof ist für die betrachteten Klimaprofile am kältesten einzustufen, der Anteil an Außentemperaturen kleiner 2 °C ist am größten. Für diesen Standort lassen sich ebenfalls vermehrt Temperaturen unter -10 °C aufzeichnen. Temperaturen kleiner -10 °C lassen sich für alle Standorte ermitteln, sind jedoch auf Grund des geringen Anteils nicht dargestellt. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [6, 7, 8, 9, 10].

2.1.2 Temperaturprofile nach Tages- und Nachttemperatur

In diesem Kapitel soll zu den betrachteten Temperaturverläufen über das Jahr und die Bedingungen zwischen heiter und bewölkt weitere Annahmen aus dem Tagesverlauf der Tagestemperaturen und der Temperaturdifferenzen zwischen Tag und Nacht betrachtet werden.

Als Grundlage der Untersuchung dienen Testreferenzjahre des Standortes Zwickau. Die Unterscheidung in Tag und Nacht wurde über einen 24-stündigen Zeitraum anhand der Betrachtung der diffusen Strahlungsintensität festgelegt. Tritt in den

Messwerten eine Strahlungsintensität größer Null auf, so wird die gemessene Jahresstunde als Tagesstunde gewertet und der Kategorie Tag zugeordnet. Für Null ergeben sich Temperaturen, die der Kategorie Nacht zugeordnet werden.

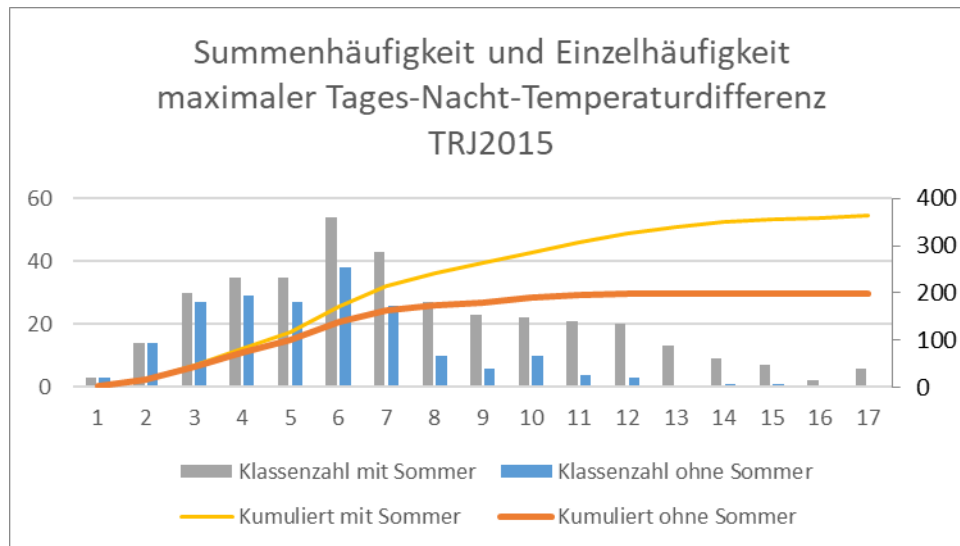


Abbildung 7: Summenhäufigkeit und Einzelhäufigkeit maximaler Tages-Nacht-Temperaturdifferenz (TRJ2015)

Die Daten der Abbildung ergeben sich aus den Differenzen der minimal gemessenen Nachttemperatur und der maximal gemessenen Tagestemperatur. Bei dieser Betrachtung muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Temperaturen meist nur für eine Stunde gelten und ein absolutes Maximum eines Tages darstellen. Diese Maxima treten häufig im Bereich der vier bis acht Kelvin Temperaturunterschied auf. Für die Sommertage, Tage an denen eine mittlere Temperatur größer der Heizgrenze von festgelegten 12 °C (15 °C) berücksichtigt wurde, weisen unter anderem maximale Temperaturdifferenzen bis 17 K auf. Tagestemperaturen mit einer Mitteltemperatur unter 15 °C haben entsprechend dem gelben Graphen einen Anteil von 244 Tagen am Gesamtjahr. Für eine Betriebsverhaltensbetrachtung einer Wärmepumpe mit möglichst langen Laufzeiten werden die Temperaturdifferenzen der gemittelten Tages- und Nachttemperatur herangezogen. In der nachfolgenden Abbildung sollen die unterschiedlichen Betrachtungsreferenzen genauer analysiert werden.

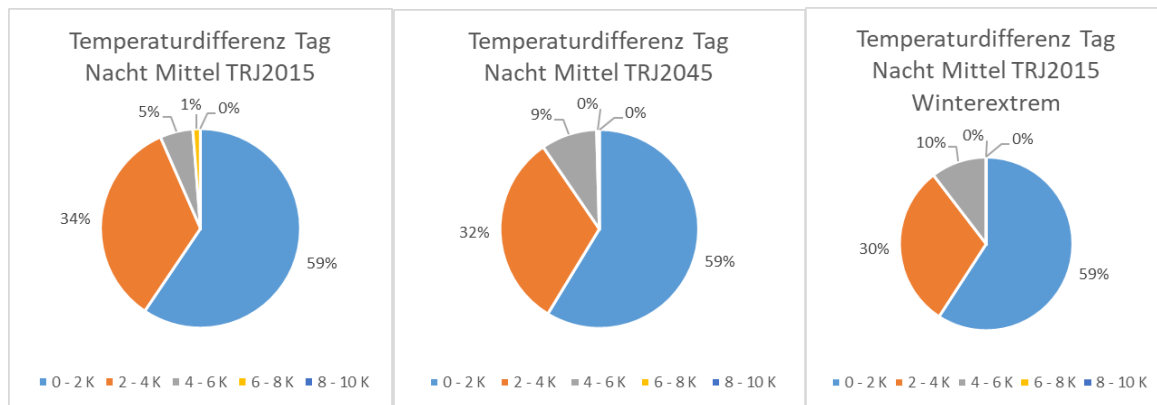


Abbildung 8: Tagestemperaturdifferenzen gemittelt

Grundlage der Abbildung sind die Differenzen der gemittelten Tages- und Nachttemperaturen an Tagen mit einer gemittelten Außentemperatur kleiner 15 °C. Auffällig ist, dass es für das Zukunftsreferenzjahr keine Werte für eine mittlere Differenz größer sechs K gibt. Diese Werte kommen den Klassen von zwei bis sechs K zugute. Aus der Abbildung geht jedoch hervor, dass die gesamte Tagesmitteltemperatur jedoch in den Winter- und Übergangsperioden entsprechend höher ist. Für das Referenzjahr Extremwinter können verminderte Temperaturdifferenzen im Bereich der zwei bis vier K und im Bereich sechs bis acht K unter Zunahme des Temperaturbereichs vier bis sechs K dargestellt werden. Für alle betrachteten Fälle bietet eine Temperaturdifferenz im Bereich von null bis zwei K den größten prozentualen Anteil.

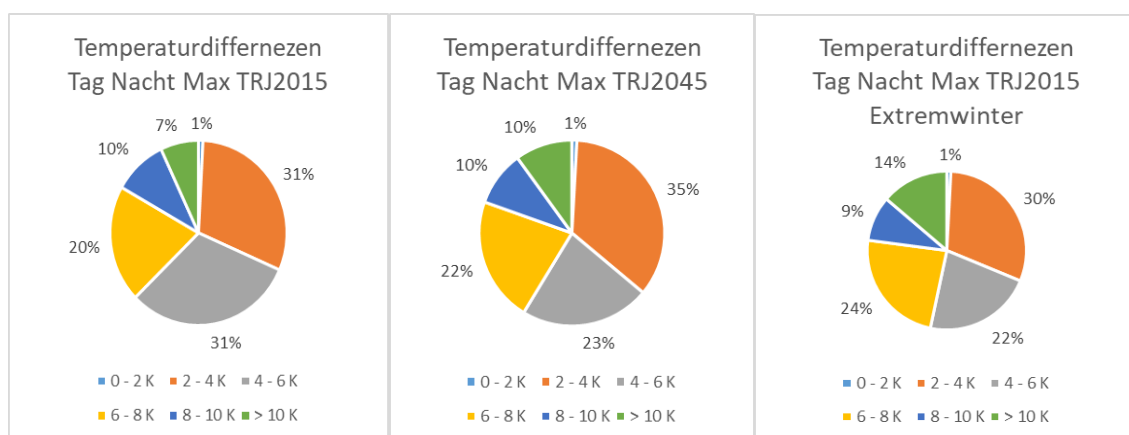


Abbildung 9: Maximale Tagestemperaturdifferenzen

Vergleicht man die maximalen Temperaturdifferenzen ergeben sich obige Darstellungen.

Den geringsten Anteil mit 1 % bildet maximale Temperaturdifferenzen im Bereich von null bis zwei K. Den prozentual größten Bereich bilden Temperaturdifferenzen

zwischen zwei und vier K, gefolgt von vier bis sechs K. Temperaturdifferenzen von sechs bis größer 10 K sind für das Zukunftsreferenzjahr und das Winterextreme am höchsten. Es ist anzunehmen, dass für das Winterextrem geringe Temperaturen für die nächtlichen Stunden ermittelt wurden, die moderaten Tagestemperaturen, bei beispielsweise heiterem Wetter gegenüberstehen. Für die weitere Betrachtung von Relevanz ist ebenfalls, dass für mehr als 60 % der betrachteten Tage eine Temperaturdifferenz größer vier K zu erwarten ist. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [2, 3, 4, 5].

2.1.3 Temperaturprofile nach Typtagen

Zur Betrachtung der Typtage und typischen Temperaturverläufe dieser wurden die Referenzjahre der entsprechenden Standorte herangezogen und mittels Excel-Anwendung gruppiert und ausgewertet.

Die Kategorien ergeben sich aus der Verbindung einer Jahreszeit und der damit verbundenen Tagesmitteltemperatur und dem entsprechenden Bedeckungsgrad eines Tages. Jeder Tag des Testreferenzjahres wurde über die oben genannten Bedingungen und einer entsprechenden Logik einer Typtagkategorie zugeordnet. Diese Tage wurden anschließend stündlich gemittelt und somit ein Tagestemperaturverlauf dargestellt.

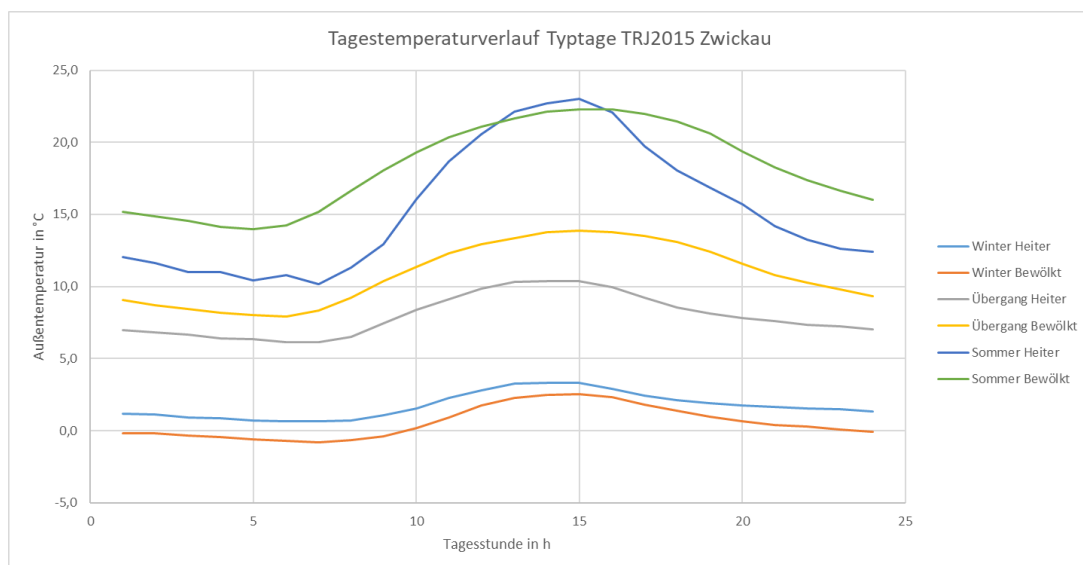


Abbildung 10: Tagestemperaturverlauf, Zwickau, TRJ2015

Anhand der Abbildung sind die Tagestemperaturverläufe der Typtagkategorien für den Standort Zwickau und das TRJ2015 zu erkennen. Für die

Tagestemperaturverläufe der Winter- und Übergangstage sind Temperaturdifferenzen zwischen heiteren und bedeckten, sowie zwischen Tag- und Nachtzeiten der betrachteten Tage zu erkennen. Ein differenziertes Ergebnis ergibt sich jedoch für die Betrachtung der Sommertypstage heiter und bewölkt. Bis auf eine Temperaturspitze in den Mittagsstunden und frühen Nachmittagsstunden sind die gemittelten Tagestemperaturen für bedeckte Tage höher anzunehmen als für heitere mit Ausnahme von Tagesspitzen über einen speziellen Zeitraum. Mit Blick auf die nachfolgenden Tabellen lassen sich die Ergebnisse weiter betrachten.

Tabelle 6: Tageszahlen und Temperaturdifferenzen der Typtage (TRJ2015, Zwickau)

Tageszahlen	Sommer	Winter	Übergang	Temperaturdifferenzen	Sommer	Winter	Übergang
Temperaturen	15	5	5-15	Temperaturen	15	5	5-15
Heiter	2	57	44	Heiter	12,9	2,7	4,2
Bewölkt	102	65	95	Bewölkt	8,3	3,3	5,9

In den oberen Zeilen der Tabellen sind die Temperaturbereiche der Perioden Sommer, Winter und Übergang definiert. Die linke Tabelle zeigt die Anzahl der entsprechend zugeordneten Typtage. Auffällig ist, dass die Zahl der bewölkten Tage im betrachteten Zeitraum überwiegen. Für den Sommer ergibt sich jedoch ein deutlich extremerer Unterschied zwischen bewölkten und heiteren Tagen. Die geringe Anzahl der heiteren Sommertage ist ebenfalls ein Indiz für die markanten Ausbrüche des Graphen in der Abbildung des Standardreferenzjahres. Die Werte des Graphen „Sommer bedeckt“ sind durch die Vielzahl der Werte aus den 102 zugeordneten Tagen geglättet. Der rechten Tabelle können die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen der niedrigsten und maximalen, ermittelten Tagestemperatur abgelesen werden. Für die Perioden „Winter“ und „Übergang“ ergeben sich höhere Differenzen für bewölkte Tage. Für die Sommerperiode ergeben sich höhere Differenzen für heitere Tage. Für die Winter- und Übergangsperiode sind Temperaturdifferenzen von 2,7 bis 5,9 K zu erwarten. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [2, 5].

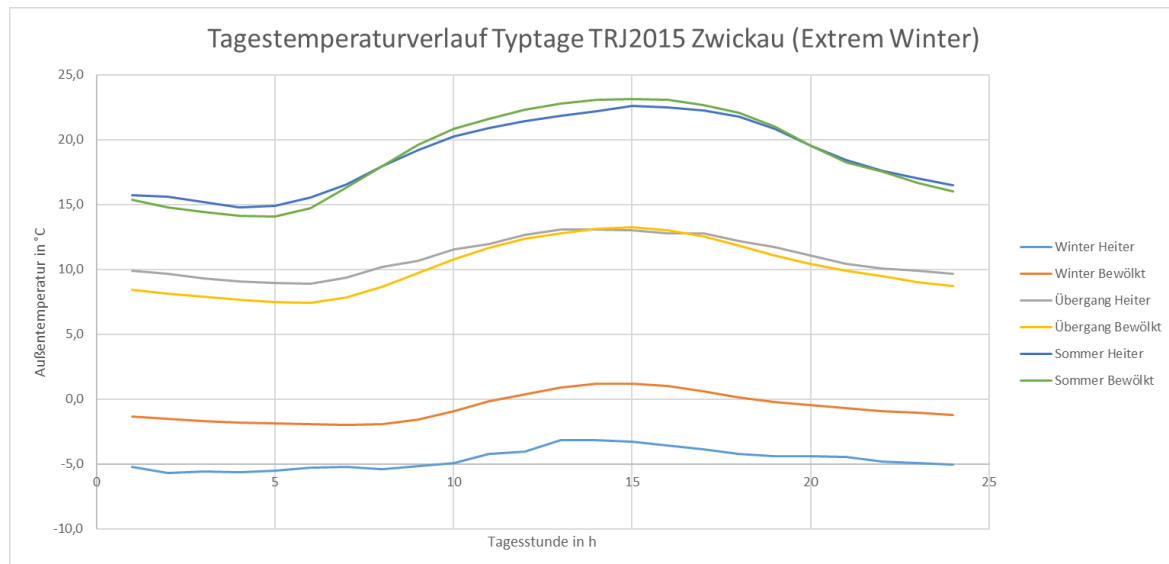


Abbildung 11: Tagestemperaturverlauf, Zwickau, TRJ2015, Winterextrem

Für das Testreferenzjahr TRJ2015-Winter mit Temperaturinformationen für einen härteren Winter ergeben sich Tagestemperaturverläufe entsprechend der oberen Abbildung. Für dieses Diagramm ist zu erkennen, dass die Temperaturunterschiede zwischen bedeckten und heiteren Tagen einer Periode für Sommer- und Übergangstage geringe bis keine Differenzen aufzeigen. Lediglich die Morgen und Abendtemperaturen sind für heitere Tage höher zu erwarten. Für die Winterperiode ergeben sich größere Temperaturdifferenzen. Im Vergleich zum Standardreferenzjahr ergeben sich für den kalten Winter Temperaturdifferenzen von bis zu fünf K. Die Tagestemperaturdifferenzen einer Kategorie lassen sich der nachfolgenden Tabelle entnehmen.

Tabelle 7: Tageszahlen und Temperaturdifferenzen der Typtage (TRJ2015, Zwickau, Winter)

Tageszahlen	Sommer	Winter	Übergang
Temperaturen	15	5	5-15
Heiter	39	11	12
Bewölkt	68	107	128

Temperaturdifferenzen	Sommer	Winter	Übergang
Temperaturen	15	5	5-15
Heiter	7,8	2,5	4,2
Bewölkt	9,1	3,2	5,8

Im linken Tabellenbereich ist die Anzahl der Typtage dargestellt. Auffällig ist, dass die bewölkten Tage überwiegen und für die Winter- und Übergangsperioden deutliche Mehrheiten für die bewölkten Typtage zu verzeichnen sind. Für die maximalen Temperaturdifferenzen der gemittelten Tagestemperaturverläufe ergeben sich Werte entsprechend der rechten Tabelle. Für die Winter- und Übergangsperioden sind Temperaturdifferenzen von 2,5 bis 5,8 K zu erwarten. Die Temperaturen für heitere Tage sind entsprechend der Tabelle geringer zu erwarten als für bewölkte Tage. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [4].

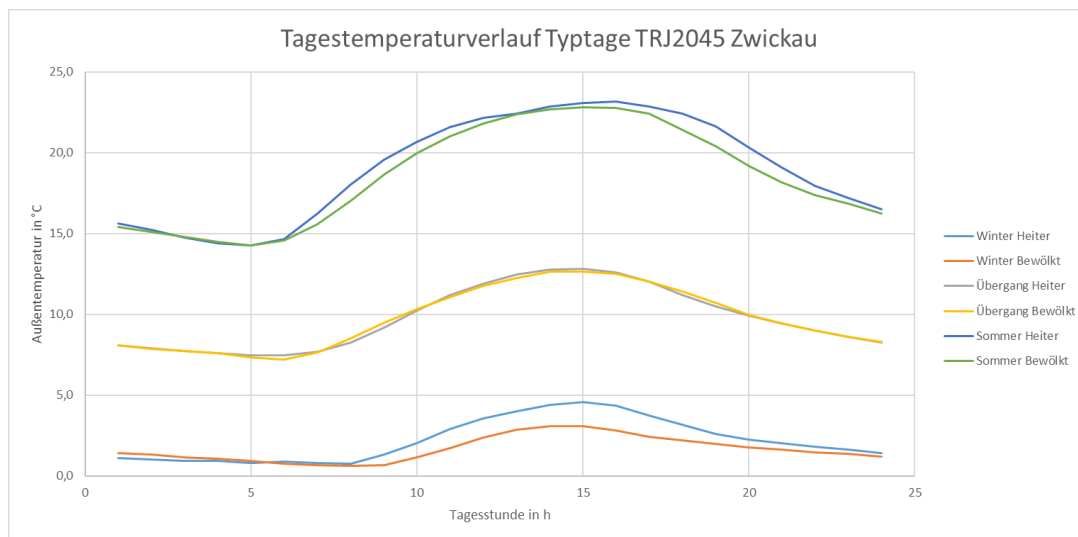


Abbildung 12: Tagestemperaturverlauf, Zwickau, TRJ2045

Für das prognostizierte Testreferenzjahr entsprechend des DWD ergeben sich Temperaturverläufe entsprechend der Abbildung. Ähnlich wie in der Betrachtung für das Winter-Extremum ergeben sich für die Sommer- und Übergangsperioden geringe Abweichungen zwischen den heiteren und bedeckten Typtagen zu verzeichnen sind. Für die Winterperiode ergeben sich für heitere Tage wärmere Tagestemperaturen bei annähernd gleichen Nachttemperaturverläufen. Die Differenzen im Tagestemperaturverlauf eines jeden Typtages zu erkennen.

Tabelle 8: Tageszahlen und Temperaturdifferenzen der Typtage (TRJ2045, Zwickau)

Tageszahlen	Sommer	Winter	Übergang
Temperaturen	15	5	5-15
Heiter	54	27	59
Bewölkt	65	75	85

Temperaturdifferenzen	Sommer	Winter	Übergang
Temperaturen	15	5	5-15
Heiter	8,9	3,8	5,3
Bewölkt	8,6	2,5	5,5

Diese Temperaturdifferenzen können genauer anhand der Tabelle 6 dargestellt werden. Auch für dieses Referenzjahr ergeben sich mehr bewölkte als heitere Tage. Die Temperaturdifferenzen im Maximum ergeben sich für die Winter- und Übergangsperiode zwischen 2,5 und 5,5 K. Die Gesamttemperatur für die Winterperiode im Gegensatz zu den TRJ2015 wird für die Zukunft höher erwartet. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [3].

Anhand der drei betrachteten Fälle lässt sich zusammenfassen, dass für die Winterperioden Tagesgangdifferenzen im Mittel von 2,5 bis 4 K für Übergangsperioden Differenzen von 4,2 bis 5 K und Sommerperioden Differenzen

von 7,8 bis 12,9 K zu erwarten sind. Es ist zu erwarten, dass der Anteil an bewölkten Tagen höher, als der Anteil heiterer Tage ist. Für das TRJ2015 ist zu erkennen, dass das Grundniveau der Tagestemperaturverläufe für heitere Tage höher ist, als für bedeckte. Diese Auffälligkeit wird jedoch für das Zukunfts- und Extremreferenzjahr nicht oder nur teilweise zu bestätigen.

Für einen genaueren Überblick der Ergebnisse und eine Auswertung über die Tagestemperaturdifferenz, sollen die nachfolgenden Abbildungen genauer betrachtet werden. Grundlage für die Aufbereitung der Daten sind die Einteilung in Sommer-, Übergangs- und Winterperioden anhand der gemittelten Außentemperatur über 24 h sowie die Unterteilung in bewölkt und heiter. Die Unterteilung in Tag- und Nachtstunden erfolgte anhand der Betrachtung der diffusen Bestrahlung.

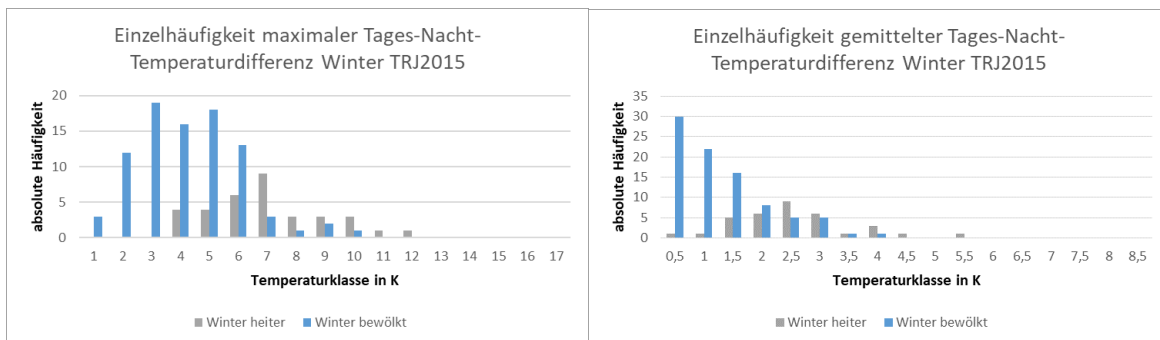


Abbildung 13: Häufigkeit Tagestemperaturdifferenz Winter TRJ2015

Für die Betrachtung der Winterperiode ergeben sich vermehrt maximale Tages-Nacht-Temperaturdifferenzen von einem bis sechs Kelvin. Für heitere Wintertage ergeben sich höhere Temperaturdifferenzen von vier bis 12 Kelvin. Der Gesamtanteil an Tagen mit geringeren Temperaturdifferenzen ist auf Grund der ungleichen Verteilung von bewölkten und unbewölkten Tagen zu erwarten. Betrachtet man in Bezug auf die Laufzeit von Wärmepumpen die gemittelten Temperaturunterschiede, so ergibt sich eine ähnliche Verteilung für heitere und bewölkte Tage, sowie eine Temperaturdifferenz von null bis vier Kelvin.

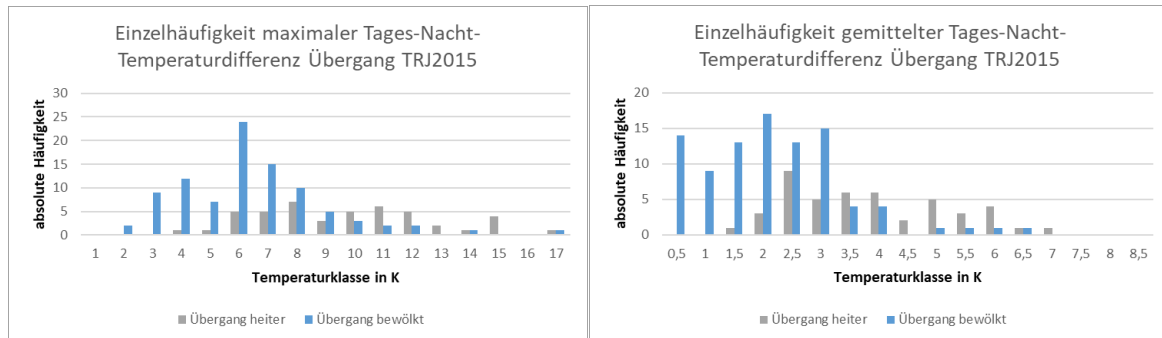


Abbildung 14: Häufigkeit Tagestemperaturdifferenz Übergang TRJ2015

Für die Übergangsperioden ergeben sich weitere differenziert zu betrachtende Ergebnisse. Das Maximum der maximalen Temperaturdifferenzen wurde an bewölkten Tagen mit einer Temperaturdifferenz von sechs Kelvin ermittelt. Dies gibt die Möglichkeit zur Annahme, dass eine Ausnutzung der Tages-Nacht-Temperaturdifferenzen auch für bedeckte Tage infrage kommen kann. Im Vergleich zu den im Winter ermittelten Werten ergeben sich für die Übergangsmonate Temperaturdifferenzen von zwei bis 12 Kelvin an bedeckten Tagen, wobei eine vermehrte Häufigkeit für den Temperaturbereich um sechs Kelvin zu verzeichnen ist. Für heitere Tage während der Übergangsperiode lassen sich maximale Temperaturdifferenzen von vier bis 15 Kelvin verzeichnen. Für die gemittelte Betrachtung der Tages- und Nachttemperaturen ergeben sich Temperaturdifferenzen im Bereich von null bis sechs Kelvin für bewölkte Tage, wobei ein Maximum bei zwei Kelvin zu verzeichnen ist und Temperaturdifferenzen von ein bis sieben Kelvin für bedeckte Tage mit einem Maximum bei 2,5 K.

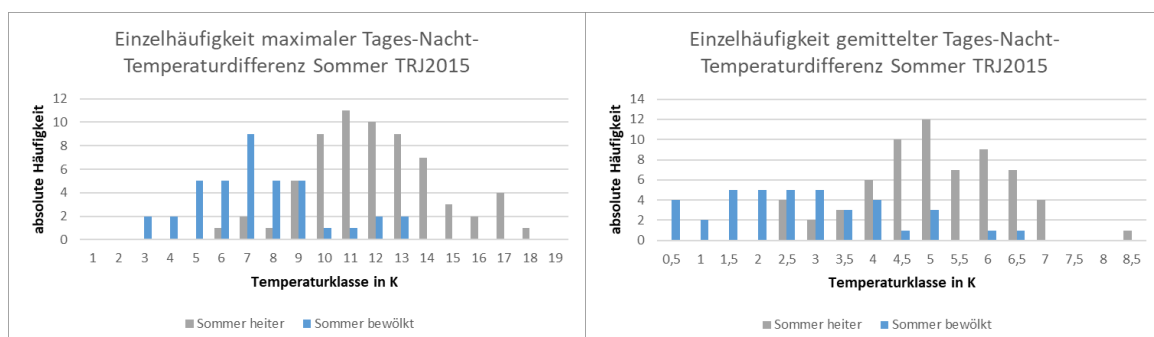


Abbildung 15: Häufigkeit Tagestemperaturdifferenz Sommer TRJ2015

Für die Bereitstellung von Trinkwasser und die Ausnutzung von Solarenergie sind die Temperaturdifferenzen für die Sommerperiode entscheidend. Für bewölkte Tage lassen sich maximale Temperaturdifferenzen von drei bis 13 Kelvin, bei einem

Maximum von sieben Kelvin feststellen. Die Verteilung der Temperaturen für heitere Tage ist auf einen Bereich von sechs bis 18 Kelvin verteilt mit einem Maximum für 11 Kelvin. Die gemittelten Temperaturdifferenzen von bewölkten Tagen liegen in einem Temperaturbereich von null bis sieben Kelvin und einem Bereichsmaximum um 2,5 K. Für heitere Tage ergeben sich gemittelte Differenzen von 2,5 bis sieben Kelvin. Für gemittelte heitere Sommertage ist ein Häufigkeitsmaximum von fünf K zu erwarten. Aus der Darstellung wird deutlich, dass für erhöhte Solarerträge auch höhere Quellentemperaturen zu berücksichtigen sind. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [6].

In Bezug auf den Vergleich der Klimaprofile untereinander ergeben sich nachfolgende Varianten. Die Betrachtung beschränkt sich auf die Typtagesprofile Übergang und Winter. Anhand der nachfolgenden Abbildungen werden die absoluten Häufigkeiten in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Die Summe der Tage für die entsprechende Typtagesklasse wird kumuliert als Linie dargestellt.

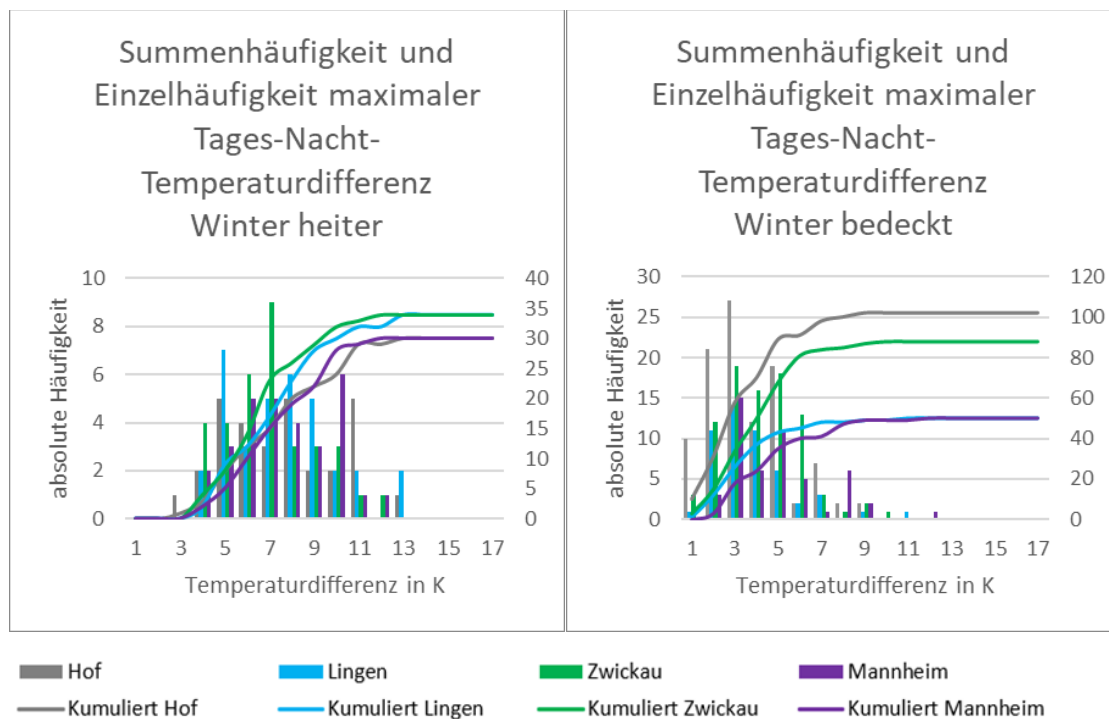


Abbildung 16: Vergleich maximaler Tages-Nachttemperaturdifferenzen nach Wintertagen

Für die Betrachtung der Wintertage wird gesamtheitlich deutlich, dass die bedeckten den heiteren Tagen überwiegen. Für die Standorte Hof und Zwickau sind summiert deutlich mehr bedeckte Wintertage zu verzeichnen. Dies kann auf einen höheren Anteil an Tagen mit geringeren Außentemperaturen zurückgeführt werden. Des

Weiteren lässt sich erkennen, dass die maximale Tages-Nacht-Temperaturdifferenz für heitere Tage höher als für bedeckte Tage ist. Die größten Temperaturdifferenzen lassen sich an heiteren Tagen für den Standort Lingen und Hof zuzuordnen. Anhand des Anstieges der kumulierten Kurven lassen sich die Verteilungen der Temperaturdifferenzen der Tage erkennen. Je stärker der Anstieg der Kurve, desto höher ist der Anteil von Typtagen mit geringen Temperaturdifferenzen. Für den Standort Zwickau ergeben sich die meisten Temperaturdifferenzen im Bereich vier bis sieben K. Für den Standort Lingen ergibt sich ein ähnliches Bild. Die größte Häufigkeit der Temperaturdifferenzen der Standorte Hof und Mannheim verschieben sich in den Bereich fünf bis 11 K. Für bedeckte Übergangstage lassen sich weitere Unterschiede erkennen. Der Anteil geringer Temperaturdifferenzen ist für den Standort Hof am höchsten (Bereich ein bis drei K). Für den Standort Zwickau, Mannheim und Lingen ergeben sich die meisten Häufigkeiten für den Temperaturbereich zwei bis fünf K.

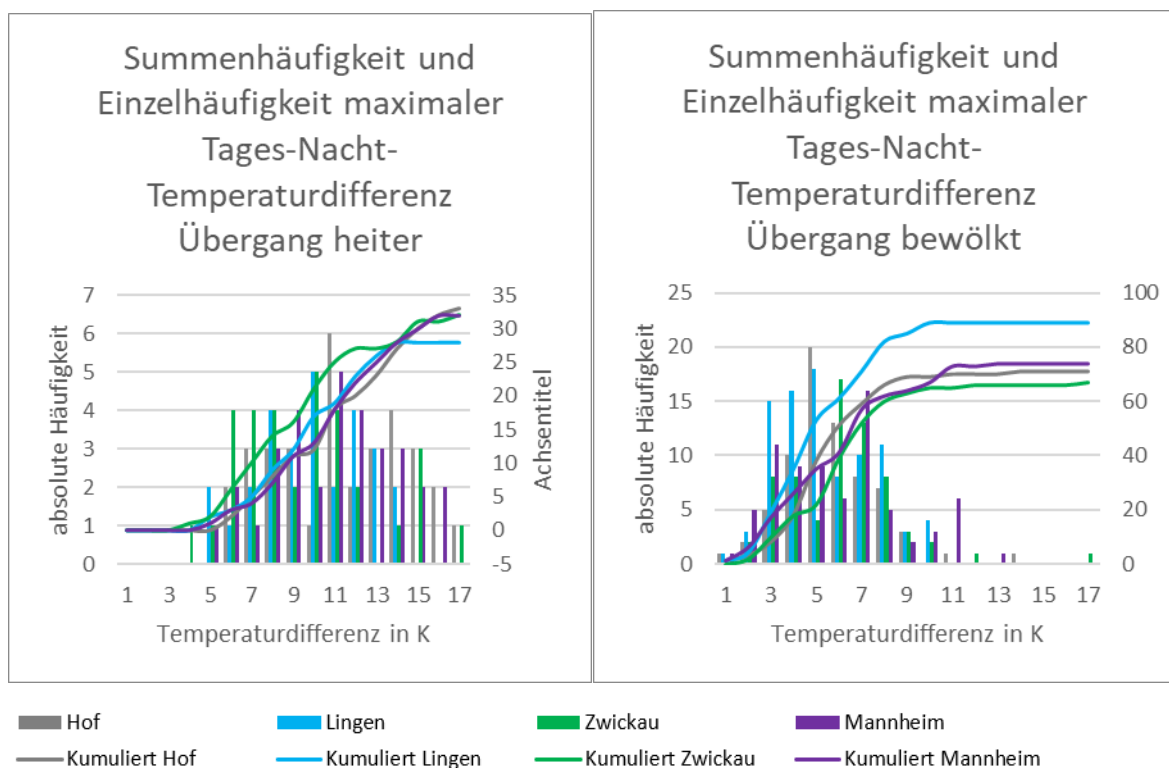


Abbildung 17: Vergleich maximaler Tages-Nachttemperaturdifferenzen nach Übergangstagen

Für die ausgewählten Klimaprofile ergeben sich ebenfalls höhere Temperaturdifferenzen an heiteren Übergangstagen. Die Tagesverteilung von heiteren Tagen ist für alle gewählten Profile annähernd gleich. Für die Verteilung der bedeckten Tage ergibt sich ein Maximum für den Standort Lingen. Für den Standort

Hof ergibt sich ein Maximum für eine Temperaturdifferenz von 11 und 15 K an heiteren, sowie 5 Kelvin an bedeckten Tagen. Für Lingen ergibt sich ein Maximum bei 10 K Temperaturdifferenz an heiteren und 5 K an bedeckten Tagen. Für den Standort Zwickau ergeben sich am häufigsten Temperaturdifferenzen von 10 K an bedeckten und 6 bis 7 K an heiteren Tagen. Für Mannheim ergeben sich maximale Temperaturdifferenzen von 11 K an heiteren und 7 K an bedeckten Tagen. Die Tage mit hohen Temperaturdifferenzen werden entscheidend für die Betrachtung der Ausnutzung der Überladungsprozesse. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [10]

Eine Einsparung der Energieaufnahme von Wärmepumpen mittels einer geregelten Einschaltlogik und entsprechenden Speichermöglichkeiten kann anhand der Außentemperaturen sinnvoll sein. Für die Wärmeenergiebereitstellung werden vereinzelt Arbeitszeiten verwendet, die im Bereich von Temperatursenken liegen, des Weiteren werden die späten Nachmittagstemperaturspitzen bei der Bereitstellung und Speicherung von Wärmeenergie nicht berücksichtigt und ausgenutzt. Dieses Energiepotenzial soll im Nachgang erschlossen und bewertet werden.

2.2 Gebäudeklassifizierung

In diesem Kapitel sollen Parameter für die Verteilung und Beschaffenheit verschiedener Gebäudetypen ermittelt und in Kategorien unterteilt werden. Für die Simulation ist es sinnvoll einen geeigneten Querschnitt für die Beschaffenheit der im Bestand zu findenden Gebäude zu ermitteln und gegebenenfalls mit dem aktuellen Stand der Technik zu vergleichen und Wege aufzuzeigen, wie entsprechende Speicherverhalten von Gebäuden und hydraulischen Speichern, sowie die Betriebsweise von Wärmepumpen genutzt werden kann.

2.2.1 Aktueller Gebäudebestand

Die aktuellen Daten für den Gebäudebestand Deutschlands sind im DENA GEBÄUDEREPORT 2023 (dena, 2022-10) zusammengefasst.

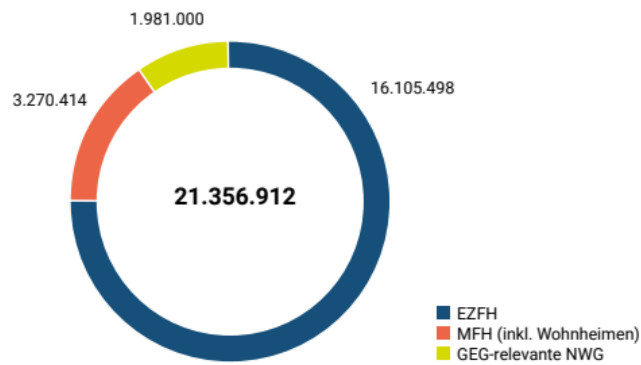


Abbildung 18: Anzahl der Wohngebäude 2021 (dena, 2022-10)

Aus der Zusammenfassung ergeben sich 21.356.912 Wohn- und Nichtwohngebäude, wobei der Großteil der Wohngebäude mit 16.105.498 auf Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) zusammengefasst wird. Mit 3.270.414 Gebäuden bilden die Mehrfamilienhäuser (MFH) die zweitgrößte Klasse. Der Rest der Gebäude ist Nichtwohngebäuden (NWG) zuzuordnen, die GEG-relevant sind.

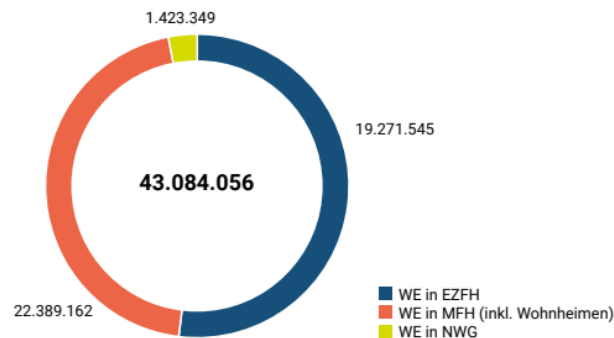


Abbildung 19: Anzahl der Wohneinheiten 2021 (dena, 2022-10)

Unter Betrachtung der voranstehenden Abbildung ergeben sich rund 43,1 Mio. Wohneinheiten verteilt auf die zuvor genannten Wohn- und Nichtwohngebäude. Deutlich wird, dass sich in Bezug der MFH und EZFH trotz des hohen Gebäudeanteils der EZFH an den Gesamtgebäuden rund 52 % der Wohneinheiten in den Mehrfamilienhäusern befinden. Aus dem Report wird deutlich, dass eine Zunahme von Wohneinheiten in Mehrfamilienhäusern in den letzten Jahren erkennbar ist.

Für die Beheizung der Wohneinheiten lässt sich nachfolgende Übersicht heranziehen.

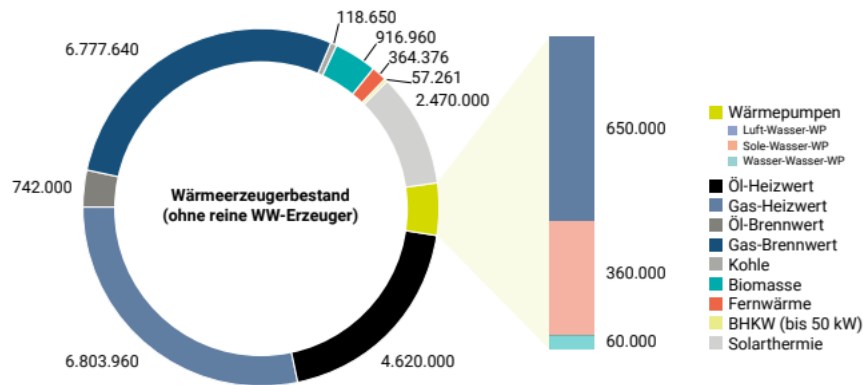


Abbildung 20: Wärmerezeuger im Bestand 2020

Im Jahr 2020 gab es in Deutschland rund 24 Mio. Wärmerezeuger. Der Anteil mit Wärmerezeugern, die fossile Brennstoffe nutzen wird zunehmend verbessert, indem Heizwertgeräte gegen Brennwerttechnik ersetzt werden. Einen kleinen, jedoch stetig wachsenden Anteil nehmen erneuerbare Wärmerezeugungskonzepte, wie Wärmepumpen Solarthermieanlagen und Biomasse ein. Der Anteil an Wärmepumpen im Jahr 2020 beläuft sich auf über 1 Mio. Geräte. Die am häufigsten verwendeten Wärmequellen für die Wärmepumpen bilden in dieser Aufzählung Luft und Erdreich.

