

Multifunktionale Bauteile als Wärmespeicher

Vom Fachbereich
Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Tillman Gauer

geb. in Saarbrücken

Prüfungsvorsitzende:	Apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. pol. Björn-Martin Kurzrock
Tag der mündlichen Prüfung:	19.02.2024

Kaiserslautern 2024

(D 386)

„Es gibt nichts Gutes, außer man tut es.“

Erich Kästner in *Moral*

Für meinen Vater.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Fachgebieten Massivbau & Baukonstruktion sowie Immobilienökonomie der Technischen Universität Kaiserslautern.

Für das entgegengebrachte Vertrauen und die mir zu Teil gewordene Unterstützung danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Pahn sowie meinem Zweitbetreuer Herr Prof. Dr. rer. pol. Kurzrock.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Für die sehr gute Zusammenarbeit, den intensiven fachlichen Austausch und die schöne Zeit danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen an den beiden sowie den benachbarten Fachgebieten. Ein besonderes Dankeschön gilt dabei den Kollegen Dennis Aldenhoff, Christian Caspari und Martin Kiesche für konstruktive Diskussionen rund um die Themen Energie und „SmallHouse IV“ sowie der Kollegin Ann-Christin Sreball für ein immer offenes Ohr sowie moralische Unterstützung.

Für ihren tatkräftigen Einsatz möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des Labors für konstruktiven Ingenieurbau sowie den von mir betreuten Studierenden danken. Ein besonders großer Dank gilt meinen wissenschaftlichen Hilfskräften, insbesondere Nico Fuchs und Phillip Rheinwald, für den z. T. schweißtreibenden Einsatz.

Meiner Familie und meinen Freunden, ganz besonders meinen Eltern Christine und Axel sowie meinen Freunden Johanna Rothmann und Simon Stummann, danke ich für die Unterstützung, inkl. schier endloser Diskussionen zum Promotionsthema sowie Korrekturrunden.

Zum Abschluss bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner wunderbaren Frau Esther für den stetigen Rückhalt und das Vertrauen in mich sowie für unsere beiden Söhne Maximilian und Henri. Ohne all dies wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen.

Kaiserslautern, im Januar 2023

Tillman Gauer

Multifunktionale Bauteile als Wärmespeicher

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XII
Zusammenfassung	XIII
Abstract	XV
Bezeichnungen	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	3
1.3 Methodik der Untersuchung	4
1.4 Vorgehensweise der Untersuchung	6
2 Grundlagen	10
2.1 Definition von multifunktionalen Bauteilen	10
2.2 Thermisch aktivierte Bauteilsysteme	12
2.2.1 Stand der Technik von TABS	12
2.2.2 Stand der Wissenschaft von TABS	12
2.2.3 Stand der Wissenschaft und Technik zur Nutzung von TABS und Speichern mit integrierten PCM	16
2.2.4 Stand der Wissenschaft und Technik zu schaltbaren oder regelbaren Wärmedämmungen	17
2.3 Gebäude-Energie-Konzepte und Grundlagen zur Wärmespeicherung	17
2.3.1 Gebäude-Energie-Konzepte	17
2.3.2 Heizsystem	19
2.3.3 Grundlagen der Wärmespeicherung	21
2.3.4 Normative Berücksichtigung von Erneuerbaren Energien	23
2.3.5 Stand der Wissenschaft zur Berücksichtigung von Wärmespeichern für Solarthermieanlagen	24
2.4 Bewertung von Gebäude-Energie-Konzepten und deren Komponenten	26

Inhaltsverzeichnis

2.4.1	Behaglichkeit.....	26
2.4.2	Energetische Kennwerte	28
2.4.3	Ökonomische Kennwerte	30
2.4.4	Ökologische Kennwerte	32
2.4.5	Massen- und Energiebilanz für LCC und LCA	33
2.4.6	Sensitivität	34
2.5	Regelung & Steuerung	35
2.5.1	Definitionen und Ziel von Regelung & Steuerung	35
2.5.2	Regelung und Steuerung von TABS	37
2.5.3	TABS zur Deckung der Grundlast des Kühlbedarfs	37
2.5.4	TABS zur Deckung der Grund- und Spitzenlast.....	39
3	Parameter der thermischen Simulation sowie Referenzen	40
3.1	Aufbau der MFB	40
3.2	Größe und Orientierung der MFB.....	43
3.3	Technische Gebäudeausrüstung	46
3.4	Stand der Technik und MFB unter Variation der Pufferspeichergroße 47	
3.5	Kaltes Klima und theoretisches Minimum.....	48
3.6	Fazit	48
4	Referenzgebäude	49
4.1	Auswahl des Referenzgebäudes.....	49
4.2	Ziel und Aufbau der Referenz	50
4.3	Nomenklatur der technischen Gebäudeausrüstung	51
4.4	Geometrie und thermische Hülle des Referenzgebäudes	53
4.5	Regelung & Steuerung der technischen Gebäudeausrüstung des Referenzgebäudes	54
4.5.1	Steuerung der Solarthermie, der Wärmepumpe und der Fußbodenheizung	54
4.5.2	Steuerung der thermischen Aktivierung der MFB	57
4.6	Varianten und Referenzen	59

4.7	Fazit	59
5	Kennwerte, Simulationsmodell, Simulationssoftware und Verifikation des Simulationsmodells.....	60
5.1	Kennwerte und Grenzwerte der Bewertung	60
5.1.1	Thermische Behaglichkeit.....	60
5.1.2	Energetische Bewertung.....	60
5.1.3	Ökonomische Bewertung.....	62
5.1.4	Ökologische Bewertung	64
5.2	Simulationsmodell und Simulationssoftware	64
5.2.1	Modell multifunktionales Bauteil.....	65
5.2.2	Technische Gebäudeausrüstung und Wetterdaten.....	66
5.3	Verifikation des Gebäude- und des Bauteilmodells.....	66
5.3.1	Verifikation Modell multifunktionales Bauteil	66
5.3.2	Verifikation des Modelles der thermischen Gebäudehülle	71
5.4	Fazit	77
6	Ergebnisse der thermischen Simulation.....	78
6.1	Wirkende Mechanismen und Effekte.....	78
6.1.1	Zeiträume in der Übergangs- und der Heizperiode	79
6.1.2	Jahresbilanz.....	84
6.1.3	Behaglichkeit.....	86
6.1.4	Fazit wirkende Mechanismen und Effekte	87
6.2	Einfluss des Aufbaus der MFB	88
6.2.1	Aktiviertes Bauteil: Dicke Außendämmung	88
6.2.2	Aktiviertes Bauteil: Dicke Tragschale.....	91
6.2.3	Aktivierung: Lage, Material und Verlegeabstand.....	92
6.2.4	Aktiviertes Bauteil: Dicke Innendämmung.....	94
6.2.5	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmespeicherkapazität	94
6.2.6	Fazit Aufbau MFB	97
6.3	Orientierung und Größe der MFB.....	98

Inhaltsverzeichnis

6.3.1	Orientierung MFB.....	98
6.3.2	Aktivierter Anteil der Außenwände der nördlichen Räume.....	100
6.3.3	Orientierung und aktivierte Fläche in den nördlichen Räumen .	101
6.3.4	Solare Strahlung auf MFB.....	107
6.3.5	Fazit Orientierung und Größe MFB.....	107
6.4	Einfluss der technischen Gebäudeausrüstung	108
6.4.1	Solarthermie: Kollektorfläche	108
6.4.2	Solarthermie: Orientierung des Kollektors	111
6.4.3	Fazit Technische Gebäudeausrüstung	113
6.5	Stand der Technik ohne und mit MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe.....	114
6.5.1	Stand der Technik ohne MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe	114
6.5.2	Referenz mit MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe	116
6.6	Kaltes Klima und theoretisches Minimum.....	117
6.6.1	Theoretisches Minimum.....	117
6.6.2	Kaltes Klima.....	118
6.7	Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse	119
6.7.1	Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und Eingrenzung der Parameter für die weitere Betrachtung	119
6.7.2	Gleichung zur Beschreibung der eingegrenzten und interpolierten Simulationsergebnisse.....	122
6.7.3	Graphische Darstellung der eingegrenzten Simulationsergebnisse	123
6.7.4	Einordnung der Ergebnisse anhand der äquivalenten PufferspeichergroÙe	124
6.8	Fazit	125
7	Ökonomische und ökologische Bilanzierung.....	126
7.1	Ökonomische Bilanz LCC	126

7.1.1	Lebenszyklusanalyse der Referenz mit MFB und der ohne MFB	126
7.1.2	Ökonomische Bilanzierung mit Variation der TGA.....	127
7.2	Ökologische Bilanz LCA.....	129
7.2.1	Lebenszyklusanalysen einer Variante mit MFB und der Referenz ohne MFB	129
7.2.2	Ökologische Bilanzierung mit Variation der TGA	130
7.3	Sensitivität der Zinssätze	132
7.4	Limitationen und Anmerkungen zur Auslegung.....	137
7.4.1	Limitationen der ökonomischen und ökologischen Bilanzierung	137
7.4.2	Anmerkungen zur Auslegung.....	138
7.5	Fazit	139
8	Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik.	141
8.1	Normative Berücksichtigung.....	141
8.1.1	Limitationen, gewählte Annahmen und Randbedingungen.....	141
8.1.2	Gleichung zur Beschreibung des Nutzens der MFB	142
8.1.3	Exemplarische Anwendung der Gleichung zur Beschreibung des Nutzens der MFB	143
8.2	Ansatz zur Bewertung von MFB – Herleitung.....	144
8.3	Anwendung des Ansatzes zur Bewertung von MFB	146
8.3.1	Anwendung des Ansatzes zur Bewertung auf MFB mit schaltbarer Wärmedämmung	146
8.3.2	Anwendung des Ansatzes zur Bewertung auf MFB mit integrierten PCM	150
8.4	Fazit	155
9	Fazit, Limitationen und Ausblick.....	157
9.1	Fazit	157
9.2	Limitation.....	159
9.3	Ausblick.....	159
10	Literaturverzeichnis.....	161