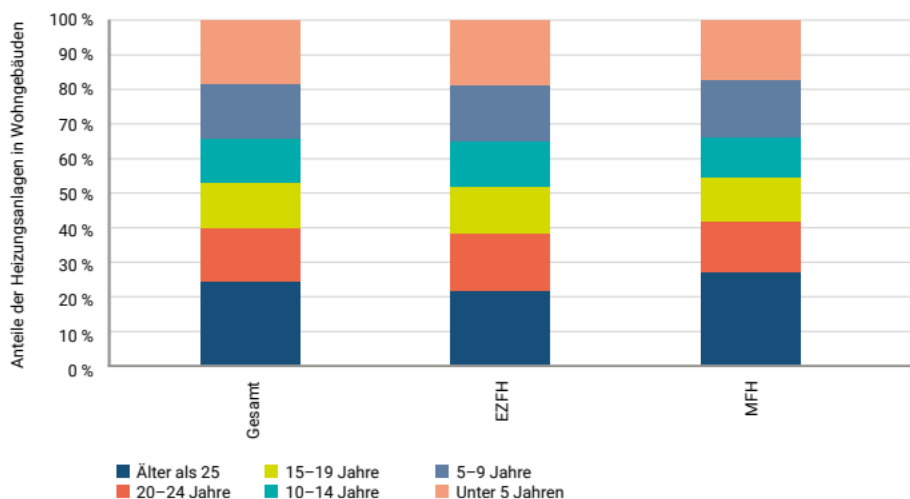


Abbildung 21: Aufteilung Heizungsbestand nach Alter der Anlage 2019

Anhand der Abbildung wird deutlich, wie hoch der Altersanteil an Heizungsanlagen im Bestand ist. Vor allem der Anteil an Heizungen, die älter als 15 Jahre sind, ist mit 50 Prozent recht hoch. Für Anlagen mit einem Alter größer 25 Jahre werden in dieser Abbildung 25 %, der im Bestand vorhandenen Anlagen beziffert. Entsprechend der Novelle des Gebäudeenergiegesetzes soll ab dem 01.01.2024 jede neu eingebaute Heizung zu 65 % mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Unter Betrachtung

dieser beiden Faktoren wird deutlich, dass der Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden für die Zukunft weiter zunehmen wird.

Anhand der vorangegangenen Abbildungen lässt sich das Potenzial der Verwendung erneuerbarer Energieerzeuger im Wohnungs- und Gebäudebestand erahnen.

2.3.2 Deutsche Wohntypologie

Der Report ist jedoch nicht Aussagekräftig gegenüber der Baualter- und Energieklassen der Wohngebäude und liefert lediglich vereinzelte Daten für NWG. Für die weitere Betrachtung und Klassifizierung von Bestands- und Neubauobjekten wird das Werk Deutsche Wohntypologie des IWU herangezogen (IWU, 2015-02). Für die Untersuchung relevant sind Parameter wie die Gebäudegeometrie (zur Ableitung der Transmissionswärmeverluste), die dazugehörigen Bauteilflächen, Nachbarbebauung zur Beurteilung des Verhältnisses zwischen Hüll- und Wohnflächen. Des Weiteren wird die Art und Qualität der Wärmeversorgung mit dem Installationsdatum und dem Erzeugertyp als grober Indikator für die Anlageneffizienz gewertet. Weiterhin betrachtet werden bereits erfolgte energetische Sanierungen der Gebäudehülle oder des Wärmeerzeugers. Für die Verkörperung der einzelnen ermittelten Gebäudetype gibt es Fallbeispiele, deren Eigenschaften exemplarisch sind. Ziel der Aufstellung ist es anhand einer Ist-Analyse den aktuellen Gebäudezustand zu ermitteln und Ausblick auf eine mögliche energetische Einsparung und die damit verbundenen Maßnahmen zu geben. Dabei werden die gesetzlichen Mindeststandards bis hin zu den besten verfügbaren Technologien betrachtet. Anhand zuvor genannter energierelevanter, Alters- und Größenmerkmale wird der deutsche Wohngebäudebestand alphabetisch in die Klassen A bis L und Sonderfälle (Fertighausbau, industrieller Wohnungsbau), sowie die Größenklassen EFH, Reihenhauser (RH), MFH, großes Mehrfamilienhaus (GMH) und Hochhaus (HH) unterteilt. Zur Kategorie EFH, zählen freistehende Gebäude mit ein bis zwei Wohnungen. Reihenhäuser Doppelhäuser, oder gereihte Häuser mit ein bis zwei Wohnungen. Unter die Kategorie MFH fallen Gebäude mit drei bis 12 Wohnungen. Gebäude mit 13 oder mehr Wohnungen werden als GMH bezeichnet. Entsprechend der nachfolgenden Abbildung ist die Einteilung der Basistypen mit entsprechenden Referenzgebäuden dargestellt. Ausschlaggebend für die baulichen Epochen werden

allgemeine übliche Konstruktionsweisen, typische Bauteilflächen und deren Beeinflussung der Transmissionswärmeverluste berücksichtigt.

Baualtersklasse		EFH	RH	MFH	GMH
		Basis-Typen			
A	... 1859	EFH A		MFH A	
B	1860 ... 1918	EFH B	RH B	MFH B	GMH B
C	1919 ... 1948	EFH C	RH C	MFH C	GMH C
D	1949 ... 1957	EFH D	RH D	MFH D	GMH D
E	1958 ... 1968	EFH E	RH E	MFH E	GMH E
F	1969 ... 1978	EFH F	RH F	MFH F	GMH F
G	1979 ... 1983	EFH G	RH G	MFH G	
H	1984 ... 1994	EFH H	RH H	MFH H	
I	1995 ... 2001	EFH I	RH I	MFH I	
J	2002 ... 2009	EFH J	RH J	MFH J	
K	2010 ... 2015	EFH K	RH K	MFH K	
L	2016 ...	EFH L	RH L	MFH L	

Abbildung 22: Haustypenmatrix (ohne Hochhaus und Sonderfälle) (IWU, 2015-02)

Für die Auswahl geeigneter Baualtersklassen und Gebäudegrößen wird im nachfolgenden Abschnitt die Verteilung der Klassen genauer betrachtet. Ziel ist es die Variationsvielfalt für die Anlagensimulationen so überschaubar wie möglich zu machen und ggf. Anreize zu geben, diese in weiterführenden Untersuchungen zu erweitern.

Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 Stichtag: 9.5.2011		Baualtersklassen										Summe	Anteil
		bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009		
Deutscher Wohngebäudebestand Baujahre bis 2009	EFH	EFH A	EFH B	EFH C	EFH D	EFH E	EFH F	EFH G	EFH H	EFH I	EFH J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	9.976	55%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	12.263	31%
	Wohnfläche in Mio. m²	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	1.463	41%
	RH		RH B	RH C	RH D	RH E	RH F	RH G	RH H	RH I	RH J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	148	492	710	447	633	611	335	652	619	384	5.030	28%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	181	617	840	546	749	685	374	722	674	409	5.796	15%
	Wohnfläche in Mio. m²	19	62	82	52	76	79	45	85	80	52	633	18%
	MFH		MFH B	MFH C	MFH D	MFH E	MFH F	MFH G	MFH H	MFH I	MFH J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	54	442	388	356	586	412	146	309	244	85	3.023	17%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	214	2.177	1.911	2.003	3.340	2.313	852	1.826	1.390	461	16.495	42%
	Wohnfläche in Mio. m²	16	163	129	125	225	169	64	133	104	39	1.168	33%
	GMH		GMH B	GMH C	GMH D	GMH E	GMH F	GMH G	GMH H	GMH I	GMH J		
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	0,6	28,7	7,4	17,3	34,0	50,1	15,0	28,7	20,9	7,6	210	1%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	11	526	126	308	818	1.366	356	605	408	151	4.674	12%
	Wohnfläche in Mio. m²	0,7	35,8	7,9	17,0	47,1	86,7	21,9	34,8	25,5	10,4	288	8%
Anzahl Wohngebäude in Tsd.		533	1.929	2.236	1.679	2.762	2.580	1.200	2.150	1.919	1.251	18.239	
Anteil		3%	11%	12%	9%	15%	14%	7%	12%	11%	7%		
Anzahl Wohnungen in Tsd.		806	4.533	4.265	3.915	6.863	6.279	2.463	4.550	3.675	1.880	39.228	
Anteil		2%	12%	11%	10%	17%	16%	6%	12%	9%	5%		
Wohnfläche in Mio. m²		82	396	370	309	567	569	240	431	368	220	3.552	
Anteil		2%	11%	10%	9%	16%	16%	7%	12%	10%	6%		

Gewählte Zuordnung: EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser; RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte, Reihenhäuser oder sonstiger Gebäudetyp
MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen, GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen
Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude (ohne Wohnheime, ohne "sonstige Gebäude mit Wohnraum", ohne "bewohnte Unterkünfte")

Abbildung 23: Häufigkeit Wohnungstypen bis 2009 (IWU, 2015-02)

Entsprechend der Abbildung „Häufigkeit von Wohnungstypen“ ergibt sich eine Gesamtwohnungszahl von 39,2 Mio. verteilt auf 18,2 Mio. Gebäude. Es ist ein

deutlicher Anstieg der Gebäudeanzahl und der Wohnungsanzahl für das Jahr 2022 entsprechend dem Gebäudereport 2023 zu verzeichnen. Es ist davon auszugehen, dass ein hoher prozentualer Anteil der hinzugekommenen Gebäude neu errichteten Einfamilienhäusern zugeordnet werden kann, weitere prozentuale Anteile der Wohnungen können ggf. MFH und GMH zugeordnet werden, da für diese Gebäude weitere Wohnflächen erschlossen worden sein könnten (Dachgeschosse und Anbauten, Umnutzung von Garagen). Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [18].

Tabelle 9: Heatmap Gebäudebestand

Wohnungegebäude in Tausend

Klasse	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Summe
EFH	1,81%	5,30%	6,20%	4,71%	8,27%	8,26%	3,86%	6,36%	5,67%	4,25%	55%
RH	0,81%	2,70%	3,89%	2,45%	3,47%	3,35%	1,84%	3,57%	3,39%	2,11%	28%
MFH	0,30%	2,42%	2,13%	1,95%	3,21%	2,26%	0,80%	1,69%	1,34%	0,47%	17%
GMH	0,00%	0,16%	0,04%	0,09%	0,19%	0,27%	0,08%	0,16%	0,11%	0,04%	1%
Summe	2,92%	10,57%	12,26%	9,21%	15,14%	14,15%	6,58%	11,79%	10,52%	6,86%	100%

Wohnungen in Tausend

Klasse	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Summe
EFH	1,02%	3,09%	3,54%	2,70%	4,97%	4,88%	2,25%	3,56%	3,07%	2,19%	31%
RH	0,46%	1,57%	2,14%	1,39%	1,91%	1,75%	0,95%	1,84%	1,72%	1,04%	15%
MFH	0,55%	5,55%	4,87%	5,11%	8,53%	5,90%	2,17%	4,65%	3,54%	1,18%	42%
GMH	0,03%	1,34%	0,32%	0,79%	2,09%	3,48%	0,91%	1,54%	1,04%	0,38%	12%
Summe	2,05%	11,55%	10,87%	9,98%	17,49%	16,01%	6,28%	11,60%	9,37%	4,79%	100%

Wohnfläche in Mio. m²

Klasse	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Summe
EFH	1,30%	3,81%	4,23%	3,27%	6,14%	6,57%	3,10%	5,02%	4,45%	3,35%	41%
RH	0,54%	1,75%	2,31%	1,47%	2,14%	2,23%	1,27%	2,40%	2,25%	1,41%	18%
MFH	0,45%	4,59%	3,64%	3,52%	6,34%	4,76%	1,80%	3,75%	2,93%	1,10%	33%
GMH	0,02%	1,01%	0,22%	0,48%	1,33%	2,44%	0,62%	0,98%	0,72%	0,29%	8%
Summe	2,30%	11,16%	10,40%	8,74%	15,96%	16,00%	6,79%	12,14%	10,36%	6,16%	100%

Auf Grundlage der Daten für die Wohntypologie des deutschen Gebäudebestandes wurde diese Heatmap in Form einer Tabelle erstellt. In Dieser sind die Informationen der Wohnungstypenhäufigkeit grafisch veranschaulicht und mit prozentualen Werten hinterlegt. Alle Werte beziehen sich auf die jeweilige Gesamtanzahl bis zum Stichtag im Mai 2010. Entsprechend dieser Auswahl ergeben sich nachfolgende Auswahlkategorien. Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) der Baualtersklasse E und F (von 1958 bis 1978) treten vermehrt auf und sollen in der

Betrachtung als Querschnitt des Deutschen Gebäudebestands in der Simulation herangezogen werden. Für eine breitere Abbildung der Baualtersklassen wird diese Auswahl um die Gruppen B/C (1919 bis 1948) und H (1984 bis 1994) ergänzt, da in dieser Epoche weitere Maxima in den drei Kategorien Wohnfläche, Gebäude- und Wohnungsbestand erkennbar sind. Mit der Auswahl der Kategorien B, C, E, F und H werden ca. 65 % des deutschen Bestands in den drei Kategorien bis zum Stichtag abgedeckt. Ergänzt werden diese Kategorien von den Gebäuden, die ab 2010 zusätzlich errichtet wurden. Somit kann von einem geeigneten Querschnitt für die Erarbeitung einer Übersicht der Gebäudetypologie und anschließender Simulation gesprochen werden.

Für die weitere Klassifizierung der Kategorien MFH und EFH dienen weitere Informationen der Analyse Datenbasis 2010 des IWU (Diefenbach, Cichinsky, Rodenfels, & Clausnitzer, 2010-12). In diesem Forschungsprojekt wurden Ergebnisse über Gebäudeeigenschaften und Sanierungstrends von Wohngebäuden aus 7.364 Wohngebäudedatensätzen ermittelt und dargestellt.

82 % der Wohngebäude sind EZFH und davon 73 % sind klassische Einfamilienhäuser, der übrige Anteil entfällt auf Doppel- oder Reihenhäuser. Die typische Geschosszahl für EZFH liegt bei zwei Vollgeschossen. In 66,5 % der Fälle sind die Gebäude freistehend, mit einem Steildach und haben ein unbeheiztes Dachgeschoss. Das Kellergeschoss der Gebäude ist ebenfalls unbeheizt in 61,9 % der Fälle.

Für die Kategorie EZFH ergeben sich nachfolgende Merkmale:

- Baualtersklassen B, C, E, F, H und Neubau (Klasse K und L)
- Einfamilienhaus, eine Wohnung
- zwei Vollgeschosse, unterkellert (unbeheizt), mit Steildach (unbeheizt), freistehend

Für die Kategorie MFH ergeben sich nachfolgende Ergebnisse. In 53,7 % der betrachteten Mehrfamilienhäuser sind drei bis vier Wohnungen, verteilt auf drei bis vier Vollgeschosse. Vorzufinden sind Mehrfamilienhäuser in der Zeilenbebauung (55,9 % der Mehrfamilienhäuser) bei denen 53 % auf Endhäuser und 47 % auf Mittelhäuser fallen. Die Dachform beschreibt ein Steildach, dass wie der Keller nicht beheizt ist. Es ergeben sich für die Kategorie MFH nachfolgende Merkmale:

- Baualtersklassen B, C, E, F, H und Neubau (Klasse K und L)

- Mehrfamilienhaus, drei bis vier Wohnungen
- Drei bis vier Vollgeschosse, unterkellert (unbeheizt), mit Steildach (unbeheizt), als Reihenendhaus
- Unter Berücksichtigung der Grunddaten entsprechend der Referenzgebäude für die Wohngebäudetypologie ergibt sich nachfolgende Tabelle.

Tabelle 10 - Referenzgebäudegrunddaten ausgewählter Gebäudeklassen

Var. 1	Baualter	B/L	Stockwerke	beheizte Wohnfläche	Beheiztes Volumen	A/V
		m		m ²	m ³	1/m
EFH B	1860...1918	8,0	2	128,9	595,0	0,64
EFH C	1919...1948	11,7	2	275	1052,5	0,62
EFH E	1958...1968	10,5	1	110,2	502,9	0,92
EFH F	1969...1978	12,5	1	157,5	606,0	0,91
EFH H	1984...1994	12,3	1	150,2	514,0	0,86
EFH K	2010...2015	9,0	2	160,4	827,1	0,62
EFH L	2016...	9,0	2	160,4	827,1	0,62
MFH B	1860...1918	8,4	4	284	1360	0,30
MFH C	1919...1948	10,8	3	350	1171	0,64
MFH E	1958...1968	26,7	4	2844,6	10397	0,43
MFH F	1969...1978	10,3	4	426	1435	0,59
MFH H	1984...1994	15,4	3	707	2413	0,60
MFH K	2010...2015	16,2	5	1305	5371	0,40
MFH L	2016...	16,2	5	1305	5371	0,40

In der Tabelle sind die Rahmendaten zusammengefasst. Die Bezeichnung der Gebäudeklasse und die zeitliche Einordnung erfolgt nach den Vorgaben der Wohngebäudetypologie des IWU. Die Längen und Breiten wurden aus der gegebenen beheizten Grundfläche geteilt durch die Anzahl der Stockwerke und unter Voraussetzung einer quadratischen Grundfläche gerundet ermittelt. Das Verhältnis A/V gibt die Kompaktheit von Baukörpern an und wird durch das Verhältnis der wärmeabgebenden Hüllfläche und dem beheizten Volumen bestimmt. Je kleiner die Kompaktheit, desto geringer ist der spezifische Energiebedarf pro m³ beheizten Raum bei gleichen Außenbedingungen. Geringe A/V – Verhältnisse im Bereich von 0,3 bis 0,5 1/m sind typisch für Mehrfamilienhäuser. (Baunetzwissen.de, 2023) Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [11, 20].

2.3.3 Wärmeschutz der Gebäudereferenzen

Der Wärmeschutz der Gebäude lässt sich aus der Häufigkeit der Wandtypen und Dämmung spezieller Bauteilgruppen ableiten. Entscheidend für die Betrachtung und Ermittlung des Gesamtwärmebedarfes der Baualtersklassen sind die Bauteile der Gebäudehülle. Zu diesen Bauteilen zählen Fenster, Außenwände, Dächer, sowie Decken oder Böden zu unbeheizten Räumen. Eingangstüren werden auf Grund der angenommen geringen Fläche und den Verdacht auf Modernisierung als Bestandteil der Außenwand gewertet und betrachtet. Insgesamt ist zu erkennen, dass der Dämmstandard mit dem Alter der Gebäude abnimmt und sich deutlich unterscheidet. Demnach sind für die unterschiedlichen Baualtersklassen, differenzierte Werte für die Betrachtung der Bauteile heranzuziehen. Als Grundlage dient die Datenbasis des IWU, für die die Baualtersklassen in drei Kategorien unterteilt werden. Altbauten bis 1978 zu der die Baualtersklassen B / C und E / F zugeordnet werden, Baujahre von 1979 bis 2004 als Übergangsbauten, der die gewählte Baualtersklasse H zugeordnet werden kann, sowie die Neubauten mit einem Errichtungsjahr ab 2005. Angesichts dieser Verteilung wird ein höheres Augenmerk auf die Baualtersklassen des Altbaus mit in Summe vier betrachteten Klassen gelegt.

Für Außenwände können Mauerwerkswände in einem einschaligen Aufbau im Maximum herausgefiltert werden. Gedämmte Gebäude weisen in 55 % eine Außendämmung, nachträgliche gedämmte Altbauten haben zu 75 % eine Außendämmung, in Kombination mit einer Fachwerksbauweise. Jüngere Gebäude zeigen vermehrt ein zweischaliges Mauerwerk und Holz-Fertigbau. Der Gesamtanteil der Zweischaligen und Fertigbauweise ist für junge Gebäude zu verzeichnen. Dämmstoffdicken der Außenwand für die betrachteten Bestandsgebäude. Die Dämmstoffdicken aller Wohngebäude im Bestand liegen mit einem prozentualen Anteil über 30 % für die Kategorien sechs bis neun cm und 10 bis 13 cm. Für die Kategorie Altbauten und Übergangsbauten liegt das Maximum im Bereich der Dämmung von sechs bis neun cm. Dämmungen der Außenwand größer 18 cm sind mit einem prozentualen Anteil kleiner fünf Prozent zu erwarten. Für Altbauten liegt der Anteil der Gebäudedämmung mit kleiner-gleich fünf Zentimeter bei 25 %. Dämmstärken größer 5 Zentimeter wurden vor allem im Zuge der Sanierung der Altbauten verwendet. Für Neubauten ergibt sich eine maximale Häufung für

Dämmstärken im Bereich 10 – 13 cm. Dämmstärken über 13 cm sind für diese Gebäudekategorie mit 50 % der Gebäude vertreten. Für die drei Kategorien wurden mittlere Dämmstoffdicken ermittelt, es ergeben sich für Altbauten bis 1978 eine mittlere Dämmstoffdicke von 8,4 cm, für den Übergang bis 2004 10,2 cm und für Neubauten 14,1 cm Dämmstoffdicke.

Für Dachflächen oder Obergeschossdecken lässt sich ein hoher Dämmanteil der Gesamtgebäude von 76 % verzeichnen. Altbauten vor 1978 liegen mit 62 % unter dem Durchschnitt, Neubauten ab 2005 mit 98 % weit darüber. Anders als aus der Typologie für Wohngebäude des IWU werden 42 % der Dachgeschosse voll beheizt und 41 % bleiben unbeheizt. Der Restanteil beschreibt Mischformen. Knapp die Hälfte der Altbauten bis 1978 haben einen unbeheizten Dachraum. Für die oberste Gebäudehülle ergeben sich nachfolgende gemittelte Dämmstärken, Gebäude mit einem Baujahr bis 1978 verfügen über eine Dämmstoffdicke von 12,2 cm, Übergangsbauten bis 2004 über eine Dämmstoffdicke von 14,3 cm und Neubauten ab 2005 über eine mittlere Dämmstoffdicke von 18,7 cm

Für die Kellerdecke oder den Untergeschossboden ergeben sich geringere Dämmanteile der Gesamtgebäude von 37 %. Für die Fußboden- und Kellerdecke ergeben sich nach Betrachtung der Dämmstoffdicken entsprechend der Datenbasis für Altbauten von 6,8 cm für Übergangsbauwerke von 8,5 cm und für Neubauten 11,9 cm.

Für die Dämmung der Hüllflächen sind unterschiedliche Ausbaustufen zu erkennen. Dächer von Bestandsgebäuden haben den höchsten Dämmanteil. Dies kann auf einen meist geringen technischen Aufwand und eine hohe energetische Wirkung zurückgeführt werden. Neben den Unterschieden zwischen den verschiedenen Gebäudehüllflächen lassen sich deutliche Differenzen der Baualtersklassen erkennen. Auf Grund der immer weiter verschärften Dämmstandards für Neubauten ist auch eine Zunahme des Dämmanteils zu verzeichnen.

Für die Analyse der Fenster werden fünf verschiedene Generationen betrachtet. Für die Generationen werden typische U-Werte herangezogen. Die erste Kategorie bildet die Einscheibenverglasung, die Aufgrund der schlechten Wärmedämmeigenschaften nicht berücksichtigt wird. Es wird für die Gebäudeklassen festgelegt, dass mindestens der Standard der Zweisheibenverglasung erster Generation, im Zuge einer Sanierungsmaßnahme vorliegt. Die drei nachfolgenden Typen gehören zur Familie der Zweisheibenverglasung. Generation eins, mit einem U-Wert von 1,4

W/m²K; Generation zwei, mit einem U-Wert von 1,2 W/m²K; Generation drei mit einem U-Wert von 1,1 W/m²K und die Generation vier als Vertreter der Dreischeibenverglasung mit einem U-Wert von 0,7 W/m²K.

Auf Grund der umfangreichen Variationen der einzelnen Gebäudekategorien wird für die Analyse auf die Betrachtung von Sonderbauweisen, wie Denkmalschutz und industrieller Wohnungsbau verzichtet. Des Weiteren werden keine Gebäudetypen berücksichtigt, für deren der Einsatz einer Wärmepumpe im Referenzgebäude auf Grund nicht übereinstimmender Rahmenbedingungen, für den Betrieb einer Wärmepumpe aus technischen und vor allem wirtschaftlichen Aspekt nicht berücksichtigt.

Als Referenz der Gebäudetypen werden im nachfolgenden die für die Bestimmung der Typologien zu Grunde gelegten Referenzgebäude betrachtet. Hierfür wurde ein Ist-Zustand der Beispielgebäude ermittelt.

Anhand der im Verlauf aufgeführten Tabelle zur Bestimmung der Normheizlast, lassen sich verschiedene Spezifikationen der Referenzgebäude zusammentragen. Die Bezeichnung der Gebäude erfolgte mittels Gebäudetyp und Baualtersklasse. Diese wurde in der nachfolgenden Spalte genauer bezeichnet. Für die Gebäude wurden quadratische Grundflächen zu Grunde gelegt, die sich aus den gegebenen Stockwerken und der gegebenen beheizten Wohnfläche ergeben. Unter Berücksichtigung einer festgelegten Raumhöhe von 2,50 m ergibt sich das nachfolgend errechnete Raumvolumen des Gebäudes. Die U-Werte mit Bezug auf die Wohn- und Hüllfläche des Gebäudes stammen, wie der Nettoheizwärmebedarf, aus den Unterlagen der IWU Wohngebäudetypologie. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [20].

Der Lüftungswärmeverlust errechnet sich unter zu Hilfenahme der DIN EN 12831-1 entsprechend nachfolgender Formel.

$$\phi_{V,build} = V_{build} \cdot n_{build} \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \cdot (\theta_{int,build} - \theta_e) \quad (1)$$

Dabei ist

$\phi_{V,build}$ der Norm – Lüftungsverlust in W

V_{build} das Innenvolumen (Luftvolumen) des Gebäudes in m³

n_{build} die Luftwechselrate in $\frac{1}{h}$

$\rho_L \cdot c_{p,L}$ die Stoffkonstante der Luft in $\frac{Wh}{m^3 \cdot K}$, (vereinfacht 0,34)

$\theta_{int,build}$ die Norminnentemperatur des betrachteten Gebäudes in °C

θ_e die Norm – Außentemperatur in °C

Tabelle 11: Luftwechselraten für das vereinfachte Verfahren

Anwendungsfall (Verfahren)	Luftdichtheitsgrad		Luft- wechsel- rate $n [h^{-1}]$
Heizlast für Einzelräume (7)	-		0,5
Gebäude-Heizlast (8)	$n_{50} \leq 3 h^{-1}$	— Baujahr ≥ 1995 — Gebäude mit dichten Fenstern	0,25
	$3 h^{-1} < n_{50} \leq 6 h^{-1}$	— Baujahr < 1995	0,5
	$n_{50} > 6 h^{-1}$	— Baujahr < 1977 — Gebäude mit offensichtlichen Undichtheiten	1

Die Luftwechselrate ergibt sich nach den Vorgaben entsprechend der DIN EN 12831-1 dargestellt in der obigen Tabelle. Die Luftwechselraten wurden entsprechend der Baujahre der Gebäude berücksichtigt. Dargestellt anhand der grauen Verfärbung der Tabelle zur Ermittlung der Gebäudeheizlast, Spalte Lüftungswärmeverlust. Der dunkelgraue Bereich entspricht einer Luftwechselrate von 1 1/h, der hellgraue Bereich für eine Rate von 0,25 1/h. Für die nachfolgend betrachteten Sanierungsempfehlungen unter der Bezeichnung Modernisierungspaket, werden auf Grund der Verbesserung der Dämmeigenschaften und einer Abdichtung der Gebäudehülle je Sanierungsstufe eine bessere Luftwechselrate entsprechend der drei vorgegebenen Luftwechselraten unterstellt, sodass im letzten Sanierungsschritt für alle Gebäude eine Luftwechselrate von 0,25 1/h herangezogen wird.

Als Grundlage der Norminnentemperatur dienen 20 °C, für die Normaußentemperatur wird der Standort Mannheim, mit einer Normaußentemperatur von -10,5 °C herangezogen, da dieser als Referenzstandort der Klimadaten für die Ermittlung der Wohngebäudetypologie verwendet wurde.

Der Transmissionswärmeverlust errechnet sich aus:

$$\phi_{T, build} = \frac{\dot{Q}_{Aa} \cdot A_{build, beheizt}}{b_{VH}} \quad (2)$$

Mit

$A_{\text{build, beheizt}}$ beheizte Wohnfläche des Gebäudes in m^2

$\phi_{T, \text{build}}$ Transmissionswärmeverlust des Gebäudes in kW

Q_{Aa} flächenbezogener Nettoheizwärmejahresbedarf in $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{a}}$

b_{VH} Jahresvollbenutzungsstunden in h

Als Grundlage der Vollbenutzungsstunden wurden in Anlehnung an die VDI 2067 für Einfamilienhäuser 2000 h und für Mehrfamilienhäuser 2100 h angesetzt.

Die Gebäudeheizlast der letzten Spalte ergibt sich aus der Summe der Lüftungswärmeverluste und der Transmissionswärmeverluste.

Tabelle 12: Ermittlung der Gebäudeheizlasten

Var. 1	Baualter	B/L	Stockwerke	beheizte Wohnfläche	Beheiztes Volumen	U-Wert Gebäude (hüllflächenbezogen)	U-Wert Gebäude (wohnflächenbezogen)	Nettoheizwärme	Lüftungswärmeverlust	Transmissionswärmeverlust	Gebäude-Heizlast
		m		m^2	m^3	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	kW	kW	kW
EFH B	1860...1918	8,0	2	128,9	595,0	1,54	4,53	308,6	6,1	18,9	25,1
EFH C	1919...1948	11,7	2	275	1052,5	1,5	3,54	250,2	10,9	32,8	43,6
EFH E	1958...1968	10,5	1	110,2	502,9	1,07	4,5	303,2	5,2	15,9	21,1
EFH F	1969...1978	12,5	1	157,5	606,0	0,9	3,13	223,6	6,3	16,8	23,0
EFH H	1984...1994	12,3	1	150,2	514,0	0,72	2,34	173,7	2,7	12,4	15,1
EFH K	2010...2015	9,0	2	160,4	827,1	0,36	1,14	76,9	2,1	5,9	8,0
EFH L	2016...	9,0	2	160,4	827,1	0,26	1,2	64,8	2,1	4,9	7,1
MFH B	1860...1918	8,4	4	284	1360	1,7	2,44	196,8	14,1	27,9	42,0
MFH C	1919...1948	10,8	3	350	1171	1,54	3,29	250,2	12,1	43,8	55,9
MFH E	1958...1968	26,7	4	2844,6	10397	1,21	1,91	160,5	107,5	228,3	335,7
MFH F	1969...1978	10,3	4	426	1435	1,02	2,03	168,6	14,8	35,9	50,7
MFH H	1984...1994	15,4	3	707	2413	0,87	1,77	146,1	12,5	51,6	64,1
MFH K	2010...2015	16,2	5	1305	5371	0,45	0,81	63,2	13,9	41,2	55,1
MFH L	2016...	16,2	5	1305	5371	0,42	0,77	37,9	13,9	24,7	38,6

Unter Betrachtung der Tabelle und der Daten der Wohngebäude im Ist-Zustand sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Vor allem die Baualterklassen und damit verbundene Bautechniken und die Verwendung von Rohstoffen haben einen Einfluss auf die Heizlast der Gebäude. Anhand der U-Werte der Gebäude lassen sich starke Verbesserungen der Dämmeigenschaften verzeichnen. Der U-Wert des Gesamtgebäudes wird in der Literatur auch H_T bezeichnet. Im fortlaufenden Text wird jedoch die Bezeichnung U-Wert als gesamtheitlicher U-Wert der Gebäudehülle betrachtet.

Anhand der Tabelle lassen sich für Einfamilienhäuser gleiche Wohnflächen feststellen. Für Mehrfamilienhäuser variiert die beheizte Wohnfläche deutlich. Im nachfolgenden sollen die unterschiedlichen Varianten der Sanierung anhand der Heizlast und der spezifischen Heizlast der Gebäude verglichen werden. Die Variante eins stellt den Ist-Zustand dar. Die Variante zwei gibt Sanierungsvorschläge zum Erreichen des KfW-70-Standards (konventionell) und die Variante drei zeigt

Maßnahmen zum Erreichen des KfW-40-Standards zukunftsweisend auf und wird als Niedrigenergiehaus oder zukunftsweisend bezeichnet. Die genauen Maßnahmen sind von der jeweiligen Baualtersklasse und den typischen Wohngebäudeeigenschaften verbunden. Eine Auflistung typischer Sanierungsmaßnahmen sind der Wohngebäudetypologie des IWU in der Tabelle 10 Typisierung von Wärmeschutzmaßnahmen S. 26 ff aufgelistet und beschrieben. (IWU, 2015-02)

Nach Berücksichtigung der Sanierungsmaßnahmen ergeben sich nachfolgende Verbesserungen. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [25].

Tabelle 13: Heizlast und spezifische Heizlast der Referenzgebäude

Typ	Baualter	beheizte Wohnfläche	Heizlast			Spezifische Heizlast				
			Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 1	Var. 2	Optimierung zu Var. 1	Var. 3	Optimierung zu Var. 1
		m ²	kW	kW	kW	W/m ²	W/m ²		W/m ²	
EFH B	1860...1918	128,9	25,1	10,0	4,0	195	78	60%	31	84%
EFH C	1919...1948	275	43,6	18,0	6,9	159	65	59%	25	84%
EFH E	1958...1968	110,2	21,1	10,3	4,1	192	93	51%	38	80%
EFH F	1969...1978	157,5	23,0	11,0	4,7	146	70	52%	30	80%
EFH H	1984...1994	150,2	15,1	9,2	4,2	100	61	39%	28	72%
EFH K	2010...2015	160,4	8,0	5,3	3,6	50	33	33%	23	55%
EFH L	2016...	160,4	7,1	4,8	3,6	44	30	32%	23	49%
MFH B	1860...1918	284	42,0	20,0	6,4	148	70	53%	22	85%
MFH C	1919...1948	350	55,9	22,4	7,9	160	64	60%	23	86%
MFH E	1958...1968	2844,6	335,7	159,0	55,5	118	56	53%	19	83%
MFH F	1969...1978	426	50,7	25,0	9,0	119	59	51%	21	82%
MFH H	1984...1994	707	64,1	34,8	14,8	91	49	46%	21	77%
MFH K	2010...2015	1305	55,1	38,9	22,2	42	30	29%	17	60%
MFH L	2016...	1305	38,6	28,3	22,2	30	22	27%	17	43%

Anhand der Tabelle zur Aufstellung der spezifischen und Norm-Heizlast entsprechend der IWU-Typologie wird deutlich, dass der Einsatz von Wärmepumpen in unsanierten Gebäuden mit einem Baujahr vor 1984 als alleiniger monoenergetischer Wärmeerzeuger wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, beziehungsweise der Wärmebedarf mit dem vorhandenen Wärmeübergabesystem und den zugrundeliegenden Systemtemperaturen nicht gedeckt werden kann. Auf Grund des Alters, der Bausubstanz und der hohen spezifischen Heizlast ist die Deckung des Wärmebedarfs über die im Bestand vorzufindenden Wärmeüberträgerflächen in Form von Guss-, Gliederradiatoren oder Flachheizkörpern nicht möglich. Für diese Gebäude kann ein Hybridbetrieb mit fossilen Energieträgern wie Öl oder Gas als sinnvoll betrachtet werden. Für dieses Szenario kann die Heizlast in der Übergangszeit und die Warmwasserbereitung im Sommer von einer Wärmepumpe gedeckt werden. Auf Grund des ausgeschlossenen monoenergetischen Betriebs für diese Gebäude, werden sie in der Simulation nicht weiter berücksichtigt. Betrachtet

man jedoch die Sanierungsvarianten zwei und drei, so erweist sich der Einsatz einer Wärmepumpe als möglich. Die Senkung der spezifischen Heizlast um 50 bis 60 % im ersten Sanierungsschritt der Variante zwei und die Reduktion der Heizlast auf bis zu 25 bis 15 % der Ist-Heizlast im Zuge der Sanierung zum Niedrigenergiehaus sollten genauer betrachtet werden. Es ist sinnvoll für geeignete Kategorien die Gebäude zu einer weiteren Gruppe zusammenzufassen. Auch für die jüngeren Gebäude ab 1984 und Neubauten ab 2016 lassen sich im Zuge der Sanierung eine Senkung der Heizlast erwirken. Für Gebäude ab 1984 lassen sich in der ersten Sanierungsstufe bis zu 40 % einsparen. Für die Sanierung der dritten Variante ergeben sich Verbesserungen von 50 bis 78 %, wobei die Verbesserung geringer ausfällt, je jünger das Gebäude ist.

Betrachtet man die U-Werte der Gebäude als Vergleichswert und unterteilt diese in drei Untergruppen so ergeben sich nachfolgende Verteilungen.

Tabelle 14: hüllflächenbezogene U-Werte der Gebäude

Typ	U-Wert Gebäude (hüllflächenbezogen)		
	W/(m²K)	W/(m²K)	W/(m²K)
EFH B	1,54	0,45	0,22
EFH C	1,50	0,47	0,24
EFH E	1,07	0,44	0,22
EFH F	0,90	0,36	0,21
EFH H	0,72	0,42	0,22
EFH K	0,36	0,32	0,17
EFH L	0,26	0,27	0,17
MFH B	1,70	0,64	0,27
MFH C	1,54	0,46	0,24
MFH E	1,21	0,43	0,25
MFH F	1,02	0,4	0,23
MFH H	0,87	0,4	0,24
MFH K	0,45	0,26	0,21
MFH L	0,42	0,29	0,21

Die Unterteilung erfolgte in nachfolgende Bereichsgrenzen.

- gelb: U-Wert 0,1 bis 0,3 W/(m²K), Mittelwert 0,23 W/(m²K)
- blau: U-Wert 0,3 bis 0,5 W/(m²K), Mittelwert 0,41 W/(m²K)
- rot: U-Wert größer 0,5 W/(m²K), Mittelwert 0,74 W/(m²K)

So ergeben sich für die Betrachtung der Gebäude und des Gebäudetyps jeweils drei Typen für EFH und MFH.

Die für die Simulationssoftware relevanten Informationen und Daten werden entsprechend nachfolgender Tabelle festgelegt.

Tabelle 15: Aufstellung Gebäudevariation

Typ		EFH 1	EFH 2	EFH 3	MFH 1	MFH 2	MFH 3	EFH 2.1	EFH 3.1
B	m	8	8	8	23	23	23	8	8
L	m	10	10	10	10	10	10	10	10
Stockwerke		2	2	2	4	4	4	2	2
beheizte Wohnfläche	m ²	160	160	160	920	920	920	160	160
beheiztes Volumen	m ³	704	704	704	3500	3500	3500	704	704
U-Wert Gebäude	W/(m ² K)	0,72	0,40	0,22	0,76	0,43	0,24	0,40	0,22
Spezifische Heizlast	W/m ² a	100,40	64,37	30,06	80,47	49,95	21,35	64,37	30,06
Spezifischer Heizenergiebedarf	kWh/(m ² a)	210,84	135,18	63,12	168,98	104,89	44,84	135,18	63,12
Nettoheizwärme	kWh/(m ² a)	173,70	98,40	38,46	118,55	72,00	22,59	98,40	38,46
Lüftungswärmeverlust	kW	1,94	1,67	1,05	6,40	11,37	7,06	1,67	1,05
Transmissionswärmeverlust Hat	kW	12,42	7,42	2,89	32,28	38,96	11,80	7,42	2,89
Gebäude-Heizlast	kW	14,36	9,10	3,94	38,69	50,32	18,86	9,10	3,94
erforderliche Heizleistung (bei -7 °C bei θ_e -14 °C und θ_i 20 °C)	kW	11,407	7,2241	3,1318	30,7213	39,9625	14,9764	7,2241	3,1318
Fenster-anteil Nord, Ost, Süd, West	%	25	25	30	25	25	30	25	25
Luftwechsel	1/h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Infiltration	1/h	1	0,5	0,25	1	0,5	0,25	0,5	0,25
festgelegte Wärmekapazität Gebäude	kJ/(K*m ²)	468	324	180	468	324	180	468	468
G-Wert Fenster	W/(m ² K)	0,85	0,85	0,55	0,85	0,85	0,55	0,55	0,55

Die Angaben der Gebäude wurde aus den mittleren Gebäudedaten der Referenzgebäude der einzelnen Baualtersklassen und Gebäudetypen bestimmt. Unter dem Typ EFH 1 sind Gebäude aus der Baualtersklasse H im unsanierten Zustand berücksichtigt. Für die Gebäude des Typs EFH 2 werden unsanierte Neubauten vor 2015 und Altbauten der Sanierungsvariante 2 zusammengefasst. Für die Klasse EFH 3 werden Neubauten nach 2015 und Altbauten vor 2015 der Sanierungsvariante 3 zusammengefasst. Ähnlich ergibt sich dieses Bild für die Klassen der Mehrfamilienhäuser.

In der Simulationssoftware Polysun können unterschiedliche Parameter für die Berechnung der Heizlast des Gebäudes herangezogen werden. Da sich durch die Simulation der unterschiedlichen Klimaprofile auch der Referenzstandort ändert, hat dies in Abhängigkeit von der Außentemperatur, Folgen für die Normheizlast des Gebäudes. Als Berechnungsgrundlage wurde aus diesem Grund der gebäudespezifische U-Wert zur Simulation herangezogen. Dies führt zu unterschiedlichen Heizlasten entsprechend eines Gebäudetyps in Abhängigkeit von der Wahl des Klimaprofils. Demnach kann es dazu kommen, dass Anlagenkomponenten ggf. größer ausgelegt werden müssten oder ein

Zusatzheizstab häufiger schaltet und die Wärmepumpe unterstützt. Es ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass die hier ermittelte Normheizlast für eine Normaußentemperatur von -14 °C und eine Norminnentemperatur von 20 °C bestimmt wurde und dient als Referenz für die nachrangige Auswahl der Wärmepumpe.

Die zuvor ermittelten Daten wurden durch den Fensterflächenanteil des Gebäudes, den G-Wert der Fenster und die wirksame Wärmekapazität des Gebäudes ergänzt. Als Grundlage des Fensteranteils dient die Ableitung der DIN EN 17037 im Beitrag (Glaswelt, 2020) von 20 bis 25 % der Raumgrundfläche, die hier auf die Gebäudegrundfläche angewandt wird. Für Neubauten wurde ein höherer Wert von 30 % angesetzt, da für Neubauten größere Fensterflächen vorausgesetzt werden. Ein erforderlicher Nachweis von Wärmeschutz nach DIN 4108-2 wird in diesem Fall nicht berücksichtigt. Der G-Wert, Gesamtdurchlassgrad der Fenster wurde anhand des Internetbeitrages (Fensterblick, kein Datum). Die Werte $0,7\text{ W/(m}^2\text{K)}$ entsprechen einem doppelverglasten Fenster. Der Wert 0,45 einer Dreischeibenverglasung, die als Standard für die letzte Sanierungsstufe angesetzt wird.

Die wirksame Wärmekapazität des Gebäudes ergibt sich aus den vereinfachten Anhaltswerten der DIN V 18599-2 für leichte, mittelschwere und schwere Gebäude. Da für die Simulationssoftware Polysun die spezifische Wärmekapazität in Bezug zur beheizten Wohnfläche angegeben wird, werden ebenfalls die Daten entsprechend der DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz Tabelle 8 herangezogen. (DIN 4108-2, 2013-02). In dieser wird angegeben, dass die wirksame Wärmekapazität nach DIN EN ISO 13786 in die Bauweisen leicht, mittelschwer und schwer eingeordnet werden kann. Dabei wird folgende Untergliederung vorgenommen. Die Umrechnung in kJ erfolgt auf Grund der Vorgabe der Simulationssoftware.

$$\text{Verhältnis: } \frac{C_{\text{wirk}}}{A_G} \quad (3)$$

Mit

C_{wirk} Wirksame Wärmekapazität
 A_G Nettogrundfläche in m^2

- Leicht: Verhältnis $< 50 \frac{\text{Wh}}{\text{K} \cdot \text{m}^2} = 180 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^2}$
- Mittelschwer: $50 \frac{\text{Wh}}{\text{K} \cdot \text{m}^2} \leq \text{Verhältnis} \leq 130 \frac{\text{Wh}}{\text{K} \cdot \text{m}^2}$

- (Gewählt: $90 \frac{Wh}{K \cdot m^2}$) $\approx 324 \frac{kJ}{K \cdot m^2}$
- Schwer: Verhältnis $> 130 \frac{Wh}{K \cdot m^2} \approx 468 \frac{kJ}{K \cdot m^2}$

Im Vergleich zu diesen Typisierungen werden die Anhaltswerte entsprechend der DIN EN 12831-1. Entsprechend des Kapitels spezifische Wärmespeicherkapazität c_{eff} werden Gebäude in geringe und mittel/ bis hohe volumenspezifische Speicherkapazität unterteilt.

- Gering: $15 \frac{Wh}{K \cdot m^3}$ (hohes AV-Verhältnis, Leichtbau, abgehangene Decken, aufgeständerte Böden)
- Mittel/hoch: $50 \frac{Wh}{K \cdot m^3}$ (überwiegend Massivbauweise, Ziegel und Betonwände, -decken, -böden)

Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Grundfläche und des A/V-Verhältnisses $f_A \frac{1}{V}$ nachfolgende spezifische Wärmespeicherkapazitäten.

Aus den Zusammenstellungen des IWU, ergeben sich für die betrachteten Gebäudeklassen EFH: 0,74 und für MFH 0,48 gemittelt über alle betrachteten Baualtersklassen. Werden diese Werte berücksichtigt, so lassen sich die Ergebnisse in bereits gewählte Bereiche aufteilen. Für Mehrfamilienhäuser wurde das geringste A/V-Verhältnis mit 0,3 ermittelt. Dafür ergeben sich nachfolgende Werte.

- MFH leicht: $c_{wirk} = \frac{c_{eff}}{f_A \frac{1}{V}} = \frac{15 \frac{Wh}{K \cdot m^3}}{0,30 \frac{1}{m}} = 50 \frac{Wh}{K \cdot m^2} = 180 \frac{kJ}{K \cdot m^2}$
- MFH mittel/hoch: $c_{wirk} = \frac{c_{eff}}{f_A \frac{1}{V}} = \frac{50 \frac{Wh}{K \cdot m^3}}{0,30 \frac{1}{m}} = 166,7 \frac{Wh}{K \cdot m^2} \approx 600 \frac{kJ}{K \cdot m^2}$

Die Variation des leichten Mehrfamilienhauses entspricht der spezifischen Wärmekapazität für leichte Gebäude entsprechend DIN EN ISO 13786. Für die zweite Kategorie ergibt sich eine höhere Kapazität als bereits betrachtet.

Die Bauweise kann in Abhängigkeit zur Baualtersklasse festgesetzt werden. Da die Kapazität in den gewählten Beispielen keiner genaueren Baualtersklasse zugeordnet werden kann, werden für alte Gebäude schwere Bauweisen unterstellt. Um die Veränderung im Zuge der Sanierung bei gleichbleibender Gebäudesubstanz und zusätzlicher Dämmung zu verdeutlichen und die Speicherfähigkeit zu berücksichtigen wurden für Einfamilienhäuser die Gruppen EFH 2.1 und EFH 3.1 erstellt, die sich in der Speicherfähigkeit und den G-Werten der Fenster von den Urtypen unterscheiden

und die beiden Sanierungsstufen konventionell und zukunftsweisend berücksichtigen. (IWU, 2015-02).

Unter Betrachtung dieser Ausführung lassen sich parallelen zu den Angaben in der Märzbrochure des BDH ((Hrsg.), Interessengemeinschaft Energie Umwelt, 2021-03) ziehen. In diesem werden die Grundtypen der Gebäude in EFH, RH und MFH aufgeteilt. Für die Betrachtung der Baualtersklassen werden die Klassen

- H, E für Einfamilienhäuser,
- C, F für Mehrfamilienhäuser,
- F, H, I für Reihenhäuser

Die Betrachtung der Reihenhäuser würde im Einzelnen nicht berücksichtigt, da Reihenhäuser sowohl Mehr- als auch Einfamilienhäuser sein können. Der Anteil der als Reihenhaus ausgeführten Mehrfamilienhäuser liegt in Form einer Doppelhaushälfte oder eines Reihenhauses bei 33,5 %. Für Mehrfamilienhäuser überwiegt der Anteil der Reihenhäuser mit 55,9 %. Es ist davon auszugehen, dass der Anteil der Reihenhäuser über die entsprechenden MFH-Typen abgedeckt werden kann. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [11].

2.3 Anlagenkomponenten

Die Anlagenkomponenten werden anhand der Berechnungskörper der Simulationsoftware Polysun und deren Beschreibung genauer betrachtet. Als Grundlage der Ausführungen dient das Tutorial-Handbuch des Softwareherstellers. (Polysun Handbuch, 2022) Weitere Informationen entsprechend der Anlage [12].

2.3.1 Speichersysteme Heizung

Grundlage für die Betrachtung dieses Kapitels bilden Herstellerunterlagen und die Vorgaben und Richtwerte der VDI 4645. Anhand Punkt 8.8 Wärmespeicher (VDI 4645, 2023-04) ergeben sich nachfolgende Überlegungen und Vorgaben für hydraulische Speicher. Grundsatz der Wärmespeicherung ist die Überbrückung von zeitlichen und leistungsmäßigen Differenzen der Wärmeerzeugung und des Wärmebedarfs. Im Gebäude wirken die Gebäudemassen und das Verteilsystem als Speichermassen, die im Unterpunkt Wohntypologie genauer betrachtet wurden. Zusätzlich zu den genannten Vorteilen der Speicher, wie

- Laufzeiterhöhung der Wärmepumpe (Mindestlaufzeit: drei bis vier Minuten (Vaillant))
- Überbrückung von Sperrzeiten
- Hydraulische Entkopplung
- Gewährleistung der Mindestwasserumlaufmenge der Wärmepumpe bei Anlagen mit geringer Wasserumlaufmenge
- Energiemanagement mehrerer Wärmeerzeuger
- Energiemanagement zur Erhöhung der Eigenstromnutzung

Zusätzlich zu diesen Ausführungen wird in dieser Ausarbeitung die gezielte Betriebsweise zu erhöhten, täglichen Außentemperaturen betrachtet.

Für die Betriebsweise der Wärmepumpe mit Pufferspeicherlösung werden verschiedene Modelle berücksichtigt, die ebenfalls in der Simulation betrachtet werden.

- Speicherung von Heizungswasser und Trinkwarmwasser in zwei unterschiedlichen Speichern
- Speicherung von Trinkwarmwasser
- Speicherung von Heizungswasser, wobei der obere Speicherbereich für die Warmwasserbereitung vorgehalten wird, die Verteilung erfolgt mittels Frischwasserstation

Für die Dimensionierung der Pufferspeicher werden in Anlehnung an die DIN EN 15450 ein Puffervolumen von 12 bis 35 l je kW maximaler Wärmepumpenleistung angegeben. Nach VDI werden für monovalente Anlagen bis 50 kW Wärmepumpenleistung im Auslegungspunkt werden 20 l je kW Wärmepumpenleistung im Auslegungspunkt berücksichtigt. Für die Überbrückung von Sperrzeiten werden je kW Wärmepumpenleistung im Auslegungspunkt und je Stunde der Sperrdauer 30 bis 40 l Speichervolumen angesetzt. Bei der Nutzung eines Zweitarifzählers mit verbesserten Konditionen für den Wärmepumpenstrom wird dem Energieversorgungsunternehmen die Möglichkeit eingeräumt die Wärmepumpe innerhalb eines Tages dreimal für zwei Stunden vom Netz zu nehmen. Laut Vaillant Planungsbroschüre ist des Weiteren eine Auslegung für die Kompressor-Mindestlaufzeit der Wärmepumpe, in diesem Fall drei bis vier Minuten,

entscheidend. Dies ergibt für die verschiedenen Anlagengrößen nachfolgende Speichergrößenvariationen.

Tabelle 16: Speichergrößen

Typ		EFH 1	EFH 2	EFH 3	MFH 1	MFH 2	MFH 3	EFH 2.1	EFH 3.1
Gebäude-Heizlast $\theta_e -14\text{ °C}$ und $\theta_i 20\text{ °C}$	kW	14,36	9,10	3,94	38,69	50,32	18,86	9,10	3,94
Anzahl	n	1	1	1	2	3	1	1	1
gewähltes Wärmepumpenmodell		VWL 155/6	VWL 85/6	VWL 45/6	VWL 155/6	VWL 155/6	VWL 155/6	VWL 85/6	VWL 45/6
Nach VDI 4546 für Wärmepumpen < 50 kW (entspricht 20 l/kW)	l	287	182	79	774	1006	377	182	79
Herstellerempfehlung 50 - 100 l/kW (gewählt 50 l/kW)	l	718	455	197	1934	2516	943	455	197
Nach VDI 4546 Abtauung	l	69	61	26	137	206	61	61	26
Nach Kompressor- mindestlaufzeit für A12W35(55)	l	40 (159)	35 (142)	15 (60)	80 (318)	119 (477)	35 (142)	35 (142)	15 (60)
Wärmepumpenleistung A12/W55	kW	18,5	16,5	7	37	55,5	16,5	16,5	7
Transmissionswärme- verlust $\theta_e -14\text{ °C}$ und $\theta_i 20\text{ °C}$	kW	14,36	9,10	3,94	38,69	50,32	18,86	9,10	3,94
Stockwerke		2	2	2	4	4	4	2	2
beheiztes Volumen	m ³	704	704	704	3500	3500	3500	704	704
Mindestluftwechsel	1/h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Korrekturfaktor Geschossanzahl		0,76	0,76	0,76	0,8	0,8	0,8	0,76	0,76
Lüftungswärmeverlust	kW	3,09	3,09	3,09	16,18	16,18	16,18	3,09	3,09
Nach EnEV-Daten, 2 h Sperrzeit W35(55)	l	1368 (684)	915 (458)	472 (236)	4022 (2011)	5023 (2511)	2317 (1159)	915 (458)	472 (236)
Nach EnEV-Daten, 4 h Sperrzeit W35(55)	l	1501 (200)	1048 (200)	605 (200)	4718 (857)	5719 (857)	3013 (857)	1048 (200)	605 (200)
Nach EnEV-Daten, 6 h Sperrzeit W35(55)	l	1634 (817)	1181 (590)	738 (369)	5414 (2707)	6414 (3207)	3709 (1854)	1181 (590)	738 (369)
Nach EnEV-Daten, 12 h Sperrzeit W35(55)	l	2032 (1016)	1579 (790)	1136 (568)	7501 (3751)	8502 (4251)	5796 (2898)	1579 (790)	1136 (568)

Für die Berechnung nach VDI 4546 und nach Herstellerangaben ergibt sich

$$V_{\text{Speicher}} = \Phi_{HL} \cdot f_{V/kW} \quad (4)$$

Für die Berechnung nach Kompressor-Mindestlaufzeit (VDI 4546)

$$V_{\text{Speicher}} = \frac{P_{WP,A12} \cdot t_{\text{mind.Laufzeit}}}{\rho_W \cdot c_{pw} \cdot \Delta\theta_{\text{Entnahme}}} \cdot 1/60 \quad (5)$$

Für die Berechnung des Abtauvorganges (VDI 4546)

$$V_{\text{Speicher}} = \frac{P_{WP,A12} \cdot t \cdot (COP_{WP,A12} - 1)}{\rho_W \cdot c_{pw} \cdot \Delta\theta_{\text{Raum,Vorlauf}} \cdot COP_{WP,A12}} \quad (6)$$

Nach EnEV-Daten

$$V_{\text{Speicher}} = \frac{(\Phi_T + \rho_L \cdot c_{pL} \cdot V_{\text{build}} \cdot n \cdot f_{\text{Geschoss}}) \cdot f_{\text{Sperr}}}{c_{pW} \cdot \Delta\theta_{\text{VL,Puffer}}} \cdot 1000 \quad (7)$$

Mit

V_{Speicher} Speichervolumen in l

Φ_{HL} Gebäudeheizlast in kW

$f_{\frac{V}{kW}}$ Faktor, Speichervolumen je kW Heizleistung Wärmepumpe in $\frac{l}{kW}$

$P_{WP,A12}$ Wärmepumpenleistung im Punkt A12/W35 in W

$t_{\text{mind.Laufzeit}}$ Kompressormindestlaufzeit in min (3 min für Vaillant)

$c_{p,W}$ spezifische Wärmekapazität des Wassers in $\frac{Wh}{kg \cdot K}$ (vereinfacht 1,163)

ρ_W Dichte des Wassers in $\frac{kg}{l}$ (vereinfacht 1)

$\Delta\theta_{\text{Entnahme}}$ zulässige Temperaturerhöhung in K (W35: 20 K, W55: 5K)

$COP_{WP,A12}$ COP im Punkt A12/W35

$\Delta\theta_{\text{Raum,Vorlauf}}$ Temperaturdifferenz Raum und Vorlauftemperatur (15 K)

Φ_T Transmissionswärmeverlust in kW

$\rho_L \cdot c_{p,L}$ die Stoffkonstante der Luft in $\frac{Wh}{m^3 \cdot K}$, (vereinfacht 0,34)

V_{build} Gebäudevolumen in m^3

n Mindestluftwechsel in $\frac{1}{h}$

f_{Geschoss} Faktor der Vollgeschossanzahl (bis 3: 0,76; > 3: 0,8)

f_{Sperr} Sperrzeitfaktor (Viertel der tatsächlichen Sperrdauer)

$\Delta\theta_{\text{VL,Puffer}}$ Temperaturdifferenz Vorlauf und Pufferspeichermindesttemperatur

VL: 35 °C → Speichermindesttemperatur 25 °C

VL: 55 °C → Speichermindesttemperatur 35 °C

Die Sperrzeit wurde durch ein Rechenbeispiel mit einer Sperrzeit von 12 h hinzugefügt. Dies soll für die Betrachtung der Wärmebereitstellung nur im Überladungsbetrieb darstellen.

Tabelle 17: gewählte Speichergrößen

Gebäudetyp	Einheit	EFH 1	EFH 2	EFH 3	MFH 1	MFH 2	MFH 3	EFH 2.1	EFH 3.1
Nach VDI 4546 für Wärmepumpen < 50 kW (entspricht 20 l/kW)	l	300	200	80	800	1000	400	200	80
Herstellerempfehlung 50 - 100 l/kW (gewählt 50 l/kW)	l	800	500	200	2000	2500	1000	500	200
Nach VDI 4546 Abtauung	l	80	80	30	200	300	100	80	30
Nach EnEV-Daten, 2 h Sperrzeit W35(55)	l	1400	1000	500	4000	5000	2500	1000	500
Nach EnEV-Daten, 4 h Sperrzeit W35(55)	l	1500	1000	600	5000	6000	3000	1000	600
Nach EnEV-Daten, 6 h Sperrzeit W35(55)	l	1600	1200	800	5500	6500	4000	1200	800
Nach EnEV-Daten, 12 h Sperrzeit W35(55)	l	2000	1600	1200	7500	8500	6000	1600	1200

Anhand dieser Berechnungen wurden geeignete Speichergrößen ausgewählt. Berücksichtigt werden hierbei am Markt verfügbare Speichervolumina. Für die Darstellung in der Polysun-Simulationssoftware wird ein Speicher-Rechenmodell angelegt. Dabei ist das zylindrische Speichervolumen in 12 gleich große Teile untergliedert.

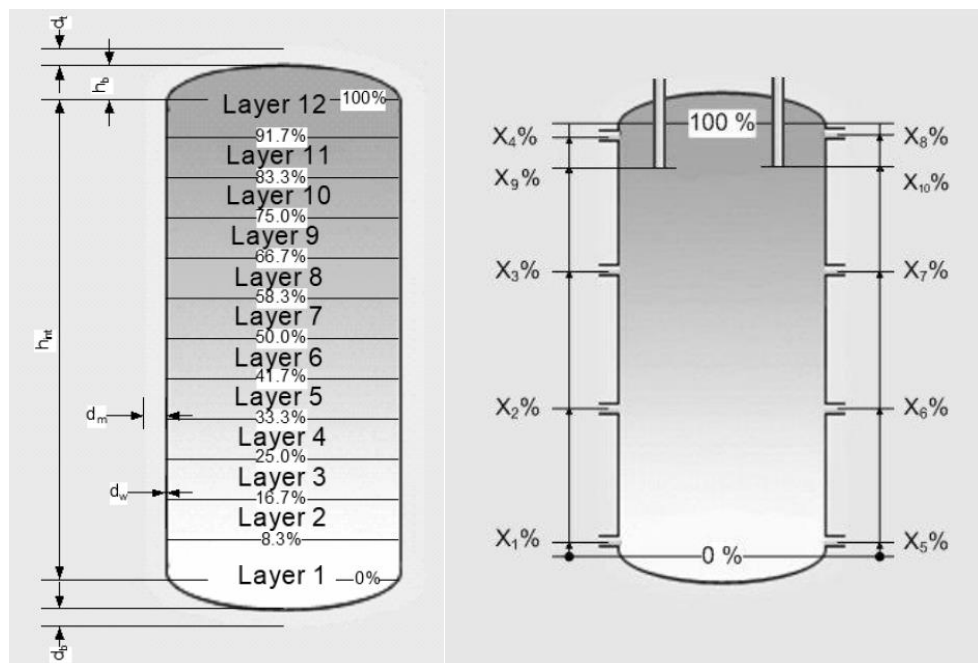


Abbildung 24: Darstellung der Polysun-Speicher

Für die Pufferspeicher wurden die Anschlussmaße in Prozent wie folgt vorgenommen:

- X_1, X_5, X_{10} : 5 % / X_3, X_7 : 50 % / X_4, X_8 : 95 % / X_2, X_6 : 35 % / X_9 : 100 %
- Alle Anschlüsse sind zuflussberuhigt

Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [12, 13, 21].

2.3.2 Warmwasserbereitung

Zur Ermittlung des Trinkwarmwasserverbrauchs dient die VDI 4655, für den Bereich Thüringer Becken und sächsischen Hügelland der Klimazone 9, entsprechend dem Standort Zwickau. Der Jahresenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung wird auf 500 kWh/Person im Einfamilienhaus und 1.000 kWh/Wohneinheit (WE) im Mehrfamilienhaus benannt. Die Ermittlung des Tagesenergiebedarfs ergibt sich somit aus nachstehender Formel.

$$Q_{TWE,TT} = Q_{TWE,a} \cdot \left(\frac{1}{365} + N_{WE} \cdot F_{TWE,TT} \right) \quad (8)$$

Mit

$Q_{TWE,TT}$ Energiebedarf zur Trinkwassererwärmung je Typtag in kWh

$Q_{TWE,a}$ Jahresenergiebedarf zur Trinkwassererwärmung in kWh

N_{WE} Anzahl der Wohneinheiten

$F_{TWE,TT}$ Faktor zur Trinkwassererwärmung je Typtag

Tabelle 18 - Faktoren Klimazone 09

MFH	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB	SWX	SSX	WWH	WWB	WSH	WSB
$F_{Heiz,TT}$	1,8758E-03	2,1459E-03	1,9351E-03	2,0129E-03	2,1418E-04	2,5124E-04	5,6018E-03	5,1558E-03	5,9297E-03	4,4059E-03
$F_{el,TT}$	1,2162E-05	2,1796E-06	-1,4790E-05	-1,4790E-05	-3,9746E-05	-4,1743E-05	5,1093E-05	1,8151E-05	3,1128E-05	-8,1509E-07
$F_{TWE,TT}$	1,2185E-05	3,2642E-06	3,2642E-06	1,6150E-05	-5,4225E-05	-4,5304E-05	2,8044E-05	2,7053E-05	2,0115E-05	1,4167E-05

Unter Berücksichtigung der Faktoren und Zapfprofile der einzelnen Typtage, gemittelt auf ein Jahr ergibt sich ein Zapfprofil, was abhängig von der Belegung eines Einfamilienhauses oder der Anzahl der Wohneinheiten eines Mehrfamilienhauses ist. Für die Einfamilienhäuser ergeben sich im Mittel 1 Wohneinheit je Gebäude. Für die betrachteten Mehrfamilienhäuser ergeben sich 13 Wohneinheiten je Gebäude. Für Deutschland werden nach Bundeszentrale für politische Bildung (BpB, 2021) 1,92 Personen je Haushalt angesetzt. In der Berechnung wird der gerundete Wert von 2 Personen je Wohneinheit gewertet. Nach VDI 4655 ergeben sich für einen 2 Personenhaushalt 1000 kWh Jahresenergiebedarf im Einfamilienhaus. Für die Mehrfamilienhäuser ein Jahresenergiebedarf von 13.000 kWh unter Berücksichtigung eines Jahresenergieverbrauchs von 1000 kWh je Wohneinheit.

Unter Betrachtung des Zapfprofils nach VDI ergeben sich für zwei Personen Haushalte ein Warmwasserbedarf von circa 73 l am Tag mit einer Zapftemperatur von mindestens 42 °C. Für die Betrachtung des Mehrfamilienhauses ergeben sich circa 957 l Warmwasser mit einer Temperatur von mindestens 42 °C.

Die Wasservolumina ergeben sich aus nachfolgender Berechnungsformel.

$$V_{TWE, TT} = \frac{Q_{TWE, TT}}{c_{p,W} \cdot \rho_W \cdot \Delta\theta_{TWE}} \cdot 1000 \frac{l}{m^3} \quad (9)$$

Mit

$V_{TWE, TT}$ Warmwasservolumen in $\frac{l}{d}$ je Typtag

$Q_{TWE, TT}$ Energiebedarf zur Trinkwassererwärmung je Typtag in kWh

$c_{p,W}$ spezifische Wärmekapazität des Wassers in $\frac{Wh}{kg \cdot K}$ (vereinfacht 1,163)

ρ_W Dichte des Wassers in $\frac{kg}{m^3}$

$\Delta\theta_{TWE}$ Temperaturdifferenz zwischen Warm – und Kaltwasser in K

Unter Betrachtung der Norm DIN EN 12831-3 wird entsprechend nachfolgend dargestellter Tabelle der Warmwasserverbrauch für Ein- und Mehrfamilienhäuser empfohlen.

Tabelle 19 - Warmwasserbedarf nach Gebäudeart

Art des Gebäudes	$V_{W,f;day}$ [Liter erwärmtes Trinkwasser je Person und Tag]
Wohngebäude (einfache Unterkunft)	25 - 60
Wohngebäude (Luxus-Unterkunft)	60 - 100
Einfamilienhäuser	40 - 70
Wohnungen	25 - 30

Für Einfamilienhäuser, einer Wohneinheit mit zwei Personen im Haushalt ergeben sich 80 bis 140 l Warmwasserbedarf mit einer Mindestzapftemperatur von 42 °C. Die mittels VDI ermittelten 73 l Warmwasser für eine Wohneinheit orientieren sich an der untersten Vorgabe der DIN EN 12831-3. Für die Berechnung im Simulationsprogramm und einem zunehmenden Warmwasserkomfort wird von einem Warmwasserverbrauch für Einfamilienhäuser von 140 l je Tag ausgegangen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse für Mehrfamilienhäuser werden 13 Wohneinheiten mit je zwei Personen berücksichtigt. Es ergibt sich ein Warmwasserbedarf je Gebäude von 650 bis 780 l. Mittels VDI wurden circa 950 l ermittelt. In Bezug auf die Berücksichtigung von Gleichzeitigkeitsfaktoren und dem zunehmenden Bedarf an Warmwasser, wird ein Warmwasserbedarf von 800 l je Mehrfamilienhaus und Tag zugrunde gelegt.

Unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Tagesvolumina werden im nachfolgenden Zapfprofile für einzelne Konstellationen betrachtet. Die Aufteilung der

Zapfprofile erfolgt in stündlich untergliederte prozentuale Anteile. Der stündliche Wasserverbrauch ist vom Tagesgesamtverbrauch abhängig.

Für die Betrachtung werden fünf unterschiedliche Zapfprofile herangezogen.



Abbildung 25: Trinkwarmwasserzapfprofil Tagesnutzung

Anhand des Zapfprofils „Tagesnutzung“ wird ein Szenario unterstellt, an denen Personen ganztägig im Haus sind. Es werden vermehrte Zapfmengen für die Morgen-, Mittag- und Abendstunden herangezogen. Denkbar wäre dieses Szenario in Einfamilienhäusern während den Ferien oder als Betreuung der Enkelkinder im Hause der Großeltern.

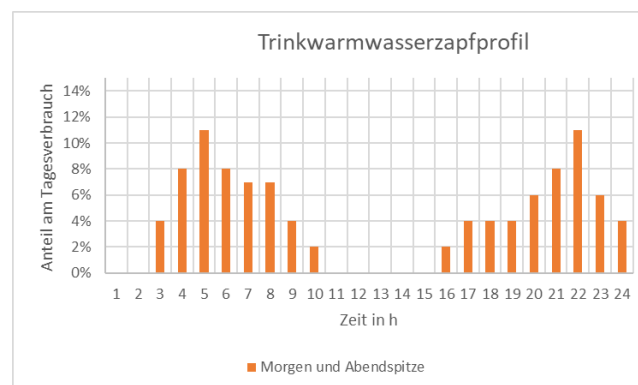


Abbildung 26: Trinkwarmwasserzapfprofil Morgen- und Abendspitze

Für das Zapfprofil „Morgen- und Abendspitze“ werden ausschließlich Zapfvorgänge in den Morgen- und Abendstunden herausgestellt. Die Zapfmaxima treten in den Zeiten von 5 und 22 Uhr auf. Hier wird unterstellt, dass ein Tagesarbeiter am Morgen und Abend die Dusche benutzt. Ein solches Zapfprofil ist für voll arbeitstätige Besitzer eines Einfamilienhauses denkbar.

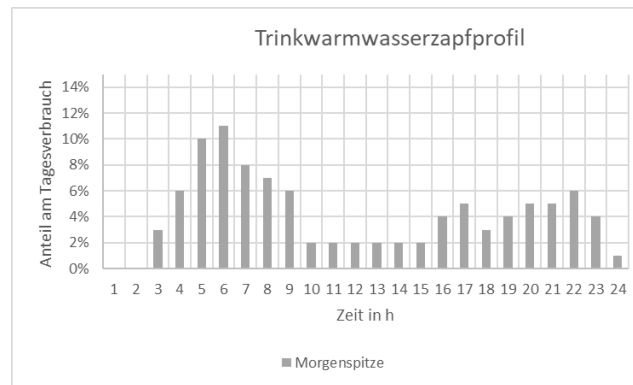


Abbildung 27: Trinkwarmwasserzapfprofil Morgenspitze

Mit der Darstellung des Zapfverhaltens „Morgenspitze“ wird eine vermehrte Nutzung des Warmwassers in den Morgenstunden eines Tages unterstellt. Für diesen Fall soll die Auswirkung der Trinkwarmwasserspeicherung genauer betrachtet werden. Da zu den Zeiten des erhöhten Bedarfs während der Morgenstunden, typischerweise die in Betrachtung des Tagestemperaturverlaufes niedrigsten Temperaturen zu erwarten sind. Denkbar ist dieses Zapfverhalten ebenfalls für Einfamilienhäuser, in denen lediglich in den Morgenstunden geduscht wird.

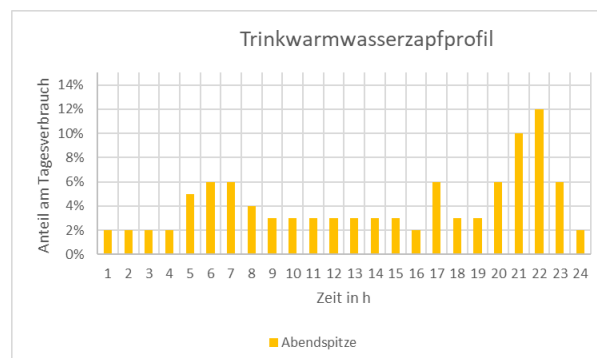


Abbildung 28: Trinkwarmwasserzapfprofil Abendspitze

Für das Zapfprofil „Abendspitze“ wird eine vermehrte Warmwasser-Zapfung in den Abendstunden unterstellt. Die Maxima der Abendstunden sind auf 17 und 22 Uhr festgelegt um Duschvorgänge nach der Arbeit und am Abend vor der Ruhezeit abzubilden. Denkbar ist dieses Zapfverhalten für Bewohner von Einfamilienhäusern, die beispielsweise in den Abendstunden oder nach der Arbeit Warmwasser benötigen.

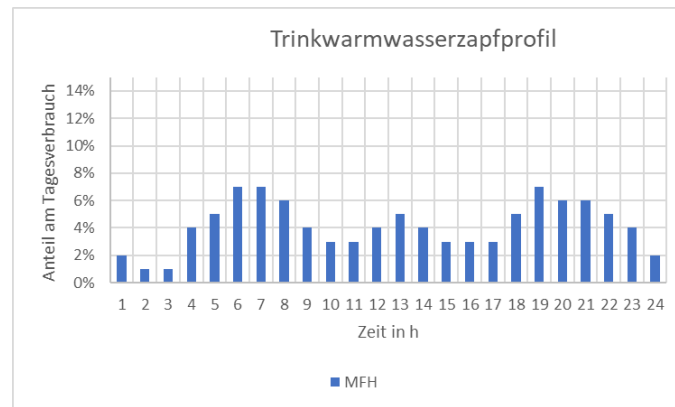


Abbildung 29: Trinkwarmwasserzapfprofil MFH

Im fünften Beispiel „MFH“ wird ein Zapfprofil mit ganztägiger Warmwassernutzung unterstellt. Auf Grund der höheren Belegungszahl des Mehrfamilienhauses ist es möglich, dass sich einzelne besondere Zapfprofile vermischen. Demnach sind die Maxima der Hauptzapfzeiten am Morgen, gegen Mittag und Abend nicht extrem ausgeprägt und heben sich nur leicht von der durchschnittlichen Zapfmenge ab. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [14].

2.3.2.1 Trinkwarmwasserspeicher

Für die Warmwasserbereitung werden zwei Alternativen betrachtet. Die Warmwasserbereitstellung mittels Frischwasserstation über den bestehenden Pufferspeicher und die Bereitstellung über einen Separaten Trinkwarmwasserspeicher mit den Volumina 140 und 800 l. Ähnlich dem Speichermodell für die Heizung der Simulationssoftware Polysun werden Speicher für die Trinkwarmwasserbereitung ausgewählt, diese unterscheiden sich von den Pufferspeichern in einer weiteren Komponente, der Innenliegenden Heizwendel.

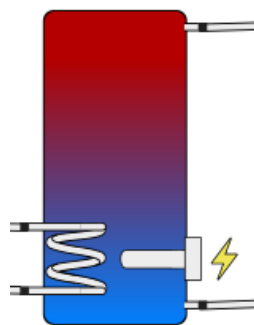


Abbildung 30: Warmwasserspeicher

- X_5 : 5 % / X_8 : 95 %

- Wendeltauscher, oberer Anschluss bei 30 % (klein: 1,8 m² Wärmeüberträgerfläche und groß: 5,4 m²)
- Mit Elektroheizstab (klein: 2 und groß: 10 kW) bei 80 %

Für diese Verschaltung ist zu beachten, dass die Warmwasseraustrittstemperaturen von zentralen Trinkwarmwasserbereitern größer gleich 60 °C ist. Für zentrale Warmwasserbereiter mit einem hohen Warmwasseraustausch, für die der Warmwasseraustausch innerhalb von drei Tagen nachvollzogen werden kann, können Temperaturen größer gleich 50 °C eingestellt werden. Einstellungen unter 50 °C sind zu vermeiden. (DIN 1988-200 , 2012-05)

Für die Betrachtung der Speichergrößen sind ebenfalls die Speicherverluste zu betrachten. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [12].

2.3.2.2 Frischwasserstation

Die Frischwasserstation besteht aus den Komponenten Pumpe, Plattenwärmetauscher, Dreiwegemischventil, sowie einer Pumpensteuerung und einer Dreiwegemischventil-Steuerung. Ein Schema kann nachfolgender Abbildung entnommen werden.

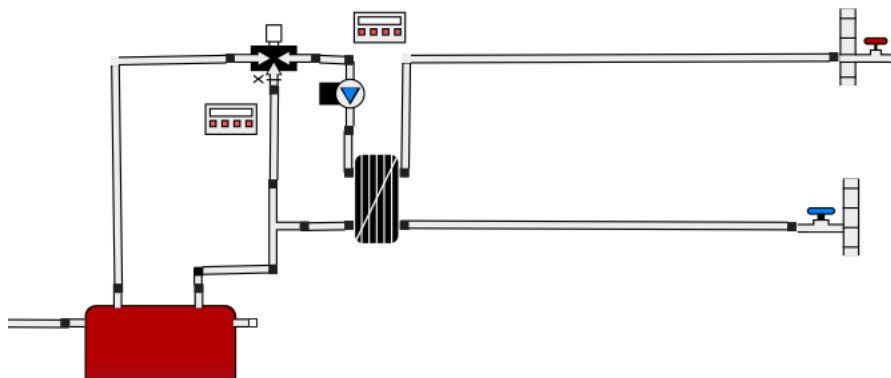


Abbildung 31: Schema Frischwasserstation

Vorteil dieser Verschaltung sind geringere Warmwassertemperaturen. Unter Berücksichtigung einer Warmwasseraustrittstemperatur von mindestens 45 °C am Auslauf, kann der Speicher je nach Wärmetauscherleistung und Bereitstellungsverlusten für die Versorgung von Entnahmestellengruppen auf Temperaturen größer gleich 50 °C am Trinkwassererwärmeraustritt gehalten werden. Dezentrale Durchfluss-Trinkwarmwasserbereiter können ohne weitere Anforderungen betrieben werden, wenn das nachgeschaltete Leitungsvolumen von 3 l im Fließweg nicht überschritten wird. (DIN 1988-200 , 2012-05)

Für die Regelung der Pumpe werden vier feste und zwei optionale Eingabegrößen definiert. Zu den festen Vorgabewerten gehören die Eintrittstemperatur der Primär- und Sekundärseite, sowie der Durchsatz der Sekundärseite und der Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmetauschers. Optional kann eine variable Solltemperatur hinterlegt und ein zweiter Durchsatz der Sekundärseite hinzugefügt werden. Der Steuerausgang verfügt über eine Pumpensteuerung als Leistungsangabe und den zugehörigen Durchsatz. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [12].

2.3.3 Wärmeübergabesysteme

Für die Wärmeübergabe werden zwei verschiedene Systeme betrachtet. Dabei handelt es sich um die Beheizung mittels Fußboden- und Radiatorheizung für die eine Systemtemperatur von 35/25 und 55/45 ausgewählt wurde. Die Auslegung der Anzahl der Flächenheizungselemente erfolgt automatisch über die Software. Die Abgabeleistung pro Heizkreis und Heizkörper ist auf 1000 W festgelegt.

Die Wärmeübergabesysteme werden über eine Heiz- und Kühlsteuerung geregelt. Diese Steuerung regelt eine Pumpe, sowie einem Dreiwegeventil. Die Eingangsgrößen des Reglers greifen auf die aktuelle Außentemperatur, eine Durchsatzvorgabe des Heizkreises, sowie Soll- und Ist-Raumtemperatur sowie das für den Mischer relevante obere und untere Temperaturniveau. Die Ausgabegrößen der Regelung beziehen sich auf den Pumpenstatus in Prozent sowie einem optionalen Schalter und der Durchsatzvorgabe für die Heizkreispumpe. Wenn ein Mischventil in der Regelung integriert ist, so wird die Ventilstellung ausgegeben.

2.3.4 Hydraulik, Komponenten

Im nachfolgenden werden die Anlagenkomponenten der einzelnen Hydrauliken genauer betrachtet und beschrieben.

2.3.4.1 Pumpen

Das Pumpenmodell basiert auf einer Pumpenkennlinie. Bei Nichteinsatz der Pumpe sperrt diese. Für die Pumpen können drei Varianten unterschieden werden.

- Regelung anhand des Druckverlustes der Anlage
- Eingabe eines fixen Durchsatzes
- Regelung des Durchsatzes mittels Pumpensteuerung

2.3.4.2 Dreiwegeventile

In der Simulation werden die Dreiwegeventile über eine programmierbare oder vorgegebene Steuerung als Schalt- und Mischventile verwendet. Bei den Mischer-Regelungen verfügt die Übersicht des Reglers über drei Regeleingänge bestehend aus dem oberen, unterem Soll-Temperaturniveau. Die Ausgabegröße wird über einen prozentualen Einstellwert für das Dreiwegeventil dargestellt. Bei der Verwendung als Schaltventil gibt es lediglich die Stellungen 0 und 1, für voll geöffnet und voll geschlossen.

2.3.5 Wärmepumpen

Die Simulationssoftware Polysun bietet zahlreiche Möglichkeiten Wärmepumpen verschiedener Hersteller abzubilden und in Simulationen zu berücksichtigen. Für die Simulationsbetrachtung sind Luft/Wasser-Wärmepumpen relevant. Diese Komponente basiert auf den Eingaben der Herstellerdaten entsprechend der Prüfnorm EN 255 und EN 14511 für vordefinierte Stützstellen. Das Vereisungs- und Abtauverhalten wird in der Simulation berücksichtigt, wenn in der elektrischen Leistungsaufnahme an den Stützstellen die elektrische Leistung für die Abtauzyklen mitberücksichtigt ist. Anfahrverluste der Wärmepumpe werden im Modell nicht berücksichtigt. Bei der Wahl der modulierenden Wärmepumpen wurde auf den Hersteller Vaillant zurückgegriffen, da für diesen umfangreiche Daten zur Verfügung stehen und Abrufbar sind. Des Weiteren bietet die Simulationssoftware für diesen Hersteller leistungsgeregelte Pumpen, sowie eine umfangreiche Datenvielfalt. Als Grundlage der Modulationsfunktionen dienen die Ausführungen der schweizerischen Eidgenossenschaft (Fierz, Witzig, Gasser, & Welling, 2013-12) (Gasser, et al., 2011-12). Betrachtet wird die Wärmepumpen-Generation VWL .../6 in verschiedenen Leistungsstufen entsprechend der erforderlichen Heizleistung im Bivalenzpunkt von – 7 °C. Der Bivalenzpunkt wurde entsprechend der Norm für die kältere Heizperiode gewählt, mit einer Grenzbetriebstemperatur von -15 °C und einer Bezugsauslegungstemperaturbedingung von -22 °C (DIN EN 14825, 2019-07). Für die Wärmebereitstellung werden nachfolgende Modelle vorausgewählt.

Tabelle 20: Auswahl Wärmepumpen Vaillant (aroTHERM plus, 2021-03)

gewähltes Wärmepumpenmodell	Einheit	VWL 45/6 A 230V S2	VWL 85/6 A 230V S2	VWL 155/6 A 230V S2
Kältemittel		R290	R290	R290
Kältemittelmenge	kg	0,6	0,9	1,3
Kompressortyp		Rollkolben	Rollkolben	Scroll
Arbeitstemperaturen	°C	Min -25 °C, Max 46 °C		
max. Vorlauftemperatur	°C	75	75	75

Die Wärmepumpen des Typs aroTHERM plus .../6 oder VWL .../6 verfügen über eine integrierte Hocheffizienzpumpe, integrierte Umweltenergieertragsanzeige, elektronisches Expansionsventil, Geräuschminderungsfunktion und einem 4 Wege Umschaltventil (Dieses wird in der Simulation mit Hilfe von zwei Dreiwegeventilen dargestellt). Bei den Wärmepumpen handelt es sich um Modelle in Monoblockbauweise die Vorlauftemperaturen von bis zu 75 °C erreichen können. Die zusätzliche Bezeichnung S... steht für die aktive Kühlfunktion der Geräte. Für die Wärmepumpe wird das natürliche Kältemittel R290 mit einem Global-Warming-Potential (GWP) von 3 verwendet. Auf die Betrachtung weiterer Kältemittel wird an dieser Stelle verzichtet, um die Vielfalt der Variationen gering zu halten. Weitere technische Merkmale und Vorgaben für die Aufstellung des Gerätes werden in der Simulation nicht berücksichtigt und sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Die Wärmepumpen sollen monovalent oder bivalent-parallel unter Nutzung eines Heizstabes simuliert werden.

Für die Gebäudetypen ergeben sich nachfolgende Varianten. In der Tabelle wurde ein Faktor ergänzt, mit diesem Faktor kann die Leistung eines Wärmeerzeugers um den Faktor multipliziert, erhöht werden.

Tabelle 21: Auswahl der Wärmepumpen für die Gebäudetypen

Typ		EFH 1	EFH 2	EFH 3	MFH 1	MFH 2	MFH 3	EFH 2.1	EFH 3.1
Lüftungswärmeverlust	kW	1,94	1,67	1,05	6,40	11,37	7,06	1,67	1,05
Transmissionswärmeverlust Hat	kW	12,42	7,42	2,89	32,28	38,96	11,80	7,42	2,89
Gebäude-Heizlast	kW	14,36	9,10	3,94	38,69	50,32	18,86	9,10	3,94
erforderliche Heizleistung (bei -7 °C bei θ_e -14 °C und θ_i 20 °C)	kW	11	7	3	31	40	15	7	3
Anzahl-Faktor	n	1	1	1	2	3	1	1	1
gewähltes Wärmepumpenmodell		VWL 155/6 A 230V S2	VWL 85/6 A 230V S2	VWL 45/6 A 230V S2	VWL 155/6 A 230V S2	VWL 155/6 A 230V S2	VWL 155/6 A 230V S2	VWL 85/6 A 230V S2	VWL 45/6 A 230V S2

Bei der Verwendung des Faktors ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Faktor immer vollumfänglich berücksichtigt wird. Ein Ausschaltbetrieb einzelner Wärmepumpen oder die Vernetzung als Kaskade lässt sich somit nicht abbilden. Für die Simulation werden die hinterlegten Stützpunkte einer vom Hersteller zur Verfügung gestellten Prüfdatei entnommen. Für diese ist zu erwähnen, dass die

Datenpunkte weit umfassender sind als für die Norm verlangt, was für den Hersteller und die Simulationssoftware spricht, da für die Simulation viele Stützpunkte zur Verfügung stehen. Anhand der nachfolgenden Abbildung sind ausgewählte Leistungsstufen in Abhängigkeit zur Außentemperatur dargestellt. Die Graphen mit den als Dreieck gekennzeichneten Stützpunkten berücksichtigen die Systemtemperatur 35/25, mit den Punkten wird das System 55/45 dargestellt. Für die Betrachtung der Leistung und Leistungsabgabe im Teillastbereich ist berücksichtigen, dass die Stützstellen der Herstellerdaten für die maximale Vorlauftemperatur des Systems aufgenommen worden. Eine übliche Anpassung der Vorlauftemperatur entsprechend der Außentemperatur ist nicht dargestellt, wirkt sich jedoch auf die Leistung und den tatsächlichen Energieverbrauch der Wärmepumpe aus. Demnach sind bessere COP-Werte für den Teillastbetrieb zu erwarten. Der graue Graph dient als Darstellung der erforderlichen Gebäudeheizlast entsprechend der Außentemperatur. Eckpunkte für die Bestimmung bilden die Heizlastdaten der Wohngebäudetypologie für die festgelegte Normaußentemperatur von $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Heizgrenze wurde auf eine Außentemperatur von $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ festgelegt.

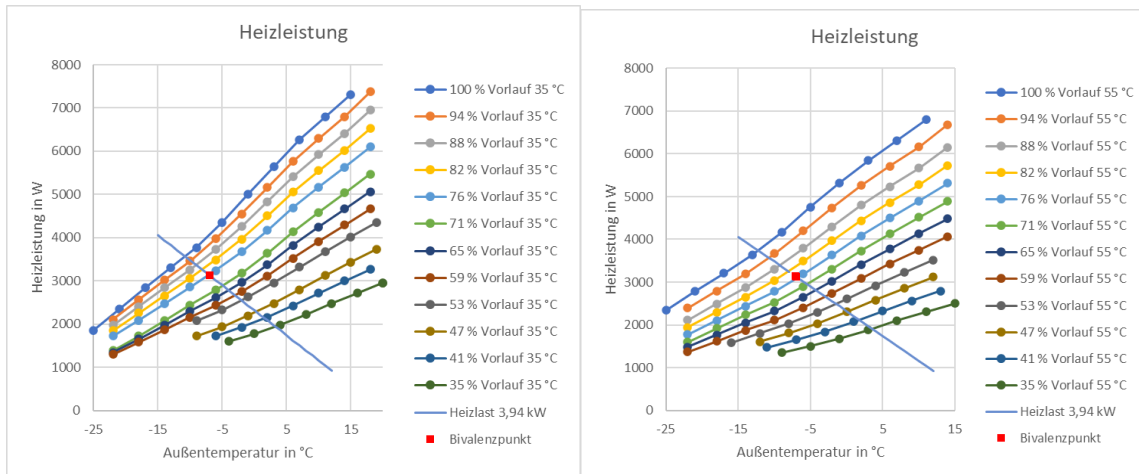


Abbildung 32: Leistungsstufen VWL 45/6 für Systemtemperatur 35 und $55\text{ }^{\circ}\text{C}$

Entscheidend für den Einsatz der Wärmepumpe ist die Wärmeleistungsabgabe im festgelegten Auslegungspunkt von $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Für beide Vorlauftemperaturen kann hier ein Wert größer 4 kW ermittelt werden. Die Wärmepumpe moduliert im Bereich der Leistungsstufen 30 bis 100 Prozent. Anhand des blau dargestellten Graphen ist die erforderliche Heizleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur dargestellt. Für diesen Auslegungsfall wird deutlich, dass die Wärmepumpe im angestrebten Bivalenzpunkt von $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rote Markierung) die erforderliche Gebäudeheizlast für

Radiator und Flächenheizung decken kann. Zu berücksichtigen ist, dass die geringste Leistungsstufe in den Übergangsmonaten deutlich über der erforderlichen Heizleistung liegt. Es ist davon auszugehen, dass für Wärmeübergabeflächen mit geringer Speicherefähigkeit und leichten Gebäuden ein Taktverhalten zu erwarten ist. Für diesen Fall ist ein entsprechendes Speichervolumen vorzuhalten, was in der Simulation mit Hilfe der Großspeicher abgedeckt werden soll.

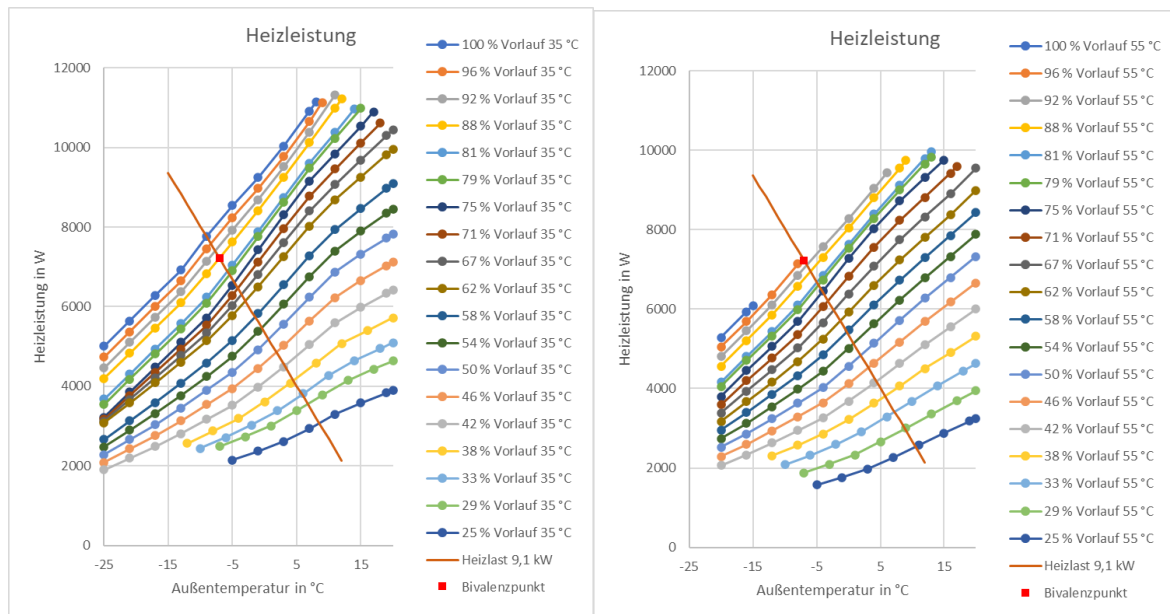


Abbildung 33: Leistungsstufen VWL 85/6 für Systemtemperatur 35 und 55 °C

Für die Wärmepumpe VWL 85/6 ist auffällig, dass auch hier die Leistungsstufe im Bivalenzpunkt -7 °C für beide betrachteten Wärmeübergabesysteme ausreichend ist. Der Leistungsregelbereich der Wärmepumpe liegt ebenfalls im Bereich von 30 bis 100 Prozent. Für diese Anlage ist deutlich, dass die Leistung in Volllast für eine Vorlauftemperatur von 55 °C deutlich höhere Abgabeleistungen erzielen kann als für eine geringere Vorlauftemperatur. Dies ist vor allem für die Leistungsstufen 100 und 75 Prozent deutlich zu erkennen. Im Teillastbereich ist erneut zu erkennen, dass die Leistungsabgabe an das System der geringsten Stufe zu hoch ist. Einer Taktung der Anlage ist mittels Speicherlösung entgegenzuwirken.