Inhaltsverzeichnis

11	Anhang	180
A	Weitere Angaben zu den Simulationsmodellen.....	180
B	Ökonomische und ökologische Eingangsgrößen	182
C	Modellverifikation	183
D	Mechanismen in MFB (Heizperiode)	185
E	Simulationsergebnisse	187
12	Lebenslauf	189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze und Visualisierung des Referenzgebäudes nach IEA SHC TASK 32 (<i>Heimrath 2007</i>)	4
Abbildung 2: Heizsystem mit MFB	5
Abbildung 3: Schemata der "Referenz ohne MFB", "Referenz mit MFB" und "Variante mit MFB"; in blau sind die gruppierten Variierten dargestellt	6
Abbildung 4: Gliederung der Arbeit	9
Abbildung 5 (oben): Schematischer Aufbau einer Außenwand mit thermischer Aktivierung (rot) in der Tragschale (rechts), Dämmung (gelb) und Vorsatzschale (links) auf Grundlage eines Betonfertigteils	11
Abbildung 6: Energiebilanz eines Energieplushauses (schematisch)	18
Abbildung 7: Schematischer Aufbau Heizsystem	19
Abbildung 8: Gebäude-Energie-Konzept des Modells inkl. Wärmefluss und Priorisierung der Regelung & Steuerung	21
Abbildung 9: Sensible und latente Wärmespeicherung im T-Q-Diagramm (in Anlehnung an [<i>Mehling 2008</i>])	22
Abbildung 10: Behaglichkeitsfelder (<i>Dentel o. A.</i>)	27
Abbildung 11: Lebenszyklus von Gebäuden nach <i>DIN EN 15804</i>	30
Abbildung 12: Jährliche Energiekosten und Anteil der Arbeitskosten an diesen	34
Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Regelung (vereinfacht) in Anlehnung an (<i>Heinrich et al. 2009</i>)	35
Abbildung 14: Charakteristischer Temperaturzyklus in Räumen mit thermoaktiven Bauteilen (<i>Tödtli 2009</i>)	38
Abbildung 15: Querschnitt MFB	40
Abbildung 16: Grundriss des Obergeschosses des Referenzgebäudes (oben) und Visualisierung nach <i>Heimrath 2007</i> (unten)	45
Abbildung 17: Visualisierung des Referenzgebäudes nach IEA SHC TASK 32 (<i>Heimrath 2007</i>)	49
Abbildung 18: Heizsystem mit MFB	50
Abbildung 19: Gruppierung der Komponenten des Heizsystems in bedarfs- (grün) und angebotsgeführt (blau)	51
Abbildung 20: Heizsystem mit MFB	51
Abbildung 21: Schnittstelle Komponenten TGA	52
Abbildung 22: Geometrie des Referenzgebäudes nach <i>Heimrath 2007</i>	53
Abbildung 23: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der Solarthermie	54
Abbildung 24: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der FBH	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 25: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der Wärmepumpe	56
Abbildung 26: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der Aktivierung ..	58
Abbildung 27: Schnittstelle TRNSYS© – MatLab®	65
Abbildung 28: Querschnitt des MFB mit thermischer Aktivierung zur Verifikation des Bauteilmodells (Pahn et al. 2020)	68
Abbildung 29: MFB als Außenwand zur Verifikation des Bauteilmodells	68
Abbildung 30: Anordnung der Temperaturen im Querschnitt des MFB mit thermischer Aktivierung zur Verifikation des Bauteilmodells (Pahn et al. 2020)	69
Abbildung 31: Zeitlicher und räumlicher Temperaturverlauf im Bauteil während der Be- und Entladung	70
Abbildung 32: Vergleich der gemessenen und der simulierten Temperatur im Kern des Bauteils	70
Abbildung 33: Großdemonstrator „SmallHouse IV“ in der Süd-West-Ansicht inkl. des Kollektors der Solarthermie	72
Abbildung 34: Nord-Ost-Ansicht des „SmallHouse IV“	73
Abbildung 35: Außenwandelemente des Großdemonstrators „SmallHouse IV“	74
Abbildung 36: Raumlufttemperatur des „SmallHouse IV“ im Zeitraum 24.–29.01.2020 (auskühlen) mit Einschwingphase (hellgrüne Fläche)	76
Abbildung 37: Leistung und Temperatur im Pufferspeicher ohne und mit aktivierten Bauteilen sowie gesamter Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ (Referenz ohne MFB und Referenz mit MFB)	81
Abbildung 38: Temperatur- und Leistungsverlauf des MFB bzw. der Außenwand und des Raums im März (Referenz ohne MFB und Referenz mit MFB)	83
Abbildung 39: Jahreswärmebilanz ohne und mit MFB	84
Abbildung 40: Jährlicher elektrischer Energiebedarf W_{el} ohne und mit MFB	85
Abbildung 41: Vergleich der Behaglichkeit ausgedrückt als PMV mit und ohne MFB	86
Abbildung 42: Jährliche Wärmeerzeugung Q_{ST+WP} : Dicke Außendämmung $d_{dämm}$	88
Abbildung 43: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$: Dicke Außendämmung $d_{dämm}$	89
Abbildung 44: Einsparung gesamte elektrische Energie $W_{el,tot}$ durch Nutzung von MFB und Änderung der Dicke der Außendämmung $d_{dämm}$	90
Abbildung 45: Jährliche Wärmeerzeugung $Q_{ST\&WP}$: Dicke Tragschale d_{TS}	91
Abbildung 46: Jährlicher Bedarf elektrische Energie W_{el} : Dicke Tragschale d_{TS}	92

Abbildung 47: Einfluss der thermischen Betoneigenschaften auf die Wärmeezeugung Q_{ST+WP}	95
Abbildung 48: Einfluss der thermischen Eigenschaften des Betons auf den kumulierten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$	96
Abbildung 49: Jährliche Energieerzeugung und -bedarf: Orientierung MFB.....	99
Abbildung 50: Jährliche Wärmeezeugung Q_{ST+WP} : Aktivierter Anteil der Außenwände der Nordräume.....	100
Abbildung 51: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} : Aktivierter Anteil Außenwände der nördlichen Räume	101
Abbildung 52: Grundriss des Obergeschosses des Referenzgebäudes.....	102
Abbildung 53: Jährliche Wärmeezeugung Q_{ST+WP} : Orientierung und angrenzender Raum	103
Abbildung 54: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} : Pufferspeichergroße V_{PS}	104
Abbildung 55: Aktivierte Nordwand Ost (1.-15. Februar)	106
Abbildung 56: Aktivierte Nordwand West (1.-15. Februar).....	106
Abbildung 57: Jährliche Wärmeezeugung Q_{ST+WP} : Größe Kollektor Solarthermie A_{ST}	108
Abbildung 58: Verhältnis zw. täglichem solaren Ertrag und täglichem Heizwärmebedarf bei einer Kollektorfläche von $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$	109
Abbildung 59: Verhältnis zw. täglichem solaren Ertrag und täglichem Heizwärmebedarf bei einer Kollektorfläche von $A_{ST} = 50 \text{ m}^2$	109
Abbildung 60: Solarer Ertrag und Bedarf an elektrischer Energie der Wärmepumpe W_{WP} bei unterschiedlichen Kollektorgroßen der Solarthermie A_{ST}	110
Abbildung 61: Jährlicher kumulierter Bedarf an elektrischer Energie W_{el} : Größe Kollektor Solarthermie A_{ST}	111
Abbildung 62: Jährliche Energiemengen des Kollektors und der Wärmepumpe Q_{ST+WP} in Abhängigkeit der Orientierung des Kollektors O_{ST} ($A_{ST} = 40 \text{ m}^2$)	112
Abbildung 63: Jährliche Wärmeezeugung Q_{ST+WP} : Stand der Technik ohne MFB mit variabler Pufferspeichergroße V_{PS}	114
Abbildung 64: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} : Stand der Technik ohne MFB mit variabler Pufferspeichergroße V_{PS}	115
Abbildung 65: Jährliche Wärmeezeugung Q_{ST+WP} : Referenz mit MFB und variabler Pufferspeichergroße V_{PS}	116
Abbildung 66: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} : Referenz mit MFB und variabler Pufferspeichergroße V_{PS}	117
Abbildung 67: Jahreswärmebilanz mit und ohne MFB im kalten Klima.....	118

Abbildung 68: Jährlicher elektrischer Bedarf W_{el} mit und ohne MFB im kalten Klima.....	119
Abbildung 69: Übersicht des relativen Einflusses der untersuchten Parameter auf den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie bezogen auf die Referenz mit MFB	121
Abbildung 70: Jährlicher elektrische Energiebedarf $W_{el,tot}$ bei Aktivierung der nördlichen Fassade (Prozentsatz ist der Anteil der Nordfassade, der als MFB ausgebildet ist und Orientierung des Kollektors O_{ST}).....	123
Abbildung 71: Lebenszykluskosten mit und ohne Aktivierung	127
Abbildung 72: Einfluss der Fläche der MFB A_{MFB} und der Solarthermie A_{ST} auf die Lebenszykluskosten (Prozentsatz ist der Anteil der Nordfassade, der als MFB ausgebildet ist und Orientierung des Kollektors).....	128
Abbildung 73: THG-Emissionen der Referenz und einer Variante mit MFB ...	129
Abbildung 74: Einfluss der Fläche der MFB A_{MFB} und der Solarthermie A_{ST} auf die THG-Emissionen im Lebenszyklus (Prozentsatz ist der Anteil der Nordfassade, der als MFB ausgebildet ist und Orientierung des Kollektors) ..	131
Abbildung 75: Einfluss des Diskontierungszinssatzes für Konstruktion & Geldanlage auf die Lebenszykluskosten	133
Abbildung 76: Einfluss des Diskontierungszinssatzes der Energiekosten auf die Lebenszykluskosten	134
Abbildung 77: Einfluss des Diskontierungszinssatzes der Kosten für TGA auf die Lebenszykluskosten	135
Abbildung 78: Einfluss des normierten Diskontierungszinssatzes auf die Lebenszykluskosten	136
Abbildung 79: Grundriss des Obergeschosses des erweiterten Referenzgebäudes	143
Abbildung 80: Schematischer Aufbau einer Außenwand mit Innendämmung (gelb) thermischer Aktivierung (rot) in der Tragschale (rechts), Außendämmung (gelb schraffiert) und Vorsatzschale (links).....	147
Abbildung 81: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie des Gebäudes mit und ohne schaltbare Wärmedämmung.....	148
Abbildung 82: Einfluss der Fläche des MFB mit SWD auf den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie	149
Abbildung 83: Schematischer Aufbau einer Außenwand mit thermischer Aktivierung (rot) und PCM (blau) in der Tragschale (rechts), Außendämmung (gelb) und Vorsatzschale (links).....	150
Abbildung 84: Bedarf an elektrischer Energie in Abhängigkeit der Lage und der Art des PCM	152
Abbildung 85: Phase der PCM im Jahresgang	153

Abbildung 86: Vergleich des Temperaturverlaufs in der Tragschale des Bauteils T_2 und T_4183

Abbildung 87: Vergleich des Temperaturverlaufs an der Kontaktfläche zwischen Dämmungen und Tragschale des Bauteils T_1 und T_5184

Abbildung 88: Leistung und Temperatur des Pufferspeichers ohne und mit aktivierten Bauteilen im Januar.....185

Abbildung 89: Temperatur- und Leistungsverlauf des MFB bzw. der Außenwand und des Raums im Januar186