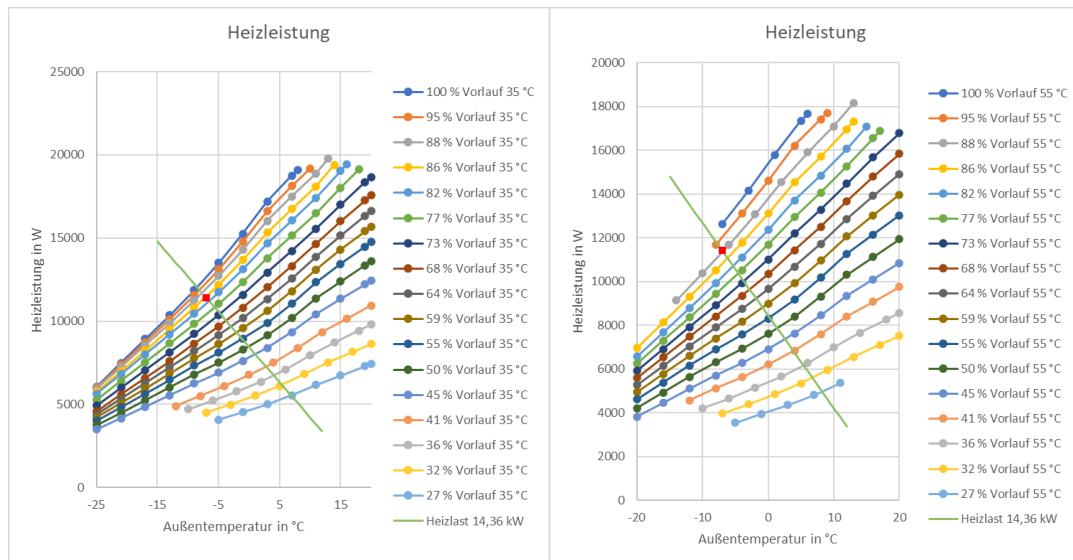


Abbildung 34: ausgewählte Leistungsstufen VWL 155/6 für Systemtemperatur 35 und 55 °C

Für die Wärmepumpe VWL 155/6 sind die Leistungsstufen anhand der Herstellerangaben, die für die Simulationssoftware Polysun hinterlegt sind, in voranstehender Abbildung dargestellt. Auch für diese Anlage ist es wichtig, dass im Bivalenzpunkt für eine Außentemperatur von -7 °C die erforderliche Heizleistung ohne weitere Zusatzenergie bereitgestellt werden kann. Die Deckung der Heizlast im Bivalenzpunkt (rote Markierung) ist gegeben. Für den Übergangsbereich ist ebenfalls eine höhere Leistungsabgabe als erforderlich zu verzeichnen. Ein entsprechendes Puffervolumen ist vorzusehen. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [15].

Da die Angabe der Stützpunkte für die Leistungsstufen entsprechend dem Softwareanbieters Vela Solaris (Polysun) den Daten der Hersteller entsprechen, jedoch nach kein genormtes Prüfverfahren genannt wird, werden die Daten einer Wärmepumpe (VWL 125/6) mit den Herstellerangaben entsprechend der Heatpumpkeymark und der zugehörigen Norm DIN EN 14825 verglichen. Die DIN EN 14825 dient als Grundlage der SCOP-Berechnung nach EU-Richtlinienbestimmung. Die Leistungsdaten entsprechend der Anlage DINCertco VWL 125/6 wurden entsprechend der DIN EN 14825 mit den Leistungsdaten für die Vorlauftemperaturen 35 (niedrig) und 55 (mittel) für die Bezugsauslegungstemperaturbedingungen kalt, mittel und warm, sowie den Daten für die Bivalenz- und Betriebsgrenztemperatur entsprechend der Anlage bestimmt. In den Herstellerdatenblättern sind keine weiteren Ausführungen zu den Vorlauftemperaturen genannt. Es ist demnach möglich, dass für geringere

Leistungsstufen und höhere Außentemperaturen von variablen Vorlauftemperaturen entsprechend der Norm auszugehen ist, da so bessere COP-Werte zu erreichen sind.

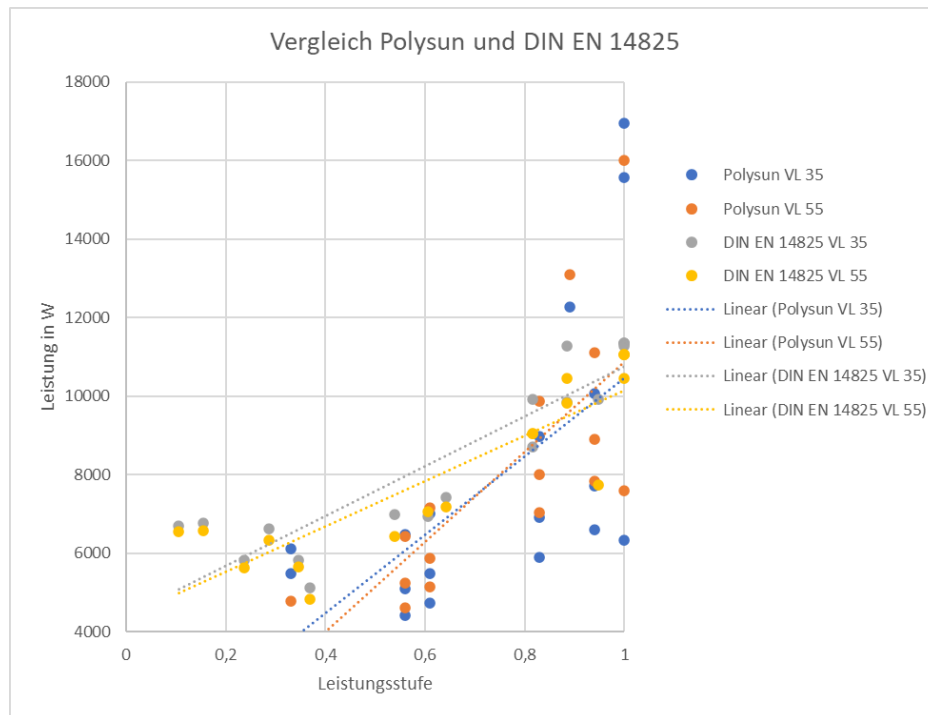


Abbildung 35: Vergleich Leistungsdaten nach Polysun und DIN EN 14825

Entsprechend der Abbildung ist die abgegebene Leistung in Abhängigkeit der Leistungsstufe berücksichtigt. Die Abgabeleistung je Stufe variiert auf Grund der unterschiedlichen Quellentemperaturen der Wärmepumpe. Die Daten der Polysun-Datenbank wurden um die entsprechenden Leistungsstufen und Verdampfer-Temperaturen eingegrenzt. Der Verlauf der Polysun-Graphen ist steiler, da hohe Leistungsstufen bei hohen Außentemperaturen berücksichtigt werden und geringe Leistungsstufen unter 30 % nicht berücksichtigt wurden (Regelbereich). Unter Ausblendung dieser Randgebiete ergibt sich ein ähnlicher Verlauf für die als Beispiel geltende Wärmepumpe VWL 125/6. Auf Grund der höheren Informationsdichte der Polysun Daten wird auf die Erstellung einer eigenen Stützdatei verzichtet und auf die hinterlegten Daten zurückgegriffen.

Um die Simulation entsprechend der Aufgabenstellung abzubilden ist es notwendig eine modulierende Wärmepumpe zu hinterlegen und zu programmieren. Für die Modulation gibt es drei verschiedene Stufen. Über die Stufe „Nach Außentemperatur“ wird die Wärmepumpe anhand der vorhergehenden Stützstellen definiert, sodass eine Anpassung an den tatsächlichen Wärmebedarf nicht abgebildet wird. Ergänzt

werden kann diese Betriebsweise durch einen zweistufigen Betrieb, für den eine Modulation in zwei Stufen in Bezug auf die thermische Abgabeleistung hinterlegt sind. Der für die Simulation entscheidende Modus einer stufenlosen Modulation wird als „Nach Bedarf“ bezeichnet. Für diese Betriebsweise werden Herstellerdaten mittels CSV-Datei und entsprechenden Datenpunkten für Verdampfer- (entspricht der Außentemperatur), Kondensatortemperatur (entspricht der Vorlauftemperatur), Leistungsstufe, thermische Abgabeleistung und elektrische Leistungsaufnahme berücksichtigt. Für die Wärmepumpe im stufenlosen Modulationsbetrieb müssen die Parameter Status, Steuermodus und die zugehörigen Steuerungsausgänge mittels programmierbarer Regelung definiert werden. Für den Status werden die Steuerungswerte null und eins definiert, wobei der Wert null die Wärmepumpe, unabhängig von weiteren Eingaben ausschaltet. Anhand der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Steuermodi mit den zugehörigen Steuerungsausgängen definiert.

Tabelle 22: Betriebsmodi modulierender Wärmepumpen (Polysun Handbuch, 2022)

Beschreibung	Steuerungs- Wert	Weitere Steuerungs- Ausgänge	Funktionsbeschreibung
Fix maximale Leistung	0	-	Die Wärmepumpe läuft auf der maximalen Leistungsstufe
Wärmegeführt	1	„Geregelte Leistung Wärmerezeuger“	Die Wärmepumpe gibt möglichst die über den Steuerungswert „Geregelte Leistung Wärmerezeuger“ gewünschte thermische Leistung ab. (Default-Modus)
Stromgeführt	2	„Geregelte Leistung Wärmerezeuger“	Die Wärmepumpe nimmt möglichst die über den Steuerungswert „Geregelte Leistung Wärmerezeuger“ verfügbare elektrische Leistung auf.
Definierte Leistungsstufe	3	„Geregelte Leistungsstufe“	Die Wärmepumpe wird mit der am nächsten der „Gewünschte Leistungsstufe“ entsprechenden Leistungsstufe betrieben.

Der Modus 1 wird für die außentemperaturgeführte Vorlauftemperatur und den daraus resultierenden Leistungsbedarf genutzt. Für die Charakterisierung der Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur wird eine Heizkurve entsprechend der Beheizungssysteme und deren Systemtemperaturen hinterlegt. Die Systemtemperaturen wurden anhand des Unterpunktes Wärmeübergabesysteme auf 35/25 und 55/45 festgelegt. Für diese Systemtemperaturen ergeben sich nachfolgende Heizkurven.

Für die Heizkurven wurden nachfolgende linearisierte Trendlinien bei der Berechnung der Außentemperatur berücksichtigt.

$$\text{Im System 35/25: } \theta_{\text{Vorlauf}} = -0,45 \cdot \theta_e + 29 \text{ K} \quad (10)$$

$$\text{Im System 55/45: } \theta_{\text{Vorlauf}} = -1,05 \cdot \theta_e + 42 \text{ K} \quad (11)$$

Die Systemtemperaturen sind dem Heizungssystem Fußbodenheizung und Radiatorheizung zuzuordnen.

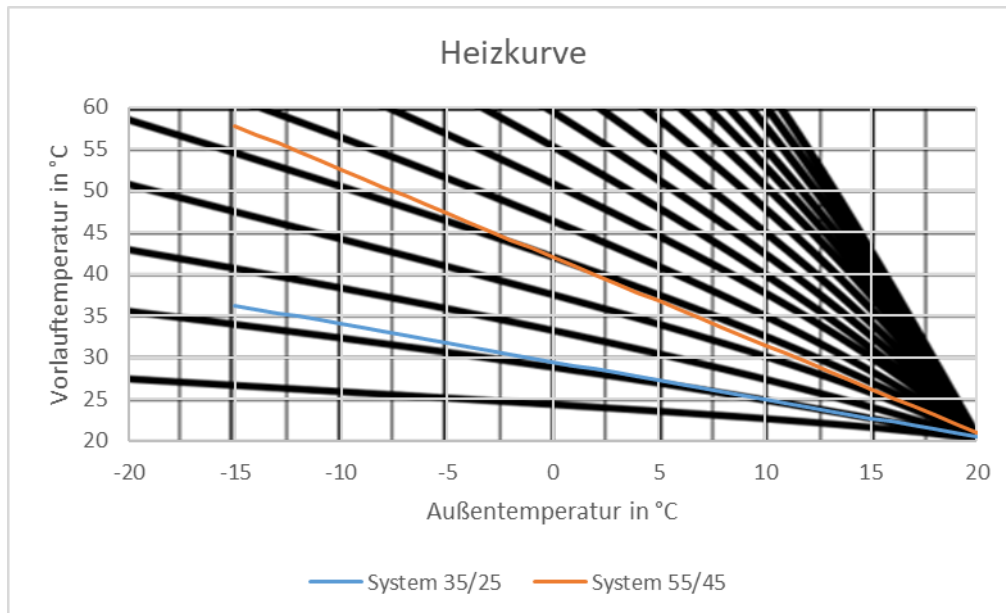


Abbildung 36: ausgewählte und linearisierte Heizkurve

Die Funktion der Heizkurve liefert die entsprechend der Außentemperatur notwendige Vorlauftemperatur. Mit Hilfe der vorgefertigten Polysun-Funktion „Matchpower“ lässt sich anhand dieser Daten die erforderliche Leistung für den wärmegeführten Betriebsmodus 1 ermitteln. Grundlage der Berechnung ist nachfolgende Berechnungsformel.

$$\dot{Q} = (\theta_a - \theta_i) \cdot c_p \cdot \frac{\dot{V}}{3600} \quad (12)$$

Mit

$\dot{Q}, \dot{Q}_{\min}, \dot{Q}_{\max}$ erforderliche Leistung in W
(minimale und maximale Leistungsangabe einstellbar)

θ_a Austrittstemperatur in °C

θ_i Eintrittstemperatur in °C

$c_{p,w}$ spezifische Wärmekapazität des Wassers in $\frac{J}{l \cdot K}$

$\dot{V}$ Volumenstrom in $\frac{l}{h}$ (Nenndurchsatz Wärmepumpe)

Für die Wärmepumpe wird eine entsprechende programmierbare Regelung eingesetzt, die im nachfolgenden Punkt genauer betrachtet werden soll.

Entsprechend oben genannter Betriebsmodi „definierte Leistungsstufe“ ist es entscheidend, für welche Leistungsstufen in Abhängigkeit von der Außen- und Vorlauftemperatur möglichst hohe COP-Werte erreicht werden können. Unter Berücksichtigung der ausgewählten Wärmepumpen ergibt sich nachfolgende Aufstellungen. Diese bestehen aus einer Tabelle, die die COP-Werte zur besseren Übersicht entsprechend ihrer Gruppierung einordnet. Die Einordnung erfolgt separat für jede Vorlauftemperatur. In der Oberflächengrafik wird das COP-Verhältnis in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und Leistungsstufe dargestellt. Die COP-Werte wurden je Leistungsstufe über den Temperaturverlauf gemittelt.

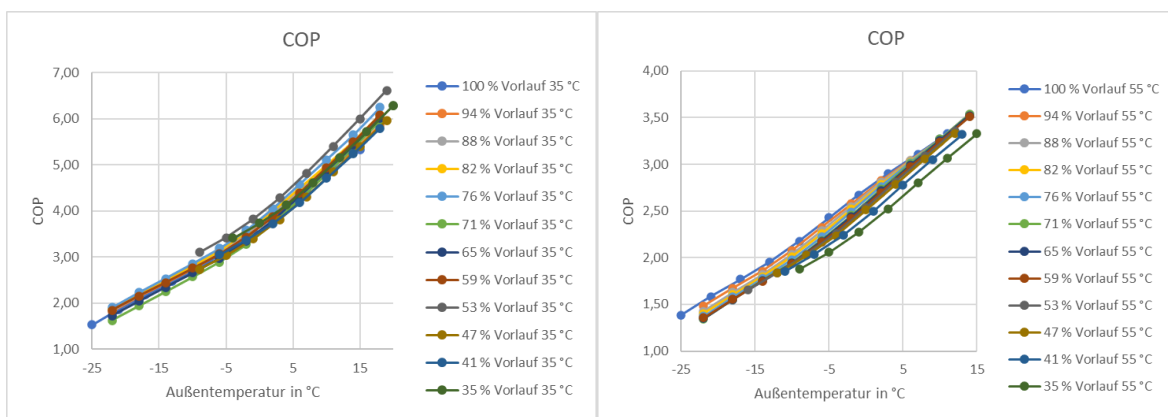


Abbildung 37: COP in Abhängigkeit von der Außentemperatur entsprechend der Leistungsstufe VWL 45/6

In der voranstehenden Abbildung sind die ermittelten COP-Werte der Vaillant VWL 45/6 dargestellt. Wie zu erwarten sind für geringere Vorlauftemperaturen höhere COP-Werte zu erwarten. Für niedrigere Vorlauftemperaturen werden die höchsten COP-Werte mit einer Leistungsstufe um 50 % erreicht. Für hohe Vorlauftemperaturen werden höhere COP-Werte für hohe Gütegrade erreicht. Für beide Anwendungen sind für niedrige Außentemperaturen ebenfalls geringe COP-Werte zu erwarten.

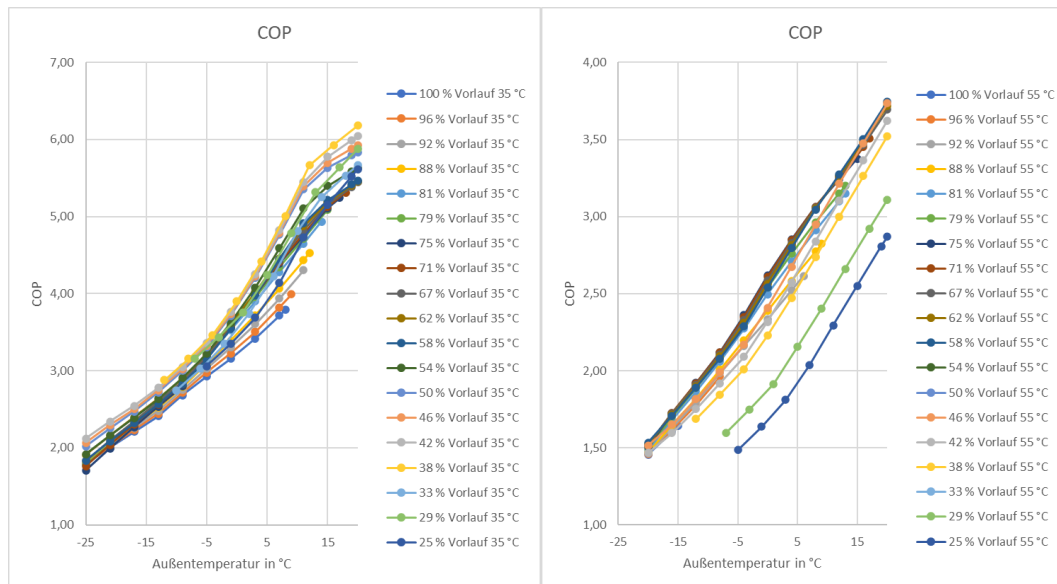


Abbildung 38: COP in Abhängigkeit von der Außentemperatur entsprechend der Leistungsstufe VWL 85/6

Für die Wärmepumpe VWL 85/6 ergeben sich ebenfalls höhere COP-Werte für geringe Vorlauftemperaturen. Für diese Wärmepumpe ergeben sich die höheren COP-Werte für die Leistungsstufe um 88 %. Die niedrigsten COP-Werte ergeben sich für die Leistungsstufe um 40 bis 50 %. Wiederum geringere Leistungsstufen ergeben bessere COP-Werte. Für die höhere Vorlauftemperatur von 55 °C ergeben sich ein Leistungsbereich von 60 bis 70 % ideal. Die geringsten COP-Werte werden für geringe Leistungsstufen unter 30 % ermittelt.

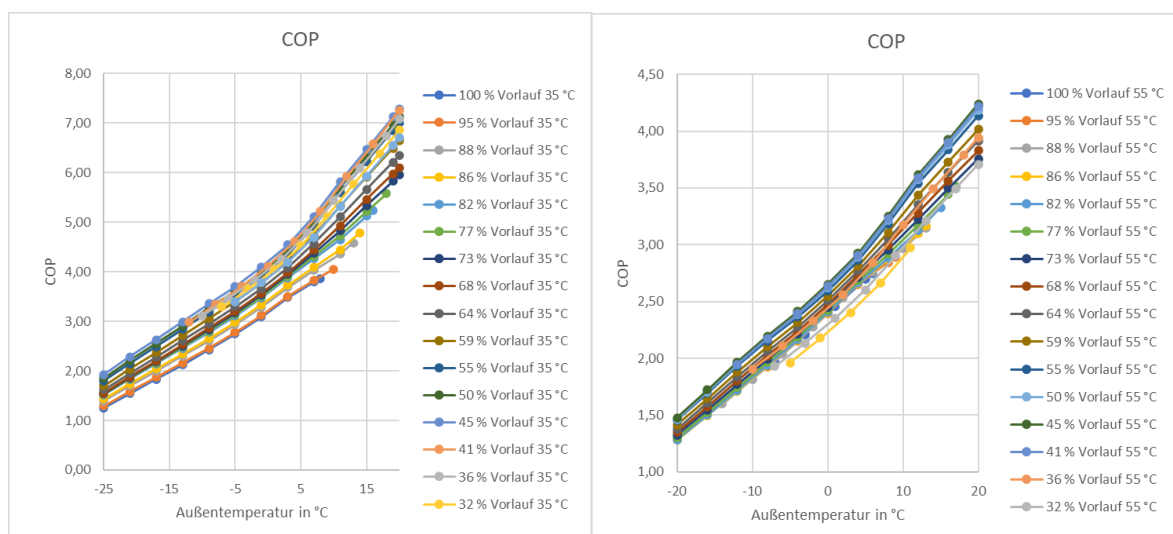


Abbildung 39: COP in Abhängigkeit von der Außentemperatur entsprechend der Leistungsstufe VWL 155/6

Für die Wärmepumpe VWL 155/6 ergeben sich für beide Vorlauftemperaturen die höchsten COP-Werte für einen Leistungsbereich von 40 bis 50 %. Die COP-Werte in

Abhängigkeit der Vorlauftemperatur liefern gleiche Ergebnisse wie die anderen betrachteten Wärmepumpen. Je geringer die Vorlauftemperatur, desto höher sind die zu erwartenden COP-Werte. Für niedrige Vorlauftemperaturen werden die geringsten COP-Werte für hohe Leistungsbereiche (90 bis 100 %) erzielt. Bei hohen Vorlauftemperaturen ergeben sich die geringsten COP-Werte für niedrige Leistungsbereiche kleiner 30 %. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [15, 23].

Aus den Ergebnissen der COP-Werte für die unterschiedlichen Wärmepumpen wird deutlich, dass die Abhängigkeit von COP und Leistungsstufe nicht linear verläuft. Dies erfordert eine weitere Betrachtung. Zur besseren Bewertung der Betriebsweise der Wärmepumpen wird der Gütegrad herangezogen.

Als Grundlage des Kältetechnischen Prozesses gilt der Carnotprozess in Form eines linksdrehenden Kreisprozesses. Betrachtet man den idealen Kreisprozess einer Anlage, so ist der carnotsche Wirkungsgrad gleich eins. Die ideale Leistungszahl bildet den Kehrwert des carnotschen Wirkungsgrad. Die reale Leistungszahl oder auch coefficient of performance (COP), gibt das Verhältnis aus thermischer zu elektrischer Leistung an. Das Verhältnis der carnotschen Leistungszahl zur realen Leistungszahl ergibt den Gütegrad.

$$\eta_c = \frac{T_h - T_k}{T_h} = 1 - \frac{T_k}{T_h} = \frac{1}{\varepsilon_{WP,Carnot}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{WP,real} = COP = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} > 1$$

$$\nu_{G,WP} = \varepsilon_{WP,real} \cdot \eta_c = \varepsilon_{WP,real} \cdot \left(1 - \frac{T_k}{T_h}\right) = \frac{P_{WP,real}}{P_{WP,Carnot}} = \frac{\varepsilon_{WP,real}}{\varepsilon_{WP,Carnot}}$$

Mit

η_c carnotscher Wirkungsgrad

T_h Verflüssigungstemperatur, Vorlauftemperatur in K

T_k Verdampfungstemperatur, Quellentemperatur in K

$\varepsilon_{WP,real}$ reale Leistungszahl der Wärmepumpe

$\nu_{G,WP}$ Gütegrad der Wärmepumpe

$P_{WP,Carnot}$ theoretische Wärmepumpenleistung nach Carnot in kW

$P_{WP,real}$ reale Wärmepumpenleistung in kW

$\varepsilon_{WP,Carnot}$ ideale Leistungszahl der Wärmepumpe nach Carnot

Für die unterschiedlichen Wärmepumpen ergeben sich nachfolgende Ergebnisse. Zu beachten ist, dass der Gütegrad der Wärmepumpe zu einem großen Teil in Abhängigkeit zum Kompressor- und Motorwirkungsgrad der Wärmepumpe steht. Demnach beschreibt die Einteilung der Stufen den entsprechenden Drehzahlstufen des Kompressors bedingt durch die elektrische Stromaufnahme. Weiterhin wird der Gütegrad vom Wirkungsgrad und der Anzahl der verbauten Ventilatoren der Verdampferseite, die Dimensionierung der Wärmeübertrager und das Vereisungsverhalten beeinflusst. Für die Größe der Wärmetauscher gilt, dass mit zunehmender Wärmeübertragerfläche der Gütegrad der Anlage erhöht werden kann, dies kann auf verminderte Vereisung und geringere Ventilatorleistungen zurückgeführt werden.

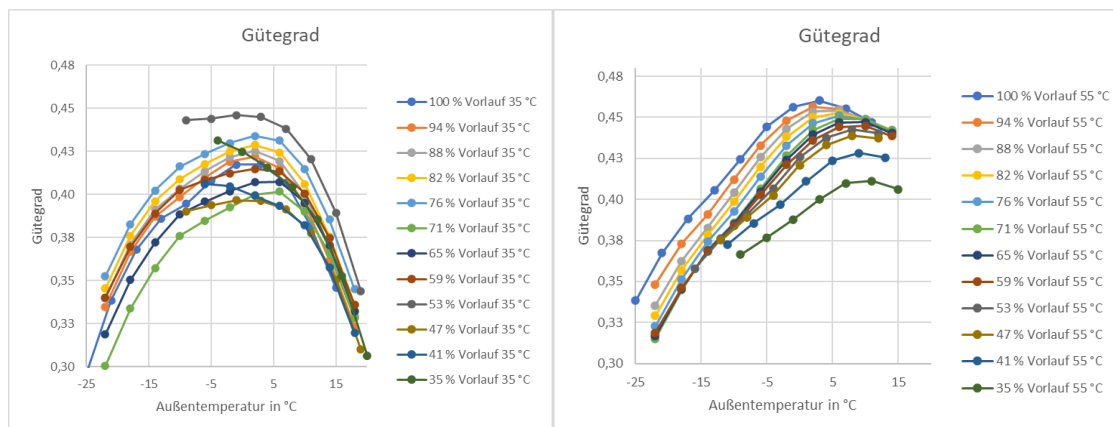


Abbildung 40: Gütegrad in Abhängigkeit zur Außentemperatur je Leistungsstufe (VWL 45/6)

Auffällig ist, dass auch die Gütegrade abhängig von der Vorlauftemperatur sind. Für die Wärmepumpe mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C ergeben sich die besten Gütegrade bei einer Leistungsstufe von 53 %. Die geringsten Gütegrade ergeben sich für eine Stufe von 71 % für kalte Außentemperaturen und bei Außentemperaturen größer 0 °C für Leistungsstufen im Bereich von 40 bis 50 %. Für höhere Vorlauftemperaturen ergeben sich ebenfalls schlechtere Ergebnisse für geringe Leistungsstufen. Der beste Gütegrad wird für die höchste Leistungsstufe von 100 % erreicht.

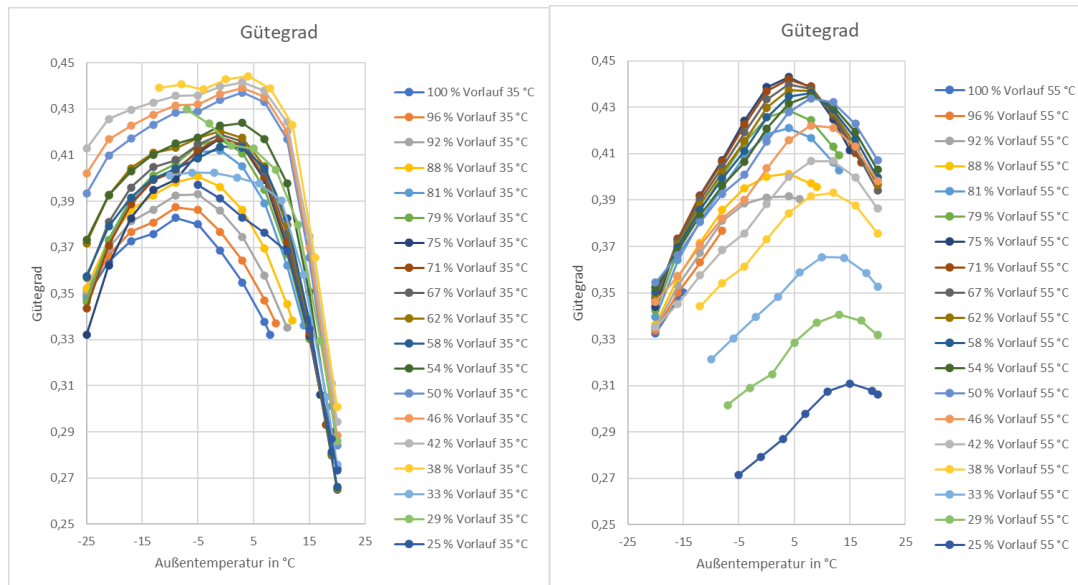


Abbildung 41: Gütegrad in Abhängigkeit zur Außentemperatur je Leistungsstufe (VWL 85/6)

Für die Anlage VWL 85/6 ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie für das Vorgängermodell. Für geringe Systemtemperaturen von 35 °C ergeben sich die höchsten Gütegrade für Leistungsbereiche um 40 bis 50 %. Verminderte Gütegrade ergeben sich für hohe Leistungsstufen größer 90 %. Für hohe Vorlauftemperaturen ergeben sich erhöhte Gütegrade für Leistungsstufen im Bereich von 65 bis 75 %. Die Gütegrade der maximalen Leistungsstufen liegen im Mittelfeld.

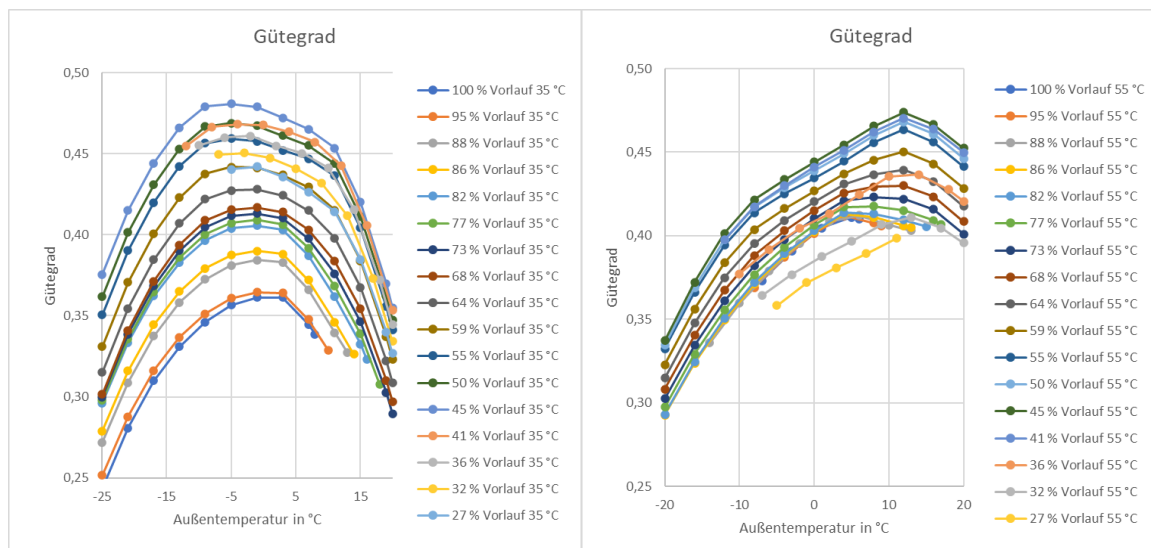


Abbildung 42: Gütegrad in Abhängigkeit zur Außentemperatur je Leistungsstufe (VWL 155/6)

Die Resultate bestätigen sich, sodass erneut hohe Gütegrade für geringe Vorlauftemperaturen bei mittleren Leistungsstufen erzielt werden. Die niedrigsten Gütegrade ergeben sich für hohe Leistungsstufen und geringe Vorlauftemperaturen.

Bei hohen Vorlauftemperaturen lassen sich die höchsten Gütegradniveaus ebenfalls für Leistungsstufen im Bereich von 40 bis 50 % erzielen. Die geringsten Gütegrade ergeben sich hier jedoch für Leistungsstufen unter 30 %.

Im Mittel lässt sich aus allen Auswertungen zusammenfassen, dass hohe Leistungsstufen für geringe Vorlauftemperaturen und geringe Leistungsstufen für hohe Vorlauftemperaturen ungünstig sind und zu geringen Gütegradniveaus führen. Der mittlere Leistungsbereich von 40 bis 70 % eignet sich nach dieser Bewertung unter Betrachtung des Gütegrades. Des Weiteren ist auffällig, dass die Abhängigkeit von Gütegrad zu Außentemperatur nicht linear, sondern eher einer umgekehrten Normalparabel folgt. Das Maximum wird je nach Vorlauftemperatur für unterschiedliche Außentemperaturen im Bereich um die 0 °C. zusammenfassend kann ergänzt werden, dass der Betrieb der Wärmepumpe in den Übergangsjahreszeiten bei mittleren Leistungsstufen zu besseren Wirkungsgraden führt. Der Gütegrad für hohe Vorlauftemperaturen sinkt mit zunehmender Außentemperatur, im Gegensatz zu niedrigen Vorlauftemperaturen moderat ab, was eine Eignung der Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung in den Sommermonaten bestätigt. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [15].

2.3.6 Anlagenschemen und Regelkonzepte

In diesem Kapitel werden die Steuerungen zusammen mit den entsprechenden Anlagenschemen betrachtet. Für diese Betrachtung werden die programmierbaren Steuerungen der Varianten betrachtet. Alle weiteren Regelorgane wurden in den entsprechend vorhergehenden Unterpunkten behandelt. In diesem Abschnitt werden vier Varianten von insgesamt acht Varianten betrachtet. Die Varianten unterscheiden sich im hydraulischen Aufbau und der Nutzung unterschiedlicher Wärmeübergabesysteme. Die Varianten mit Heizkörpern (Variante fünf bis acht) werden lediglich für die Gebäudetypen EFH eins, zwei und MFH eins, zwei betrachtet. Hintergrund sind die baulichen Gegebenheiten, wie spezifische Heizlasten größer 100 W/m² und die Unterstellung, dass für wenig bis gar nicht gedämmte Gebäude im Bestand Heizkörper verwendet werden. Der Typ EFH zwei dient als Übergangsbeispiel und wird für alle Varianten betrachtet. Die Fußbodenheizung wird für die Gebäudetypen EFH und MFH drei als alleiniges

Übergabesystem zugrunde gelegt. Die Varianten mit der Überladung der Raumtemperatur finden für die Sondervariationen EFH 2.1 und 3.1 Anwendung. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [16].

2.3.6.1 Schemen-Variante 1

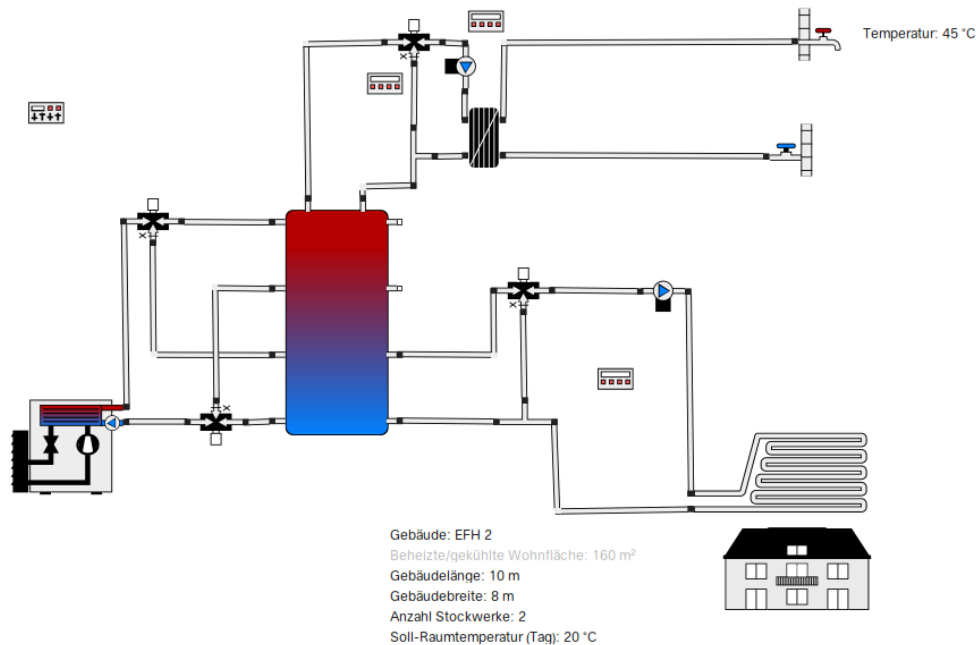


Abbildung 43: Anlagenschema Variante 1

Für Variante 1 wird ein Heizungspufferspeicher mit Frischwasserstation simuliert. Die Wärmepumpe lädt über zwei Dreiwegeschaltventile die obere oder untere Pufferzone des Speichers. Betrieben wird die Wärmepumpe über eine programmierbare Regelung. Die Frischwasserstation wird über eine Pumpen- und Mischer-Regelung geregelt und stellt Warmwasser zur Verfügung. Der Heizkreis verfügt ebenfalls über ein Mischventil mit zugehöriger Pumpe. Hier können aus dem Speicher resultierend höhere Vorlauftemperaturen auf die, für die Fußbodenheizung passende Vorlauftemperatur angepasst werden. Für die Hydraulik ist es dringend erforderlich zwei Dreiwegeschaltventile zu verwenden. Die Platzierung eines T-Stücks anstelle des Dreiwegeschaltventils, das für die Zusammenführung der Rückläufe der Ladekreise verantwortlich ist, führt zu Simulationsfehlern der Software und produziert unerklärlich hohe Speichertemperaturen.

Ziel dieser hydraulischen Verschaltung ist es, die Wärme- und Bereitschaftsverluste des Speichers gering zu halten und einen hohen Warmwasserkomfort mit geringen Warmwassertemperaturen zu gewährleisten. Die Einstellungen des Reglers werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 23: Regelkonzept Variante 1

Betriebs- zustand (PS)	Bedingung	Beschreibung
1	I5<(I10) AND TC=0	Speicher Schicht 10 < Warmwassersolltemperatur (45 °C) Und Zeitschaltuhr aus
2	I7<=(H1-5) AND (PS <>1 Or H8) AND TC=0 AND I4<H7	Speicher Schicht 5 <= Sollvorlauftemperatur - 5 K Und keine Warmwasserbereitung Und Zeitschaltuhr aus Und Außentemperatur (24h-Mittel) < Heizgrenze
3	TC=1 AND I5<H5	Zeitschaltuhr ein Und Speicher Schicht 10 < Überladungsgrenze TWW
4	TC=1 AND PS <> 3 AND I7<H4 AND I4<H7	Zeitschaltuhr ein Und Überladung TWW abgeschlossen Und Speicher Schicht 5 < Überladungstemperatur HK Und Außentemperatur (24h-Mittel) < Heizgrenze
5	(PS=1 AND H8) OR (PS=2 AND I8>=H1) OR (PS=3 AND I6>=H5) OR (PS=4 AND I8>=H4)	AUS TWW, I6>=(H6) Speicher Schicht 9 >= Warmwassersoll Oder Speicher Schicht 1 >= TempHeizkurve Oder Speicher Schicht 9 >= Überladungsgrenze TWW Oder Speicher Schicht 1 >= Überladungsgrenze HK

In der Regelungslogik wurden eine geringe Schalzhäufigkeit und eine lange Betriebsdauer der Wärmepumpe angestrebt. Dies wurde über Temperaturdifferenzen und unterschiedlicher Messpunkte abgebildet. Am Beispiel der Trinkwarmwasserbereitung (Betriebszustand 1) ergibt sich folgender Ablauf. Sinkt die Speichertemperatur der obersten Schicht unter die gewünschte Zapftemperatur, so beginnt die Nachheizung durch die Wärmepumpe im oberen Bereich des Speichers. Erst wenn am unteren Speicherbereich die gewünschte Warmwassersolltemperatur erreicht ist, schaltet die Wärmepumpe aus. Dieser Betrieb erfolgt nur, wenn die integrierte Zeitschaltuhr des Reglers den Wert 0 liefert, oder in anderen Worten, die Überladung des Speichers nicht stattfindet. Die Warmwasserbereitung wird immer im Vorrang betrieben. Auch bei der Überladung des Speichers wird erst der obere und dann der untere Bereich geladen.

Für die Bereitstellung der Heizwärme dient die Sollvorlauftemperatur entsprechend der Heizkurve als Vorgabe. Sinkt das Temperaturniveau des Speicherbereiches

unter die erforderliche Vorlauftemperatur abzüglich 5 K Hysterese, so schaltet die Wärmepumpe zu. Die 5 K wurden in Bezug auf die Erhöhung der Laufzeit der Wärmepumpe und die Ausnutzung der Speicherfähigkeit des Gebäudes gewählt. Der Betrieb der Wärmepumpe zur Bereitstellung des Heizenergiebedarfs ist des Weiteren von der Außentemperatur in Bezug auf die Heizgrenze und den Warmwasservorrang gekoppelt.

Die Betriebszustände 3 und 4 beschreiben die Überladung der verschiedenen Speicherzonen. Die Überladung erfolgt, wenn die Zeitschaltuhr den Wert eins liefert. Dies erfolgt in einem festgelegten Intervall in der frühen Nachmittagszeit. Die Überladung setzt ein, wenn die gewünschte Überladungstemperatur in der jeweiligen Speicherzone noch nicht erreicht ist. Mit dem Betriebszustand 5 werden die Ausschaltbedingungen der Wärmepumpe definiert. Dabei handelt es sich um Solltemperaturen einer bestimmten Speicherzone, deren Erreichung zum Ausschalten der Wärmepumpe führt.

2.3.6.2 Schemen-Variante 2

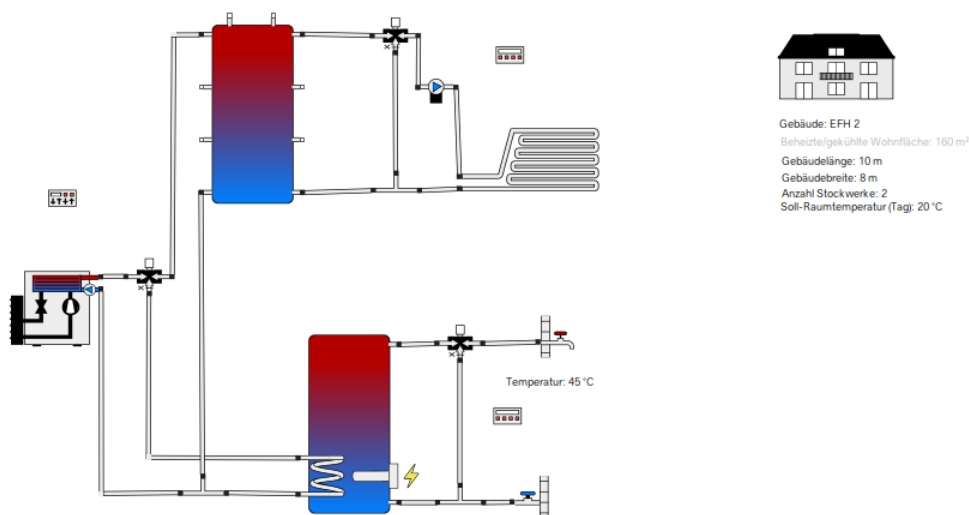


Abbildung 44: Anlagenschema Variante 2

Für diese Variante wurde eine Verschaltung mit zwei getrennten Speichern für die Warmwasserbereitung und Heizungspufferung erstellt. Die Bereitstellung der Raumwärme erfolgt über eine vorgegebene Heizkreisregelung mit separater Pumpe und einem Dreiwegemischventil. Die Einbindung eines Mischventils ermöglicht die Überladung des Speichers. Für die Bereitstellung des Warmwassers ist ebenfalls eine Mischgruppe ausgewählt. Die von der eingestellten Sollwarmwassertemperatur des Speichers auf die Zapftemperatur im System herab mischt. Beladen werden die

Speicher über ein Dreiwegeschaltventil. Für diese Hydraulik ist es ausreichend lediglich ein Dreiwegeschaltventil zu verwenden und anzusteuern. Die Wärmepumpe wird über eine programmierbare Regelung geregelt. Vorteil dieser Verschaltung ist es, dass für beide Anwendungen das jeweils gesamte Speichervolumen zur Verfügung steht. Jedoch ist zu erwarten, dass die Summe der Speicherwärmeverluste höher als bei Konfigurationen mit einem Speicher ausfallen dürften.

Das Regelkonzept dieser Anlage wird in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 24: Regelkonzept Variante 2

Betriebszustand (PS)	Bedingung	Beschreibung
1	I4<(I11) AND TC=0	Speicher PWH Schicht 12 < Warmwassersoll (45 °C) Und Zeitschaltuhr aus
2	I7<(H1-5) AND (PS<>1 OR H7) AND TC=0 AND I10<H8	Speicher Puffer Schicht 12 < Sollvorlauftemperatur - 5 K Und keine Warmwasserbereitung Und Zeitschaltuhr aus Und Außentemperatur (24h-Mittel) < Heizgrenze
3	TC=1 AND I6<=H5	Zeitschaltuhr ein Und Speicher TWW Schicht 2 < Überladungsgrenze TWW
4	TC=1 AND PS<>3 AND I9<=H6 AND I10<H8	Zeitschaltuhr ein Und Überladung TWW abgeschlossen Und Speicher Puffer Schicht 2 < Überladungsgrenze HK Und Außentemperatur (24h-Mittel) < Heizgrenze
5	(PS=1 AND H7) OR (PS=2 AND I9>=H1) OR (PS=3 AND I6>=H5) OR (PS=4 AND I9>=H6)	AUS TWW, I6>=H4 Speicher TWW Schicht 2 >= Warmwassersoll Oder Speicher Puffer Schicht 2 >= TempHeizkurve Oder Speicher TWW Schicht 2 >= Überladungsgrenze TWW Oder Speicher Puffer Schicht 2 >= Überladungsgrenze HK

Mit dieser Regellogik wurde eine lange Wärmepumpenlaufzeit angestrebt, die durch die Durchladung der zur Verfügung stehenden Speicher realisiert wird. Im Normalbetrieb werden die Speicher auf die entsprechende Vorlauftemperatur aufgeheizt und komplett geladen. Der TWW-Speicher wird ebenfalls komplett auf die gewünschte Temperatur geladen. Bei der Wahl der Betriebsweisen ist eine Trinkwarmwasser-Vorrangschaltung im Normal- und Überladungsbetrieb

vorgesehen. Auf Grund der besseren Übersichtlichkeit im Vergleich der Regelungslogiken untereinander, sind diese entsprechend gleich aufgebaut. Sie unterscheiden sich lediglich in den für die hydraulische Verschaltung relevanten Bauteilen und die Ansteuerung. Im Gegensatz zu Schema 1 werden in dieser Regelung die beiden Pufferspeicher unterschiedlich angesteuert. Die Schaltbedingungen sind mit den gleichen Temperaturniveaus versehen, es unterscheiden sich jedoch die Zonen, in denen die Temperatur ermittelt wird.

2.3.6.3 Schemen-Variante 3

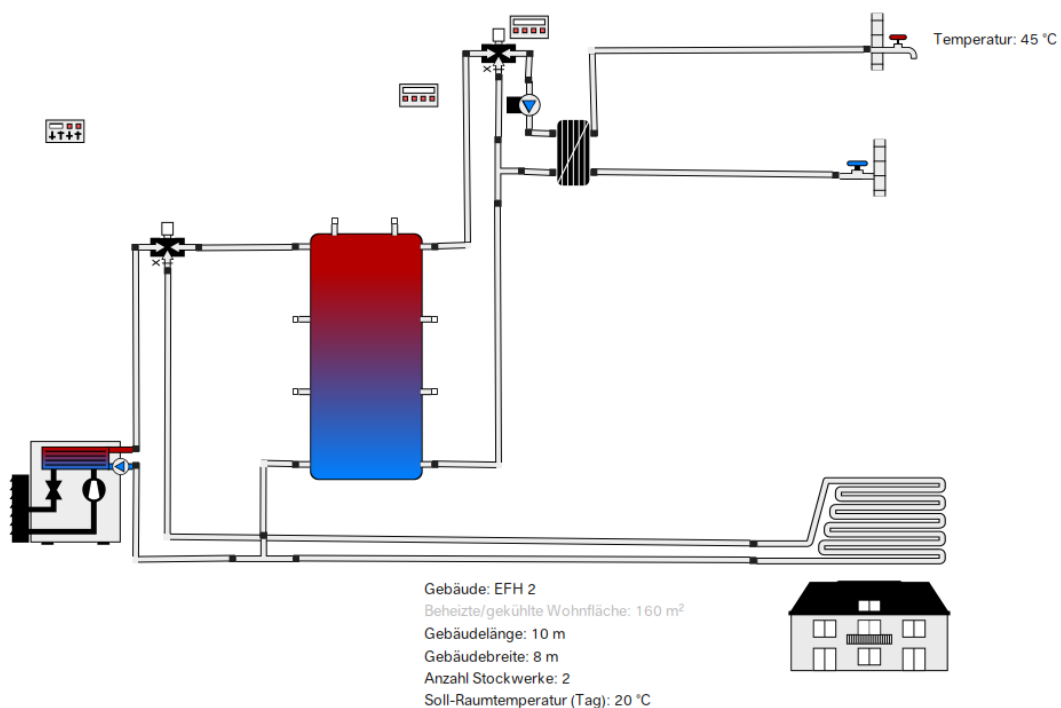


Abbildung 45: Anlagenschema Variante 3

In Variante drei wird auf einen zusätzlichen Heizungspuffer verzichtet. Die Warmwasserbereitung wird über einen Puffer und eine Frischwasserstation gewährleistet. Die Einheit der Frischwasserstation ist identisch zu Variante 1. Die Überladung erfolgt einerseits über den TWW-Speicher und die Erhöhung der Raumtemperatur mit Hilfe der Fußbodenheizung. Für diese Beispiele wird die Speicherfähigkeit der Gebäude ausgenutzt. Bei nicht ausreichendem Leistungsbedarf kann es zur Taktung der Wärmepumpe vor allem in den Übergangsmonaten kommen. Es ist sicherzustellen, dass der Mindestvolumenstrom der Wärmepumpe über die Flächenheizung gedeckt werden kann, um diesem

Taktverhalten entgegenzuwirken. Die zu erwartenden Investitionskosten sind für diese Schemenvariante vergleichsweise geringer zu erwarten, da die Anschaffung eines Speichers entfällt.

Für diese Version wurde nachfolgende Regellogik erstellt.

Tabelle 25: Regelkonzept Variante 3

Betriebszustand (PS)	Bedingung	Beschreibung
1	I5<(I10) AND TC=0	Speicher Schicht 12 < Warmwassersoll (45 °C) Und Zeitschaltuhr aus
2	I9<(I12-0.5) AND (PS <>1 Or H8) AND TC=0 AND I4<H7	Raumtemp < RaumSolltemp - 0,5 Und keine Warmwasserbereitung Und Zeitschaltuhr aus Und Außentemperatur (24h-Mittel) < Heizgrenze
3	TC=1 AND I8<H5	Zeitschaltuhr ein Und Speicher Schicht 2 < Überladungsgrenze TWW
4	TC=1 AND PS<>3 AND I9<H4 AND I4<H7	Zeitschaltuhr ein Und Überladung TWW abgeschlossen Und Raumtemp < maxRaumtemp Und Außentemperatur (24h-Mittel) < Heizgrenze
5	(PS=1 AND H8) OR (PS=2 AND I9>=I12) OR (PS=3 AND I8>=H5) OR (PS=4 AND I9>=H4)	AUS TWW, I8>=H6, Speicher Schicht 2 >= Warmwassersoll Oder Raumtemp >= RaumSolltemp Oder Speicher Schicht 2 >= Überladungsgrenze TWW Oder Raumtemp >= maxRaumtemp

Auch für die Regellogik der Variante drei ergeben sich Parallelen zu den vorgenannten Aufstellungen. Durch den Entfall des Speichers zur Pufferung des Heizwärmebedarfs, ergeben sich für die Betriebszustände, die den Heizkreis betreffen (Betriebszustand zwei, vier und fünf) gesonderte Bedingungen. Als Regelgröße dient die Raumtemperatur des Gebäudes. Als Führungsgröße werden zwei Raumtemperaturen festgesetzt. Im Normalbetrieb, der durch die Zeitschalterstellung null definiert ist, dient die Raumsolltemperatur als Führungsgröße. Für Zeiträume, in denen eine Überladung des Raumes stattfindet, dient die maximal definierte Raumtemperatur als Führungsgröße. Die Bereitstellung

von Wärmeenergie endet mit dem Erreichen der entsprechend definierten Temperatur. Zur Vermeidung eines Taktverhaltens der Raumbeheizung wird die Erwärmung des Raumes erst nach Unterschreitung einer mittleren Raumtemperatur von 19,5 °C in Kraft gesetzt. Dieser Wert kann jedoch beliebig, mit Auswirkungen auf den Wärmebedarf angepasst werden. Auch in dieser Regelung und Hydraulik hat die Warmwasserbereitung einen Vorrang gegenüber der Gebäudeerwärmung.

2.3.6.4 Schemen-Variante 4

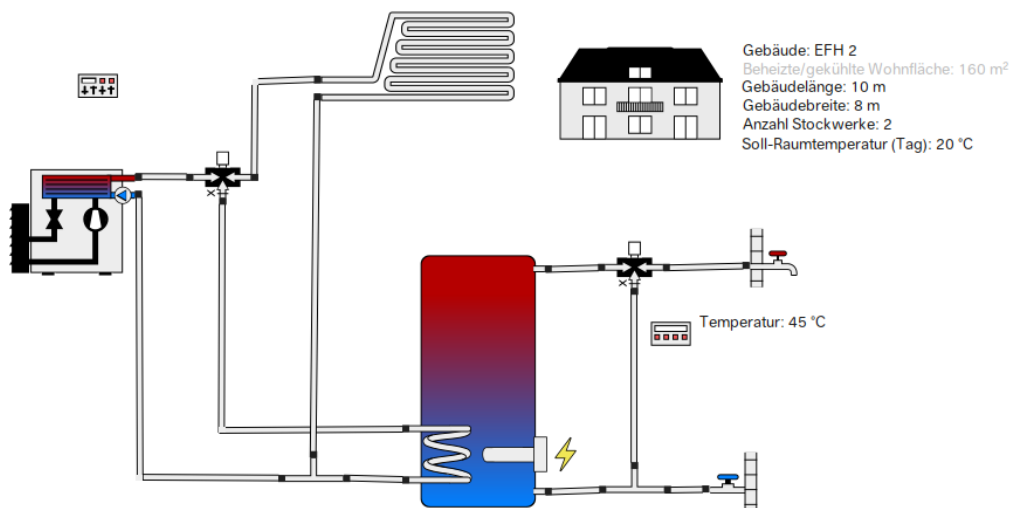


Abbildung 46: Anlagenschema Variante 4

Das Anlagenschema der Variante vier ist analog zu Variante drei zu verstehen. Diese unterscheiden sich lediglich in der Bereitstellung von Warmwasser mittels Trinkwarmwasserspeicher anstelle einer Frischwasserstation mit einem Pufferspeicher. In der Darstellung sind für die Warmwasserbereitung Heizstäbe integriert, die jedoch nicht angesteuert werden. Die Ansteuerung der Heizkreise und Warmwasserbereitung erfolgt über ein Dreiwegeschaltventil. Das Regelkonzept der Variante vier gleicht dem der zuvor beschriebenen Variante drei, mit Ausnahme der Bezeichnung des Speichers. Aus diesem Grund wird auf die genauere Beschreibung und Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

2.3.6.5 Schemen-Varianten 5-8

Für Varianten 5 bis 8 ist der Austausch des Wärmeübergabesystems von Fußbodenheizung zu Radiatorheizung mit der Änderung der Systemtemperaturen 35/25 auf 55/45 vorgesehen. Dies hat eine Erhöhung der Speichertemperatur und Speicherüberladung zu Folge. Alle Varianten werden in Bezug auf Regelung und

Hydraulik bis auf den Flächenüberträger und die entsprechende Heizkurve nicht geändert.

2.4 Variationen

Anhand des Gebäudes EFH 2 und den unterschiedlichen Schemen wurden Vorgaben ermittelt, mit denen die weiteren Gebäude und Klimaprofile betrachtet werden sollen. Variiert wurde die Anlage entsprechend der Parameter Speichergröße, Überladungszeitintervall, Überladungstemperaturen für Trinkwarmwasser und Heizungspufferung und Raumtemperaturen und in der Betriebsstufe der Wärmepumpe. Aus dieser hohen Variantenvielfalt werden die Ergebnisse zusammengetragen und in einer geringeren Variantenvielfalt für die weitere Betrachtung herangezogen.

Variationen, die auch den Grundtyp beeinflussen und Verbesserungen ergeben werden in diesen überführt. Die Ergebnisse sind dem Anhang unter Punkt 22 beigelegt.

Für die Abschätzung der Wirkungsweise der Anpassungen werden neun Parameter miteinander verglichen, dazu gehören

- Q_{aux} Energie der Wärmeerzeuger an das System in MWh
- Q_{use} Nutzenergie in MWh
- Q_{def} Energiedefizit in kWh
- E_{tot} Gesamter Stromverbrauch des Systems in kWh
- e_p Anlagenaufwandszahl
- $SCOP$ Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe
- Anzahl der Wärmepumpeneinschaltungen innerhalb eines Jahres
- Betriebsdauer eines Jahres in h
- Speicherwärmeverlust in kWh

2.4.1 Überladungstemperatur

Für die Betrachtung der Überladungstemperatur wurden Variationen in 5 Kelvin-Schritten untersucht. Dies bedeutet eine Speicherüberladung von 40 bis 55 °C für die Fußbodenheizung, 60 bis 75 °C für die Radiatorheizung und 50 bis 65 °C für die Trinkwarmwassererwärmung. Je höher die Überladungstemperatur, desto länger die Wärmepumpenlaufzeit bei sinkendem SCOP und steigenden Speicherverlusten. Die Differenz entsprechend der Leistungsaufnahme beläuft sich vom unteren Temperaturniveau auf das obere auf rund 100 kWh. In Anbetracht des geringen Mehrverbrauchs und einer entsprechend höheren Laufzeit, sowie eines höheren Komforts bei der Trinkwarmwassererwärmung wird eine Überladung des Trinkwarmwasserspeichers auf 60 °C und eine Überladung des Puffers auf 5 K über der Sollvorlauftemperatur angestrebt.

2.4.2 Leistungsstufe

Die Leistungsstufe wurde in den Schritten 35, 50, 65, 80 % untersucht. Je geringer die Leistungsstufe, desto geringer ist die Einschalthäufigkeit der Wärmepumpe. Entsprechend dem Kapitel Wärmepumpe sind die höchsten SCOP-Werte mit einer Leistungsstufe von 50 % ermittelt worden, was die Auswertung dieses Kapitels und die Funktionalität der Simulationssoftware bestätigt. Für die weiteren Simulationen wird die Leistungsstufe 50 % zur Überladung und Trinkwarmwasserbereitstellung genutzt.

2.4.3 Speichervolumen

Für die Speicher wurden alle ermittelten Speichergrößen untersucht und mit einem entsprechend ausgesuchten Trinkwarmwasserspeicher kombiniert. Zusätzlich wurde ein Trinkwarmwasserspeicher mit doppelten Volumen ergänzt. Mit zunehmender Speichergröße ist eine geringere Schalthäufigkeit der Wärmepumpe und somit längere Wärmepumpenlaufzeiten zu verzeichnen. Der Energie-Mehrverbrauch durch höhere Speichervolumen lässt sich auf den Wärmeverlust des Speichers zurückführen. Für die Varianten mit separatem Speicher wird deutlicher, dass die Wahl eines größeren Trinkwarmwasserspeichers die Laufzeit der Wärmepumpe stärker erhöht, als eine zunehmende Erweiterung des Heizungspuffervolumens. Die Wahl eines kleinen Abtaupuffers, führte in dieser Regelstrategie zu sehr hohen Einschalthäufigkeiten. Auf Grund der Anschaffungskosten die pauschal auf 1 €/l

festgelegt werden und des höheren Platzbedarfs werden für die nachfolgenden Varianten die nach Herstellerangaben mit einem spezifischen Volumen von 50 l/kW und nach VDI mit einem Volumen von 20 l/kW ermittelten Puffervolumen herangezogen. Gleiche Puffervolumen für Varianten mit und ohne Überladung führen zu erhöhten Verbräuchen für Varianten mit Überladungseinstellung. Aus diesem Grund wird auf einen direkten Vergleich gleicher Volumina mit und ohne Überladung verzichtet und nur gesondert herausgestellt. Da für die Überladung ein entsprechendes Volumen zur Verfügung stehen muss werden hier die Volumina nach der Berechnung von 50 l/kW und für Varianten ohne Überladung werden für die Volumenberechnung 20 l/kW angesetzt. Für die Warmwasserspeicher werden Speicher herangezogen, die den täglichen Warmwasserbedarf und den doppelten täglichen Warmwasserbedarf decken herangezogen.

Für die weiteren Varianten, bei denen auf die Wahl eines Pufferspeichers verzichtet wird, dient die Speicherfähigkeit des Gebäudes als Speichermasse. Zur Festlegung der Überladung dient die Raumtemperatur der Gebäude. Diese wird von den üblichen 20 °C in 1 Kelvin-Schritten bis auf 23 °C erhöht. Als Standard für alle Betriebsweisen dienen 22 °C. Das betrachtete Beispiel des Gebäudetyps EFH2 hat eine mittlere Speicherfähigkeit im Vergleich zu den anderen Gebäudetypen. Mit der Erhöhung der Raumtemperatur lassen sich die Betriebszeiten der Wärmepumpe nur marginal verringern. Für die Raumtemperatur von 23 °C kann der Gesamtenergiebedarf nicht gedeckt werden und das Programm liefert einen Auslegungsfehler. Die Temperaturerhöhung wird auf 21 °C angepasst.

2.4.4 Überladungszeitintervalle

In Bezug auf das Zeitintervall, in dem eine Überladung des Speichers stattfindet, wurde der Zeitraum von 15 bis 17 Uhr, jeden Tag, mit Ausnahme der Monate Juni, Juli und August festgelegt. Hintergrund der Wahl sind eventuell verordnete Sperrzeiten des Energieversorgungsunternehmens (EVU) um die Mittagszeit und im Zeitbereich nach 17 Uhr, auf Grund höherer Stromabnahmen. Dennoch wurde für die Betrachtung des Zeitintervalls ein längerer Zeitraum von 15 bis 19 Uhr, der Betrieb an allen Tagen und Monaten und an allen Tagen bis auf die Monate Juni, Juli, August, Januar und Dezember untersucht. Die Verlängerung der Überladungszeiten erhöht die Schalthäufigkeit und führt zu einem Taktbetrieb. Die Verringerung der

Betriebsmonate führt zu einer geringeren Schalthäufigkeit und höheren SCOP-Werten. Diese Einstellung ist jedoch für die Betrachtung nicht weiter relevant, da vor allem auch die Wintermonate betrachtet werden. Die Ausweitung der Betriebszeit auf die Sommermonate hat eine nicht relevante Erhöhung der Stromaufnahme zur Folge und führt zu höheren Einschaltzeiten. Auf diese Einstellung wird ebenfalls nicht zurückgegriffen, da der Betrieb der Wärmepumpe auf Grund der höheren Außentemperaturen ohnehin effizienter ist.

2.4.5 Warmwasserzapfprofile

Die Gestaltung der Zapfprofile hat für die Dimensionierung eines Speichers, der den Tagesbedarf des Gebäudes deckt, minimale bis keine Auswirkungen. Zur Veranschaulichung der Auswirkung des Zapfverhaltens der Nutzer. Werden für die Variante zwei und drei Simulationen mit verkleinertem Speicher und dem Profil Morgenspitze verglichen. Es ergeben sich nur geringe Differenzen, wobei die Schalthäufigkeit der Wärmepumpe für die Überladungssimulation deutlich erhöht ist. Dies konnte durch die Änderung der Regellogik angepasst werden. Die Wärmepumpe schaltete bei Unterschreitung der Solltemperatur in Schicht zwei auf Warmwasserbereitung und beendete diese, sobald in Schicht zwei die Solltemperatur erreicht ist. Die Einschaltbedingung wurde auf die Unterschreitung der Solltemperatur in der obersten Schicht geändert. Dies führte zu einer Halbierung der Schalthäufigkeit und wird für die nachfolgenden Grundtypen in allen Regelungen berücksichtigt. Auffällig für die Nutzung von Frischwasserstationen sind Energiedefizite von rund 200 kWh in Bezug auf die Trinkwarmwasserbereitung. Dies bedeutet, dass zum Zapfzeitpunkt, meist in den Morgenstunden nach Auskühlung der Rohre über Nacht, die gewünschte Warmwassersolltemperatur nicht erreicht wurde. Abhilfe soll in diesen Simulationsvarianten die Integration einer Warmwasserzirkulation schaffen. Hierfür wird in der Regelung ein zusätzlicher Durchfluss für die Zirkulation angegeben und über die Warmwassermaske wird die Funktion mit einer Zirkulation theoretisch erweitert. Der Verlust der Trinkwarmwasserzirkulation beläuft sich auf festgesetzte 25 %.

2.4.6 Hydraulik-Schemen

Des Weiteren wird auf die Betrachtung der Variante drei verzichtet. Hintergrund sind die Verschaltung mittels Puffer und Frischwasserstation, sowie die Anpassung der

Volumina. Es wird als unüblich angesehen einen Pufferspeicher zur Trinkwassererwärmung zu nutzen, wenn nur ein Wärmeerzeuger betrachtet wird. Für den Fall einer Solarthermieanlage, sowie einer Hybridlösung ist ein solches System denkbar. Wird auf Grund der Analysedaten und der Betrachtung der speziellen Fälle jedoch nicht weiter betrachtet.

2.4.7 Regelungslogik

Bezüglich der Simulationsabläufe hat sich ergeben, dass durch die Regelungslogik in der Überladungszeit geringfügige Fehler aufgetreten sind. An kalten Wintertagen kann es zu einem starken Abfall der Gebäudetemperatur kommen, wenn der TWW-Speicher komplett durchgeladen wird. Über eine weitere Bedingung wird festgelegt, dass die Warmwasserüberladung Vorrang vor der Heizungsüberladung, nicht aber vor der Bereitstellung der Heizenergie zur Deckung des Wärmebedarfs hat.

2.4.8 Zusammenfassung der Grunderkenntnisse durch die Variationen

Zusammenfassend ist anzumerken, dass die Differenz aus Q_{aux} , Q_{use} , E_{tot} der einzelnen Varianten nicht erheblich voneinander abweicht. Die prozentualen Differenzen belaufen sich um die 5 %. Dies hat zur Folge, dass alle Anpassungen der Wärmepumpensteuerung und Anlagenhydraulik kaum oder nur einen geringen Einfluss auf den Verbrauch der Anlage haben, sofern diese entsprechend korrekt ausgelegt ist. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Wärmepumpe passend zum Gebäudetyp und der Anlagengröße ausgewählt ist. Auch die Anpassung der Heizkurve an das System und den Gebäudetyp ist zwingend erforderlich und kann meist erst nur im Betrieb auf Grund zahlreicher Variationen im Nutzerverhalten angepasst werden. Alle Anpassungen der Varianten haben Einfluss auf die Anlagen Bestandteile und deren Lebensdauer. Mit hohen Volumina und erhöhten Speichertemperaturen, sowie angepassten Leistungsstufen lassen sich die Laufzeiten der Wärmepumpe erhöhen und somit eine Verlängerung der Kompressor-Lebenszeit bewirken. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Stromverbrauch für Systemlösungen ohne Heizungspufferspeicher geringer ist. Sollte das Anlagenvolumen in allen Betriebszuständen den Mindestvolumenstrom der Wärmepumpe abdecken können, so sind diese Lösungen zu bevorzugen. Eine Überladung lässt sich hier in den Nachmittagsstunden mit Hilfe der Erhöhung der Raumtemperatur erreichen.

2.4.8 Festlegung neuer Varianten

Die sich aus der Vorbetrachtung ergebenden Varianten unterscheiden sich lediglich in der Simulation der Puffervolumen. Hierfür werden ausgewählte Volumina miteinander verglichen. Als erste Übersicht dient die nachfolgende Aufstellung. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [13].

Tabelle 26: Speichervariationen nach Simulationsergebnis

Gebäudetyp	Einheit	EFH 1	EFH 2	EFH 3	MFH 1	MFH 2	MFH 3	EFH 2.1	EFH 3.1
Nach VDI 4546 für Wärmepumpen < 50 kW (entspricht 20 l/kW)	l	300	200	80	800	1000	400	200	80
Herstellerempfehlung 50 - 100 l/kW (gewählt 50 l/kW)	l	800	500	200	2000	2500	1000	500	200
Trinkwarmwasserspeicher	l	140	140	140	800	800	800	140	140
Trinkwarmwasserspeicher verdoppeltem Volumen	l	300	300	300	1600	1600	1600	300	300

Für die Gestaltung der Grundvergleichsvariante wird das nach VDI empfohlene Puffervolumen für die Schemen eins und zwei herangezogen. Da für die Überladungssimulationen keine Verbesserungen mit dem Speicher entsprechend VDI vorgaben errechnet worden sind, wird auf den Vergleich an dieser Stelle verzichtet. Es werden lediglich die Volumina entsprechend der des Faktors 50 l/kW berücksichtigt. Für höhere Speichervolumina sind verbesserte Laufzeiten der Wärmepumpe mit verringerten Einschaltvorgängen und erhöhte SCOP-Werte zu erwarten. Um die Simulationsvariationen jedoch gering zu halten und im Rahmen der vorgesehenen Zeit zu bleiben wird auf weitere Volumenvariationen verzichtet. Die Volumina für die separaten Speicher, sofern sie durch das Anlagenschema vorgesehen sind, werden in den unteren beiden Spalten dargestellt. Es ergeben sich nachfolgend dargestellte Variationen. Zu bemerken ist, dass die Varianten eins bis acht lediglich für das EFH 2 und MFH 2 simuliert werden. Für die anderen Gebäudetypen entfällt die Simulation einzelner Varianten. Für alle Simulationsbeispiele wird eine Speicherwarmwassertemperatur festgesetzt, Hintergrund sind eine erhöhte Hygiene und ein erhöhter Komfort. Des Weiteren werden durch die Überladung des Speichers in den Mittagsstunden verbesserte Werte bei höheren Zieltemperaturen verzeichnet und für die weitere Betrachtung erwartet. Die Leistungsstufe wird auf 0,5, was 50 % entspricht für die Warmwasserbereitung, sowie die Überladung der Speicher genutzt. Die Überladung der Raumtemperatur erfolgt mittels hinterlegter Heizkurve und einer Abschaltung nach Überschreitung der maximal vorgegebenen Raumtemperatur von 21 °C. Zu beachten ist, dass über die Betriebsweise auch die Überladung auf 22 °C zu keinem

deutlich erhöhten Stromverbrauch größer 60 kWh/a für den Standort Zwickau geführt hat.

Tabelle 27: Simulationsvarianten

Bezeichnung	Änderung	Puffer-volumen	TWW-Volumen	Lade-zeitraum	Speicher-temp. TWW	FBH/Raum Über-ladungs-grenze	TWW Über-ladungs-grenze	Leistungs-stufe TWW	Leistungs-stufe HK-Über-ladung (Ü)	Leistungs-stufe TWW-Über-ladung (Ü)	TWW-Profil
Einheit		l	l		°C	°C	°C				
V1.0.1	oÜ	200			60			0,5			Tages
V1.1.1	Puffer	500		15-17 oJJA	60	40	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V2.0.1	oÜ	200	140		60			0,5			Tages
V2.1.1	Puffer	500	140	15-17 oJJA	60	40	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V2.1.2	Puffer + TWW	500	300	15-17 oJJA	60	40	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V4.0.1	oÜ		140		60			0,5			Tages
V4.1.1	TWW		140	15-17 oJJA	60	21	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V4.1.2	TWW		300	15-17 oJJA	60	21	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V5.0.1	oÜ	200			60			0,5			Tages
V5.1.1	Puffer	500		15-17 oJJA	60	60	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V6.0.1	oÜ	200	140		60			0,5			Tages
V6.1.1	Puffer	500	140	15-17 oJJA	60	60	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V6.1.2	Puffer + TWW	500	300	15-17 oJJA	60	60	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V8.0.1	oÜ		140		60			0,5			Tages
V8.1.1	TWW		140	15-17 oJJA	60	21	60	0,5	0,5	0,5	Tages
V8.1.2	TWW		300	15-17 oJJA	60	21	60	0,5	0,5	0,5	Tages

Anhand der Darstellungen sind das Puffervolumen und die TWW-Speichervolumen, sowie weitere Kenngrößen zusammengetragen. Die Überladungsgrenzen ergeben sich für die Heizkreise mit einer Zugabe der Sollvorlauftemperatur von 5 K und sind für die Varianten vier und acht an die Raumtemperatur gekoppelt. Für die Warmwasserbereitung wird während der Überladung auf Grund höherer Speicherwärmeverluste und geringeren COP-Werten eine maximale Speichertemperatur von 60 °C angestrebt.

Nach Simulation der unterschiedlichen Klimaprofile entsprechend der Standorte Lingen, Mannheim, Hof, Zwickau und die Variation der Grundprofile für die Zukunft und stärkerer Winterbindungen ergaben sich ähnliche Resultate, wie für die Simulation zur Validierung der Simulationsvarianten. Auffällig ist, dass für vereinzelte Klimaprofile an den in der Übergangszeit warme Tage zu erwarten sind, die Gebäudetemperaturen stark abfallen und es zu Energiedefiziten kommt. Abhilfe schafft hier eine weitere Anpassung der Regelstrategie, die eine Heizgrenzbedingung bei zu starken Raumtemperaturabfall außer Kraft setzt. Dies soll für die weiteren Simulationen mit einem Vergleich der Raum-soll-temperatur und der Raum-ist-temperatur entkräftet werden (Start Heizkreis, wenn Raum-ist < Raum-soll - 1.5 K).

Ebenfalls musste für weitere Standorte die Heizkurve entsprechend der Bedingungen angepasst werden. Hierzu ist anzumerken, dass die Sollvorlauftemperatur für die Fußbodenheizung und Radiatoren im Normauslegungspunkt festgesetzt ist. Jedoch kann es bei milderer klimatischen Bedingungen dazu führen, dass Temperaturen unter -7 °C durch die Speicherfähigkeit des Gebäudes ausgeglichen werden können und somit eine Verschiebung oder Änderung der Steilheit der Heizkurve ausschlaggebend sein kann. Für den Standort Hof kam es zu Energieunterdeckung in den Monaten Januar und Dezember, wobei hier die Anpassung der Heizkurve keine Verbesserung aller Varianten brachte. In Zuge dessen wurde ein zusätzlicher Elektroheizstab im Vorlauf der Wärmepumpe integriert. Die Wärmepumpen des gewählten Herstellers verfügen über einen integrierten Heizstab, der jedoch nicht konfiguriert wurde und dessen Leistungsstufe nicht angepasst werden kann. Aus diesem Grund wird ein Heizstab mit Regelung und Schaltventil in den Anlagenschemen ergänzt, der lediglich zur Unterstützung der Heizung eingesetzt werden soll.

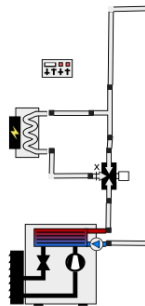


Abbildung 47: Einbindung des Zusatzheizstabes mittels Regelung und Dreiwegeschaltventil

Der Regler des Zusatzheizstabes ist als programmierbarer Regler ausgeführt. Der Regler verfügt über zwei Betriebszustände und ist an die Programmierbare Regelung der Wärmepumpe gekoppelt. Aus der Differenz zwischen Wärmebedarf der Heizkreise und der, durch die Wärmepumpe bereitgestellten Heizenergie ergibt sich die erforderliche Zusatzenergie des Heizstabes. Die Leistung des Heizstabes wird anhand der Leistung der Wärmepumpe im Bivalenzpunkt für die Vorlauftemperatur 55 °C und die erforderliche Heizleistung entsprechend der Heizlast im Normauslegungspunkt ermittelt. Für die Betriebszustände werden nachfolgende Schaltbedingungen festgelegt.

Tabelle 28: Regelkonzept Zusatzheizstab

Betriebs- zustand (PS)	Bedingung	Beschreibung
1	H1=1 AND I7<100 AND I8<(I9-1)	oberste Schicht Heizkreis < Sollvorlauftemperatur, für t > 15 min Und Volumenstrom TWW-Bereitung < 100 Und Raumtemperatur < Raumsolltemperatur - 1K
2	I8>=I9	Raumtemperatur >= Raumsolltemperatur

Auf Grund der Nutzung des zusätzlichen Heizstabes wird die Anpassungserfordernis der Heizkurve durch die Schalthäufigkeit der Wärmepumpe festgelegt. Für den Vergleich der Varianten werden nachfolgende Vergleichsgrößen herangezogen. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [16].

- Q_{aux} Energie der Wärmeerzeuger an das System in kWh
- Q_{use} Nutzenergie in kWh
- Q_{def} Energiedefizit in kWh
- E_{tot} Gesamter Stromverbrauch des Systems in kWh
- E_{HZ} Gesamter Stromverbrauch des Heizstabes in kWh
- e_p Anlagenaufwandszahl
- $SCOP$ Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe
- $SJAZ$ Systemjahresarbeitszahl
- Anzahl der Wärmepumpeneinschaltungen innerhalb eines Jahres
- Betriebsdauer eines Jahres in h

3. Ergebnisse für das Einfamilienhaus

Im nachfolgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse der Simulation betrachtet werden. Aus den Einschränkungen die mit Hilfe der vorhergehenden Simulationen getroffen werden konnten. Betrachtet wurden die unterschiedlichen Standorte anhand des Gebäudetyps EFH zwei, sowie die unterschiedlichen Gebäudetypen anhand des Standortes Zwickau. Zusätzlich zu diesen Simulationen wurden ausgewählte Variantenkombinationen, wie schlecht gedämmte Gebäude und kalte Außenstandorte kombiniert. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [17].

3.1 Betriebsverhalten Gebäudetyp EFH 2 am Standort Zwickau

Im nachfolgenden sollen die Varianten eins zwei und vier miteinander verglichen werden. Als Betrachtungsgröße dienen die Speicher- und Gebäudetemperaturen, sowie der Betriebszustand, Außentemperaturen und die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Für die Betrachtung wurde ein 500 l Pufferspeicher und ein 140 l Trinkwarmwasserspeicher herangezogen. Bei der Variante 1 mit einem Puffer beträgt dessen Volumen 500 l, ohne Zusatz für die Trinkwarmwasserbereitung. Die aufgenommenen Vergleichsparameter sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 29: Simulationsergebnis Speicherüberladung EFH

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwandszahl eP	SJAZ	Ehz	Ein-schaltungen-WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
Einheit		kWh	kWh	kWh	kWh			kWh		h	
V1.0.2	oÜ + Puffer	21902	21191	61,6	5937	0,5	3,6	0	462	3831	3,74
V1.1.1	Puffer	21962	21207	58,8	5886	0,5	3,6	0	667	3901	3,78
V2.0.2	oÜ + Puffer	21619	21299	7,6	5807	0,49	3,7	0	645	3541	3,77
V2.1.1	Puffer	21720	21262	4,9	5768	0,49	3,7	0	857	3621	3,81
V4.0.1	oÜ	21356	21093	9	5733	0,49	3,7	17,8	460	3277	3,73
V4.1.1	TWW	22821	22533	4,9	5996	0,48	3,8	0	630	3840	3,81

Die grau hinterlegten Zeilen stellen den Grundzustand jeder Variante dar und wurden für diesen Vergleich zusätzlich erstellt. Es handelt sich um Varianten mit den entsprechend beschriebenen 500 l Pufferspeichern ohne Speicherüberladung. Für die Gesamtheit des Vergleiches lässt sich erkennen, dass mit Speicherüberladung um 1 bis 2 Prozent höhere SCOP-Werte erreicht werden können. Daraus resultieren im Mittel Einsparungen von bis zu 60 kWh im Jahr bei einem Jahresenergieverbrauch von rund 5800 kWh. Die Nutz- und Abgabeenergie ist für die

Variante V4.1.1 deutlich erhöht. Auch der Energieverbrauch des Wärmeerzeugers ist hier erhöht. Dies ist auf die Überladung des Raumes auf 21 °C Raumtemperatur zurückzuführen. Die besten Ergebnisse mit dem geringsten Verbrauch konnten für die Grundvariante V4.0.1 (Trinkwarmwasserspeicher entsprechend dem Tagesbedarf, TWW-Temperatur 60 °C, keine Überladung, keine Heizungspufferung) ermittelt werden. Hintergrund sind an dieser Stelle geringe Speicher und Bereitschaftsverluste für die Bereitstellung von Heizwärme und ein Betrieb entsprechend dem Bedarf. Die Schalthäufigkeit durch die Überladung der Speicher kann im Regelfall nicht minimiert werden. Eine Senkung der Schalthäufigkeit wird insbesondere durch die Erhöhung des Puffervolumens bezweckt. Deutlich wird jedoch, dass neben der Schalthäufigkeit auch die Gesamtbetriebsdauer der Wärmepumpe erhöht werden kann.

Die Verbesserung der Schaltzeiten werden anhand der nachfolgenden Abbildungen entsprechend der unterschiedlichen Hydraulikvarianten betrachtet.

In den Grafiken werden neben Temperaturen und Arbeitszahlen auch Betriebszustände betrachtet. Entsprechend der Regellogiken für die einzelnen Varianten ergeben sich nachfolgende Betriebszustände:

Programmierbare Steuerung Heizstab (oder 3)

- Betriebszustand 1: Ein
- Betriebszustand 2: Aus

Programmierbare Steuerung Wärmepumpe

- Betriebszustand 1: Ein Warmwasserbereitung
- Betriebszustand 2: Ein Wärmebereitstellung Heizkreis
- Betriebszustand 3: Ein Überladung Warmwasser
- Betriebszustand 4: Ein Überladung Heizkreis
- Betriebszustand 5: Aus Wärmepumpe

Das Hauptaugenmerk der Simulationen und Analysen liegt in der Herausstellung, ob eine Überladung der Speichersysteme in den Mittagsstunden eines Tages zu verbesserten Effizienzwerten des Wärmeerzeugers und zu einem geringeren Stromverbrauch führt. Für die Analysen, die der Vorauswahl von Konfigurationen diene, wurde deutlich, dass das erwartete Einsparpotential von bis 30 % nicht

bestätigt werden konnte. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Variante EFH zwei am Standort Zwickau betrachtet. Hierfür wurde ein bedeckter Übergangstag ausgewählt an dem eine Mindesttemperaturdifferenz von 8 K in Bezug auf die kälteste Nacht- und höchste Tagestemperatur ist. Diese Vorgaben erfüllt der 23.03. des Standard-Testreferenzjahres für den Standort Zwickau. Um die Wirkungsweise der Speicherüberladung über die Nachtstunden zu erkennen wurde der Betrachtungszeitraum für einzelne Kenngrößen auf einen Zeitraum vom 22.03. 00:00 Uhr bis 25.03. 00:00 Uhr erweitert.

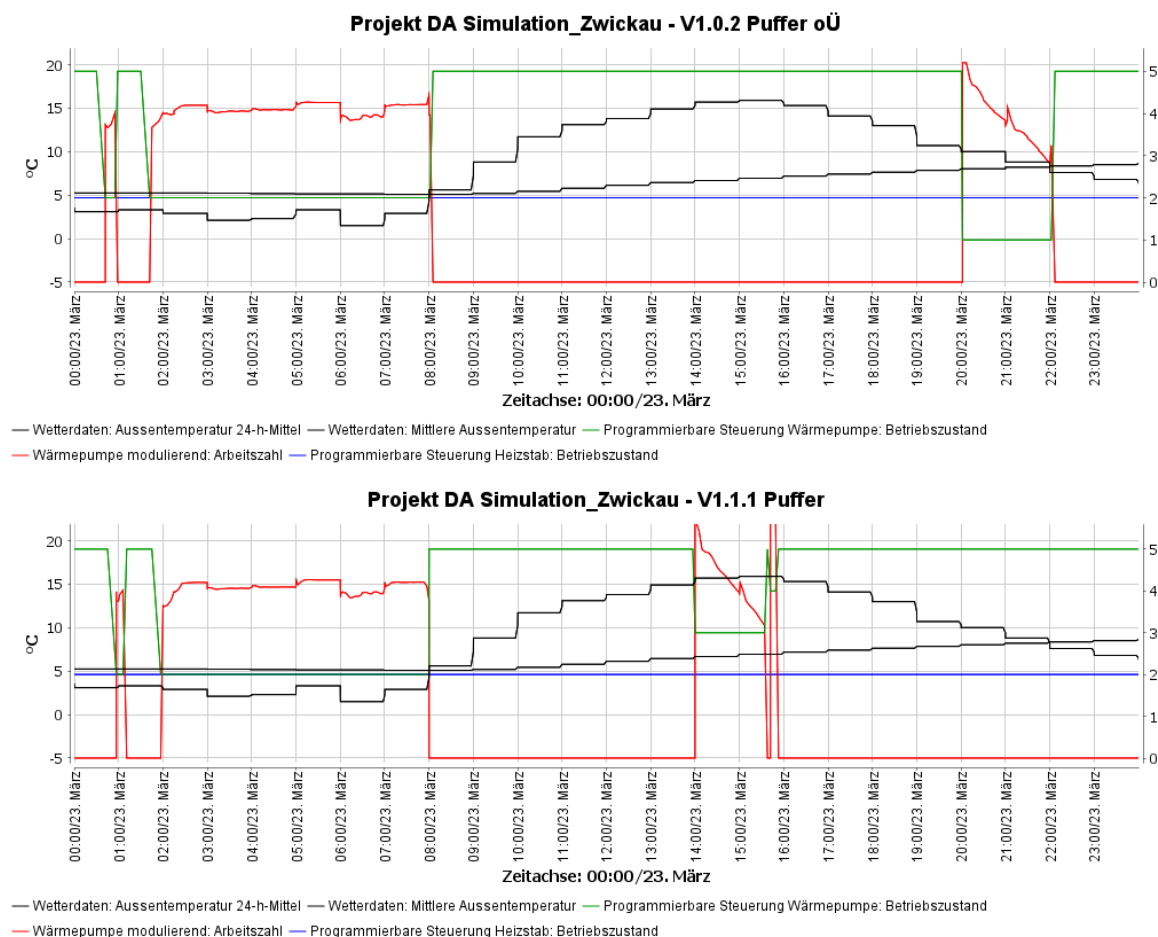


Abbildung 48: Betriebsverhalten Schema 1

Anhand obiger Darstellung werden der Betriebsmodus und die Arbeitszahl für die Simulation ohne (oben) und mit (unten) Speicherüberladung dargestellt. Für die Darstellung des Überladungsbetriebes ist zu sehen, dass der gewählte Zeitraum die höchsten Außentemperaturen abdeckt und daraus geringfügig besser Leistungszahlen resultieren. Eine Reduzierung der Schaltzeit in den Morgenstunden ist für diese Variante mit den entsprechenden Volumen nicht zu verzeichnen. In beiden Fällen wird im Zeitraum von 0 bis 2 Uhr Wärme für den Heizkreis zur Verfügung gestellt (Betriebszustand 2). Die Warmwasserbereitung erfolgt für die

Variante mit Speicherüberladung während der Überladungszeit zu höheren Außentemperaturen als ohne Überladungsregelung. Für die Betriebsweise ohne Überladung erfolgt die Warmwasserbereitung ab 20 Uhr bei niedrigeren Außentemperaturen. Eine Auswirkung auf die Arbeitszahl ist gegen Ende der Bereitstellung zu erkennen. Beim Wechsel von Betriebszustand 3 auf Betriebszustand 4 schaltet die Wärmepumpe für einen kurzen Moment aus. Unter Betrachtung der Speichertemperaturen ergeben sich nachfolgende Temperaturverläufe.

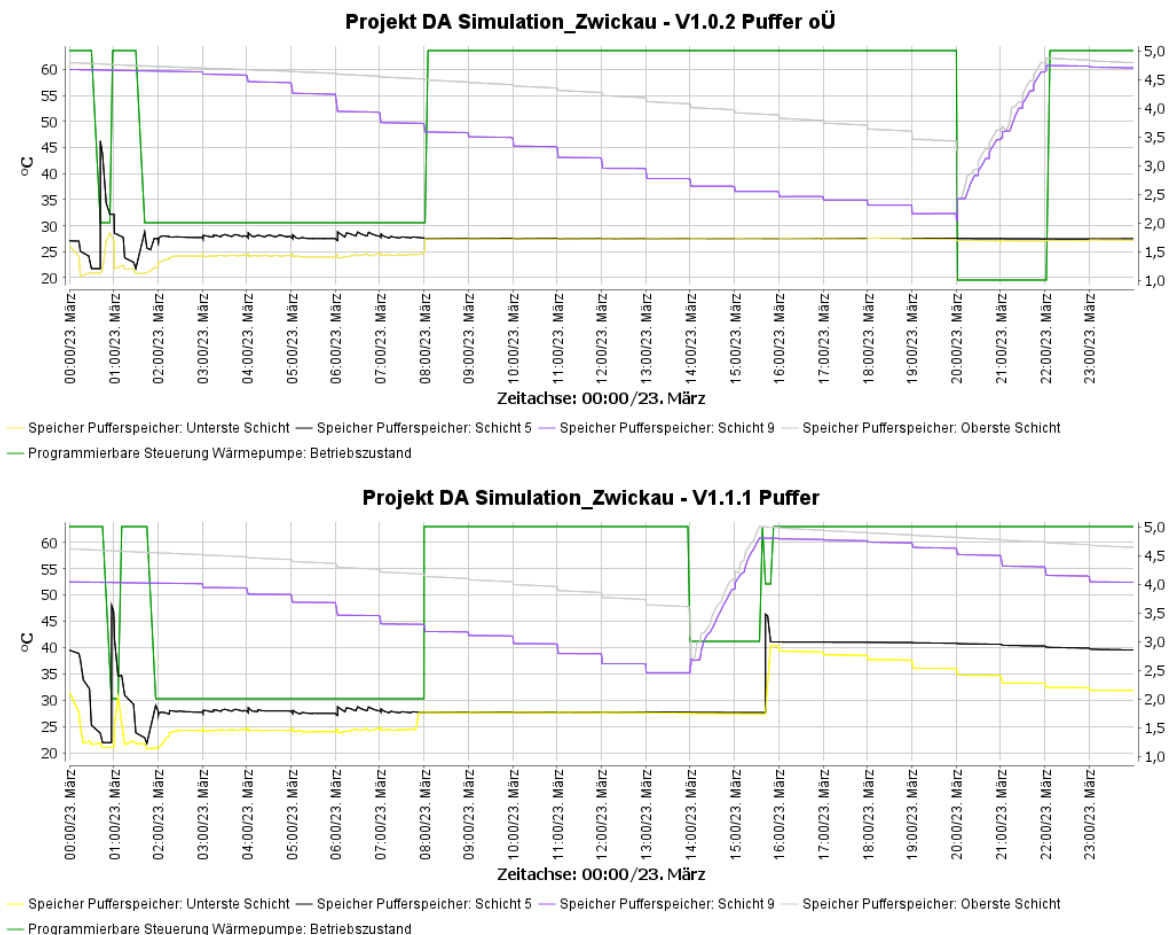


Abbildung 49: Speichertemperaturverläufe Schema 1

Es ist zu beachten, dass in dieser hydraulischen Verschaltung die Speichertemperaturen eines Speichers in unterschiedlichen Zonen betrachtet werden.