Abbildung 90: Einfluss der Innendämmung187

Abbildung 91: Einfluss der Dicke der Tragschale der MFB.....187

Abbildung 92: Einfluss der Dicke der Außendämmung der MFB188

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an Bauteile, vgl. <i>Friembichler 2014; Hegger 2014; Hegger 2011</i>	10
Tabelle 2: Parameter Schichtaufbau MFB	41
Tabelle 3: Parameter theoretische Variationen.....	42
Tabelle 4: Parameter Größe und Orientierung MFB	44
Tabelle 5: Parameter Solarthermie	46
Tabelle 6: Stand der Technik mit variabler Pufferspeichergöße sowie mit und ohne MFB	47
Tabelle 7: Vergleich der untersuchten Varianten und Referenzen.....	59
Tabelle 8: Mögliche Änderung des PMV durch MFB	60
Tabelle 9: Ökonomische Eingangsgrößen (Auszug).....	63
Tabelle 10: Eingangsgrößen LCC.....	64
Tabelle 11: Relative Abweichung der gemessenen und der simulierten Temperaturen im Bauteilquerschnitt	71
Tabelle 12: Absolute Abweichung der gemessenen und der simulierten Raumlufttemperaturen	77
Tabelle 13: Thermischer Widerstand und Kapazität der Aktivierung	93
Tabelle 14: Wärmeerzeugung und -bedarf sowie Bedarf an elektrischer Energie bei Aktivierung des östlichen und westlichen Teils der Nordwand.....	105
Tabelle 15: Eingangsdaten in die Simulation	180
Tabelle 16: Zwischen MatLab® und TRNSYS© ausgetauschte Größen	181
Tabelle 17: Ökonomische Eingangsgrößen	182
Tabelle 18: Ökologische Eingangsgrößen der variierten Parameter.....	182

Zusammenfassung

Gebäude tragen aktuell in Deutschland zu rd. 30 % der Treibhausgasemissionen bei, die reduziert werden sollen. Um dies zu erreichen, werden aktuell unterschiedlichste Ansätze diskutiert, die von der Reduktion der Wärmebedarfe über einen höheren Anteil an Erneuerbaren Energien am Wärmebedarf reichen. Für letzteres müssen das Angebot an Erneuerbaren Energien und der Wärmebedarf durch Speicherung ausgeglichen werden. Neben Pufferspeichern kann auch die Masse des Gebäudes zur Wärmespeicherung genutzt werden. Bei einem hydraulischen System eine thermische Aktivierung – wasserführende Rohre im Bauteil - mit dem Heizsystem verbunden. Da das Bauteil neben den passiv energetischen, statischen und konstruktiven Funktionen auch die aktiven energetischen Funktionen Wärmespeicherung- und -übertragung übernimmt, werden diese als multifunktionale Bauteile (MFB) bezeichnet. Um mit Hilfe der MFB die Treibhausgasemissionen von Gebäuden zu reduzieren, muss deren Temperatur- und Leistungsverlauf in Folge einer Beladung bekannt sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wird am Beispiel eines repräsentativen Einfamilienhauses mit MFB und Solarthermie gezeigt, dass durch die Ausbildung von Außenwänden als multifunktionale Bauteile die Treibhausgasemissionen im Betrieb von 56 auf 32 t-CO₂-Äq., also um 40 %, reduziert werden können. Diese Einsparung ist vorrangig auf die Steigerung des Anteils solarer Wärme am Wärmebedarf auf Grund der MFB zurückzuführen. Wird der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet, sinken die Emissionen von 86,2 auf 63 t-CO₂-Äq., was einer Einsparung von 27 % entspricht. Diesen Einsparungen resultieren in höheren Lebenszykluskosten, welche von 521.000 auf 525.000 €, also um weniger als 1 %, steigen.

Bei der Untersuchung von Schichtaufbau, Größe und Orientierung der multifunktionalen Bauteile als Außenwände konnte gezeigt werden, dass die gängigen Aufbauten, Kernaktivierung einer 20 cm dicken Tragschale und Dämmung mit $U_{AW} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, zu den geringsten Bedarfen an elektrischer Energie führen. Bei der Lage der Aktivierung sollten Außenwände von Räumen ausgewählt werden, die keine nach Süden oder Westen orientierten Fenster aufweisen. Die intendierte zeitversetzte Wärmeabgabe der multifunktionalen Bauteile deckt dann am besten die Heizlast, die im Tagesgang primär durch die Orientierung der Fenster des jeweiligen Raumes beeinflusst wird.

Zusammenfassung

Um die multifunktionalen Bauteile mit thermischer Aktivierung in die Baupraxis zu ermöglichen, schließt die Arbeit mit einem Vorschlag zu deren Berücksichtigung in der DIN V 18599.

Abstract

In Germany, buildings currently contribute around 30 % of the greenhouse gas emissions that are to be reduced. To achieve this, a wide variety of approaches are currently being discussed, ranging from better insulation to a higher proportion of renewable energies in the heating requirement. A wide variety of approaches can be found here, such as innovative storage technologies or insulation materials. There is currently no methodology for their comprehensive assessment. On the one hand, a methodology is presented within the scope of the work, which allows a wide variety of building energy concepts to be compared based on energetic, economic, and ecological criteria. On the other hand, the use of solid outer walls with thermal activation as heat storage is presented and examined. Since these have an additional active energetic function, they are referred to as multifunctional components.

Using the example of a single-family house, it can be shown that by designing external walls as multifunctional components, both greenhouse gas emissions during operation and operating costs can be reduced from 56 to 32 t-CO₂ equivalent, i.e., by 40 %. This saving is primarily due to the increase in the share of solar heat in the heat demand. If the entire life cycle of the building is considered, the emissions drop from 86.2 to 63 t-CO₂-eq., which corresponds to a saving of 27 %. These savings in greenhouse gas emissions led to negligibly higher costs in the life cycle of the building, which increase from € 521,000 to € 525,000, i.e., by less than 1 %.

When examining the parameters of the multifunctional components as external walls and the system technology, it was shown that the common structures, such as core activation of a 20 cm thick supporting shell and insulation according to GEG, lead to the lowest electrical energy requirements. At the location of activation, external walls of rooms that do not have windows facing south or west should be selected. The intended time-delayed heat emission of the multifunctional components then best covers the heating load, which is primarily influenced during the day by the orientation of the windows in the respective room.

To enable the transferability of the multifunctional components with thermal activation into building practice, the work closes with a proposal to consider multifunctional components with thermal activation into the DIN V 18599.

Bezeichnungen

Große lateinische Buchstaben

- aLT: außenliegende Lufttemperierung
- aWT: außenliegende Wandtemperierung
- BW: Barwert
- EE: Erneuerbare Energien
- EFH: Einfamilienhaus
- FBH: Fußbodenheizung
- GEG: Gebäudeenergiegesetz
- GEK: Gebäude-Energie-Konzept
- GMFH: Großes Mehrfamilienhaus
- GWP₁₀₀: Treibhausgaspotential über 100 Jahre (*greenhouse warming potential*)
- HH: Hochhaus
- HWB: Heizwärmebedarf
- HWB“: spezifischer Heizwärmebedarf (auf die Nutzungsfläche bezogen)
- KG: Kostengruppe
- LCA: Ökologische Lebenszyklusanalyse (*life cycle assessment*)
- LCC: Lebenszykluskostenrechnung (*life cycle costing*)
- MAX: Maximum
- Min: Minimum
- MFB: Multifunktionale Bauteile
- MFH: Mehrfamilienhaus
- NUF: Nutzungsfläche

O:	Orientierung
P:	Leistung oder Last
P“:	Flächenbezogene Leistung oder Last
P,I,W:	Prüfung, Inspektion und Wartung
PCM:	Phasenwechselmaterial (<i>phase change material</i>)
PENRT:	Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf
PH:	Passivhaus
PMV:	Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit (<i>predictive mean vote</i>)
PS:	Pufferspeicher
Q:	Wärme
R:	Thermischer Widerstand
RH:	Reihenhaus
RWD:	Regelbare Wärmedämmung
SFH15:	EFH mit einem HWB von 15 kWh/(m ² .a) (<i>single family house</i>)
ST:	Solarthermie
SWD:	Schaltbare Wärmedämmung
T:	Temperatur
TABS:	Thermisch aktiviertes Bauteilsystem
TGA:	Technische Gebäudeausrüstung
THG:	Treibhausgase (im Sinne von GWP_{100})
UWP:	Umwälzpumpe
V:	Volumen
VA:	Verlegeabstand
W:	Arbeit

Bezeichnungen

WLS: Wärmleitfähigkeitsstufe (ehem. Wärmleitfähigkeitsgruppe (WLG))

WP: Wärmepumpe

Kleine lateinische Buchstaben

cp: spezifische Wärmespeicherkapazität

el: elektrisch

en: energetisch

h: heiz

in: Eingang / Aufnahme

m: Masse

out: Ausgang / Abgabe

t: Zeit

th: thermisch

sol: solar

spez: spezifische, also auf Masse, Fläche oder das Volumen bezogene Größe

Griechische Buchstaben

η : Deckungsgrad

λ : Wärmeleitfähigkeit

Φ : Heizlast

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Zur Eindämmung des Klimawandels stellt die Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) eines der aktuell wichtigsten Ziele in der nationalen und internationalen Politik dar, wie u. a. im Übereinkommen von Paris festgehalten (*Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.) 2010; United Nations (Hrsg.) 2015*). Die angestrebte Reduktion von THG-Emissionen wird durch die gesteigerte und effizientere Nutzung von Erneuerbaren Energien (EE) sowie einen reduzierten Energiebedarf angestrebt. Maßnahmen, die zu diesen drei Effekten führen, werden in den Sektoren Stromversorgung, Mobilität und Gebäude angewendet. Diese verdrängen dort fossile Energieträger, die zu hohen THG-Emissionen führen.

Für den Sektor Gebäude wird ein klimaneutraler Gebäudebestand angestrebt¹ (*Bürger 2016*). Um diesen zu erreichen müssen zum einen die Wärmebedarfe von Gebäuden reduziert werden und zum anderen der nach der Reduktion verbleibende Wärmebedarf möglichst vollständig und effizient durch EE gedeckt werden (*Grove-Smith 2016*). Der Wärmebedarf ergibt sich aus den Lüftungs- und Transmissionsverlusten der thermischen Hülle von Gebäuden. Diese Wärmeverluste werden in Deutschland aktuell durch Anforderungen im Gebäude-Energie-Gesetz (GEG) reguliert. Durch höhere Anforderungen an die thermische Gebäudehülle, wie z. B. beim Passivhauskonzept, wird der Wärmebedarf von Gebäuden weiter reduziert (*Dequaire 2012*). Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus, also auch die Herstellung und den Rückbau von Gebäuden, zeigen aktuelle Veröffentlichungen, dass durch zusätzliches Dämmen der thermischen Gebäudehülle keine zusätzlichen Einsparungen an THG-Emissionen im Lebenszyklus erreicht werden. Dies ist auf den Einsatz von Energieträgern bei deren Herstellung des Dämmmaterials und somit eine Verschiebung der THG-Emissionen in die Herstellungsphase zurückzuführen (*Gauer 2019a, 2017b; Loewe 2010; Tersluisen 2018*). Daher können die THG-Emissionen nur durch den Einsatz EE weiter reduziert werden.