In den Morgenstunden lässt sich ebenfalls ein gleiches Bild bei den Temperaturverläufen erkennen. Es kann darauf geschlossen werden, dass die Überladung des Speichers nicht zur Deckung des gesamten Energiebedarfs gereicht hat. Auffällig ist, dass für den Tagesverlauf der Regelung mit Speicherüberladung der Betriebszustand 1 (Warmwasserbereitung) nicht geschaltet wird. Ebenfalls auffällig

ist, dass die Warmwasserbereitung einen höheren Zeitanteil im Bereich der Pufferüberladung einnimmt und der Puffer dennoch 5 K über der Heizungssolltemperatur aufgeheizt werden kann. Ein idealer Betrieb der Überladungsvariante würde erreicht werden, wenn die Wärmepumpe lediglich im vorgegebenen Bereich von 15 bis 17 Uhr läuft.

Um die Auswirkung der Betriebsweise besser nachvollziehen zu können wurde der betrachtete Zeitraum wie eingangs beschrieben erweitert.

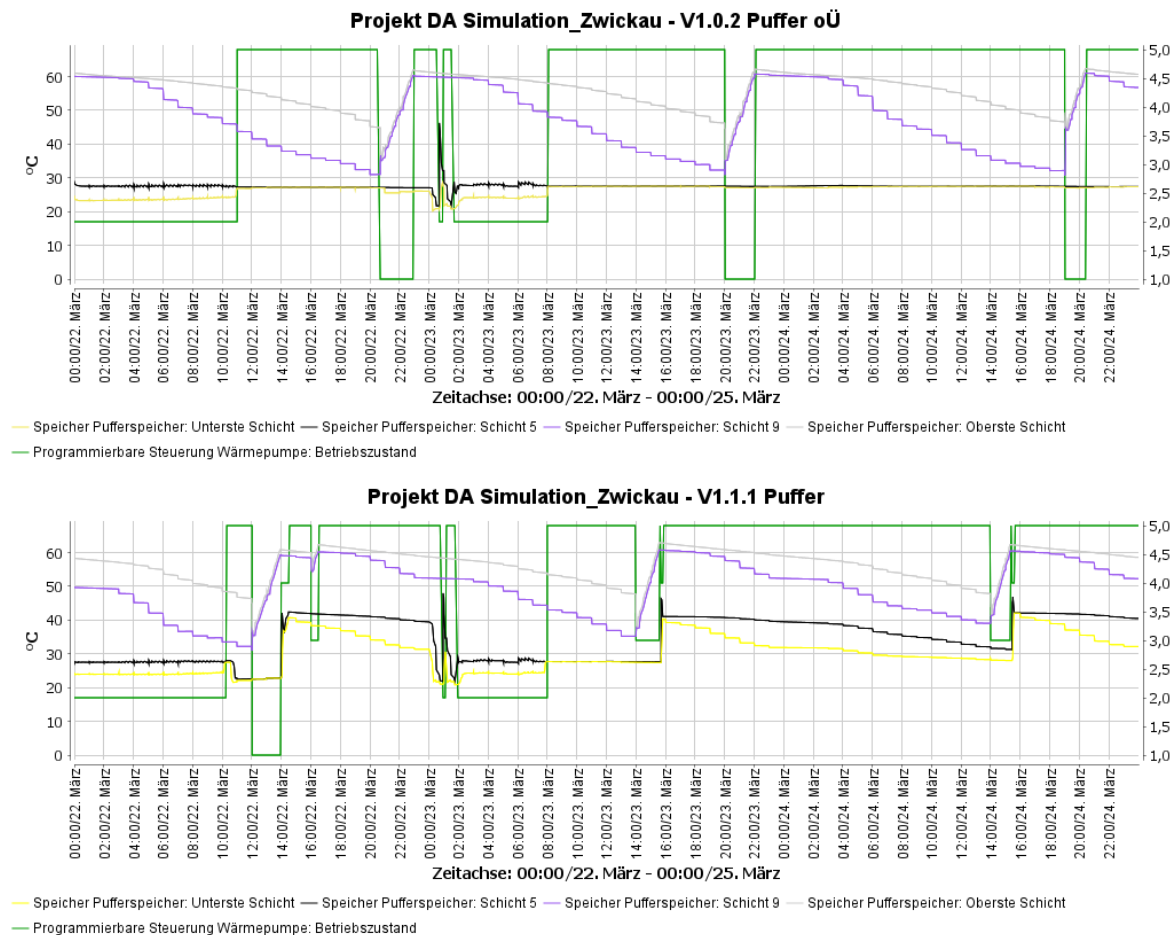


Abbildung 50: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 1

In beiden Simulationen wird deutlich, dass die Bereitstellung von Wärmeenergie für die Heizkreise im betrachteten Zeitraum gering ist. Für die Betrachtung ohne Überladung ergeben sich konstante Speichertemperaturen der untersten Speicherschichten und keine Nachbereitung für die Heizkreise. Die Warmwasserbereitung erfolgt in den Abendstunden von 20 bis 22 Uhr. Für die Variante mit Speicherüberladung ergeben sich verringert Einschaltpunkte für die Warmwasserbereitung, da dies durch die Überladungszeiten abgedeckt werden kann. Die Überhöhung des unteren Speicherniveaus hält für sechs Stunden an und pendelt sich dann bei einem Temperaturniveau von 30 °C ein. Der starke Abfall des

unteren Temperaturniveaus kann auf die Rückführung aus der Frischwasserstation mit geringen Temperaturen zurückgeführt werden. Gegebenenfalls sollte hier eine minimale Rücklauftemperatur von 30 oder 25 °C angestrebt werden, um eine Auskühlung des unteren Speichers zu verhindern.

Für die hydraulische Verschaltung zwei mit zwei separaten Speichern ergeben sich nachfolgende betriebsverhalten und Speichertemperaturen.

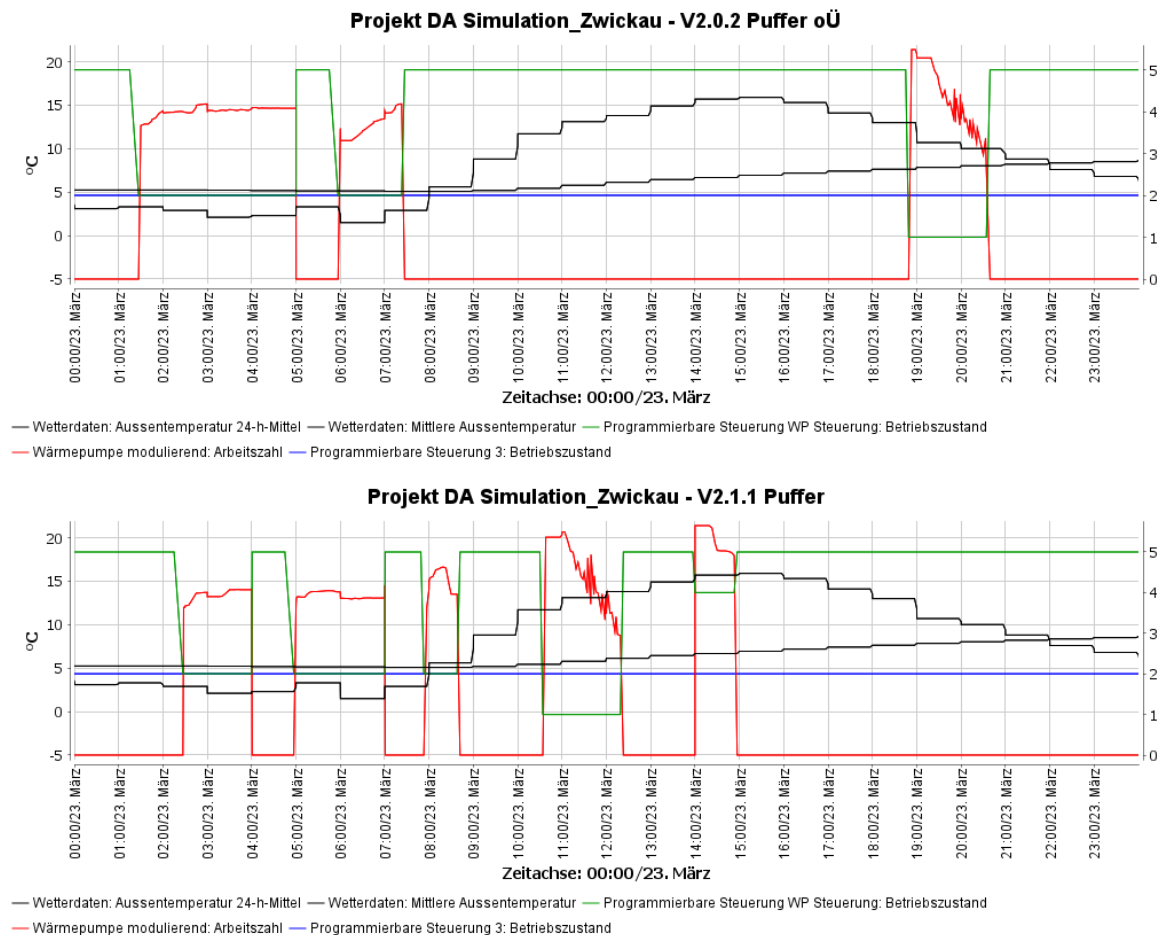


Abbildung 51: Betriebsverhalten Schema 1

Anhand der Darstellung lässt sich ein erhöhtes Taktverhalten der Wärmepumpe in der Betriebsweise mit Speicherüberladung verzeichnen. Hintergrund sind Schaltungen für die Bereitstellung von Raumwärme und Betriebsbeendigungen nach 1,5 Stunden. Die Warmwasserbereitung konnte ebenfalls nicht durch die Überladung gedeckt werden, sodass um die Mittagszeit die Aufheizung des Speichers durch die Wärmepumpe erfolgt. Aus diesem Grund findet im Überladungszeitintervall lediglich die Überladung des Pufferspeichers statt. Eine Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe in den Morgenstunden konnte in beiden Fällen nicht umgangen werden.

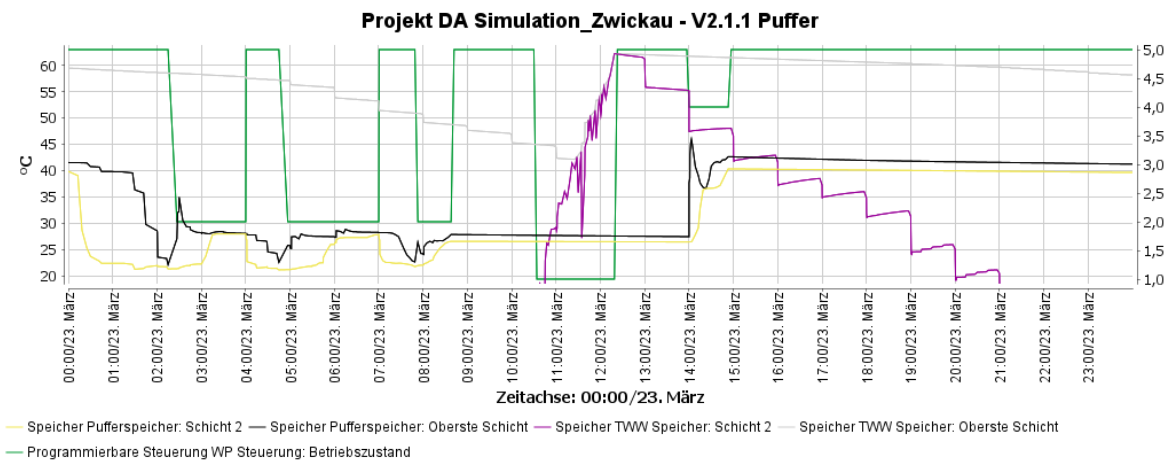
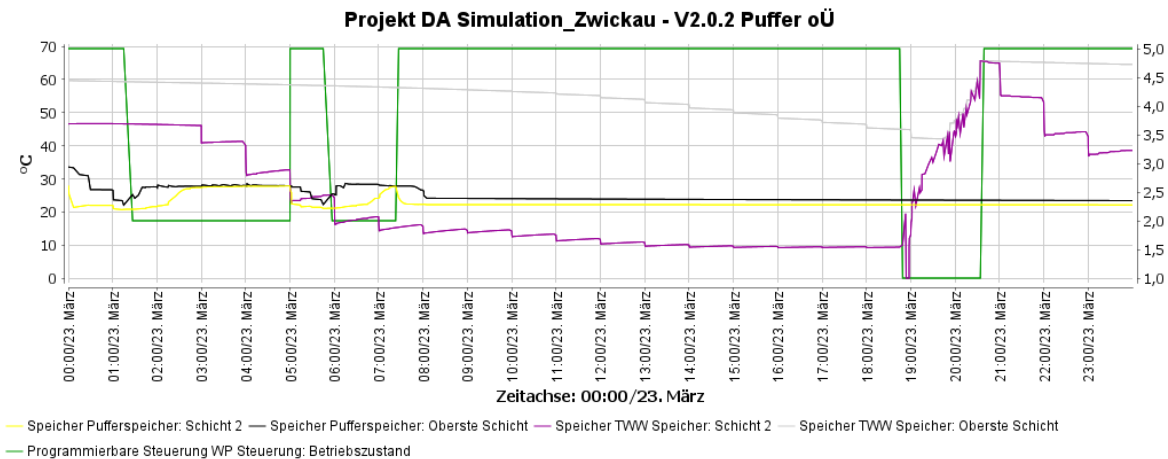


Abbildung 52: Speichertemperaturverläufe Schema 2

Die Speichertemperaturen des Pufferspeichers sind gelb (Schicht 2) und schwarz (oberste Schicht), sowie für den Trinkwarmwasserspeicher lila (Schicht 2) und grau (oberste Schicht) dargestellt. Es wird deutlich, dass der Trinkwarmwasserspeicher vor der Überladungsperiode entladen war. Auf Grund des hohen Temperaturniveaus der oberen Schicht setzte die Wärmepumpe jedoch nicht erneut zur Überladung ein. Anhand des lila gefärbten Graphen lässt sich jedoch erkennen, dass eine Überladung dennoch Wirkung gezeigt hätte. Eine Anpassung der Einschaltlogik und Erweiterung der Abzufragenden Speichertemperaturen wäre denkbar. Anhand der nachfolgenden Abbildung ist zu klären, ob der Rhythmus der Warmwasserbereitung auf einen Zeitpunkt außerhalb des Überladungszeitraumes fällt. Hierfür dienen die nachfolgenden Darstellungen.

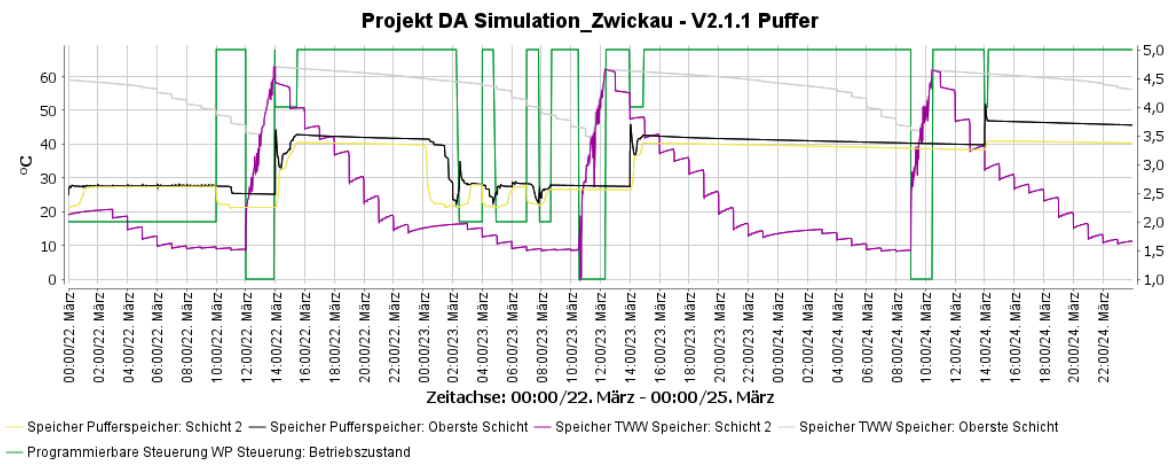
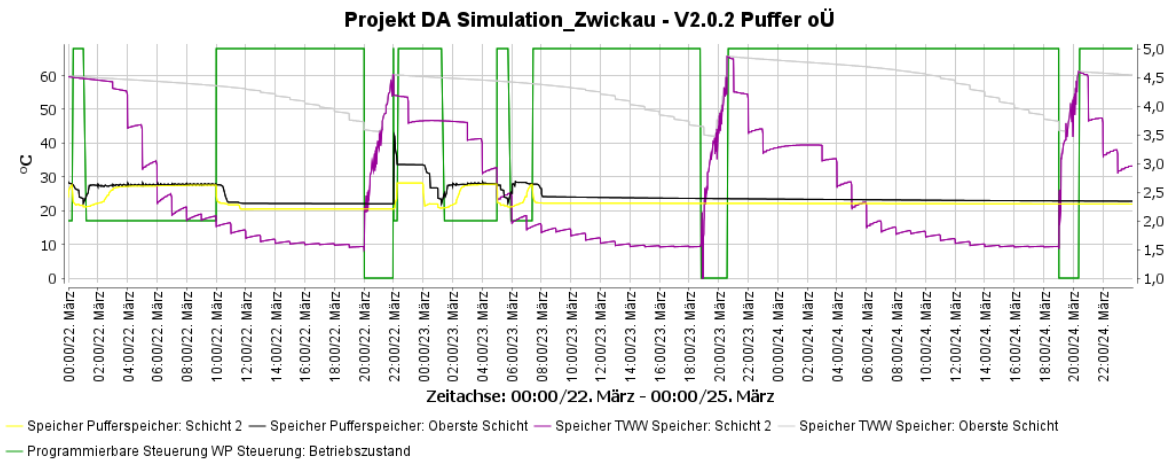


Abbildung 53: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 2

Anhand der Darstellung zur erweiterten Betrachtung der Speichertemperaturverläufe lässt sich erkennen, dass der Zeitraum für die Warmwasserbereitung auf die Mittagszeit verschoben wurde und für die Warmwasserbereitung ohne Überladung entsprechend der Variante 1 geführt wird. Mittels Anpassung der Regellogik, oder Erhöhung des Speichervolumens sollte dies jedoch erneut verschoben werden können.

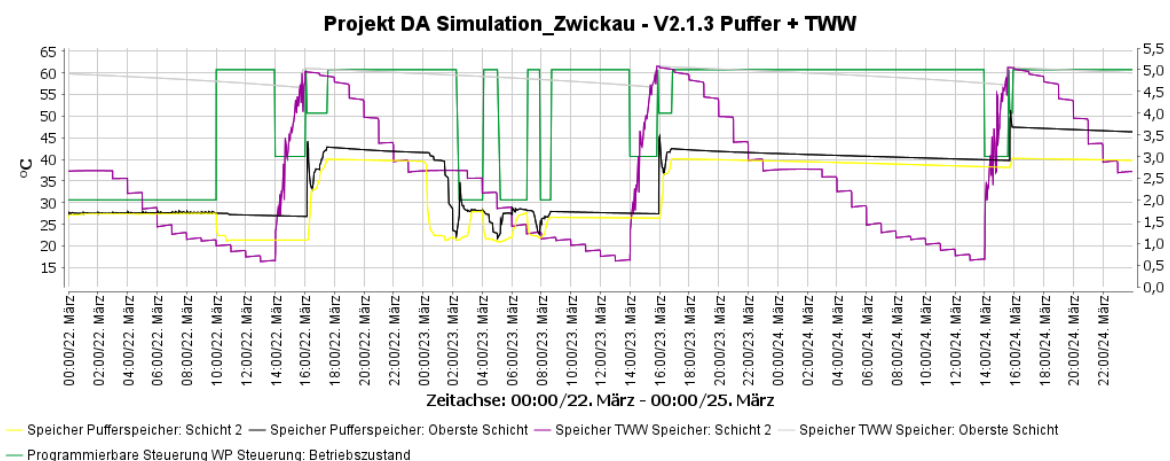


Abbildung 54: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 2 (300 l TWW)

Anhand der Darstellung mit einem größeren Puffervolumen lässt sich erkennen, dass das Zeitintervall zur Warmwasserbereitung auf das gewünschte Überladungsintervall verschoben werden konnte. Diese Verschiebung führt in der Betrachtung jedoch zu keinem geringeren Energieverbrauch auf Grund steigender Speicherverluste. Die Variante zur Anpassung der Regelungslogik wird nicht genauer betrachtet.

Für die hydraulische Variante vier ergeben sich nachfolgende Resultate.

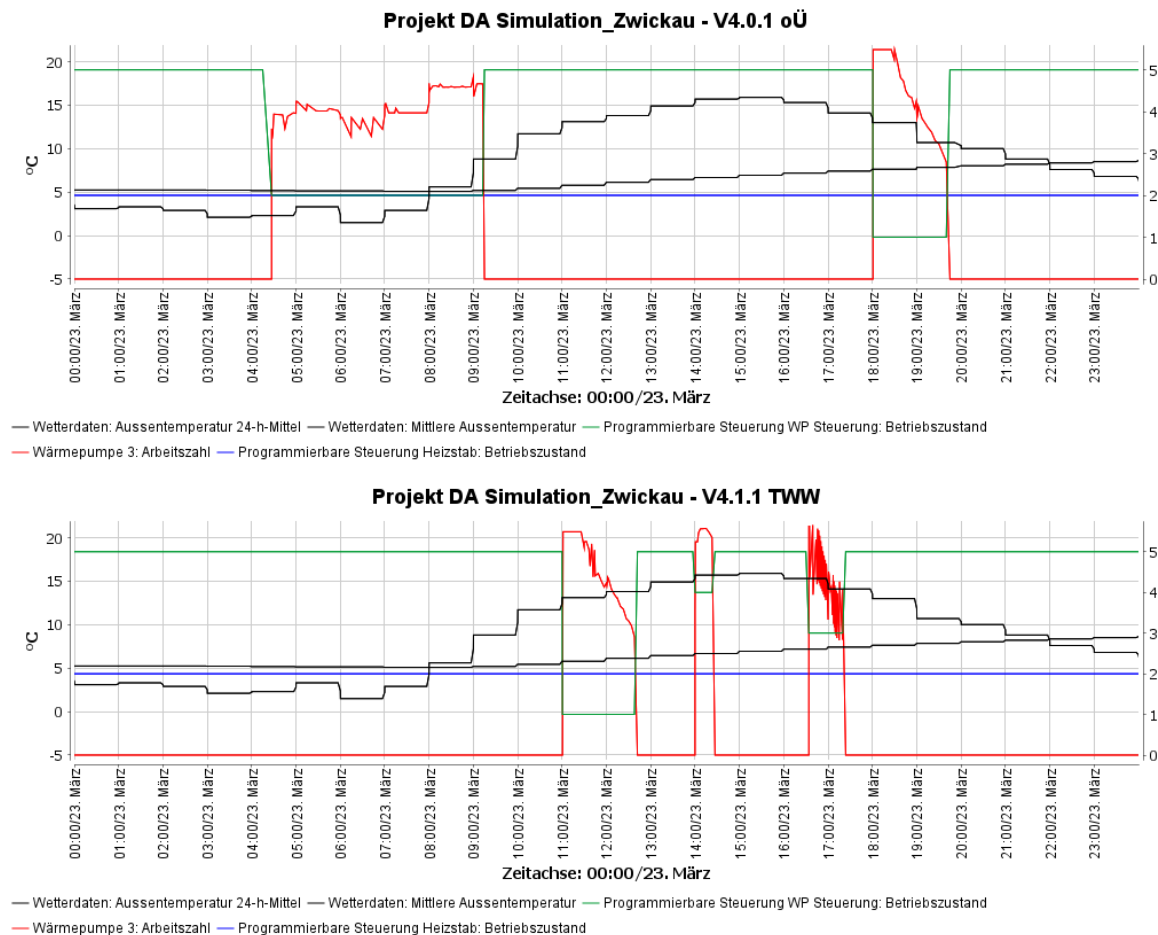


Abbildung 55: Betriebsverhalten Schema 4

Für die Variante vier ohne Speicherüberladung ergeben sich die geringsten Schalthäufigkeiten der Wärmepumpe. Für den 23. März schaltet die Wärmepumpe in der Simulation ohne Überladung zweimal. Für die Variante mit Überladung schaltet die Wärmepumpe dreimal. Es ist erneut zu erkennen, dass der Warmwasserbereitungsrythmus auf die Mittagszeit verschoben wurde was im Nachgang erneut durch die Änderung des Trinkwarmwasservolumens angepasst werden soll.

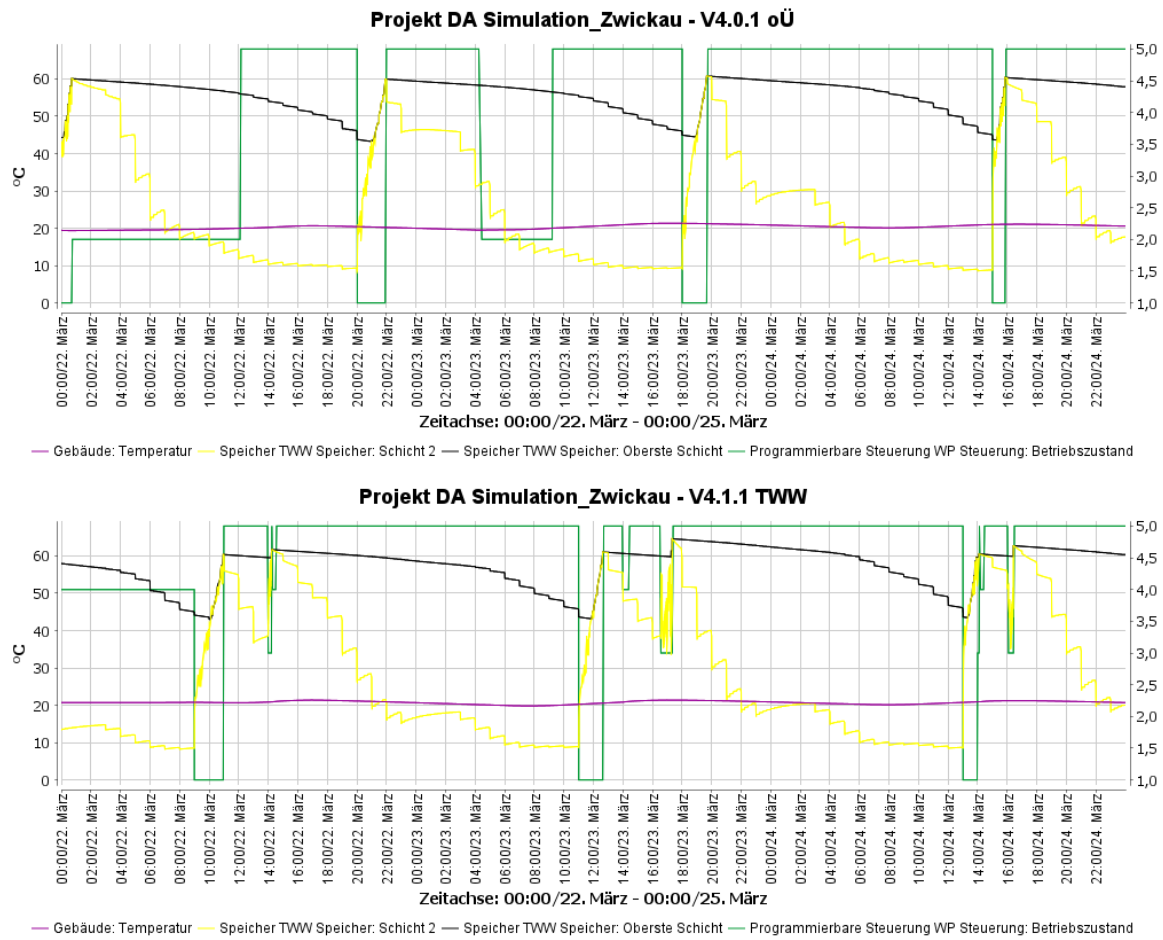


Abbildung 56: erweiterte Raum- und Speichertemperaturverläufe Schema 4

Auf Grund der geringen Änderungen und Integration des 23. März in dieser Darstellung wird auf die Temperaturbetrachtung des einzelnen Tages verzichtet. Im Vergleich zu den obigen Temperaturverläufen ist zu beachten, dass der Pufferspeicher mit der dem oberen und unteren Temperaturniveau durch die Raumtemperatur ersetzt wurde.

Wie erwartet ändert sich der Ladezeitpunkt des Trinkwarmwasserspeichers nicht, da dieser genau auf den Tagesverbrauch des Gebäudes ausgelegt ist. Des Weiteren ist in der Abbildung mit Speicherüberladung eine fehlerhafte Betriebsweise zu verzeichnen. Die Regelung schaltet die Wärmepumpe auf Raumüberladung, obwohl die Zeitschaltuhr dies nicht zulassen dürfte. Hintergrund des Betriebes sind das Nichterreichen der Ausschaltbedingung der Raumüberladung und das Ausbleiben einer anderen Betriebsweise mit Vorrang. Durch Ergänzung der Führungsgröße Zeitschaltuhr in den Ausschaltbedingungen kann der Fehler behoben werden. Daraus resultieren nachfolgende Ergebnisänderungen.

Tabelle 30: Auswirkung Anpassung Schaltbedingung

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwands- zahl eP	SJAZ	Ehz	Ein- schaltungen- WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
Einheit		kWh	kWh	kWh	kWh			kWh		h	
V4.0.1	oÜ	21356	21093	9	5733	0,49	3,7	17,8	460	3277	3,73
V4.1.1	TWW	22821	22533	4,9	5996	0,48	3,8	0	630	3840	3,81
V4.1.2	TWW	23045	22600	2,1	6054	0,48	3,7	0	460	3902	3,81
V4.1.1N	TWW	21529	21242	9,2	5769	0,49	3,7	35,1	788	332	3,75
V4.1.2N	TWW	21614	21183	2,3	5812	0,49	3,6	0	699	3298	3,72

Es ergeben sich für die betrachteten Simulationen keine verbesserten Werte gegenüber den bereits gerechneten und der Grundvariante ohne Überladung. Auf Grund der bereits erfolgten Aufnahme der Werte und in Betracht des geringen Zeitrahmens, werden die bereits erfolgten Simulationen nicht geändert und fließen so in die Wertung ein. Bei der Auswertung sollte jedoch beachtet werden, dass die Energiebereitstellung tendenziell geringer als ermittelt anzunehmen ist.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Variante vier mit Überladung und angepasster Ausschaltbedingung dargestellt.

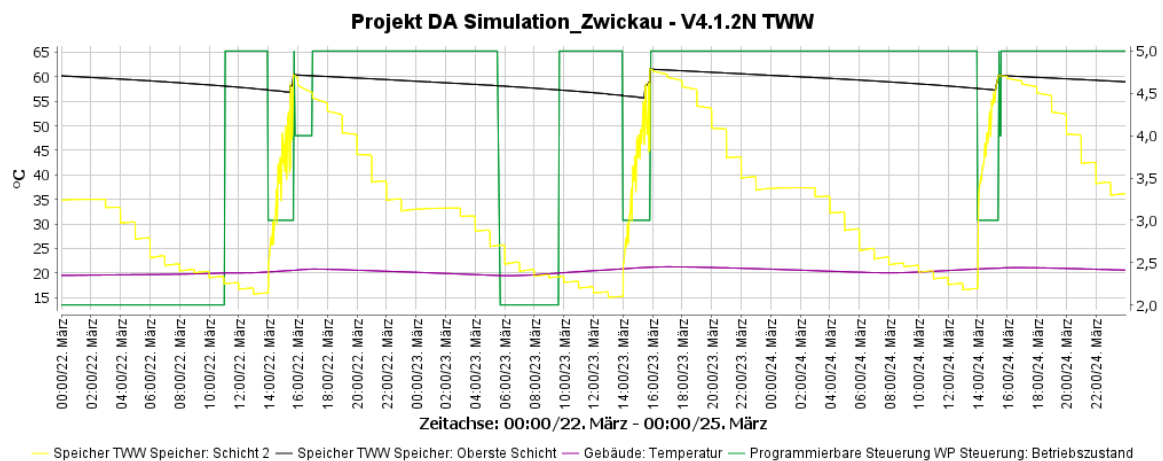


Abbildung 57: erweiterte Speichertemperaturverläufe Schema 4 (300 l TWW)

Durch die Änderung der Ausschaltlogik und Erhöhung des Speichervolumens konnte das Betriebsverhalten angepasst werden. Die Raumerwärmung erfolgt mittels Betriebszustand 2 auf eine Solltemperatur von 20 °C. Die Warmwasserüberladung (Betriebszustand 3) ist ebenfalls ausreichend und eine weitere Nachheizung der Wärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung nicht notwendig.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Überladung auf den Rhythmus der Betriebsverhalten angepasst werden muss. Es ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass das Zapfprofil für jeden Tag identisch vorausgesetzt wurde. Um solchen Schwankungen aus dem Weg gehen zu können empfiehlt sich für die Speicherüberladung ein größeres Volumen. Des Weiteren ist jedoch nicht davon auszugehen, dass das Zapfverhalten über ein Jahr unverändert bleibt, sodass sich

der Bereitstellungsrythmus auch mit einem entsprechend dem Tagesverbrauch ausgelegten Speicher einpendeln wird.

Für die Ausnutzung der höheren Quellentemperaturen an heiteren und bedeckten Tagen um die Nachmittagsstunden konnten nur geringere Verbesserungen der SCOP-Werte sowie geringe Energieeinsparungen ermittelt werden. Diese Aussage beschränkt sich jedoch auf die betrachteten Gebäudetypen und hydraulischen Schemen, sowie die unterschiedlichen Standorte. Gegebenenfalls muss die Regelung einer höheren Komplexität unterliegen um bessere Ergebnisse erzielen zu können oder die Anlagen mit anderen Einflussgrößen paaren. Jedoch ist, auf Grundlage dieser Simulationsergebnisse von keiner signifikanten Verbesserung der Energieeffizienz der Wärmepumpe auszugehen. Beispielsweise einer Ausnutzung von Solarüberschuss groß dimensionierter PV-Anlagen.

3.2 Simulationsergebnisse Standortvariationen Gebäudetyp EFH 2

Für die Simulationen ergeben sich im Nachgang weitere Erkenntnisse die zu einer, hier vorausgesetzten, korrekten Auswahl und Dimensionierung einer Wärmepumpe beitragen. Anhand der Bewertung und Simulation der unterschiedlichen Gebäudetypen und Standorte ergeben sich nachfolgende Ergebnisse. Die Daten wurden für die Variante 2 mit getrennten Speichern und einer Fußbodenheizung als Übergabesystem betrachtet.

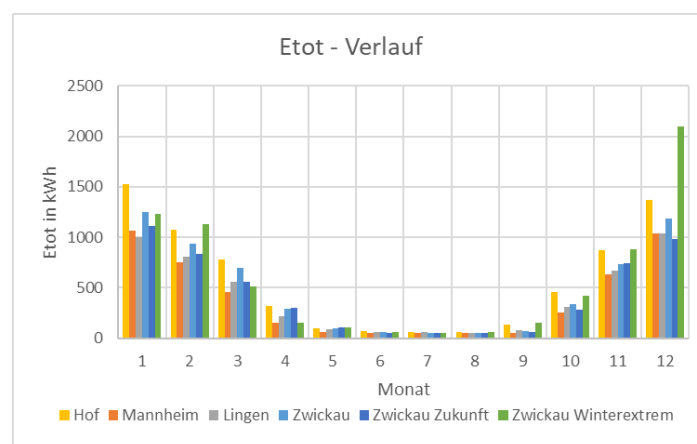


Abbildung 58: Etot - Verlauf des EFH2 Standortvariabel

Anhand der Abbildung zur Darstellung der Energieaufnahme des Systems (Wärmepumpe und weitere elektrische Bauteile) werden Unterschiede in Bezug auf die Wahl des Standortes deutlich. Es ergeben sich höhere Energieverbräuche für kältere Außentemperaturen, wie es beispielsweise in den Wintermonaten der Fall ist. Des Weiteren werden erhöhte Energieaufnahmen für den Standort Hof und den Standort Zwickau mit Betrachtung des winterextremen Profils verzeichnet. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Temperaturverlauf der monatlichen Mitteltemperaturen, ergibt sich Zusammenhänge einer umgekehrten Abhängigkeit. Eine Übersicht der mittleren Monatstemperaturen kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

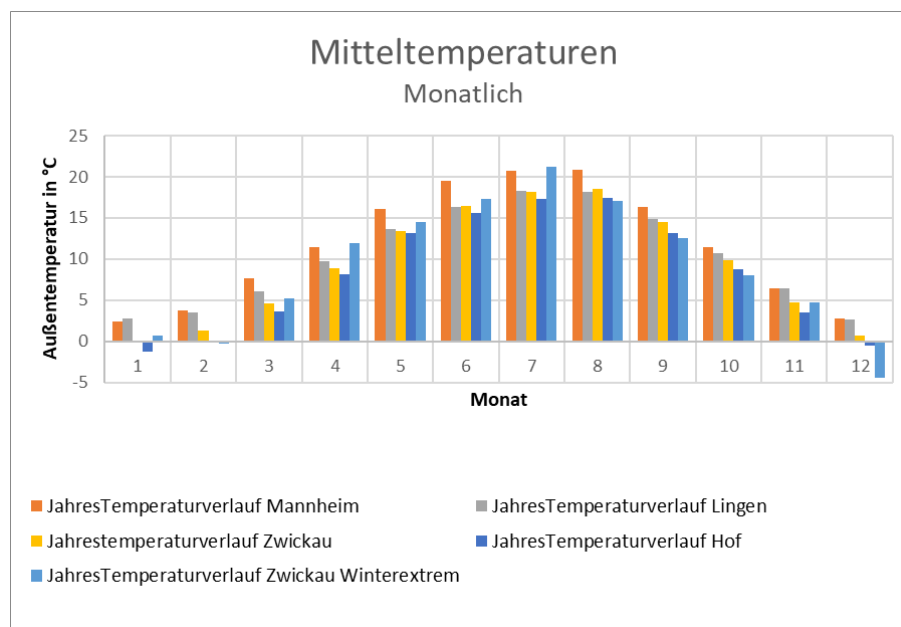


Abbildung 59: Mitteltemperaturen monatlich Standortspezifisch

Es ergeben sich für hohe Außentemperaturmittelwerte geringere Energiebedarfe und umgekehrt. Bei der Betrachtung der Wärmepumpenauswahl ist die Berücksichtigung der Temperaturverläufe, neben der Heizlast entsprechend der Normaußentemperatur entscheidend. Dies ist vor allem im Vergleich der Standortauswahl Lingen und Mannheim zu betrachten. Eine Übersicht der Kennparameter der Standorte und dazugehörige Leistungsdaten sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Für den Standort Mannheim ist eine Normaußentemperatur gemittelt über alle Postleitzahlen des Standortes (DIN EN 12831, 2020-04) von $-10,46\text{ °C}$ zu erwarten. Für den Standort Lingen von $-8,9\text{ °C}$. Es wäre demnach zu erwarten, dass die Jahresnutzenenergie des Standortes Mannheim höher, als die des Standortes Lingen ist.

Anhand der simulierten Ergebnisse ergibt sich jedoch eine höhere Nutzenergie und ein höherer totaler Energiebedarf für den Standort Lingen. Anhand der obigen Abbildung ist zu sehen, dass trotz einer geringeren Normaußentemperatur des Standortes Mannheim, vor allem in den für die Heizperiode entscheidenden Übergangsmonaten höhere Außentemperaturen zu erwarten sind. Die gemittelten Monatstemperaturen der Wintermonate sind hingegen annähernd gleich. Es ist davon auszugehen, dass in den Wintermonaten höhere Temperaturdifferenzen für den Standort Mannheim zu erwarten sind, wohingegen die Außentemperatur des Standorts Lingen nur geringen Schwankungen unterliegt.

Tabelle 31: Simulation Standortvergleich

	Einheit	Hof	Mannheim	Lingen	Zwickau	Zwickau Zukunft	Zwickau Winterextre m
Transmissionswärme- verlust Polysun	W	6660	6324	5496	6037	6221	6876
Lüftungswärmeverlust Polysun	W	2220	2108	1832	2012	2074	2292
niedrigste Außentemperatur	°C	-13,7	-12,3	-7,8	-10,5	-11,4	-15,4
Heizlast	W	8880	8432	7328	8049	8295	9168
Quse	kWh	23666	17485	19045	21279	19341	22030
Ehz	kWh	251	43,5	0	0	0	421
Anteil Heizstab		1%	0%	0%	0%	0%	2%
Normaußentemperatur	°C	-14,38	-10,46	-8,9	-13,55	-13,55	-13,55
Leistung Wärmepumpe A-7/W35	W	8542	8542	8542	8542	8542	8542
Leistung Wärmepumpe bei Normaußentemperatur	W	6703	7454	7759	6836	6836	6836
Leistung Wärmepumpe bei niedrigster Simulationstemperatur	W	6778	7070	8009	7446	7258	6423

Die oberen Zeilen der Tabelle fassen die Ergebnisse für Heizlast, bestehend aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlust, sowie die in der Simulation, bedingt durch das hinterlegte Testreferenzjahr, niedrigste Außentemperatur des Jahres. Vervollständigt werden diese Angaben durch den Jahresnutzenergiebedarf und die Nutzenergiezufuhr durch den Heizstab ergänzt. In den unteren Zeilen sind neben der Normaußentemperatur als Standortmittelwert entsprechend der DIN EN 12831, die Heizleistungen der verwendeten Wärmepumpe VWL 85/6 für ausgewählte Quellentemperaturen.

Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass die Auswahl der Wärmepumpen entsprechend der Annahme einer Außentemperatur von -14 °C für alle Varianten ausreichend ist. Der Einsatz des Heizstabes liegt im anzustrebenden Bereich von bis

zu 2 %. Auch Winterextreme können unter der Nutzung eines bivalenten, monoenergetischen Systems abgedeckt werden. Die Zuschaltung der Heizstäbe erfolgt in den Jahresstunden mit den geringsten Temperaturen, Januar und Dezember. Der Einsatz des Heizstabes ist jedoch lediglich für die Standorte Mannheim, Hof und das Winterextrem für Zwickau erforderlich, obwohl die erforderliche Heizleistung durch die Wärmepumpe für das Wärmeübergabesystem Fußbodenheizung ab einer Außentemperatur kleiner -9 °C nicht ausreichend gedeckt werden kann. Dies kann auf die kurze Dauer eines Kältezyklus und das Speicherverhalten des Gebäudes zurückgeführt werden.

Für das Zukunftsreferenzjahr des Standortes Zwickau ergeben sich geringere Außentemperaturen und demnach höherer erforderliche Heizleistungen als für das Standard-Referenzjahr. Auf Grund eines sinkenden Jahresenergieverbrauches der Wärmepumpe für das Zukunftsreferenzjahr ergibt sich die Annahme, dass die Wintermonate kühler und die Übergangsmonate umso wärmer zu erwarten sind.

Für die Dimensionierung der Standorte Lingen würden gegebenenfalls geringere Leistungen einer Wärmepumpe ausreichen.

Um dies genauer betrachten zu können, werden in der nachfolgenden Darstellung die mittlere Leistungsstufe der Wärmepumpen dargestellt. Für den Standort Mannheim ergeben sich für alle Monate die geringsten erforderlichen mittleren Leistungsstufen. Ggf. würde die Auswahl einer kleineren Wärmepumpe ebenfalls ausreichen. Dies soll im Nachgang kurz beleuchtet werden.