Solarthermie ist einer der wichtigsten Vertreter der EE in Gebäuden, da diese in fast jedem Standort und unbegrenzt verfügbar ist. Eine zentrale Herausforderung ist die Speicherung der solaren Wärme, da diese nur fluktuierend und nur

¹ Die Emissionen zur Bereitstellung von elektrischer Energie für Gebäude, z. B. zu deren Beleuchtung, wird im Sektor Stromerzeugung erfasst. Somit wird im Gebäudesektor primär die Bereitstellung von Wärme bilanziert.

eingeschränkt regelbar bereitsteht. Diese maximale Nutzung von solarer Wärme wird mit dem Sonnenhaus-Konzept verfolgt (*Sonnenhaus-Institut e.V.Hrsg. o. A.*). Zur Deckung des Wärmebedarfs werden wassergefüllte Speicher, sog. Puffer, eingesetzt. Bei Einfamilienhäusern (EFH) nach dem Sonnenhauskonzept liegt das benötigte Speichervolumen bei $V_{PS} = 5 - 15 \text{ m}^3$ (*Dequaire 2012; Konersmann 2008; Schenke 2006*).

Alternativ zur Wärmespeicherung in Puffern kann die Masse von Gebäuden in Massivbauweise als Wärmespeicher genutzt werden. Hierzu muss es möglich sein über eine thermische Aktivierung Wärme in das Bauteil einzubringen. Da diese Bauteile neben den architektonischen, passiv energetischen, statischen und konstruktiven auch die aktiven energetischen Funktionen Wärmespeicherung und -übertragung übernehmen, werden diese als Multifunktionale Bauteile (MFB) bezeichnet.

Soll der Bedarf an elektrischer Energie und THG-Emissionen durch den Einsatz von MFB reduziert werden, müssen diese in ein Heizsystem eingebunden werden. In diesem sollen sie die Funktionen Wärmespeicherung und -übertragung übernehmen und zusätzliche Speicherkapazität für EE bereitstellen. Da die MFB zur Wärmeübertragung eine möglichst große Fläche benötigen, werden die Außenwände als MFB ausgebildet. Dies erlaubt, die Geschossdecke weiter als reinen Wärmeüberträger in Form einer Fußbodenheizung zu nutzen. Um eine ausreichende Speicherkapazität der MFB zu gewährleisten, werden diese als Betonbauteil ausgeführt.

In Kombination mit einer Solarthermie-Anlage lässt diese zusätzliche Speichermasse – bei gleichem solarthermischem Ertrag – geringere Temperaturen im Pufferspeicher erwarten. Diese geringeren Temperaturen können zum einen in zusätzlichen solarthermischen Erträgen bei geringeren Strahlungsleistungen resultieren, welche bei zu warmen Speichern nicht genutzt werden könnten. Zum anderen führen geringere Speichertemperaturen zu gesteigerten Wirkungsgraden bei Solarthermieanlagen. Beides führt zu höheren solarthermischen Erträgen und einem reduzierten Bedarf des zweiten Wärmerzeugers, z. B. einer Wärmepumpe. Werden Außenwände als MFB ausgebildet, ist zu erwarten, dass zudem die Transmissionswärmeverluste von den angrenzenden Räumen über die MFB an die Umgebung reduziert werden.

Zusammenfassend ist somit zu klären ob durch den Einsatz der MFB der solare Ertrag gesteigert und der elektrische Bedarf sowie die THG-Emissionen reduziert werden.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Um mit Hilfe der MFB grundsätzlich einen Beitrag zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes leisten zu können, müssen diese in der Baupraxis einsetzbar sein. Erforderlich ist, dass diese normativ gefasst und somit in der energetischen Bewertung Berücksichtigbar sind, wofür wiederum der Einfluss der MFB auf das Heizsystem quantifizierbar sein muss. Deshalb müssen die Eigenschaften des MFB identifiziert werden müssen, die sich signifikant auf dessen thermisches Verhalten auswirken. Im Einzelnen sind für das oben beschriebene, elektrische Heizsystem folgende Forschungsfragen zu klären:

- [I.] Können durch den Einsatz der MFB der solarthermische Ertrag und die Jahresarbeitszahl der Solarthermie-Anlage gesteigert werden? In welchem Umfang kann der Bedarf an elektrischer Energie reduziert werden? In welchem Maße sinken die Transmissionswärmeverluste der Außenwände, wenn diese als MFB ausgebildet werden?
- [II.] Kann durch den Schichtaufbau der MFB und die daraus resultierenden Änderungen der thermischen Speicherkapazität und der Wärmeleitfähigkeit der solare Ertrag gesteigert und der Bedarf an elektrischer Energie des Heizsystems reduziert werden?
- [III.] Wie wirkt sich die Dimensionierung von Solarthermieanlage und Pufferspeichers auf den solaren Ertrag und den Bedarf an elektrischer Energie des Heizsystems aus?
- [IV.] Basierend auf den Erkenntnissen aus [I.] – [III.], welchen Schichtaufbau und Größe müssen die MFB sowie die Solarthermie-Anlage und der Pufferspeicher aufweisen, um den Bedarf an elektrischer Energie des Heizsystems zu reduzieren?
- [V.] Wie wirkt sich die Nutzung der MFB in Kombination mit der technischen Gebäudeausrüstung auf die Lebenszykluskosten und die THG-Emissionen im Lebenszyklus aus?
- [VI.] Wie können, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, die MFB und die Anlagentechnik praxisnah dimensioniert und in der DIN 18599 berücksichtigt werden?
- [VII.] Können durch den Einsatz von MFB mit jeweils innenseitig angebrachter schaltbarer Wärmedämmung sowie Phasenwechselmaterialien (PCM) zur Steigerung der Wärmespeicherkapazität der Bedarf an elektrischer Energie und THG-Emissionen reduziert werden?

1.3 Methodik der Untersuchung

Als Referenzgebäude wird das zweigeschossige EFH nach IEA SHC Task32 verwendet, vgl. Abbildung 1. Dieses verfügt über zwei Etagen und weist eine Nutzungsfläche von $NUF = 140 \text{ m}^2$ auf.

Die Untersuchung erfolgt mit Hilfe einer thermischen Simulation, welche es erlaubt das Gebäude, die MFB und die Anlagentechnik zu simulieren. Somit können zum einen deren zu untersuchen Eigenschaften geändert und das thermische Verhalten ausgewertet werden. Im Gegensatz zu praktischen Untersuchungen führt die thermische Simulation zu geringeren Versuchsdauern und einer höheren Reproduzierbarkeit.

Das Gebäude wird mit einer Solarthermie-Anlage, vgl. Abbildung 1 unten rechts, und einer elektrischen Wärmepumpe mit Wärme versorgt. Die erzeugte Wärme wird an einen Pufferspeicher abgegeben. Zur Beheizung des Gebäudes werden aus diesem MFB und Fußbodenheizung (FBH) in Parallelschaltung versorgt, vgl. Abbildung 2.

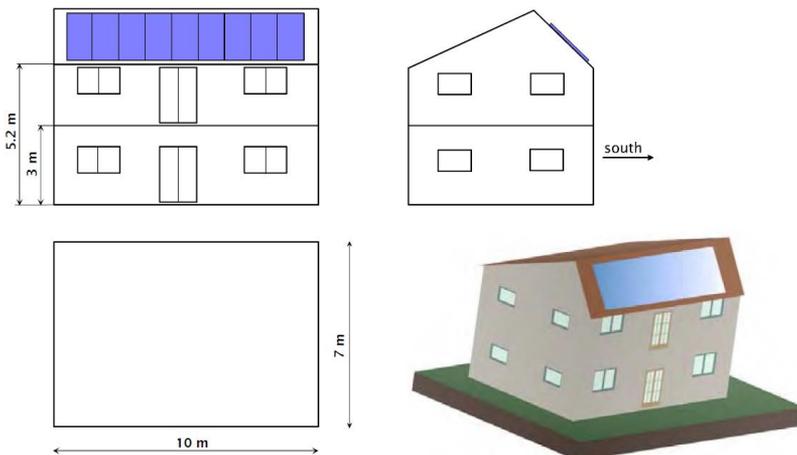


Abbildung 1: Skizze und Visualisierung des Referenzgebäudes nach IEA SHC TASK 32 (Heimrath 2007)

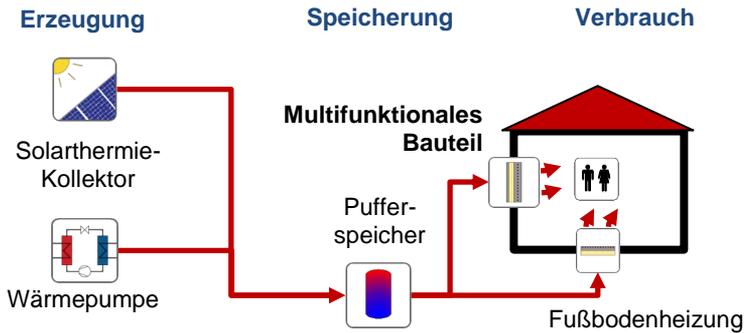


Abbildung 2: Heizsystem mit MFB

Zur Untersuchung der MFB wird ein Simulationsmodell bestehend aus Heizsystem, Gebäude und MFB erstellt und letztere beiden mit Hilfe von Messdaten verifiziert. Um das Potential der MFB als Außenwände zur Reduktion der THG-Emissionen zu untersuchen, wird die Variante aus Abbildung 2, „Referenz mit MFB“ einer Variante ohne MFB „Referenz ohne MFB“ gegenübergestellt. Beide Varianten weisen die gleichen Geometrien und Anlagentechnik auf und unterscheiden sich lediglich durch die Nutzung der MFB. Analog zur Untersuchung des Einflusses der Eigenschaften des MFB wird die „Referenz mit MFB“ einer Variante gegenübergestellt. Diese unterscheidet sich lediglich in der zu untersuchenden Eigenschaft, vgl. Abbildung 3.

Eine ausführliche Beschreibung des Referenzgebäudes findet sich in Kapitel 4, insbesondere der Regelung & Steuerung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) in Abschnitt 4.3.

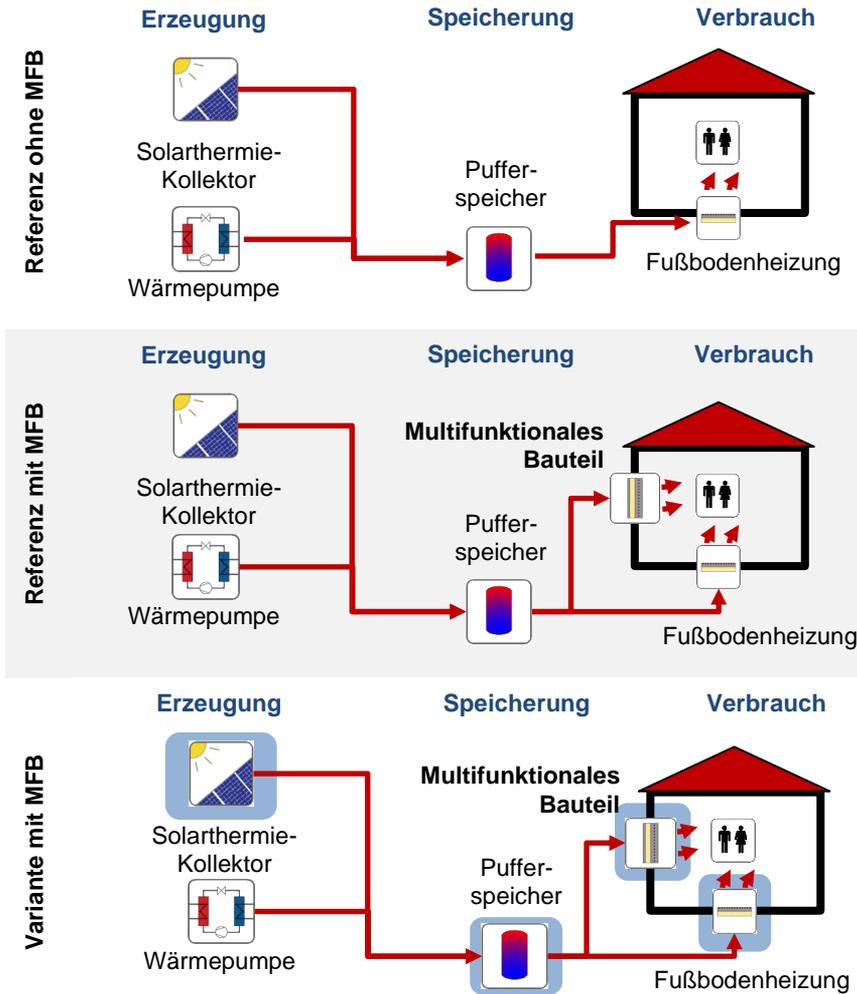


Abbildung 3: Schemata der "Referenz ohne MFB", "Referenz mit MFB" und "Variante mit MFB"; in blau sind die gruppierten Variierten dargestellt

1.4 Vorgehensweise der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit besteht aus neun Kapiteln, vgl. Abbildung 4. In **Kapitel 2** werden die MFB definiert und die Grundlagen dargelegt. Diese umfassen Definitionen, Stand der Wissenschaft und Stand der Technik von MFB und Gebäude-Energie-Konzepten (GEK). Des Weiteren werden der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot}$, *predictive mean vote* (PMV), THG-Emissionen und Barwert (BW) zur Bewertung des Energieeinsatzes, der Behaglichkeit, des Umwelteinflusses bzw. der Lebenszykluskosten von Gebäuden vorgestellt. Das Kapitel schließt mit dem Stand der Technik und Wissenschaft zur Regelung &

Steuerung im Allgemeinen sowie für Bauteile mit thermischer Aktivierung im Speziellen.

In **Kapitel 3** werden die zu untersuchenden Eigenschaften der MFB und der Anlagentechnik vorgestellt. In der ersten Gruppe „Material und Geometrie der MFB“ werden alle Parameter, die den Aufbau des MFB betreffen, zusammengefasst. Diese umfassen insbesondere die Schichtdicken des Betonsandwichbauteils sowie die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Speichereigenschaft des Betons. Da die MFB als Außenwände eingesetzt werden, wird in der zweiten Gruppe „Größe und Orientierung der MFB“ der Anteil der als MFB ausgebildeten Außenwände als Parameter definiert. Da die Orientierung des Raumes einen Einfluss auf die Heizlast Φ des Gebäudes im Tagesverlauf hat, wird zudem die Orientierung des MFB als Parameter gewählt. Somit wird nicht nur die Wärmeleitfähigkeit und Speichereigenschaft variiert, sondern auch der zeitliche Versatz zur zu deckenden Heizlast Φ . Die dritte Gruppe bildet die „Technische Gebäudeausrüstung“, namentlich die Solarthermie-Anlage und der Pufferspeicher. Erstere führt zu einer Änderung des Verlaufs im Tagesgang bzw. der Leistung der Wärmeerzeugung. Analog führt Letztere zu einer Veränderung der Wärmespeicherkapazität. Zudem werden die beiden in Abbildung 3 vorgestellten Referenzen weiter detailliert. Somit sind die zur Beantwortung der Forschungsfragen [II.] und [III.] benötigten Eigenschaften definiert.

Die Untersuchung der einzelnen Varianten muss an einem repräsentativen Gebäude erfolgen. In **Kapitel 4** wird das untersuchte EFH nach IEA SHC Task 32 (*Heimrath 2007*) detaillierter vorgestellt. Die Vorstellung umfasst neben den Eigenschaften der thermischen Gebäudehülle auch das Anlagenkonzept und dessen Regelung & Steuerung zur vorrangigen Nutzung von solarer Wärme mit Hilfe der MFB als Wärmespeicher und -übertrager. Durch die Kombination des Referenzgebäudes mit den Parametern aus Kapitel 3 ergeben sich die zu untersuchenden Varianten. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht dieser Varianten.

In **Kapitel 5** werden die in Kapitel 2 vorgestellten Kennwerte weiter definiert und an die Modelle aus Kapitel 4 angepasst. Zudem werden weitere benötigte Eingangsdaten für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit, die energetische, ökologische und ökonomische Bewertung vorgestellt. Diese umfassen vor allem die zulässigen Kennwerte der thermischen Behaglichkeit sowie die Bilanzgrenzen. Zudem werden die verwendete Simulationssoftware TRNSYS17© sowie die im Referenzgebäude nach IEA SHC Task 32 für die Anlagentechnik verwendeten Modelle vorgestellt.

Zur Umsetzbarkeit des Heizsystems mit MFB wurde der Großdemonstrator „SmallHouse IV“ auf dem Campus der RPTU Kaiserslautern umgesetzt. Dieser wird ebenfalls in Kapitel 5 vorgestellt und per Messung untersucht. Mit Hilfe der gewonnenen Daten werden die Modelle für das Gebäude sowie für das MFB verifiziert, da diese keine Standardmodelle sind.

In **Kapitel 6** wird der Einfluss, der in Kapitel 3 dargelegten Parameter auf die definierten Kennwerte, untersucht. Initial werden die grundlegenden Mechanismen dargestellt, welche bei der Nutzung von MFB mit thermischer Aktivierung auftreten und zusammenfassend die erste Forschungsfrage [I.] beantwortet. Anschließend wird der Einfluss jedes einzelnen Parameters auf die Kennwerte anhand der Wärmeerzeugung und des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ untersucht und quantifiziert. Somit werden die Forschungsfragen [II.] und [III.] beantwortet. Auf dieser Basis werden die relevanten Parameter identifiziert und weiter auf deren kreuzweise Wechselwirkung untersucht. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine Auslegungsempfehlung abgeleitet und somit die vierte Forschungsfrage [IV.] beantwortet. Das Kapitel schließt mit der Einordnung der Ergebnisse durch Vergleich mit Referenzen ohne MFB.

In **Kapitel 7** werden die untersuchten Varianten anhand der THG-Emissionen und BW ökonomisch bzw. ökologisch bewertet und folglich die fünfte Forschungsfrage [V.] beantwortet. Hierzu werden Stoff- und Energiebilanzen je Variante aufgestellt und diese durch Multiplikation mit Kosten- bzw. Emissionsfaktoren aus Literatur bzw. der ökobaudat in die ökonomische und ökologische Lebenszyklusbilanz überführt. Durch Abgleich mit der „Referenz mit MFB“ wird geprüft, wie der jeweilige Parameter zur Reduktion von THG-Emissionen und Lebenszykluskosten unter Einhaltung der thermischen Behaglichkeit beiträgt.

Um die MFB flächendeckend in Gebäuden als Wärmespeicher und -übertrager einsetzen zu können, müssen diese normativ gefasst werden können. Daher wird in **Kapitel 8** ein Vorschlag zur Berücksichtigung der MFB in der DIN V 18599 erarbeitet, welcher die relevanten Parameter berücksichtigt und exemplarisch angewandt. Somit wird die sechste Forschungsfrage [VI.] beantwortet. Zudem werden die in den Kapiteln 2 bis 8 hergeleiteten Schritte zur Bewertung von MFB als Wärmespeicher zu einem Ansatz verallgemeinert. Dieser Ansatz wird abschließend auf zwei MFB mit schaltbarer Wärmedämmung an der Innenseite bzw. Phasenwechselmaterialien (PCM) in der Tragschale angewandt, womit die letzte Forschungsfrage [VII.] beantwortet wird.

Die Arbeit schließt mit **Kapitel 9**, welches die grundlegenden Erkenntnisse der vorhergehenden Kapitel sowie die Anforderungen an MFB als Wärmespeicher und -übertrager zur Einsparung von THG-Emissionen unter Einhaltung der Behaglichkeit zusammenfasst. Das Kapitel schießt zukünftigen Forschungsfragen.

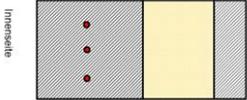
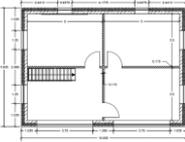
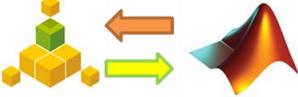
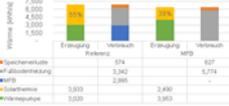
Einleitung und Motivation		1
Grundlagen und Bewertungskriterien für multifunktionale Bauteile und Gebäude-Energiekonzepte		2
Vorstellung der Orientierung und Größe des MFB sowie der Anlagentechnik und Aufbau der MFB als untersuchte Parameter ⇒ Übersicht der zu untersuchenden Parameter		3
Vorstellung des Referenzgebäudes inkl. der Technischen Gebäudeausrüstung und Regelung & Steuerung ⇒ Vollständiges Simulationsmodell		4
Definition der Kennwerte zur Bewertung sowie Vorstellung und Verifikation der Simulationsmodelle ⇒ Verifiziertes Simulationsmodell		5
Vorstellung und Auswertung der Ergebnisse der energetischen Simulation bzgl. der definierten Parameter ⇒ Simulationsergebnisse		6
Untersuchung der Simulationsergebnisse bzgl. der Kosten und THG-Emissionen im Lebenszyklus ⇒ Ökologische und ökonomische Bewertung der Parameter		7
Ableitung eines Vorschlags zur normativen Fassung sowie Untersuchung von Anwendungsbeispielen ⇒ Ansatz zur Erfassung der MFB in der DIN 18599		8
Fazit, Limitation und Ausblick		9

Abbildung 4: Gliederung der Arbeit

2 Grundlagen

Im Folgenden wird initial der Begriff MFB definiert und deren Funktionen dargelegt werden. Im Anschluss werden die Stände von Wissenschaft und Technik zu MFB, GEK und Referenzgebäuden dargestellt. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung zur ökonomischen und ökologischen Betrachtung von Lebenszyklen in Form von *life cycle costing* (LCC) und *life cycle assessment* (LCA).