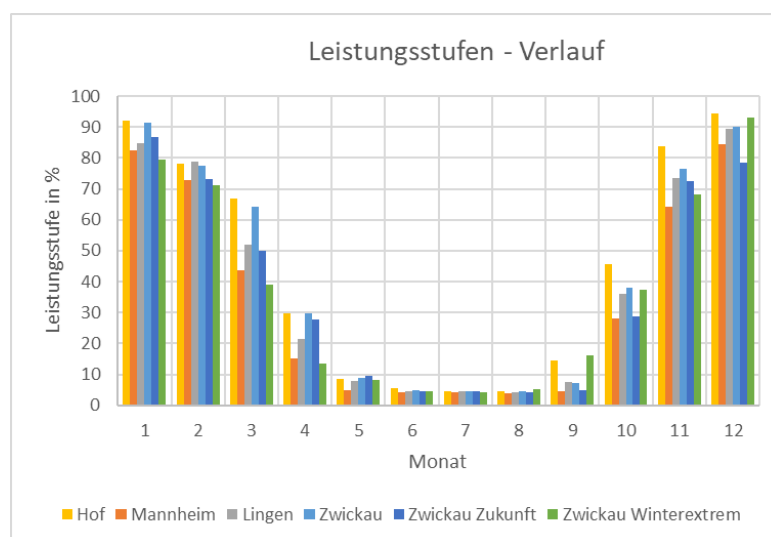


Abbildung 60: Leistungsstufen-Verlauf standortspezifisch EFH

Die Wärmepumpenauswahl für den Standort Zwickau ist hier ideal dargestellt. Auch in den Übergangsbereichen läuft die Anlage zwischen 30 und 65 %. Zu geringe Leistungsstufen in den Übergangsmonaten können zu einem erhöhten Taktverhalten führen und somit einen erhöhten Energieverbrauch hervorrufen. Für diese Szenarien ist ein ausreichendes Puffervolumen vorzusehen. Die Häufigsten Schaltungen einer Wärmepumpe sind in den Übergangsmonaten zu verzeichnen. Dies geht aus den Komponentenberichten der einzelnen Simulationen hervor. Des Weiteren muss der Regelbereich der Wärmepumpe berücksichtigt werden, da dies herstellerabhängig meist nur bis zu einem Minimalwert von 30 % möglich ist.

Resultierend aus dieser Betrachtung wird deutlich, dass die Auswahl der Wärmepumpe anhand der Normaußentemperaturen lediglich als Vorauswahl erfolgen sollte. Eine Betrachtung des Jahresenergiebedarfs ist ebenfalls zu betrachten und für eine Auslegung zu berücksichtigen. Hierfür liefern Testreferenzjahre Anhaltswerte für den zu erwartenden Jahresenergiebedarf und die zu erwartenden Außentemperaturen entsprechend einem Standort. Auch der Ausblick auf das Zukunfts-Referenzjahr zeigt, dass mit geringeren, erforderlichen Wärmepumpenleistung zur Deckung des Heizlastbedarf zu rechnen ist. Für die Betrachtung von reversiblen Wärmepumpen sind Kühllastberechnungen anzusetzen, wobei die höchst erforderliche Leistung der Wärmepumpe entscheidend für die Wärmepumpenauswahl ist.

Die Wärmepumpengröße wurde für die Standorte Mannheim und Lingen angepasst. Das nächstkleinere, auswählbare Modell ist die VWL 65/6. Die ermittelten Daten können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Als hydraulische Schaltung dient die Variante mit zwei separaten Speichern (Schema 2)

Tabelle 32: Anpassung Wärmepumpenmodell

Bezeichnung	Änderung	Q _{aux}	Q _{use}	Q _{def}	Etot	Aufwands- zahl eP	SIAZ	Ehz	Ein- schaltungen- WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
V2.0.1 Mannheim	oÜ	17772	17485	20	4638	0,48	3,8	43,5	995	2998	3,92
V2.0.2 Mannheim	oÜ + WPk	17723	17451	48,3	4736	0,49	3,7	330	858	3203	4,03
V2.0.1 Lingen	oÜ	19389	19045	6,8	4953	0,47	3,9	0	1346	3375	3,98
V2.0.2 Lingen	oÜ + WPk	19327	18997	9,2	4821	0,46	4	0	1176	3592	4,08

Für beide Anwendungen ergeben sich erhöhte SCOP-Werte, geringere Schalthäufigkeiten und längere Wärmepumpenlaufzeiten. Für den Standort Mannheim erhöht sich der Anteil, der durch den Heizstab bereitgestellten Energie, liegt jedoch noch im Bereich unter 2 % des Gesamtjahresenergiebedarfs.

3.3 Simulationsergebnisse Gebäudevariationen Standort Zwickau

Entscheidend für die unterschiedlichen Gebäudetypen sind deren Dämmstandard und die Speicherfähigkeit der Gebäude.

Betrachtet man die unterschiedlichen Gebäudetypen für einen Standort so ergeben sich nachfolgende Resultate. Als Grundlage für die Bewertung dient der Standort Zwickau mit dem Standard-Testreferenzjahr.

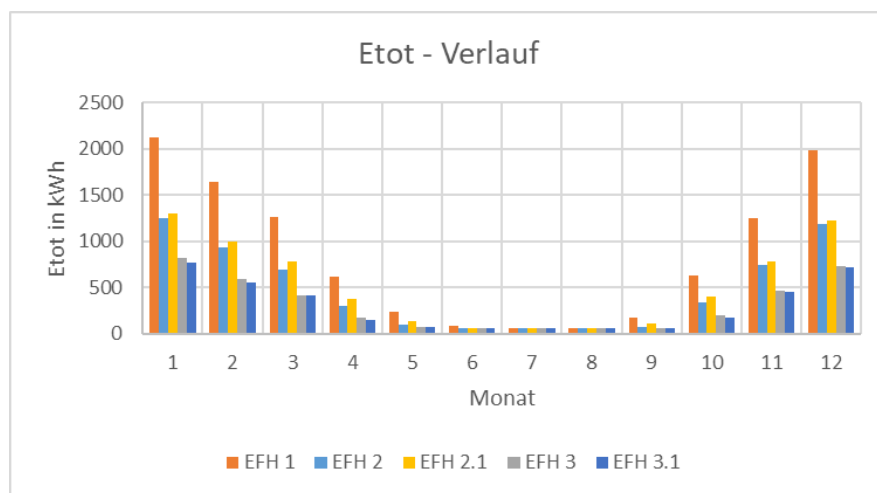


Abbildung 61: Etot-Verlauf gebäudespezifisch EFH

Anhand der Darstellung sind alle zu betrachtenden Gebäudetypen aufgelistet. Dabei hat das Gebäude eins den schlechtesten und drei den besten Sanierungsstand. Die Untertypen 2.1 und 3.1 stellen Gebäudes eines mittleren und hohen Sanierungsstandes mit einer hohen Speicherfähigkeit der Gebäudehülle dar. Wie zu erwarten sind die höchsten totalen Energieverbräuche für das Einfamilienhaus eins zu verzeichnen. Im System werden Heizkörper zur Wärmeübertragung im System 55/45 eingesetzt. Die Auswahl der Heizkörperanzahl erfolgt automatisch durch das Simulationsprogramm. Ein Heizkörper hat eine Abgabeleistung von 1000 W. Auf Grund der hohen Vorlauftemperaturen sind für diese Verschaltung ebenfalls geringe SCOP-Werte zu verzeichnen. Es wird jedoch deutlich, dass bei ausreichender Wärmeübertragungsfläche eine Wärmepumpe zum Einsatz kommen kann. Das Einfamilienhaus zwei wurde für beide Wärmeüberträgerflächen simuliert, wobei verbesserte SCOP-Werte und geringere Energieverbräuche für die Nutzung von Fußbodenheizungen zu verzeichnen sind. Für das Einfamilienhaus drei wurde lediglich die Fußbodenheizung simuliert, da im Zuge der Sanierung oder im Neubau die Wahl der Fußbodenheizung als Wärmeübertrager-Fläche angesetzt wird. Auch

für diese Variation der Gebäudetypen soll die mittlere monatliche Leistungsstufe der Gebäude betrachtet werden. Die Informationen sind nachfolgender Abbildung zu entnehmen.

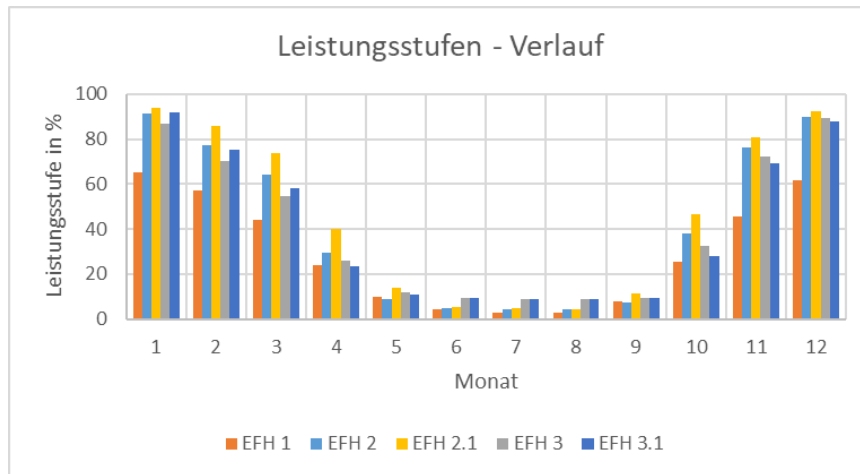


Abbildung 62: Leistungsstufen-Verlauf gebäudespezifisch EFH

Für das Gebäude EFH eins lässt sich erkennen, dass die Wärmepumpe zu groß dimensioniert scheint. Im Winterbereich werden hier im Mittel 65 % der maximalen Leistungsstufe abgerufen. Eine Änderung des Wärmepumpenmodells wäre an dieser Stelle denkbar und ratsam. Hierfür bietet sich das Modell VWL 125/6 von Vaillant an. Eine Simulation zu diesem Szenario wird jedoch nicht durchgeführt. In den Übergangsmonaten sind für die Gebäude mit einer hohen Speicherfähigkeit ebenfalls erhöhte Leistungszahlen zu verzeichnen. Die Auslegung der Wärmepumpen in den übrigen Gebäudeklassen weisen jedoch keine weiteren großartigen Veränderungen und Besonderheiten auf.

3.3.1 Speicherverhalten der Gebäudetypen

Die ermittelten und errechneten Werte zur Heizlast und Heizlastdeckung sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Diese soll die entsprechende Auslegung der Wärmepumpen belegen.

Tabelle 33: Simulation der Gebäudetypen

	Einheit	EFH 1	EFH 2	EFH 2.1	EFH 3	EFH 3.1
Transmissionswärmeverlust Polysun	W	10939	6037	6018	3278	3316
Lüftungswärmeverlust Polysun	W	1215	2012	2006	1987	2010
niedrigste Außentemperatur	°C	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5
Heizlast	W	12154	8049	8024	5265	5326
Quse	kWh	33943	21279	23825	13113	12878
Ehz	kWh	0	0	0	147	0
Anteil Heizstab		0%	0%	0%	1%	0%
Normaußentemperatur	°C	-13,55	-13,55	-13,55	-13,55	-13,55
Leistung Wärmepumpe A-7/W35	W	12617	8542	8542	4065	4065
Leistung Wärmepumpe bei Normaußentemperatur	W	10105	6836	6836	3107	3107
Leistung Wärmepumpe bei niedrigster Simulationstemperatur	W	11275	7446	7446	3554	3554

In der Tabelle sind ebenfalls in den oberen Zeilen die Simulationsergebnisse der Polysun-Software dargestellt. Diese wurden durch die Normaußentemperatur und die entsprechenden Heizleistungen der Wärmepumpe für ausgewählte Außentemperaturen dargestellt. Es ist zu beachten, dass für die unterschiedlichen Gebäudetypen auf Grund der sich unterscheidenden erforderlichen Heizlast unterschiedliche Wärmepumpen gewählt wurden. Für den Gebäudetyp EFH eins die VWL 155/6 für das EFH zwei die VWL 85/6 und für das EFH drei die VWL 45/6. Wie zu erwarten sind die geringsten Verbräuche für den höchsten Dämmstandard zu verzeichnen. Zu beachten ist, dass bei einem mittleren Dämmstandard entsprechend des KfW 70 Standards höhere spezifische Wärmekapazitäten der Gebäudehülle zu höheren Energieverbräuchen führen. Dies kann auf die erhöhte aufzubringende Energie zur Erwärmung der Gebäudehülle zurückzuführen sein. Es ist jedoch nicht ersichtlich, wie das Speicherverhalten des Gebäudes bestimmt wird.

Es wird deutlich, dass die erforderliche Heizlast für die Einfamilienhäuser eins und zwei um bis zu 1 kW unterdeckt wird, jedoch die Speicherfähigkeit der Gebäude so hoch ist, dass die Zeiträume geringer Außentemperaturen überbrückt werden können. Für den Grundtyp des EFH drei wurde die geringste und höchste Speicherfähigkeit angesetzt (180 und 468 kJ/(Km²)). Für den Fall geringer Speicherfähigkeit und einer Heizlastunterdeckung größer 1,5 kW ist die Nachheizung

mittels Elektrowärmeerzeuger notwendig. Für Gebäude mit einer hohen Speicherfähigkeit entfällt die Heizstabunterstützung.

Des Weiteren ist in Bezug auf die Speicherfähigkeit des Gebäudes auffällig, dass der Nutzenergiebedarf für ein Gebäude höherer Speicherfähigkeit um bis zu 1500 kWh höher liegt als für moderate Speicherfähigkeit. Hintergrund dieser Resultate können auf die Wärmespeicherdynamik des Gebäudes zurückgeführt werden. Für eine genauere Untersuchung sollten jedoch außerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Diplomarbeit weitere Untersuchungen angesetzt werden.

Um genauer auf den Speichereffekt eingehen zu können werden im Nachgang die Gebäude 2.1 und 3.1 mit den jeweiligen Grundtypen verglichen. Als Vergleich dient die hydraulische Schaltung entsprechend Schema vier.

Tabelle 34: Vergleich der Gebäudespeicherfähigkeit

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwands- zahl eP	SJAZ	Ehz	Ein- schaltungen- WP	Laufzeit- WP	SCOP-WP
Einheit		kWh	kWh	kWh	kWh			kWh		h	
EFH 2											
V4.0.1	oÜ	21356	21093	9	5733	0,49	3,7	17,8	460	3277	3,73
V4.1.1	TWW	22821	22533	4,9	5996	0,48	3,8	0	630	3840	3,81
V4.1.2	TWW	23045	22600	2,1	6054	0,48	3,7	0	460	3902	3,81
EFH 2.1											
V4.0.1	oÜ	23652	23309	7,5	6224	0,48	3,7	0	435	3748	3,8
V4.1.1	TWW	25194	24844	5	6535	0,47	3,8	0	579	4341	3,86
V4.1.2	TWW	25514	25014	2,1	6637	0,48	3,8	0	421	4460	3,84
EFH 3											
V4.0.1	oÜ	12976	12709	127	4015	0,57	3,2	689	418	3158	3,74
V4.1.1	TWW	13620	13351	13,5	3647	0,49	3,7	44,8	572	3428	3,77
V4.1.2	TWW	13314	12889	68	3708	0,52	3,5	147	429	3353	3,71
EFH 3.1											
V4.0.1	oÜ	12763	12426	10,8	3431	0,5	3,7	0	498	3366	3,79
V4.1.1	TWW	13542	13201	7,4	3578	0,49	3,7	0	498	3366	3,79
V4.1.2	TWW	13149	12618	3,3	3545	0,51	3,6	0	356	3309	3,71

Anhand der dargestellten Ergebnisse lassen sich, wie aus der obigen Abbildung zu erkennen, höhere Verbräuche für den Vergleich des Gebäudetypes zwei feststellen. In Summe sind jedoch höhere SCOP-Werte zu erwarten in Kombination mit geringeren Schaltheufungen und längeren Betriebsstunden der Wärmepumpe. Für den Vergleich des Gebäudes EFH 3 ergeben sich minimal geringere Energieverbräuche. Die Schaltzeiten sind vereinzelt geringer. Die Betriebsdauer ist annähernd gleich. Daraus lässt sich vermuten, dass der Einfluss der Gebäudespeicherfähigkeit geringer wird je besser der Dämmstandard des Gebäudes ist.

3.3.2 Einfluss der Warmwasserbereitung auf den SCOP

Für die Gebäudetypen ist des Weiteren zu betrachten, dass unterschiedliche Wärmeerzeuger entsprechend der zu erwartenden Heizlast ausgewählt wurden.

Für die Sommermonate wird deutlich, dass der Energieverbrauch auf Grund der Warmwasserbereitung annähernd gleich ist. Ob die Wahl einer größeren Wärmepumpe Auswirkungen auf die Warmwasserbereitung und den zu erwartenden SCOP hat soll im nachfolgenden betrachtet werden. Grundvoraussetzung ist, dass der Tagesverbrauch und die Speicherung für alle Varianten gleich festgelegt wird. Da eine Variation des Warmwasserverbrauchs lediglich von der Anzahl der Familien gekoppelt ist, kann ein Vergleich der Einfamilienhäuser erfolgen.

Tabelle 35: Bereitstellungsdefizit TWW

Typ	EFH 1	EFH 2		EFH 3	EFH 3.1
Varianten	V5 - V8	V5 - V8	V1 - V4	V1 - V4	V1 - V4
V1.0.1 / V5.0.1	60,3	58,2	62	186	100
V1.1.1 / V5.1.1	48,2	51,7	58,8	167	99,7
V2.0.1 / V6.01.	3,6	4,4	7,3	16,8	9,6
V2.1.1 / V6.1.1	2,5	3,6	4,9	9,8	7,8
V2.1.3 / V6.1.3	1,5	2,3	2,2	32,4	5,2
V4.0.1 / V8.0.1	3,8	7,4	9	127	10,8
V4.1.1 / V8.1.1	2,5	3,6	4,9	13,5	7,4
V4.1.2 / V8.1.2	1,2	2	2,1	68	3,3

Anhand der aufgenommenen Größe Energiedefizit in kWh, wird das Energiedefizit für die Warmwasserbereitstellung und durch zu geringe Raumtemperaturen festgehalten. Für die Hydraulikvarianten mit Frischwasserstation ergeben sich von vornherein auf Grund von Abkühlungsvorgängen in den Rohrleitungen Energiedefizite.

Es ist zu beachten, dass nicht alle Varianten 1 bis 8 für die untersuchten Gebäudetypen geprüft wurden.

Es wird deutlich, dass die geringe Leistung der Wärmepumpe VWL 45/6 des Einfamilienhauses drei zu höheren Energiedefiziten neigt als die beiden größeren Wärmepumpentypen. Als Vergleich wurde das EFH 3.1 mit ergänzt, um die Verfälschung des Gesamtenergiedefizites durch einen Raumtemperaturabfall auszuschließen. Dies lässt Schlussfolgern, dass die Leistung der Wärmepumpe für die Warmwasserbereitung zu gering gewählt ist. Um dem Energiedefizit entgegen zu wirken muss die Leistungsstufe für die Trinkwarmwasserbereitung unter Effizienz-Einbußen von 50 % auf 75 bis 80 % erhöht werden. Eine Bestätigung dieser Einbußen lässt sich mit einem Vergleich ausgewählter Varianten ohne die Trinkwarmwasserbereitung darstellen. Als Referenz wurde der Standort Zwickau mit dem Gebäudetyp EFH zwei herangezogen. Für die Simulationen werden die

Schemen zwei und vier betrachtet (Schema eins entfällt auf Grund der Dopplung). Eine Verbesserung der SCOP-Werte soll anhand der nachfolgenden Tabelle genauer untersucht werden.

Tabelle 36: Vergleichssimulation mit und ohne Warmwasserbereitung

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwandszahl eP	SJAZ	Ehz	Einschaltungen-WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
Einheit		kWh	kWh	kWh	kWh			kWh		h	
V2.0.2	Puffer oÜ	18926	18953	1,4	5032	0,48	3,8	14,2	466	3222	3,83
V2.1.1	Puffer	18990	18889	0	4991	0,48	3,8	0	426	3253	3,86
V4.0.1	oÜ	18696	18790	3,1	5028	0,48	3,7	11,1	195	2780	3,72
V4.1.1N	TWW	18825	18912	0	4995	0,48	3,8	0	376	2892	3,77
V2.0.2	Puffer oÜ	21619	21299	7,6	5807	0,49	3,7	0	645	3541	3,77
V2.1.1	Puffer	21720	21262	4,9	5768	0,49	3,7	0	857	3621	3,81
V4.0.1	oÜ	21356	21093	9	5733	0,49	3,7	17,8	460	3277	3,73
V4.1.1N	TWW	21529	21242	9,2	5769	0,49	3,7	35,1	788	3332	3,75
V2.0.3	Puffer oÜ	21671	21336	3,8	5907	0,5	3,7	0	760	3312	3,72
V4.0.2	oÜ TWW Stufe	21426	21149	3,9	5830	0,5	3,6	0	490	3068	3,68

Im oberen Bereich ist die Simulation ohne Warmwasserbereitung und im unteren Bereich mit Warmwasserbereitung dargestellt. Gleiche Hydraulische Schaltungen sind in der gleichen Hintergrundfärbung gekennzeichnet. In Bezug auf die Jahresnutzenergie und den totalen Energieverbrauch der elektrischen Komponenten im System ergeben sich deutlich geringere Werte für Varianten ohne Warmwasserbereitung. Die Anzahl der Einschaltungen ist ebenfalls deutlich geringer. Jedoch fällt der Vergleich der SCOP-Werte nicht signifikant aus. Hintergrund dieser Annahme sind die geringen hinterlegten Leistungsstufen von 50 % und der daraus resultierenden hohe Gütegrade für die Warmwasserbereitung. Eine deutliche Verbesserung des SCOP ist jedoch nicht feststellbar. Ein Vergleich mit höherer Leistungsstufe wird in den unteren beiden Spalten deutlich. Hier wurde eine Leistungsstufe von 80 % für die Erwärmung angesetzt. Die Verschlechterung beläuft sich auf 3 % gegenüber der Variante ohne Trinkwarmwasserbereitung.

3.4 Eigenstromnutzung Gebäudetyp EFH 2 Standort Zwickau

In diesem Abschnitt soll die Erhöhung des Eigenstromverbrauchs durch die Überladungslogik untersucht werden. Bei der Untersuchung handelt es sich um einen Überblick mit fest definierten Varianten und einer vorgegebenen PV-Anlage. Die Betrachtung beschränkt sich auf eine Simulation für den Standort Zwickau auf Grund der jährlichen Einstrahlung, die dem deutschen Mittelwert entspricht und den Gebäudetyp EFH zwei mit Fußbodenheizung.

Für die Auswahl der PV-Anlage dienen die nachfolgenden Ausführungen entsprechend der Simulationssoftware Polysun.

Name	Wert	Einheit	Schema
Beschreibung	▼ sichtbar		
Anzeige in Report	PIK580M (156H) (1500V) ...		
Photovoltaik	Pikcell Group Ltd		
- Hersteller	monokristallin		
- Modultyp	580	W	
- Nennleistung STC	2,77	m ²	
- Bruttofläche	▼ Wetterdaten verwenden		
Berechnungsmethode	▼ Anzahl Module		
Bezugsgrösse für die Fläche	15		
Anzahl Module	15		
Anzahl Module (Auslegung)	8,7	kW	
Gesamte Nennleistung DC	41,55	m ²	
Bruttogesamtfläche	0	°	
Ausrichtung (O=+90°, S=0°, W=-90°)	45	°	
Anstellwinkel (hor.=0°, vert.=90°)	▼ Keine Nachführung		
Nachführung	50	%	
Windanteil	▼ mittel		
Hinterlüftung	2	%	
Verschmutzung	0,5	%	
Degradation	▼ Verlustfaktor		
Berechnung Kabelverluste	2	%	
Kabelverluste	4	%	
Mismatching	▼ Wizard		
Wechselrichterauslegung	1		
Anzahl Wechselrichtertypen	Wechselrichter		
Auslegung 1: Wechselrichter	1		
Auslegung 1: Anzahl Wechselrichter	1		
Auslegung 1: A Anzahl Stränge	15		
Auslegung 1: A Module pro Strang	1		
Auslegung 1: Cos phi			

Abbildung 63: Festlegung der Parameter für die PV-Anlage

Bei der Auswahl wurde eine für ein Einfamilienhaus entsprechende PV-Anlage konzipiert. Dabei wurde im Groben eine Dachfläche von 50 m² berücksichtigt, die eine Neigung von 45° und eine Ausrichtung gen Süden aufweist. Der Stromverbrauch wurde mittels Standardprofil und einem Jahresenergieverbrauch von 3500 kWh festgelegt. Für das Stromnetz wurden die Polysun-Grundeinstellungen entsprechend nachfolgender Darstellung übernommen.

Name	Wert	Einheit	Schema
Beschreibung	▼ sichtbar		
Anzeige in Report	▼ Dreiphasen (230V/4...		
Stromnetz	Dreiphasen-Stern		
- Netzform	400	V	
- Nennspannung	50	Hz	
- Nennfrequenz	▼ Elektrisch		
Energieträger	400	V	
Örtliche Netzspannung	400	V	
Verkettete Spannung	230,9	V	
Sternspannung	▼ Pro Phase		
Phasenschieflast prüfen	4,6	kW	
Maximale Phasenschieflast	▼ ja		
Netzeinspeisung	▼ nein		
Profil verwenden	▼ nein		
Wirkleistungsbegrenzung	▼ ja		
Anti-Blackout			

Abbildung 64: Definition Stromnetz

Bei dem hinterlegten Stromnetz handelt es sich um ein Dreiphasenstromnetz mit einer Netzspannung von 400 V.

Anhand dieser Grundgegebenheiten wurden für die Schemen-Varianten eins, zwei und vier, je vier Simulationen geprüft. Für diese Simulationen ergeben sich nachfolgende Aufstellungen. (12)

Tabelle 37: Simulationsvarianten Eigenstromnutzung

Bezeichnung	Einheit	V1.0.2	V1.1.1	V1.1.2	V1.1.3	V2.0.2	V2.1.1	V2.1.2	V2.1.3	V4.0.1	V4.1.1N	V4.1.2N	V4.1.3N
Änderung		TWW + oÜ	Puffer	Puffer Strom	Puffer Strom	TWW + oÜ	Puffer	Puffer Strom	Puffer Strom	oÜ	TWW	TWW Strom	TWW Strom
Puffer-volumen	l	500	500	500	500	500	500	500	500				
TWW-Volumen	l			140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
Lade-zeitraum			15-17	15-17	12-17		15-17	15-17	12-17		15-17	15-17	12-17
Überladungs-regelung			definierte Leistungsstufe	strom-geführt	strom-geführt		definierte Leistungsstufe	strom-geführt	strom-geführt		definierte Leistungsstufe	strom-geführt	strom-geführt
TWW-Regelung		definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe	definierte Leistungsstufe

Die vier Varianten sollen im Nachgang anhand der Variante eins genauer beschrieben werden. Die Grundvariante (grau hinterlegt) stellt die Referenz einer jeden Schemen-Variante dar. Die Pufferspeicher sind für alle Varianten gleich groß gewählt. Das Volumen der Trinkwarmwasserspeicher wurde an den einfachen Tagesverbrauch angepasst. Für die Variante V... .1.1 sind die grundlegenden Überladungsparameter hinterlegt. Mit dieser Einstellung soll der reine Vergleich mit und ohne Überladung erfolgen. Für die Erhöhung des Eigenstromverbrauchs wurden zwei weitere Varianten erstellt. Für diese wurde in der programmierbaren Regelung eine stromgeführte Leistungsstufe hinterlegt. In dieser Einstellung nutzt die Wärmepumpe möglichst den über den Steuerungswert „geregelter Leistung Wärmeproduzierung“ verfügbare elektrische Leistung aus. Als hinterlegter Wert dient der Ertrag abzüglich der hinterlegten elektrischen Verbraucher entsprechend dem Verbrauchsprofil. Dies hat zur Folge, dass die Wärmepumpe nicht mehr auf der Leistungsstufe von 50 % betreiben wird. Für die letzte Variante wurde das Überladungszeitintervall auf die Mittagsstunden in Erwartung höherer Solarerträge auf 12 bis 17 Uhr angepasst. Auf Grund der Trinkwarmwasserbereitung im Sommer werden auch die Monate Juni, Juli und August im Überladungsbetrieb freigeschaltet. Mit Hilfe der Vergleichsfunktion der Polysun-Software ergeben sich nachfolgende Unterscheidungen in Bezug auf den Eigenverbrauch des erzeugten PV-Stroms.

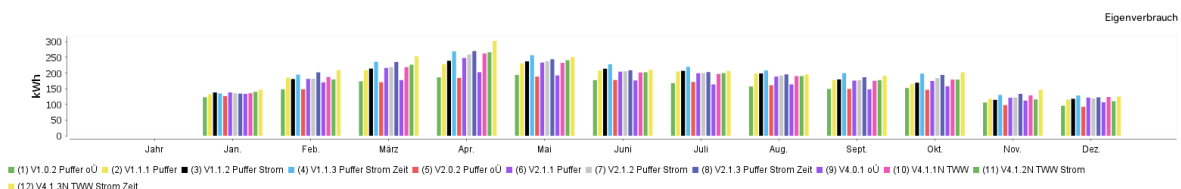


Abbildung 65: Variantenvergleich – Eigenverbrauch

Anhand der Darstellung lässt sich erkennen, dass für alle Simulationen ohne Überladung oder Anpassung der Regeleinstellungen der geringste Eigenverbrauch zu verzeichnen ist. Des Weiteren wird deutlich, dass mit jeder weiteren Anpassung der Regeleinstellungen ein höherer Eigenstromverbrauch zu verzeichnen ist. Der maximale Eigenstromverbrauch ergibt sich für den Monat April. Der totale Eigenverbrauch lässt sich anhand nachfolgender Darstellung erkennen, um die Abbildung zu untermauern.

Tabelle 38: Variantenvergleich Eigenstromnutzung

Bezeichnung	Einheit	V1.0.2	V1.1.1	V1.1.2	V1.1.3	V2.0.2	V2.1.1	V2.1.2	V2.1.3	V4.0.1	V4.1.1N	V4.1.2N	V4.1.3N
Änderung		TWW + oÜ	Puffer	Puffer Strom	Puffer Strom	TWW + oÜ	Puffer	Puffer Strom	Puffer Strom	oÜ	TWW	TWW Strom	TWW Strom
Qinv (PV-Ertrag)	kWh	5477	5477	5477	5477	5477	5477	5477	5477	5477	5476,8	5476,8	5476,8
Eigenverbrauch	kWh	1831	2173	2211	2406	1816	2204	2234	2332	1905	2234	2230	2442
Netzeinspeisung	kWh	3646	3304	3266	3071	3661	3272	3243	3145	3572	3243	3247	3035
Netzbezug	kWh	7606	7206	7362	7954	7491	7075	7198	8070	7328	7035	7069	6976
Qaux	kWh	21902	21967	21902	21752	21619	21777	21677	21590	21356	21552	21555	21621
Quse	kWh	21191	21206	21162	20999	21299	21285	21212	21117	21093	21256	21263	21333
Qdef	kWh	61,6	59,6	60,7	80,1	7,6	4,6	4,6	10,3	9	9,2	4,9	19,3
Etot	kWh	3960	3903	4096	4883	3831	3803	3955	4925	3756	3792	3822	3941
SIAZ-PV		3,98	4,4	4,28	3,8	4,07	4,52	4,41	3,71	4,18	4,57	4,52	4,66
SIAZ		3,6	3,7	3,5	3,1	3,7	3,7	3,6	3,1	3,7	3,7	3,7	3,6
Ehz	kWh	0	0	0	795	0	0	0	1187	17,8	35,1	0	68
Einschaltung en-WP		462	703	577	635	645	919	825	892	460	855	831	796
Laufzeit-WP	h	3831	3896	4158	4411	3541	3619	4040	4115	3277	3336	3561	3847
SCOP-WP		3,74	3,78	3,65	3,53	3,77	3,81	3,7	3,66	3,73	3,75	3,72	3,69

Anhand der Darstellung werden der PV-Ertrag, der Eigenverbrauch, die Netzeinspeisung, sowie der Netzbezug zu den bereits für andere Varianten betrachteten Größen ergänzt. Unter der Nutzung der Überladungsregelung über einen verlängerten Zeitraum von 12 bis 17 Uhr und eine stromgeführte Überladung ergeben sich erhöhte Eigenverbräuche von bis zu 30 %. Jedoch ist auffällig, dass für die Varianten mit dem höchsten Eigenstromverbrauch der höchste Zusatzenergiebedarf durch den Heizstab und auch der höchste totale Energieverbrauch gemessen werden kann. Mit Blick auf den Netzbezug des Anlagenkomplexes ergeben sich Einsparungen für die Varianten mit einer leistungsstufengeführten und einer stromüberschussgeführten Betriebsweise. Der geringste Netzbezug ist für die Variante mit leistungsstufengeführter Betriebsweise

zu verzeichnen. Die Schaltheufigkeit ist für die Überladungsvarianten tendenziell höher, da es zu Schaltungen in den Mittagsstunden kommt.

Anhand der groben Betrachtung dieser Varianten wird deutlich, dass die Betriebsweise einer Überladungsregelung in Kombination mit einer PV-Anlage zu höheren Eigenverbräuchen führen kann. Vergleicht man diese Stromnutzung gegen eine reine Überladung mittels Heizstab, so ergeben sich bei der Überladung mittels Wärmepumpe höhere Effizienzwerte. Eine Variation der Profile, Ausrichtung und Größe der PV-Anlage sind bei weiteren Untersuchungen denkbar. Diese Aspekte werden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

4. Ergebnisse für das Mehrfamilienhaus

Für die Gebäudetypen der Gruppe der Mehrfamilienhäuser wurden nachfolgend ebenfalls zahlreiche Daten aufgenommen. Betrachtet wurde hier ebenfalls das MFH zwei für verschiedene klimatische Bedingungen, sowie unterschiedliche Gebäudetypen am Referenzstandort Zwickau. Weitere Informationen entsprechend der Anlagen [17].

4.1 Betriebsverhalten Gebäudotyp MFH 2 am Standort Zwickau

Zur Betrachtung der Wirkungsweise des Überladungsbetriebes werden die Speichertemperaturverläufe und Betriebszustände, entsprechend den Auswertungen zum Gebäudotyp EFH zwei zugrunde gelegt. Für die Auswertung werden die Varianten eins bis vier herangezogen. Die Simulationsergebnisse können in der nachfolgenden Tabelle verglichen werden. In der Tabelle sind die Vergleichsgrößen entsprechend der vorhergehenden Simulationen gewählt. Auffällig ist, dass für das MFH zwei die besten SCOP-Werte für die Variante eins ermittelt werden konnten (gemeinsamer Speicher und Frischwasserstation). Der geringste Energieverbrauch wurde mit der Konfiguration der Variante 4 erreicht. Es ist jedoch abzuwägen, ob eine Verschaltung ohne Puffer für ein Mehrfamilienhaus üblich ist.

Mittels Überladungsregelung konnten für die verschiedenen Szenarien Energieeinsparungen von bis zu 600 kWh im Jahr für das betrachtete Mehrfamilienhaus ermittelt werden. Diese Einsparung beläuft sich in Relation zum Gesamtenergiebedarf auf eine Einsparung kleiner 1 % des Gesamtenergiebedarfs und bestätigt ebenfalls die Erwartungen an die Effizienzsteigerung, sowie die damit verbundene Reduzierung des Energiebedarfs nicht. Die SCOP-Werte konnten vereinzelt um bis zu 7 % verbessert werden, was jedoch keinen größeren Einfluss auf den Jahresenergieverbrauch hatte, da Speicherverluste diese Einsparung aufheben.

Tabelle 39: Simulationsergebnis Speicherüberladung MFH

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwandszahl eP	SJAZ	Ehz	Ein-schaltungen-WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
Einheit		MWh	MWh	kWh	kWh			kWh		h	
V1.0.2	Puffer + oÜ	96,5	95,8	31,6	25272	0,47	3,8	0	913	3382	3,83
V1.1.1	Puffer	96,4	95,7	29	24892	0,47	3,9	0	963	3435	3,88
V2.0.2	Puffer + oÜ	97,9	97,9	15	27856	0,51	3,5	0	1639	2613	3,52
V2.1.1	Puffer	98,1	97,8	32,6	26632	0,49	3,7	0	1609	2976	3,69
V2.1.3	Puffer + TWW	98,7	98,1	3,6	26641	0,49	3,7	0	1314	2982	3,71
V4.0.1	oÜ	96,1	96,2	17,5	27153	0,51	3,5	0	643	2548	3,54
V4.1.1	TWW	103	103	31,9	28102	0,49	3,7	0	996	2963	3,66
V4.1.2	TWW	103	103	3,7	28307	0,49	3,6	0	636	2918	3,65

Für eine genauere Betrachtung der Betriebsweise werden die grafischen Auswertungstools der Simulationssoftware Polysun herangezogen. Betrachtet werden die mittlere stündliche Außentemperatur, die mittlere Außentemperatur gemittelt über 24 h, der Betriebszustand der Wärmepumpenregelung, sowie der Heizstabregelung und die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Ergänzt werden diese Erkenntnisse durch die Simulationsergebnisse des Speichertemperaturverhaltens. Die unterschiedlichen Bezeichnungen der Betriebszustände sind anhand der nachfolgenden Aufzählung genauer charakterisiert.

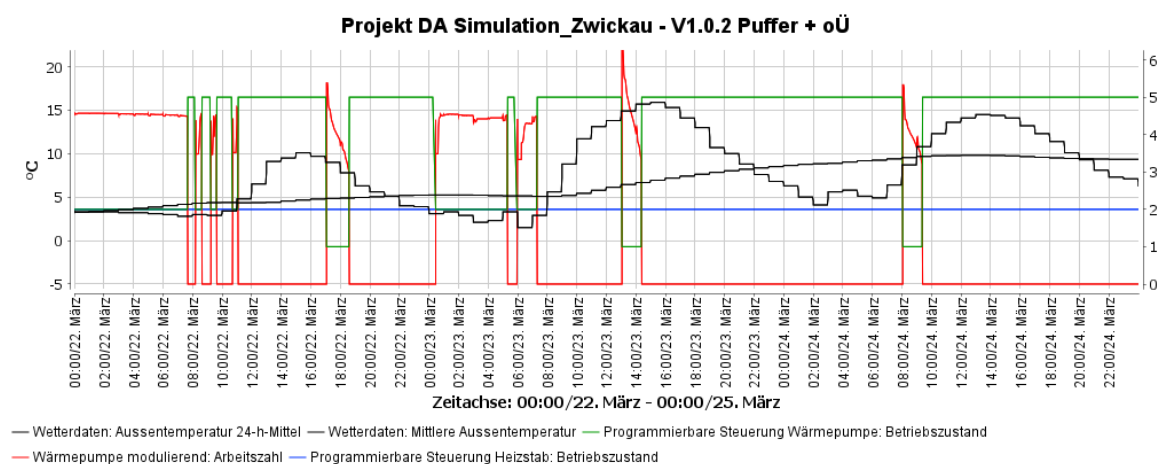
Programmierbare Steuerung Heizstab (oder 3)

- Betriebszustand 1: Ein
- Betriebszustand 2: Aus

Programmierbare Steuerung Wärmepumpe

- Betriebszustand 1: Ein Warmwasserbereitung
- Betriebszustand 2: Ein Wärmebereitstellung Heizkreis
- Betriebszustand 3: Ein Überladung Warmwasser
- Betriebszustand 4: Ein Überladung Heizkreis
- Betriebszustand 5: Aus Wärmepumpe

Um die Regellogik für unterschiedliche Hydraulikschemen und den Zustand mit und ohne Überladung werden nachfolgende Diagramme verglichen.



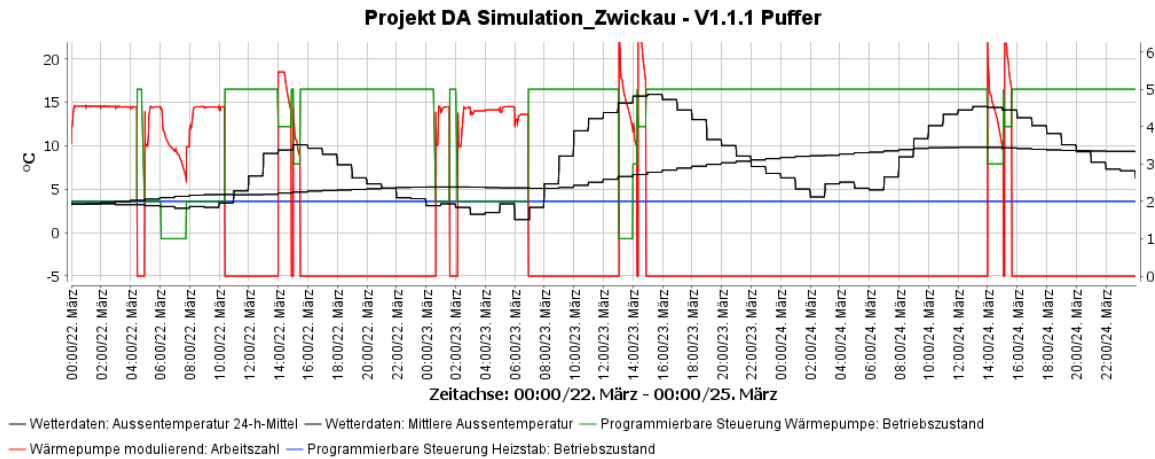
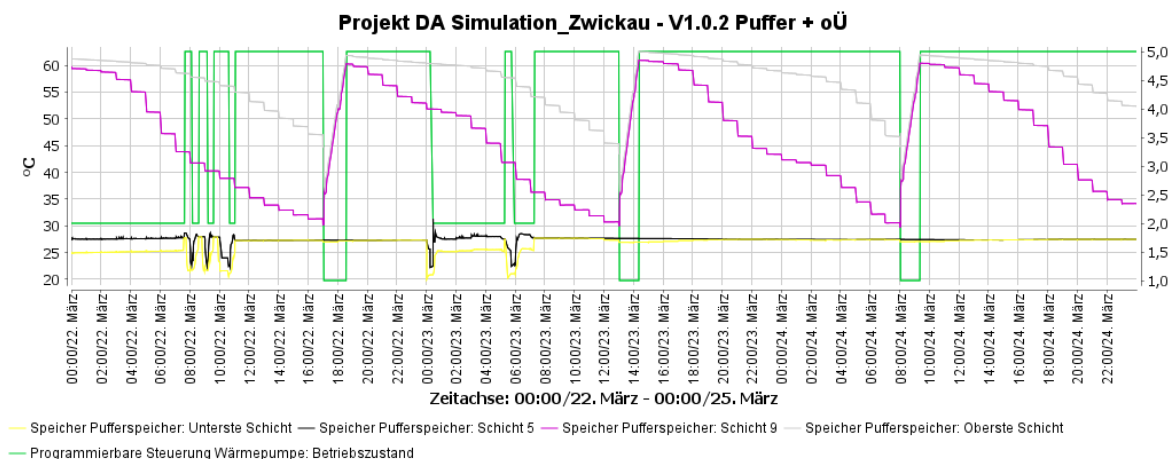


Abbildung 66: Betriebsverhalten Schema 1

Für die Betrachtung des Betriebsverhaltens wurde der Betrachtungszeitraum vom 22.03. 00:00 Uhr bis 25.03. 00:00 Uhr gewählt und in der obigen Darstellung mit Hilfe der grafischen Auswertung des Systems Polysun dargestellt.

Es wird deutlich, dass für manche Tage eine Überladung vollkommen möglich ist und die Schaltzeiten lediglich in den Überladungsintervallen stattfinden. Für den gewählten Zeitraum ergeben sich jedoch für die Warmwasserbereitung zusätzliche Schaltzeiten an denen nachgeheizt wird. Vom 23. Bis 24. März ist zu erkennen, dass die Speicherladung lediglich im Bereich der Überladungszeiträume stattfindet. Auf Grund der relativ hohen Außentemperaturen ist eine Nachheizung der Gebäude Heizung nicht erforderlich.



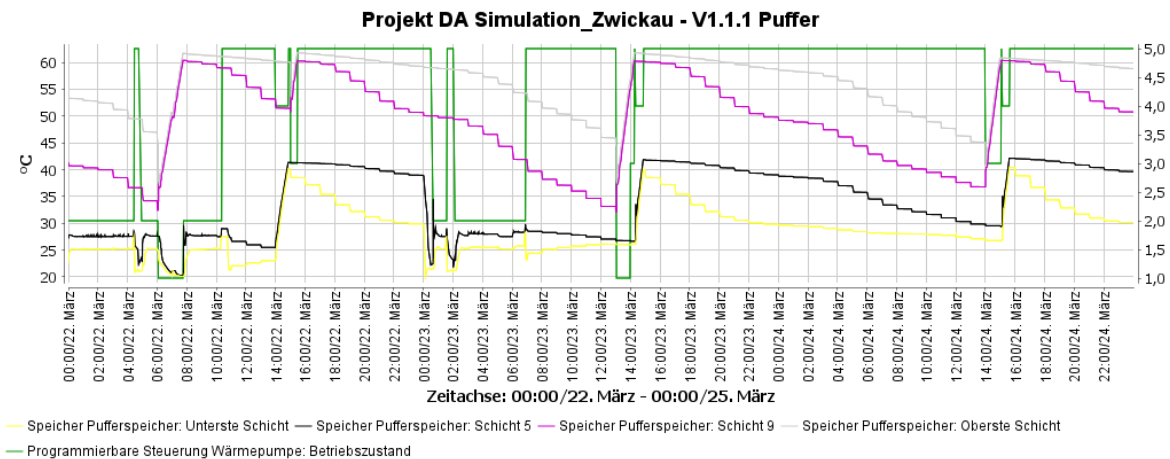


Abbildung 67: Speichertemperaturverläufe Schema 1 (MFH)

Anhand der Darstellung sind die Speichertemperaturen des gemeinsamen Speichers dargestellt. Mit Bezug auf die Sekundärachse wurde der Graph des Betriebszustandes hinzugefügt. Im Vergleich der beiden Varianten mit und ohne Überladung wird deutlich, dass die Deckung rein aus dem Überladungsbetrieb nicht ausreichend ist und es zu Nachheizungen für Warmwasser und den Heizkreis kommt. Für den 24. März lässt sich eine ideale Betriebsweise der Überladungsregelung erkennen. Diese führt dazu, dass die Trinkwassererwärmung auf den Zeitraum der höchsten Außentemperaturen fällt. In dem Zeitbereich vor dem 24. März lassen sich jedoch ähnliche Verhalten wie für eine Betriebsweise ohne Überladung erkennen.

Im nachfolgenden werden die weiteren betrachteten Schemen für den Wärmeüberträger Fußbodenheizung dargestellt und kurz ausgewertet. Es ergeben sich Parallelen zu den Ausführungen des Abschnittes Einfamilienhaus, wodurch auf eine tiefgründigere Auswertung verzichtet wird.