2.1 Definition von multifunktionalen Bauteilen

Bauteile sollen unterschiedlichste Funktionen erfüllen. Diese können in die statisch-konstruktiven, architektonischen und passiven energetischen Funktionen zusammengefasst werden, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1: Anforderungen an Bauteile,
vgl. *Friembichler 2014; Hegger 2014; Hegger 2011*

Gruppe	Architektonisch	Statisch-konstruktiv	Passiv energetisch
Funktion	<ul style="list-style-type: none">• Aussehen• Witterungsschutz	<ul style="list-style-type: none">• Lastabtrag und Unterbau• Raumabschluss• Leitungsführung• Herstell- und Rückbaubarkeit	<ul style="list-style-type: none">• Reduktion Wärmeverluste

Neben diesen Funktionen können Bauteile auch weitere aktive energetische Funktionen übernehmen. Diese lassen sich anhand des Energieflusses bzw. der Funktionen des Heizsystems wie folgt gruppieren, vgl. Absatz 2.3.2.

1. Wärme gewinnen
2. Wärme speichern
3. Wärme übertragen

Bauteile, die zusätzlich zu den Funktionen aus Tabelle 1 mindestens eine der aktiven energetischen Funktionen erfüllen, werden folgend als MFB bezeichnet. Somit grenzt sich diese Definition von *Hegger 2011* oder *Friedrich 2016* ab, welche die Multifunktionalität durch die Integration von Anlagentechnik bzw. Zuleitung in Hohlräume von Bauteilen definieren.

Zur Erfüllung der aktiven energetischen Funktionen muss das Bauteil mit dem Heizsystem verbunden werden, um gewonnene Wärme dem Heizsystem zuzuführen, Wärme im Bauteil zu speichern oder über die Oberfläche des

Bauteils an den angrenzenden, zu beheizenden Innenraum zu übertragen. Diese Leitung wird als thermische Aktivierung bezeichnet. Da fast alle Heizsysteme ein Fluid – Wasser oder Luft – als Medium einsetzen, nutzen thermische Aktivierungen ebenfalls eines dieser beiden Medien. Bauteile mit thermischer Aktivierung werden als thermisch aktivierte Bauteilsysteme (TABS) bezeichnet; daher sind TABS auch immer MFB. In der Regel handelt es sich bei TABS um Zwischengeschossdecken zur Kühlung von Bürogebäuden (Tödtli 2009).

Abbildung 5 (oben) zeigt eine Außenwand mit thermischer Aktivierung, die als MFB ausgebildet ist. Die Aktivierung liegt im Kern der Tragschale, also auf der Innenseite der Dämmung. Somit kann das Bauteil zur Wärmespeicherung und -übertragung genutzt werden. Das MFB in Abbildung 5 (unten) ist ein Element eines Sheddaches, welches als MFB ausgebildet ist. Über die thermische Aktivierung kann Wärme aus der Umgebung gewonnen werden.

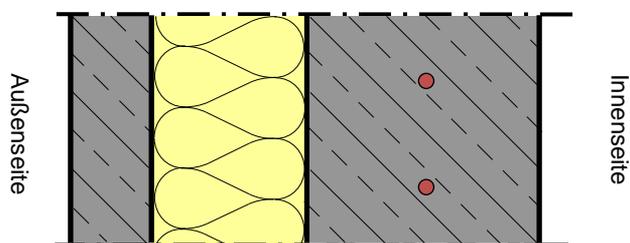


Abbildung 5

(oben): Schematischer Aufbau einer Außenwand mit thermischer Aktivierung (rot) in der Tragschale (rechts), Dämmung (gelb) und Vorsatzschale (links) auf Grundlage eines Betonfertigteils

(unten): Betonage eines Elements eines Sheddachs als MFB mit thermischer Aktivierung (weiß) an der Außenseite zur Wärmegegewinnung

2.2 Thermisch aktivierte Bauteilsysteme

2.2.1 Stand der Technik von TABS

Die Wärmeübertragung kann sowohl zum Eintrag als auch zum Entzug von Wärme aus den angrenzenden Räumen genutzt werden, also zum Heizen und Kühlen. In beiden Varianten ist der grundsätzliche Aufbau sehr ähnlich und beide Varianten unterscheiden sich vor allem durch die Wärmequelle oder -senke sowie die Regelung und Steuerung. Seit dem Ende der 1990er sind TABS zur Kühlung Stand der Technik (*Kalz 2012; Kalz 2011; Lim 2014; Siemens Schweiz AG (Hrsg.) 2011*). Diese finden sich primär in Büro- und teilweise in anderen nicht-Wohngebäuden, wie z. B. Produktionshallen. In diesen werden TABS fast ausschließlich als Decken und zur Kühlung eingesetzt. Hierbei werden die TABS hydraulisch an eine Wärmesenke angeschlossen, welche i. d. R. das Grundwasser ist (*Wystrcil 2014*). Die Kühlung, genauer gesagt eine Vorkonditionierung, erfolgt nachts. Diese Wärmeentnahme wird durch die Durchströmung der Gebäudetragestruktur erreicht. Der Vorlauf von $T_{VL} = 17$ bis 20 °C wird um 1 bis 3 K angehoben und so Wärme aus dem Gebäude ausgetragen. Je nächtlichem Zyklus werden so spezifische Wärmeentnahmen von $P_{TABS} = 4$ bis 40 kWh/m_{TABS} erreicht. Diese Wärme wird dann der Wärmesenke, z. B. dem Grundwasser, zugeführt. Somit kann die Kühllast, welche i. d. R. elektrisch durch Adsorptions- und Absorptionskühlung der Zuluft gedeckt wird, reduziert werden. Folglich kann ein deutlich kontinuierlicherer und energieeffizienterer Betrieb gewährleistet werden, was wiederum zu einer Reduktion der Betriebskosten führt (*Kalz 2016; Kuckelkorn 2015; Lehmann 2011; Pfafferott 2007; Simader 2005*). Weitere Konzepte und Wärmesenken, wie z. B. durch nächtliche Abstrahlung der Wärme gegen den Himmel, befinden sich im Experimentalstatus und wurden z. T. einmalig oder in kleinen Stückzahlen umgesetzt (*Mehling 2018*).

2.2.2 Stand der Wissenschaft von TABS

Neben dem Einsatz von TABS zur Kühlung finden sich unterschiedlichste Konzepte zur weiteren energetischen Nutzung von TABS. Diese reichen in ihrem Entwicklungsgrad von konzeptuellen Studien über einzelne experimentale Gebäude bis hin zu Kleinstserien von einigen Gebäuden. Bezogen auf die Funktion bzw. Nutzung der TABS finden sich ebenfalls unterschiedliche Ansätze. Diese lassen sich anhand der intendierten thermischen Funktion, absorbieren, heizen und kühlen sowie dem genutzten Bauteil unterscheiden.

TABS als Absorber zur Wärmegewinnung

Ähnlich wie bei der oben beschriebenen Kühlung durch TABS können diese Außenbauteile, i. d. R. Außenwände, eingesetzt werden. Hierdurch können diese Umgebungswärme aufnehmen und als Absorber, z. B. für eine Wärmepumpe, genutzt werden (Gauer 2016). Diese werden dann als Massivabsorber bezeichnet. Durch den Einsatz der TABS als Absorber kann auf kostenintensive Erdarbeiten zur Herstellung eines Boden- oder Grundwasserabsorbers verzichtet werden. In der Literatur finden sich Konzepte, Bauteilversuche und realisierte Großdemonstratoren. Eine ausführliche Diskussion sowie Modellbildung und Untersuchung erfolgt in Tanzer 2019. Dieser untersuchte ein nicht-Wohngebäude mit einer $NUF = 125 \text{ m}^2$, welches mit einer Wärmepumpe mit TABS als Wärmequelle sowie einem zusätzlichen Speicher im Primärkreis der Wärmepumpe ausgestattet ist. Hierbei konnten die Effizienzen des Heizsystems ausgedrückt als $JAZ = 4$ auf bis zu 7 und Einsparungen an elektrischer Energie für den Betrieb der Wärmepumpe von rd. 45 % per Simulation nachweisen werden.

Decken als TABS zur Kühlung und Heizung

Wie oben beschrieben gehört die Kühlung durch als TABS ausgeführter Zwischengeschossdecken zum Stand der Technik in nicht-Wohngebäuden, primär in Bürogebäuden. Diese verfügen zur Nutzung des Tageslichtes und einer flexiblen Raumaufteilung über möglichst wenige tragende Wände, welche als TABS ausgebildet werden könnten. Entsprechend wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen sind zur Nutzung von Wänden verfügbar. Die Forschung fokussiert sich vor allem auf die Nutzung der Geschossdecken zum Kühlen oder zeitversetzten Kühlen und Heizen. Besonders die Regelung und Steuerung dieser Konzepte stellt eine wichtige Forschungsfrage dar, wie z. B. in Bollin 2014, 2012; Chen 2015; Schmela 2017; Schmela 2016; Wystrcil 2014. Zur Bewertung von TABS kann die Aufwandszahl nach DIN V 18599-1 genutzt werden, womit TABS normativ fassbar sind. Diese Betrachtungen beziehen sich aber auf Decken in nicht-Wohngebäuden und untersuchen nicht den Einfluss weiterer Parameter wie den Aufbau der TABS oder der Anlagentechnik (Kempkes 2009; Schalk 2009). Praxisnahe Empfehlungen zur Auslegung von Geschossdecken als TABS zur Wärmespeicherung findet sich z. B. in Büttner 2014; Friembichler 2016; Friembichler 2014; Glombin 2015. Diese Auslegung basiert auf der Heizlast Φ von Gebäuden und wurde an zwei repräsentativen Wohngebäuden untersucht. Bei diesen wird eine Deckung der Grundlast des Heizwärmebedarfs (HWB) zu 50 % angestrebt. Der Aufbau der TABS basiert auf diesem Ziel und es werden spez. Heizleistungen von bis zu $P''_{TABS,heiz} = 9 \text{ W/m}^2$.