Für die Variante 2 ergibt sich, dass der Überladungsbetrieb erst mit einer Verdopplung des Trinkwarmwasservolumens in Gang kommt (Variante V2.1.3) und die Überladung den Trinkwarmwasserbedarf decken kann. Für die Deckung des Bedarfs an Heizenergie sind für diese Betrachtung größere Speicher notwendig aber auch unwirtschaftlicher auf Grund der Speicherverluste, da die Wärmepumpe in den Nachtzeiten für die Raumheizung zuschalten muss. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich ebenfalls für die Variante vier. Die Zuschaltung der Wärmepumpe außerhalb des Überladungszeitraumes ist zur Deckung des Heizenergiebedarfs notwendig.

4.2 Simulationsergebnisse Standortvariationen Gebäudetype MFH 2

In diesem Unterkapitel sollen die Standortvarianten der Simulationen für den Gebäudetype MFH zwei genauer betrachtet werden. Als Vergleichsgrundlage dient der Gesamtenergieverbrauch (Etot) der Wärmeerzeuger. Eine Aufstellung ist nachfolgender Abbildung zu entnehmen.

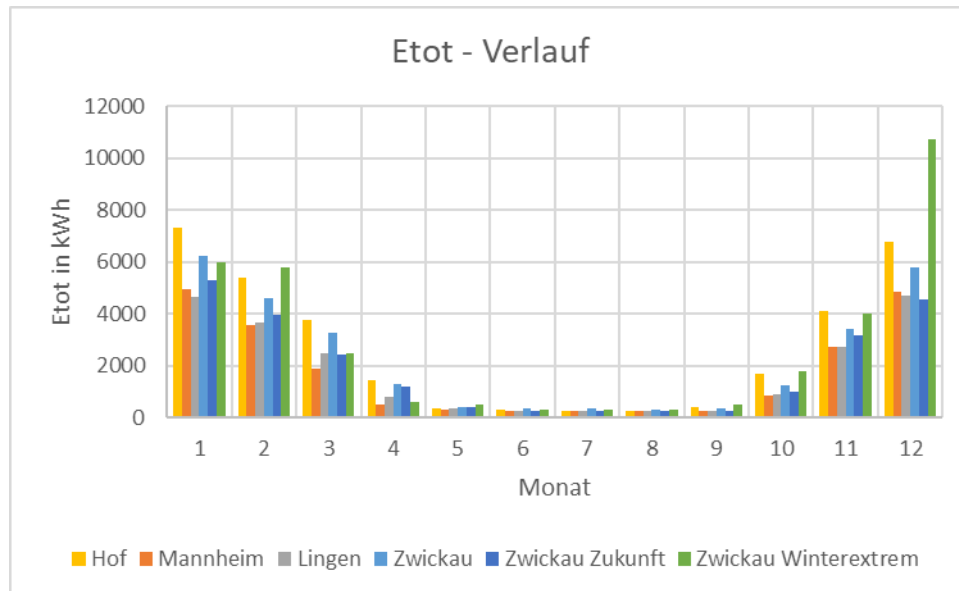


Abbildung 68: standortabhängiger Etot – Verlauf für MFH

Anhand der Darstellung lassen sich wie erwartet Parallelen zu den Auswertungen des Einfamilienhauses ziehen. Die höchsten Verbräuche werden für den Standort Hof erwartet, es ist anzunehmen, dass die Zuheizung mittels Heizstab für diesen Standort am größten ist. Für den Standort Mannheim ergeben sich lediglich in den Monaten Januar und Dezember (1, 12) höhere Verbräuche als für den Standort Lingen. Trotz einer geringeren Normaußentemperatur ist das Temperaturniveau im Standort Lingen niedriger als für Mannheim, woraus höher Energieverbräuche resultieren. Anhand des Zukunftsreferenzjahres des Standortes Zwickau lassen sich tendenziell geringere Verbräuche auf Grund einem steigenden Temperaturniveau ableiten. Ausschlaggebend für das Winterextrem-Referenzjahr des Standortes Zwickau, sind ein kalter Dezember und für Übergangsmonate höhere Temperaturniveaus als für das Standardreferenzjahr. Eine genauere Betrachtung der Resultate ermöglicht nachfolgende Tabelle.

Tabelle 40: Simulationsergebnisse MFH 2 Standortvergleich

	Einheit	Hof	Mannheim	Lingen	Zwickau	Zwickau Zukunft	Zwickau Winter- extrem
Transmissionswärmeverlust Polysun	W	35100	34330	29521	32300	33310	36900
Lüftungswärmeverlust Polysun	W	12058	12242	10527	11500	11878	13166
niedrigste Außentemperatur TRY	°C	-13,7	-12,3	-7,8	-10,5	-11,4	-15,4
Heizlast	W	47158	46572	40048	43800	45188	50066
Quse	MWh	106	74,8	79,2	97,4	83,3	99,9
Ehz	kWh	182	0	0	0	0	1391
Anteil Heizstab		0%	0%	0%	0%	0%	1%
Normaußentemperatur	°C	-14,38	-10,46	-8,9	-13,55	-13,55	-13,55
Leistung Wärmepumpe A- 7/W35	W	37167	37167	37167	37167	37167	37167
Leistung Wärmepumpe bei Normaußentemperatur	W	29370	34032	37194	30357	30357	30357
Leistung Wärmepumpe bei niedrigster Simulationstemperatur	W	30177	31842	37194	33984	32913	28155

Anhand dieser Darstellung bestätigt sich der Etot-Verlauf. Die höchste Heizlast des Gebäudes wurde für den Standort Zwickau in Betrachtung des Winterextrems und den Standort Hof ermittelt. Trotz einer höheren Heizlast des Gebäudes am Standort Mannheim, wurde ein geringerer Nutzenergiebedarf ermittelt. Dies ist auf die im Abschnitt EFH beschriebenen höheren Temperaturniveaus in den Übergangsmonaten zurückzuführen. In Bezug auf den Standort Zwickau ergeben sich für das Zukunftsreferenzjahr höhere Heizlasten resultierend aus niedrigeren Außentemperaturen und ein geringerer Nutzenergiebedarf auf Grund eines in Summe höheren Außentemperaturniveaus. Es ist zu erwarten, dass für zukünftige klimatische Bedingungen, der Heizstabanteil steigt, wobei der Gesamtenergiebedarf sinkt.

Betrachtet man die Leistungsdaten der Wärmepumpe VWL 155/6, die hier in dreifacher Ausführung hinterlegt ist, ergeben sich für die unterschiedlichen Außentemperaturen (Quellentemperaturen) gesonderte Leistungswerte. Eine Deckung der Heizlast im monovalenten Betrieb ist in keinem Szenario festzustellen, da die erforderliche Heizlast die abgebbare Leistung der Wärmepumpe übersteigt. Dennoch ist der Einsatz des Zusatzheizers nur in den extrem kalten Testreferenzjahren zu einem Anteil von 1 % am Gesamtenergiebedarf notwendig. Dies resultiert aus der Speicherfähigkeit der Gebäudehülle und kurzen Zeiträumen an denen niedrige Außentemperaturen herrschen.

Um die Ausnutzung des Leistungspotentials der Wärmepumpenkaskade betrachten zu können werden im Nachgang die mittleren Leistungsstufen eines Monats für die Standorte und den Gebäudetyp MFH zwei verglichen.

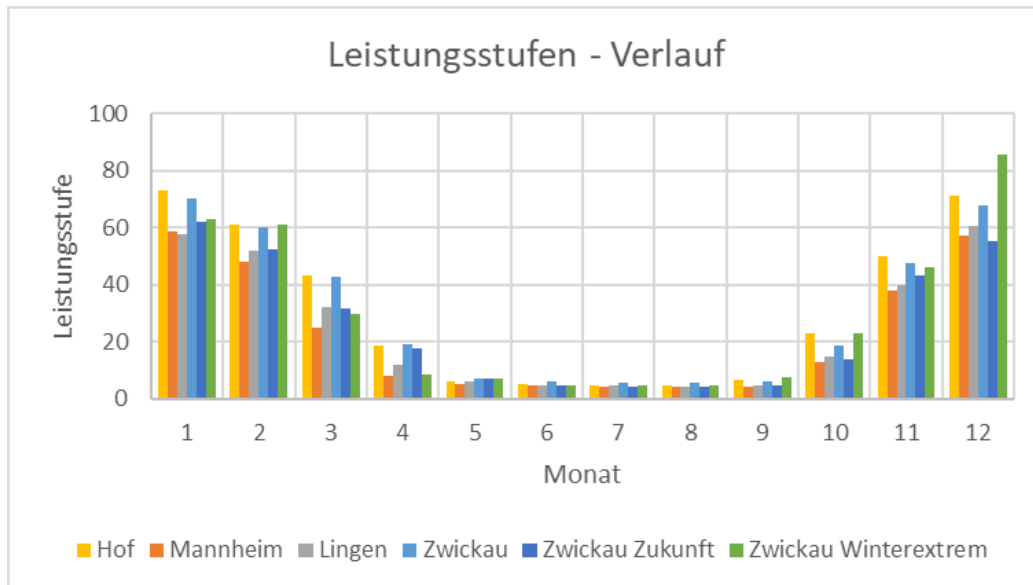


Abbildung 69: Leistungsstufenverlauf standortspezifisch MFH

Anhand der Darstellung lässt sich erkennen, dass eine Auslastung bis 85 % in den Wintermonaten gegeben ist. Dies trifft jedoch lediglich auf das winterextreme Testreferenzjahr für den Standort Zwickau zu. Für Hof und Zwickau ergeben sich mittlere Leistungsstufen von 70 bis 75 %. Für die Standorte Mannheim und Lingen, sowie das Zukunftsreferenzjahr für Zwickau können gegebenenfalls Wärmepumpen mit einer geringeren Leistung eingesetzt werden. Hierfür wurde für den Standort Lingen die Anzahl der Wärmepumpen auf zwei reduziert. Eine Veränderung der monatlichen Leistungsstufenmittel ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

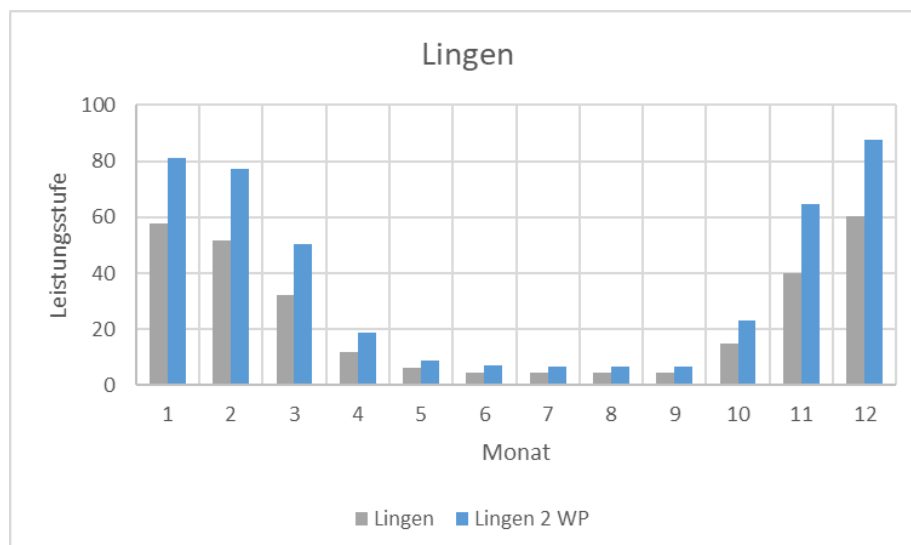


Abbildung 70: Vergleich Wärmepumpenleistungsstufe Lingen, MFH 2

Die Reduzierung der Wärmepumpenanzahl führt zu höheren Leistungsstufenmittelwerten im Jahresverlauf. Für die Wintermonate sind mittlere Leistungsstufen von 75 bis 85 % zu erwarten. Bei geringen Außentemperaturen kann es zur vermehrten Zuschaltung des Zusatzheizers kommen.

4.3 Simulationsergebnisse Gebäudevariation Standort Zwickau

Für den Standort Zwickau wurden ebenfalls die Gebäudetypen variiert. Hierbei wurde die Gebäudevariation der Gebäudetypen MFH eins, zwei und drei um die Unterkategorien 2.1 und 3.1 erweitert. Diese Varianten unterscheiden sich von der Speicherfähigkeit der Gebäudehülle. Als Wert der Wärmekapazität wurden hier $600 \frac{kJ}{K \cdot m^2}$ ergänzt. Grundlage des Vergleichs bilden die unterschiedlichen U-Werte der Gebäudehülle, die eine Mischung aus Baualtersklassen und Sanierungsstand darstellen.

Zur Betrachtung der Auslegung der Wärmepumpen sollen die monatlich gemittelten Leistungsstufen der Wärmepumpen verglichen werden. Es ist zu beachten, dass für alle Anlagen die gleiche Wärmepumpe genutzt wurde, der Faktor sich jedoch unterscheidet.

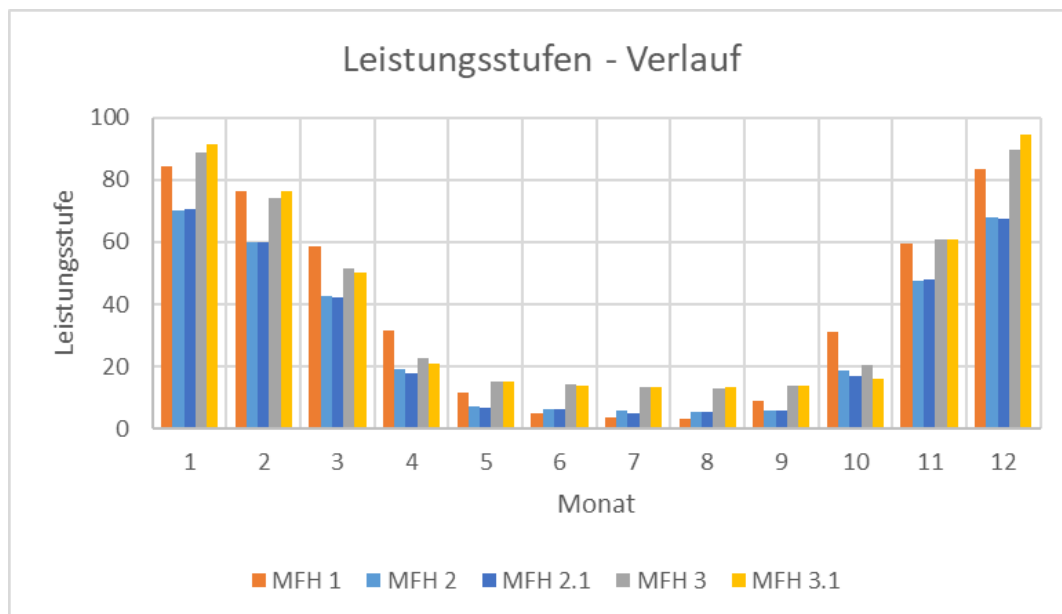


Abbildung 71: gebäudespezifischer Leistungsstufenverlauf (MFH)

Für alle Wärmepumpen ergeben sich geeignete Auslastungen des Gesamtsystems in den relevanten Winter- und Übergangszeiten. Gegebenenfalls würde eine Anpassung der Wärmepumpenleistung für den Gebäudetyp zwei in Frage kommen,

der hier jedoch nicht weiter diskutiert werden soll. Anhand des Verlaufs wird ebenfalls deutlich, dass kleinere Wärmepumpen in Sommermonaten, bedingt durch die Warmwasserbereitung in höheren Leistungsstufen betrieben werden. Für den Typ drei werden ebenfalls sehr hohe Auslastungen in den Wintermonaten erzielt. Im Allgemeinen ist anzumerken, dass die vorausgewählte Anzahl an Wärmepumpen die Simulation nicht decken und eine Erhöhung der Wärmepumpenzahl um eine Wärmepumpe für alle Gebäudetypen sinnvoll erachtet wurde um den Bedarf zu decken. Für Variante eins und zwei war eine Erweiterung und die Vergrößerung des Heizstabes zwingend erforderlich. Eine Erklärung für diese fehlerhafte Auslegung ist die Mittelung der Heizlast über die Baualtersklassen. Eine separate Berechnung erfolgte nicht, ist jedoch für zukünftige Untersuchungen unabdingbar.

Ein weiterer Vergleich besteht in der Betrachtung der Jahres-Energieverbräuche der Wärmeerzeuger (Etot).

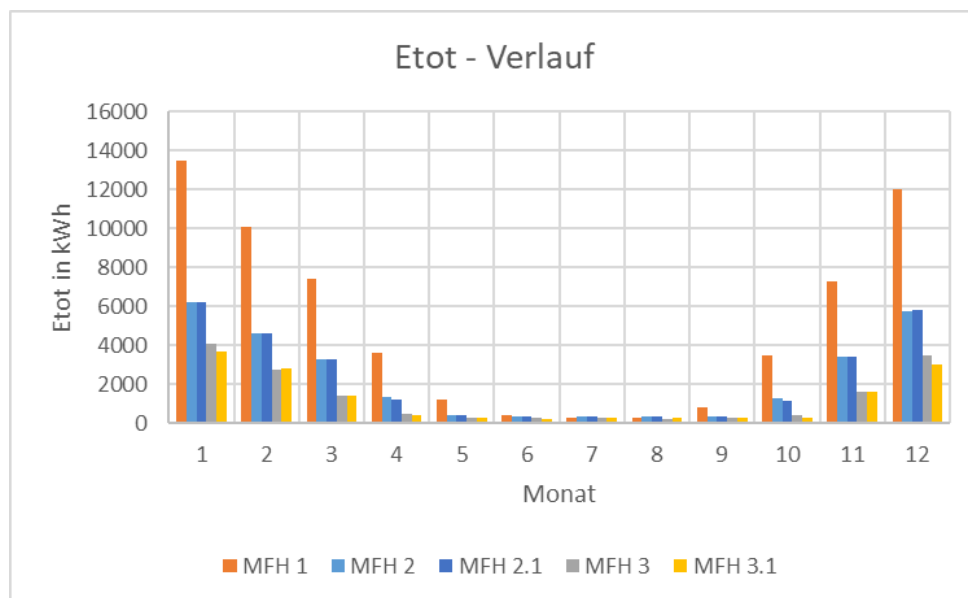


Abbildung 72: gebäudespezifischer Etot-Verlauf (MFH)

Für das Mehrfamilienhaus eins ergeben sich die höchsten Energieverbräuche. Für das Mehrfamilienhaus zwei ergeben sich angesichts der unterschiedlichen Speicherfähigkeit kaum Unterschiede, hingegen der Gebäudetyp drei zeigt Verringerungen der Speicherfähigkeit während der Winter- und vereinzelt der Übergangsmonate. Gesamtheitlich betrachtet kann man von einer Halbierung des Energieverbrauchs je Steigerung der Sanierungsstufe sprechen. Dies wird vor allem in den Übergangsmonaten deutlich. Anhand nachfolgender Tabelle sollen die

Heizlasten der Gebäude, sowie die Wärmepumpenkonfigurationen verglichen werden.

Tabelle 41: Simulationsergebnis Gebäudetypenvergleich

	Einheit	MFH 1	MFH 2	MFH 2.1	MFH 3	MFH 3.1
Transmissionswärmeverlust Polysun	kW	56,5	32,3	32,4	17,71	17,9
Lüftungswärmeverlust Polysun	kW	11,4	11,5	11,6	11,3	11,4
niedrigste Außentemperatur	°C	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5
Heizlast	kW	67,9	43,8	44	29,0	29,3
Quse	MWh	195	97,4	96,2	47,5	46,4
Ehz	kWh	1781	0	0	999	1451
Anteil Heizstab		9%	0%	0%	21%	31%
Normaußentemperatur	°C	-13,55	-13,55	-13,55	-13,55	-13,55
Leistung Wärmepumpe A-7/W35	kW	49,6	37,2	37,2	12,4 (24,8)	12,4 (24,8)
Leistung Wärmepumpe bei Normaußentemperatur	kW	40,5	30,4	30,4	10,1 (20,2)	10,1 (20,2)
Leistung Wärmepumpe bei niedrigster Simulationstemperatur	kW	45,3	34,0	34,0	11,3 (22,7)	11,3 (22,7)
Anzahl gleicher Wärmepumpen		4	3	3	1 (2)	1 (2)
Zusatzleistung Heizstab	kW	18	8	8	15	15

Anhand der Heizlasten bestätigt sich das zuvor gewonnene Bild. Die höchste Heizlast ergibt sich für das Mehrfamilienhaus eins. Wohingegen sich der Energieverbrauch der Wärmeerzeuger auf die Gebäudetypen halbiert, so ist ein solches Muster für die Jahresnutzenergie nicht zu bestätigen. Anhand der Anpassung der Heizlast wird jedoch ebenfalls das Potential von Dämmmaßnahmen deutlich. Des Weiteren zeigt sich die Speicherfähigkeit und Dynamik der Gebäudehülle im Vergleich der gemessenen maximalen Heizlast während der Polysunsimulation zu der maximalen Heizleistung der Wärmepumpe. Es ergibt sich eine Differenz von 22 kW, die jedoch mit dem Heizstab größtenteils abgedeckt werden können. Resultat einer zu geringen Leistung sind in diesem Fall, das Nichterreichen der Sollraumtemperatur von 20 °C, wobei in allen Simulationsfällen von der Vollnutzung eines Gebäudes und der Raumheizung ausgegangen wird. Sporadisch beheizte Flure und Schlafzimmer werden in der Simulation nicht betrachtet. Eine Differenz von ca. 10 kW konnte in Betrachtung des Gebäudetyps 2 ohne den Einsatz des Heizstabes dennoch gedeckt werden. Für den Gebäudetyp 3 ergeben sich Verbräuche resultierend aus dem Einsatz des Zusatzerzeugers. Die Differenz beläuft sich ohne Betrachtung des Heizstabes auf ca. 20 kW. An dieser

Stelle wäre eine weitere Wärmepumpe notwendig. Was die mangelnde Auslegung, wie im obigen Teil beschrieben, untermauert. Vor allem der hohe Anteil des Heizstabes bestätigt diese Annahme. Eine Reduzierung des Anteils auf kleiner 2 % ist anzustreben, um die Anlageneffizienz zu steigern. Eine weitere Erhöhung der Wärmepumpenanzahl hat Resultate entsprechend nachfolgender Tabelle zur Folge.

Tabelle 42: Vergleich MFH 3, 3.1 Erhöhung Wärmepumpenanzahl

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwandszahl eP	SJAZ	Ehz	Ein-schaltungen-WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
Einheit		MWh	MWh	kWh	kWh			kWh		h	
MFH 3 1 WP	oÜ	47,5	47,5	538	15432	0,59	3,1	2606	901	3476	3,55
MFH 3 2 WP	oÜ 2WP	48,7	48,6	35,9	13965	0,52	3,5	0	3346	2017	3,5
MFH 3.1 1 WP	oÜ	46,8	46,4	297	14378	0,56	3,2	1451	753	3486	3,55
MFH 3.1 2 WP	oÜ 2WP	47,7	47,7	36,3	13674	0,52	3,5	0	3379	1989	3,5

Anhand der Tabelle lässt sich erkennen, dass der Einsatz des Zusatzheizers umgangen werden kann. Der Energieverbrauch der Anlage sinkt ebenfalls um bis zu 700 kWh. Mit der Leistungserhöhung sinkt auch die Auslastung der Wärmepumpe auf eine mittlere Leistungszahl in den Wintermonaten knapp über 50 %. Eine geeignetere Wärmepumpenwahl wäre an dieser Stelle beispielsweise eine Kaskade des Typs VWL 125/6.

Für den Gebäudetyp drei lässt sich der Einsatz des Heizstabes für Gebäude mit höherer Speicherkapazität verringern. Dies lässt sich auf die langsamere Auskühlung der Gebäudehülle zurückführen, sodass der Heizstab zu einem späteren, verzögerten Punkt zuschaltet.

Für die Betrachtung des Speicherverhaltens und deren Auswirkung wird nachfolgende Tabelle betrachtet.

Tabelle 43: Vergleich Speicherverhalten MFH

Bezeichnung	Änderung	Qaux	Quse	Qdef	Etot	Aufwandszahl eP	SJAZ	Ehz	Ein-schaltungen-WP	Laufzeit-WP	SCOP-WP
Einheit		MWh	MWh	kWh	kWh			kWh		h	
EFH 2	oÜ	97,4	97,4	16,4	27649	0,51	3,5	0	3191	2593	3,53
EFH 2.1	oÜ	96,4	96,2	15,4	27433	0,51	3,5	0	3280	2562	3,53
EFH 3	oÜ	47,5	47,5	538	15432	0,59	3,1	2606	901	3476	3,55
EFH 3.1	oÜ	46,8	46,4	297	14378	0,56	3,2	1451	753	3486	3,55

Für den Gebäudetyp drei lässt sich der Einsatz des Heizstabes für Gebäude mit höherer Speicherkapazität verringern. Dies lässt sich auf die langsamere Auskühlung der Gebäudehülle zurückführen, sodass der Heizstab zu einem späteren, verzögerten Punkt zuschaltet. Das Energiedefizit kann für beide Varianten ebenfalls, wie auch der Energieverbrauch reduziert werden. Eine höhere Speicherfähigkeit wirkt sich demnach positiv auf die Betriebsweise aus und kann schlecht dimensionierten

Anlagen puffern. Eine Erweiterung der Wärmepumpe ist jedoch weiterhin erforderlich.

5. Herausstellung wesentlicher Simulationserkenntnisse

Die erhofften Effizienzsteigerungen der Wärmepumpe unter Ausnutzung höherer Außentemperaturen in den Nachmittagsstunden heiterer und bedeckter Typtage konnten mit den verwendeten Regeleinstellungen und Anlagenschemen nicht bestätigt werden. Anzumerken ist jedoch, dass bei einer passend ausgewählten Wärmepumpe die Änderung von Überladungstemperaturen, Zeitintervallen, Speichergrößen und Betriebsprofilen einen geringen bis keinen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Entscheidend für einen effizienten Betrieb sind Bedingungen wie Standort, Gebäudetyp und Sanierungsstand. Resultierend aus den geringen Unterschieden wurde auf eine wirtschaftliche Betrachtung verzichtet. Es ist anzunehmen, dass auf Grund höherer Speicherverluste und Anschaffungskosten ein Überladungssystem nicht wirtschaftlich ist.

Es ist jedoch gelungen eine umfangreiche Variantenmatrix zu erstellen, mit der die unterschiedlichen Anpassungen der Simulation betrachtet und ausgewertet werden konnten. Dabei ergaben sich Erkenntnisse, die im Nachgang kurz zusammengefasst werden sollen.

Gebäudetyp und Gebäudenutzung

Es wurden Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser entsprechend ihrer Baualtersklasse und Sanierungsstand in Unterkategorien eingeteilt, sowie für diese entsprechende Heizlasten und Speicherfähigkeiten ermittelt. Die Betrachtung von Nichtwohngebäuden ist kein Bestandteil dieser Arbeit. In Bezug auf den Sanierungszustand und die Nutzung einer Wärmepumpe als monovalenten Wärmeerzeuger lässt sich bestätigen, dass die Effizienz der Wärmepumpe in Bezug auf die Verbesserung der Dämmeigenschaft des Gebäudes stark erhöht werden kann. Daraus resultierende geringer Vorlauftemperaturen und ggf. Änderungen des Wärmeübergabesystems wirken sich vorteilhaft auf die Effizienz der Wärmepumpenanlage aus.

Die Resultate für den Gebäudevergleich können nachfolgender Tabelle entnommen werden. Als Referenzstandort dient Zwickau.

Tabelle 44: Zusammenfassung Gebäudevergleich EFH

	Einheit	EFH 1	EFH 2	EFH 2.1	EFH 3	EFH 3.1
B	m	8	8	8	8	8
L	m	10	10	10	10	10
Stockwerke		2	2	2	2	2
beheizte Wohnfläche	m ²	160	160	160	160	160
beheiztes Volumen	m ³	704	704	704	704	704
U-Wert Gebäude	W/(m ² K)	0,72	0,40	0,40	0,22	0,22
Luftwechsel	1/h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Infiltration	1/h	1	0,5	0,5	0,25	0,25
festgelegte Wärmekapazität Gebäude	kJ/(K*m ³)	468	324	468	180	468
Transmissionswärmeverlust Polysun	W	10939	6037	6018	3278	3316
Lüftungswärmeverlust Polysun	W	1215	2012	2006	1987	2010
niedrigste Außentemperatur	°C	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5
Heizlast Polysun	W	12154	8049	8024	5265	5326
Q _{use}	kWh	33943	21279	23825	13113	12878
E _{hz}	kWh	0	0	0	147	0
E _{tot}	kWh	9919	5776	6302	3698	3534
wohnflächenbezogene spezifische Heizlast	W/m ²	76	50	50	33	33
wohnvolumenbezogene spezifische Heizlast	W/m ³	17	11	11	7	8
wohnflächenbezogene spezifischer Heizenergiebedarf	kWh/m ²	212	133	149	82	80
wohnvolumenbezogene spezifischer Heizenergiebedarf	kWh/m ³	48	30	34	19	18

Anhand voranstehender Tabelle sind vereinzelte Resultate für die erfolgten Simulationen und die hinterlegten Gebäudedaten ersichtlich. Die Abkürzungen und Formelzeichen können wie nachfolgend beschrieben aufgefasst werden.

- B Breite in m
- L Länge in m
- Q_{aux} Energie der Wärmeerzeuger an das System in MWh
- Q_{use} Nutzenergie in MWh
- Q_{def} Energiedefizit in kWh
- E_{tot} Gesamter Stromverbrauch des Systems in kWh

Die Gebäudetypen 2.1 und 3.1 unterscheiden sich lediglich in der Speicherfähigkeit der Gebäudehülle zu den Grundvarianten zwei und drei. Die Variation unterschiedlicher Hydrauliksysteme führte in der Betrachtung des Jahresenergieverbrauchs und der Jahresnutzenergie zu geringen Schwankungen im Bereich von 100 bis 200 kWh. Die hier dargestellten Werte beziehen sich auf die Hydraulikvariante zwei, mit Fußbodenheizung für die Gebäudetypen zwei und drei und Radiatorheizung für den Typ eins, sowie zwei getrennten Speichern für die Warmwasserbereitung und Bereitstellung der Heizenergie. Für jedes Gebäude wurde

eine Wärmepumpe entsprechend der zu erwartenden Heizlast im Bivalenzpunkt von -7 °C ausgewählt und berücksichtigt. In Bezug auf die Änderung des Standortes und der Zukunfts-, sowie Extremwinterprofile für den Standort Zwickau ergaben sich bei der Betrachtung des Gebäudetyps zwei Unterschiede in Bezug auf den Jahresenergiebedarf von 2000 bis 4000 kWh, resultierend aus kälteren und wärmeren klimatischen Bedingungen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Betrachtung der Mehrfamilienhausgebäudetypen entsprechend nachfolgender Tabelle.

Tabelle 45: Zusammenfassung Gebäudevergleich MFH

	Einheit	MFH 1	MFH 2	MFH 2.1	MFH 3	MFH 3.1
B	m	23	23	23	23	23
L	m	10	10	10	10	10
Stockwerke		4	4	4	4	4
beheizte Wohnfläche	m ²	920	920	920	920	920
beheiztes Volumen	m ³	3500	3500	3500	3500	3500
U-Wert Gebäude	W/(m ² K)	0,76	0,43	0,43	0,24	0,24
Luftwechsel	1/h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Infiltration	1/h	1	0,5	0,5	0,25	0,25
festgelegte Wärmekapazität	kJ/(K*m ²)	468	324	600	180	600
Transmissionswärmeverlust Polysun	kW	56,5	32,3	32,4	17,71	17,9
Lüftungswärmeverlust Polysun	kW	11,4	11,5	11,6	11,3	11,4
niedrigste Außentemperatur	°C	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5
Heizlast Polysun	kW	67,9	43,8	44	29,0	29,3
Quse	MWh	195	97,4	96,2	47,5	46,4
Ehz	kWh	1781	0	0	2606	1451
Etot	kWh	60,4	27649	27433	15432	14378
wohnflächenbezogene spezifische Heizlast	W/m ²	74	48	48	32	32
wohnvolumenbezogene spezifische Heizlast	W/m ³	19	13	13	8	8
wohnflächenbezogene spezifischer Heizenergiebedarf	kWh/m ²	212	106	105	52	50
wohnvolumenbezogene spezifischer Heizenergiebedarf	kWh/m ³	56	28	27	14	13

Für die Betrachtung der Mehrfamilienhausvarianten wurden gleiche Rahmenbedingungen zu Grunde gelegt. Die Differenzen in Bezug auf den Jahresenergieverbrauch und die Jahresnutzenergie belaufen sich mit einem höheren Faktor in Bezug zu den betrachteten Einfamilienhäusern auf 1000 bis 2000 kWh. Und im Vergleich der Klimaprofile für das Referenzgebäude MFH zwei belaufen sich

die Unterschiede des Jahresnutzenergiebedarfs um 20 bis 30 MWh, für wärmere und kältere klimatische Bedingungen.

Komfort-Anspruch und Betriebsweise

Für die Simulationen wurden die Raumtemperaturen für den Überladungszustand variiert, neben höheren Energieverbräuchen und Komfort ergaben sich keine Verbesserungen in Bezug auf die Überladungstheorie. Eine Nachtabenkung wurde in den Systemen nicht berücksichtigt.

Gebäude-Speicherfähigkeit

Die Wärmekapazität der Gebäudehülle wurde variiert und im Vergleich betrachtet. Für das Einfamilienhaus ergaben sich für schwererer, moderat gedämmte Gebäude mit hoher Wärmekapazität höhere Energieverbräuche. Bei stark gedämmten Gebäuden ergaben sich kaum Unterschiede. Ein Bezug auf die Speicherfähigkeit und deren Dynamik ist an dieser Stelle in weiteren Untersuchungen von Interesse. Für Mehrfamilienhäuser konnte diese Auswirkung nicht bestätigt werden. Es ergaben sich keine höheren Verbräuche. Ein möglicher Hintergrund kann das geringere Flächen-Volumenverhältnis darstellen.

Eine direkte Auswirkung der Speicherfähigkeit des Gebäudes in Bezug auf das Speichervolumen konnte auf Grund der geringen Differenzen in Betrachtung des Energieverbrauchs und des Jahresenergiebedarfs nicht bestätigt werden. Erkenntlich ist jedoch, dass sich eine höhere Speicherfähigkeit positiv auf die Betriebsweise von Wärmepumpen auswirkt, da eine Auskühlung für sehr kalte Tage langsamer voranschreitet und somit der Einsatz eines Heizstabes verringert werden kann. Auch die Leistungsgröße der Wärmepumpe kann in Anbetracht einer höheren Speicherfähigkeit tendenziell kleiner ausgewählt werden, da der hohe Transmissionsverlust an wenigen Tagen oder Stunden eines Jahres durch die Speicherfähigkeit eines Gebäudes gepuffert werden kann. Die Nutzung der Gebäudemasse als Speicher mit einer Überladung um 1 K führte in den Vergleichen zu höheren Schaltungen und einem Energiemehrverbrauch, sodass keine Verbesserung gegenüber eines Normalbetriebes feststellbar war.

Warmwasser- und Heizungspufferspeicher-Systeme

Für die Betrachtung der Trinkwarmwasserbereitstellung und Anlagenhydraulik wurden verschiedene Schemen erarbeitet und untersucht. Begonnen mit der

Ermittlung des Warmwasserbedarfs wurden geeignete Speicher ausgewählt und in vier verschiedene Anlagenschemen integriert. Es wurde zwischen gemeinsamen Speicher mit Frischwasserstation, getrennten Speichern, Warmwasserfrischwasserstation ohne Puffer und Trinkwarmwasserspeicher ohne Heizungspuffer unterschieden. Für die Bereitstellung von Warmwasser mittels Frischwasserstation waren in den Simulationen zwangsläufig Zirkulationssysteme notwendig um das Energiedefizit zu minimieren. Die geringsten Energieverbräuche konnten für das Schema vier, einer Systemlösung mit Trinkwarmwasserspeicher und Direktbeheizung erzielt werden. Höhere Energiebedarfe anderer Hydrauliklösungen resultierten meist aus den Wärmeverlusten der Speicher. Die Variation der Pufferspeichergrößen führte zu verlängerten Laufzeiten und der Reduzierung von Schalthäufigkeiten. Das Einsparpotential resultierend aus dem Überladungsbetrieb wurde jedoch durch den Wärmeverlust größerer Speicher aufgehoben.

Raum-Wärmeübergabe

Für die Wärmeübergabe wurden eine Fußbodenheizung mit einer Systemtemperatur von 35/25 und Radiatorheizung mit einer Systemtemperatur von 55/45 verglichen. Für Gebäudetypen mit einer erhöhten spezifischen Heizlast größer 80 W/m² wurde die Betrachtung einer Fußbodenheizung vernachlässigt. Umgekehrt für den Fall von Gebäudetypen mit sehr geringer spezifischer Heizlast (Gebäudetyp drei). Unter Betrachtung eines Vergleichs der Wärmeübergabesysteme konnten verringerte Energiebedarfe für Fußbodenheizungssysteme ermittelt werden. Diese resultieren aus den geringeren Vorlauftemperaturen bedingt durch größere Wärmeüberträgerflächen.

Die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes wurden mittels aufwendiger Excel-Dateien und VBA-Erweiterungen aufbereitet. Die Resultate aus den Temperatúrauswertungen und Verläufen lassen sich für die Auslegung von Wärmepumpen heranziehen und eignen sich unter Ergänzung einer Betrachtung des Jahresenergieverbrauchs der Wärmeerzeuger als Auslegungstool für Wärmepumpen.

Der Einfluss von Energieversorgungsunternehmen wurde bei der Wahl der Überladungszeiten berücksichtigt, um Sperrzeiten zu umgehen. Eine Betrachtung unterschiedlicher Tarife wurde jedoch nicht verfolgt.

Ein kurzer Ausblick für die Verwendbarkeit der Überladungsstrategie zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs konnte gegeben werden. Eine Erweiterung der Betrachtung ist an dieser Stelle denkbar und anzustreben. Auch eine wirtschaftliche Betrachtung wäre für dieses Szenario denkbar.

Wärmepumpeneinfluss

Es wurden nur leistungsregelbare Luft-Wasser-Wärmepumpen des Herstellers Vaillant betrachtet. Hintergrund für die Wahl des Herstellers sind einfach zugängliche Produktinformationen, sowie sehr gut gepflegte Datenbanken innerhalb der Simulationssoftware Polysun.

Für die Simulationen konnten Wärmepumpen ausgelegt und näher betrachtet werden. Entscheidend für die Simulationen waren ein Temperaturabhängiger Leistungs- und Gütegradverlauf. Besonders hervorzuheben ist die Erkenntnis der Abhängigkeit der Wärmepumpenauslegung von der Normaußentemperatur, sowie des Jahresenergiebedarfs und der Wahl des Bivalenzpunktes auf eine Außentemperatur von -7 °C .

Steuerungsvorgaben Wärmepumpe

Die Überladungsabsicht sollte des Weiteren an die variierbaren Parameter angepasst werden. Soll beispielsweise der Eigenstromverbrauch erhöht werden, so erachtet es sich als sinnvoll Speicher und Gebäude maximal zu überladen. Soll die Überladung in eine bessere Betriebsweise resultieren so sind geringere Überladungstemperaturen zu berücksichtigen. Der Vergleich einer ideal ausgelegten Wärmepumpe und PV-System mit einer Wärmepumpe im Überladungsbetrieb und PV-System wäre hier denkbar.

Gesamtheitlich konnte ein Grundgerüst der Überladungsregelung mittels Temperaturbedingungen dargestellt werden. Eine Verfeinerung dieser Regelung unter Betrachtung von Tages-Nacht-Temperaturdifferenzen und Wetterprognosen veranschaulicht ebenfalls ein weiterführendes Betrachtungspotential.

Auf Grund der Nutzung frei programmierbarer Regelungen innerhalb der Simulationssoftware ist es für einzelne Simulationen notwendig die Heizgrenze, sowie die hinterlegte Heizkurve des Wärmeerzeugers anzupassen. Diese Einstellungen führen in den Simulationen zu geringeren Systemtemperaturen und besserem Betriebsverhalten der Wärmepumpen (verlängerte Laufzeiten, vermeiden von Taktung). Auf Grund der Vielzahl an Varianten wurde von einer Anpassung jeder Variante abgesehen.

6. Zusammenfassung

Neben Kenntnissen über die Anlagensimulation mittels der Simulationssoftware Polysun wurden verschiedene Simulationsvarianten erarbeitet. Neben der Betrachtung unterschiedlicher Klimabedingungen innerhalb Deutschlands wurden Gebäudetypen ermittelt, die ein Simulationsergebnis für Gesamtdeutschland und deren Bestandsgebäude liefern. Neben der Variation zahlreicher Parameter konnte der Ansatz einer Effizienzsteigerung mittels zeitlich geregelter Überladungsbetriebsweisen zur Ausnutzung Tageshöchsttemperaturen in den frühen Nachmittagsstunden von heiteren und bedeckten Tagen zu keinen signifikanten Verbesserungen führen. Die Simulationsergebnisse wurden aus energetischer Sicht betrachtet und auf Grund geringer Unterschiede nicht genauer wirtschaftlich betrachtet.

Ausschlaggebend für die Wärmepumpeneffizienz ist eine geeignete Auswahl, sowie die Festlegung auf eine passende Anlagenhydraulik. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde deutlich, dass der Einfluss zahlreicher Parameter wie Systemtemperaturen, Speichergrößen und Nutzerverhalten auf ein passend ausgelegtes System sehr gering ist. Entscheidend für die Wahl einer geeigneten Wärmepumpe sind die Betrachtung des Sanierungsstandes der Gebäudehülle, da hier das größte Potential liegt und eine Verbesserung der Heizlast sich positiv auf die Höhe der Investitionskosten auswirkt. In Bezug auf die Wärmepumpe selbst sind neben der Heizlast, der zu erwartenden Jahrestemperaturverläufe und der Wahl des Bivalenzpunktes der Jahresenergiebedarf zu berücksichtigen. Eine Ermittlung des Tageswarmwasserbedarfs und entsprechende Speicherauslegung erwies sich ebenfalls als gute Herangehensweise. Da für die Effektivität eines Heizsystems nicht der Wärmeerzeuger selbst, sondern die Anlagenhydraulik als System zu betrachten sind, ist eine geeignete Hydraulik auszuwählen.

I Literaturverzeichnis

- (DWD), D. W. (2017-07). *Handbuch - Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*. Offenbach: Bundesamt für Bauwesen und Bauordnung (BBR).
- (Hrsg.), Interessengemeinschaft Energie Umwelt. (2021-03). *Heizen in bestehenden Wohngebäuden - Wärmepumpen in Kombination mit Wärmeübergabesystemen*. Köln: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie.
- Baunetzwissen.de - A/V-Verhältnis. (29. 06 2023). Abgerufen am 29. 06 2023 von <https://www.baunetzwissen.de/glossar/a/a-v-verhaeltnis-724354>
- Bundeszentrale für politische Bildung - Bevölkerung und Haushalte. (23. 03 2021). Abgerufen am 24. 05 2023 von bpb.de: <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61584/bevoelkerung-und-haushalte/#:~:text=Das%20entsprach%20einer%20durchschnittlichen%20Haushaltsgr%C3%B6%C3%9Fe,bisher%20niedrigste%20durchschnittliche%20Haushaltsgr%C3%B6%C3%9Fe>
- dena, D. E.-A. (2022-10). *DENA-GEBÄUDEREPORT 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*. dena: Druckteam Berlin.
- Diefenbach, N., Cichinsky, H., Rodenfels, M., & Clausnitzer, K.-D. (2010-12). *Datenbasis Gebäudebestand, Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Darmstadt: IWU.
- Fierz, L., Witzig, A., Gasser, L., & Welling, B. (2013-12). *Schlussbericht Simulation modulierender Wärmepumpen - Implementierung der leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpe aus dem BFE-Projekt "Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung" in der Simulationsssoftware Polysun*. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK; Bundesamt für Energie (BFE).
- Gasser, L., Wyssen, I., Albert, M., Häusermann, M., Kleingries, M., & Wellig, B. (2011-12). *Schlussbericht Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung*. Bern: Eidgenössisches Departement für

Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK; Bundesamt für Energie (BFE).

g-Wert - Der Gesamtenergiedurchlassgrad. (kein Datum). Abgerufen am 23. 05 2023 von Fensterblick.de: <https://www.fensterblick.de/g-wert-gesamtenergiedurchlassgrad.html>

IWU, L. T. (2015-02). *Deutsche Wohntypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden - zweite Auflage* -. Darmstadt: IWU Institut Wohnen und Umwelt.

Neue EU-Richtlinie für die Tageslichtversorgung. (07. 04 2020). Abgerufen am 23. 05 2023 von Glaswelt.de: <https://www.glaswelt.de/glas/tageslicht-norm-din-en-17037-neue-eu-richtwerte-fuer-die-tageslichtversorgung>

Norm DIN 1988-200: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; TR des DVGW. (2012-05). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Norm DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. (2013-02). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Norm DIN EN 14825: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der SCOP/SEER. (2019-07). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Norm DIN TS 12831-1: Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast. (2020-04). Düsseldorf: Beuth-Verlag.

Norm DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. (2018-09). Berlin: Beuth-Verlag.

Norm DIN V 18599-5: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung Teil 5: Endenergiebedarf von Heizungssystemen. (2018-09). Berlin: Beuth-Verlag GmbH.

Norm VDI 4645: Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern Planung, Errichtung, Betrieb. (2023-04). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Norm VDI 4655: Referenzlastprofile von Wohngebäuden für Strom, Heizung und Trinkwarmwasser sowie Referenzerzeugungsprofile für Fotovoltaikanlagen. (2021-07). Düsseldorf: Beuth-Verlag.

Polysun Software by Velasolaris - Handbuch. (2022). Winterthur: Vela Solaris AG.
Technisches Datenblatt aroTherm plus. (2021-03). Vaillant GmbH.