Eine Untersuchung zum Einfluss einzelner Parameter, wie Dicke von Dämmung und Tragschale oder Größe der aktivierten Fläche, findet nicht statt. Letztere wird analog zu FBH gleich der NUF des Gebäudes angenommen bzw. eine minimale Fläche gefordert. Dies entspricht einer Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche sowie einer resultierenden Reduktion der benötigten Vorlauftemperatur. Wie in Absatz 2.3.2 beschrieben, führen geringere Vorlauftemperaturen zu einer effizienteren Nutzung von Erneuerbaren Energien. Beim untersuchten EFH konnte durch den Einsatz der TABS als Geschosdecke die benötigte Pufferspeichergröße von $V_{PS} = 7,2$ auf $1,5 \text{ m}^3$ bzw. um rd. 40 % reduziert werden. Der solare Deckungsgrad ist mit $\eta_{sol} = 55 \%$ bzw. 57% fast identisch. Bezogen auf die als TABS auszubildende Fläche wird lediglich gefolgert, dass die Flächen so anzuordnen sind, dass ein Strahlungsaustausch mit deutlich kälteren Flächen, wie z. B. den Fenstern stattfindet. Analog wird von den Autoren gefordert, den thermischen Widerstand zu maximieren, vor allem bei Außenbauteilen. Dies wird durch Dämmungen auf Niveau des Passivhaus-Standards erfüllt. Als Wärmeerzeuger werden Solarthermie, Photovoltaik und elektrischer Strom aus Windenergie jeweils als Antriebsenergie einer Wärmepumpe untersucht. Die Strombereitstellung wirkt sich nicht auf das thermische Verhalten des Gebäudes aus. Die Differenzierung zwischen PV und Windkraft spiegelt sich in unterschiedlichen zeitlichen Verläufen wider. Somit zielen die untersuchten Konzepte auf einen netzdienlichen Betrieb des Heizsystems ab. Die Parameter der Anlagentechnik werden nicht untersucht. Weitere und allgemeinere Ansätze zum netzdienlichen Betrieb von Wärmepumpen in Kombination mit TABS und/oder anderen thermischen Speichern, sog. *demand side management*, finden sich z. B. in *Arteconi 2014; Bauer 2017; Benzarti 2018; Gauer 2017a; Hausladen 2014; Knotzer 2018; Nabe 2011; Nabe 2009; Röhrenbeck 2017, 2016*.

Wände als TABS zur Heizung und Kühlung

Zur Speicherung von Wärme können nicht nur Decken, sondern auch Wände genutzt werden. Bei diesen kann ebenfalls zwischen der Wärmespeicherung in Innen- und Außenwänden unterschieden werden. Hierzu finden sich deutlich weniger Forschungsergebnisse als zu thermisch aktivierten Decken. Die meisten dieser Forschungen sind zu Innenwänden und umfassen neben massiven Wänden aus Beton auch Ziegelwände, vgl. z. B. *Vogdt 2015* bzw. *Lehmden 2013*. In Ersterem finden sich spezifische Kühl- und Heizleistungen von bis zu $P_{heiz}^{\prime} = -18$ bzw. 72 W/m^2 . Für ein Praxisbeispiel, ein EFH mit einem Pufferspeicher von $V_{PS} = 9,5 \text{ m}^3$ und rd. $A_{TABS} = 80 \text{ m}^2$ aktivierter Fläche, wurde ein solarer Deckungsgrad von $\eta_{sol} = 60 \%$ angegeben. In letzterem wird nur das Konzept am Beispiel einer ungedämmten Außenwand aus Leichtbeton

vorgestellt sowie die Reduktion dessen Transmissionswärmeverluste für definierte Bauteiltemperaturen.

Wie Innenwände können auch Außenwände als MFB ausgebildet werden. Im Vergleich zu allen anderen Varianten besteht mit der „außenliegenden Wandtemperierung“ (aWT) ein Ansatz zur nachträglichen Umsetzung. Bei diesem werden alle Schichten auf der Außenseite der Fassade, v. a. Außenputz und -dämmung, entfernt und die Tragschale auf der äußeren Oberfläche aktiviert. Ergänzend dazu wurde die „außenliegende Lufttemperierung“ (aLT) entwickelt, welche eine Vorheizung von Zuluft durch solare Wärme ermöglicht (*Schmidt 2019; Schmidt 2018; Schmidt 2017; Schmidt 2016*). Bei diesen Konzepten wird eine Reduktion der Transmissionsverluste durch die Außenwand angestrebt. Hierdurch ist es auch möglich, das Gebäude auch vollständig über die beiden Konzepte zu versorgen. Eine Untersuchung der Parameter der aWT oder der aLT, wie z. B. benötigte Fläche A_{TABS} , sowie der Anlagentechnik erfolgt nicht. Für die Auslegung der aWT oder aLT wird eine spezifische Leistung von $P^{heiz} = 20\text{--}25 \text{ W/m}^2$ empfohlen. Ebenfalls eine Aktivierung der Außenwände wurde in der „Zollverein School of Management and Design“ umgesetzt. Im Gegensatz zur aWT bzw. aLT wird diese als „aktive Dämmung“ bezeichnet und Grubenwasser mit einer Vorlauftemperatur von $T_{BTA,VL} = 30 \text{ °C}$ eingesetzt. Dieses muss kontinuierlich aus den stillgelegten Bergwerken abgepumpt werden und steht somit kontinuierlich und betriebskostenfrei zur Verfügung. Aus der Dicke der ungedämmten Außenwand aus Normalbeton von $d_{AW} = 0,3 \text{ m}$ ergibt sich eine Heizleitung an den auf $T_{Luft,innen} = 20 \text{ °C}$ temperierten Innenraum von $P^{heiz} = 153 \text{ W/m}^2$ (*Bollinger 2011*).

Änderung der thermischen Eigenschaften von Bauteilen mit thermischer Aktivierung

Die oben dargestellten Erkenntnisse nutzen übliche Baustoffe als aktivierte Schicht, i. d. R. Normalbeton. Dieser weist eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{Beton} = 2,1 \text{ W/(m.K)}$ und eine spezifische Wärmespeicherefähigkeit von $c_{p,Beton} = 0,88 \text{ kJ/kg.K}$ auf. Durch Änderung der Zusammensetzung des Betons, z. B. durch weitere Zuschläge, können diese Eigenschaften verändert werden. So kann durch einen höheren Anteil an Zement und Gesteinskörnung der Anteil der Luft reduziert werden. Hierzu zählen z. B. ultrahochfeste Betone (UHPC), welche auf Grund des geringeren Luftanteils Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda_{UHPC} = 3 \text{ W/(m.K)}$ aufweisen. Grundsätzlich können diese Eigenschaften unabhängig voneinander variiert werden. Exemplarisch findet sich in *Lin 2019* ein Beton-Bauteil, welchem Graphen zugegeben und so die Wärmeleitfähigkeit erhöht wurde.

2.2.3 Stand der Wissenschaft und Technik zur Nutzung von TABS und Speichern mit integrierten PCM

Um die Wärmespeicherfähigkeit zu erhöhen, können PCM in TABS integriert werden. So kann entweder der benötigte Temperaturhub reduziert oder mehr Wärme gespeichert werden (*Kalz 2007*).

Ein ausführliches und breites Review zum Stand der Wissenschaft und Technik zum Einsatz von PCM findet sich u. a. *Konuklu 2015; Lu 2017; Rathore 2019; Zhang 2017*. Übersichten explizit zur Nutzung von PCM in Außenwänden finden sich in *Cui 2015; Kuznik 2011; Liu 2018*. In diesem wird deutlich, dass sich die Veröffentlichungen zu PCM sich auf die Gebiete „Untersuchung und Optimierung der Materialeigenschaften“ sowie „Kühlung durch oberflächennahe Anordnung von PCM“ fokussiert. Ergebnisse, die die Nutzung vom makroverkapseltem PCM zur Deckung des HWB unter Berücksichtigung der Wärmebereitstellung und des Lebenszyklus beschreiben, finden sich nur als Antwort auf weiterführende oder untergeordnete Fragestellungen.

Der Phasenwechsel kann auch passiv zur Wärmespeicherung genutzt werden, wie z.B. mit den Handelsgütern BASF „Micronal® SmartBoard™“ oder Knauf „Comfort Board 23“. Allen diesen ist gemein, dass PCM mikroverkapselt in der Wandbekleidung, meist Gipskartonplatten, an der inneren Bauteiloberfläche verbaut wird. Die Schmelztemperaturen liegen i. d. R. bei $T_{Schmelz} = 23 \text{ °C}$, womit diese vor allem zur Reduktion von Überhitzungen dienen. Diese können z. B. durch solare Gewinne oder elektrische Geräte auftreten. Eine aktive Beladung mit TABS ist bei der oberflächennahen Lage grundsätzlich möglich. Auf Grund der geringen thermischen Maße sowie des geringen thermischen Widerstandes können nur geringe Vorlauftemperaturen genutzt werden, um die thermische Behaglichkeit nicht zu verletzen. Zudem wird die tragende Schicht nicht zur Speicherung genutzt. Auf Grund des geringen Temperaturhubes in Kombination mit einer geringen Speichermasse ergibt sich nur eine geringe Speicherkapazität.

Die Nutzung von PCM ist auch außerhalb von Bauteilen und als Komponente des Heizsystems möglich. Aktuell finden sich nur wenige Wärmespeicher mit PCM, die als eigene Komponente in das Heizsystem eingebunden werden. I. d. R. handelt es sich hierbei um Modifikationen von wasserbasierten Pufferspeichern. Diese verfügen zusätzlich über makroverkapseltes PCM, welches über das Speichermedium Wasser indirekt be- und entladen wird. Auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit fast aller PCM erfolgt die Makroverkapselung in Kugeln oder Spiralen weniger als 10 cm Durchmesser, um

ein zeitnahes, vollständiges Aufschmelzen der PCM zu ermöglichen (*BINE Informationsdienst (Hrsg.) 2009; Hennings 2011; Pomianowski 2013; 2012*).

Des Weiteren finden sich in der Literatur auch Bauteile, in die Anlagentechnik integriert wurde. So z. B. Betondecken in Fertigteilbauweise in die Lüftungstechnik integriert ist und deren Speicherfähigkeit durch PCM gesteigert wurde (*Bilgin 2017*).

2.2.4 Stand der Wissenschaft und Technik zu schaltbaren oder regelbaren Wärmedämmungen

Als schalt- oder regelbare Wärmedämmungen (SWD bzw. RWD) werden Komponenten bezeichnet, deren Wärmeleitfähigkeit aktiv, gezielt und signifikant geändert werden kann. Somit kann der Wärmestrom über diese Schichten aktiv beeinflusst werden. Bei Außenbauteilen kann die SWD bzw. RWD innen- und/oder außenseitig zur gezielten Wärmeabgabe bzw. -gewinnung eingesetzt werden. In Verbindung mit einer thermischen Aktivierung kann so eine höhere Bauteiltemperatur genutzt werden, ohne die Behaglichkeit zu verletzen. Ein möglicher Aufbau findet sich z. B. in *Gauer 2019b*, indem eine innenseitige regelbare Dämmung in Verbindung mit Solarthermie untersucht wurde. Analog zum Einsatz von PCM in der Baupraxis befindet sich die Nutzung von RWD bzw. SWD in der Konzept- oder experimentellen Erprobungsphase (*Ebert 2019; Ebert 2015; Fricke 2003*).

2.3 Gebäude-Energie-Konzepte und Grundlagen zur Wärmespeicherung

2.3.1 Gebäude-Energie-Konzepte

Zur Deckung des Wärmebedarfs von Gebäuden müssen die vier Funktionen von Heizsystemen - Gewinnung, Speicherung, Transport und Übertragung von Wärme – erfüllt werden (*Bollin 2016; DIN 4701-10*). Die hierfür eingesetzten Komponenten werden im folgenden Absatz 2.3.2 genauer beschrieben. Das Konzept, mit welchen Komponenten und Energieträgern diese Funktionen erfüllt werden, wird als GEK bezeichnet. Konventionelle GEK wandeln primär fossile Energieträger in Wärme um. Im Gegensatz dazu verfolgen moderne GEK die in der Einleitung beschriebenen Ansätze: Deckung des Wärmebedarfs durch EE und Reduktion des Wärmebedarfs.

Beim Passivhaus (PH)-Konzept wird der Ansatz verfolgt, den Wärmebedarf zu minimieren, welcher aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten resultiert. Es wird ein spezifischer Heizwärmebedarf von maximal $HWB'' = 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bzw. spezifische Heizlast von maximal $P''_{\text{heiz}} = 10 \text{ W}/\text{m}^2$ gefordert. Diese Reduktionen werden zum einen durch Anforderungen an die thermische

Gebäudehülle erreicht, die über denen des GEG liegen. Bei Außenwänden ist ein U-Wert von maximal $U_{AW,PH} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gefordert, während lt. GEG ein U-Wert von $U_{AW,GEG} = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zulässig sind. Ebenfalls zur Reduktion des Energiebedarfs wird zum einen auch der Primärenergiebedarf inkl. Haushaltsstrom auf $E_{PH,max} = 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ begrenzt, zum anderen gibt es minimale Anforderung an die Effizienz der Komponenten des Heizsystems (Laible 2019).

Kern des Sonnenhaus-Konzeptes ist die maximale Nutzung von EE, primär in Form von solarer Wärme. Die Maximierung erfolgt neben der Nutzung von Solarthermieanlagen vor allem durch die Orientierung des Gebäudes sowie den Einsatz großer, nach Süden ausgerichteter Fenster. Die über die Solarthermie gewonnene Wärme wird in Pufferspeichern zeitlich verschoben, um den zeitversetzten Wärmebedarf zu decken. Die benötigte Größe von Solarthermie und Speicher sind abhängig von der Heizlast Φ und dem HWB des Gebäudes. Bei EFH liegt die Größe der Solarthermie bei $A_{ST} = 30$ bis 60 m^2 und das Volumen des Pufferspeichers bei $V_{PS} = 4,5$ bis 9 m^3 (Dequaire 2012 und Sonnenhaus-Institut e.V.Hrsg. o. A.). Weitere Einflussfaktoren sind der Standort des Gebäudes sowie der angestrebte solare Deckungsgrad.

Das Nullenergiehaus- und das Energieplushauskonzept streben ein Verhältnis zwischen erzeugter lokaler EE und Energiebedarf von 1 bzw. $> 1 \text{ kWh/a} / \text{kWh/a}$ an. Hierbei werden fast ausschließlich solare Wärme und Umweltwärme genutzt. Bei diesen wird nicht zwischen Wärme und elektrischer Energie unterschieden. Sind Energiebedarf und -erzeugung eines Gebäudes in der Jahresbilanz gleich, handelt es sich um ein Nullenergiehaus, übersteigt die Erzeugung den Bedarf, handelt es sich um ein Energieplushaus. In der Praxis wird der Überschuss durch eine Photovoltaikanlage erreicht, wie die schematische Energiebilanz in Abbildung 6 zeigt. Die Photovoltaik-Anlage ist so dimensioniert, dass der jährliche Ertrag den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie übersteigt, also bilanzielle Überschüsse entstehen (Rühm 2013; Schmidt 2013).

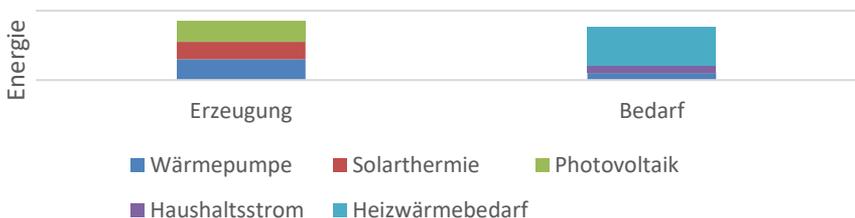


Abbildung 6: Energiebilanz eines Energieplushauses (schematisch)

2.3.2 Heizsystem

GEK müssen in Form von Heizsystemen umgesetzt werden. Diese werden anhand ihrer Funktion in fünf Teile gegliedert, vgl. *Bollin 2016* und Abbildung 7. Anhand dieser können Heizsysteme auch differenziert werden, vgl. *DIN 4701-10*.

- I. Wärmeerzeuger
- II. Wärmespeicher (nur bei Wärmepumpen, Solarthermie und Festbrennstoffen)²
- III. Wärmetransport (im Gebäude)
- IV. Wärmeübertragung
- V. Regelung & Steuerung

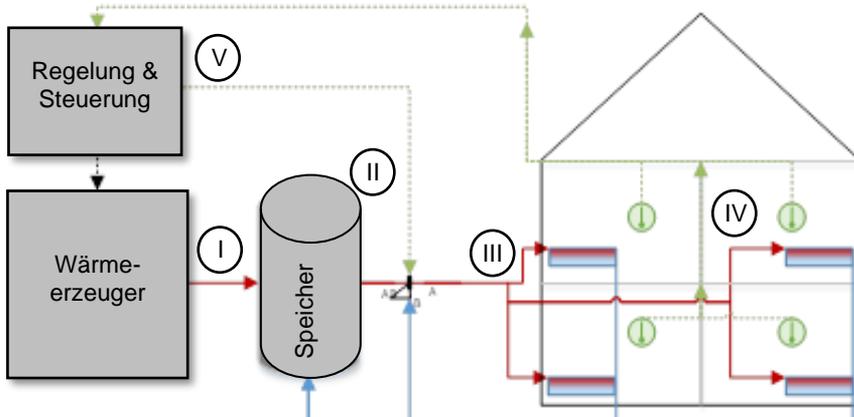


Abbildung 7: Schematischer Aufbau Heizsystem

Die **Wärmeerzeugung** beschreibt die Bereitstellung von Wärme durch Umwandlung von Energieträgern und/oder EE in Wärme. Bei klassischen GEK werden hierzu fossile Energieträger, wie z. B. Erdgas, verbrannt. Beim Einsatz von EE werden diese entweder verbrannt oder absorbiert. Bei Ersterem wird z. B. feste Biomasse genutzt, bei Letzterem z. B. solare Strahlung bei Solarthermie. Eine weitere Alternative ist die Nutzbarmachung von Umweltwärme in einer Wärmepumpe. Diese hebt durch einen Kreislaufprozess mit Phasenwechsel die Temperatur der Wärme auf ein zur Beheizung geeignetes Temperaturniveau.

² Bei anderen Energieträgern erfolgt die Speicherung als Energieträger, inner- oder außerhalb des Gebäudes.

Die **Wärmespeicherung** erfolgt aktuell in der Regel mittels wassergefüllter Speicher. Hierbei wird dessen sensible Wärmespeicherfähigkeit genutzt. Wasser ist zudem besonders geeignet, da es in jedem Gebäude verfügbar und nicht schädlich für Mensch oder Umwelt ist. Die Speicherung von Wärme in der Gebäudemasse oder die Wärmespeicherung durch Phasenwechsel werden aktuell erforscht und finden sich nicht in der Baupraxis (*Hauer 2013*).

Bei den aktuell dominierenden Energieträgern Erdgas und Heizöl wird nicht die Wärme, sondern der Energieträger gespeichert. Somit können diese zu jedem Zeitpunkt mit ausreichender Leistung zur Verfügung gestellt werden.

Der **Wärmetransport** vom Wärmeerzeuger bzw. Pufferspeicher zum Wärmeüberträger findet fast ausschließlich durch wasserführende Rohre innerhalb der thermischen Hülle statt. Das Wasser wird als Wärmeträgermedium bezeichnet. Durch eine Dämmung der Rohre wird sichergestellt, dass die Rohre nicht durch Einfrieren des Wassers bersten und die Wärmeverluste minimiert werden. Einzige Ausnahme bilden Gebäude mit extrem geringen Heizlasten Φ und Gebäude mit Klimaanlage. Bei diesen wird die Wärme ausschließlich bzw. zusätzlich über den Luftstrom der Lüftung eingebracht.

Die **Wärmeübertragung** an die zu beheizende Zone und somit die Deckung des HWB erfolgt durch Wärmeüberträger. Diese geben die Wärme an die zu beheizende Zone in Abhängigkeit der Temperatur durch Konvektion und Strahlung ab. Je höher die Vorlauftemperatur eines Heizsystems ist, desto höher ist der Anteil der Wärme, der als Strahlung an den Raum übertragen wird. In Bestandsgebäuden finden sich primär Heizkörper, die auf Grund der geringen Oberfläche über hohe benötigte Vorlauftemperaturen von bis zu $T_{FBH,VL} = 55\text{ °C}$ verfügen.³ Bei Neubauten, welcher dem GEG entsprechen, finden sich primär FBH. Bei diesen werden lediglich Vorlauftemperaturen bis $T_{FBH,VL} = 35\text{ °C}$ benötigt, da diese über eine deutlich größere Fläche zur Wärmeübertragung verfügen. Diese niedrigen Vorlauftemperaturen des Wärmeübertrages führen bei der Nutzung von solarer Wärme und von Wärmepumpen zu hohen Wirkungsgraden des Heizsystems.

Zur energieeffizienten Sicherstellung der Behaglichkeit wird eine **Regelung & Steuerung** benötigt. Letztere wird in Abschnitt 2.5 die Behaglichkeit in Absatz 2.4.1 genauer dargestellt.

³ Bei Altbauten finden sich auch Heizkörper mit noch höheren benötigten Vorlauftemperaturen von bis zu 75°C.

Folgende Abbildung 8 zeigt die Einbindung der MFB als Wärmespeicher und -übertragen in ein Heizsystem mit Solarthermie und Wärmepumpe als Wärmeerzeuger. Ein Pufferspeicher dient zur hydraulischen Trennung von Erzeugungs- und Heizkreis sowie zur kurzfristigen Speicherung im Gegensatz zur mittelfristigen Wärmespeicherung im MFB. Kann das MFB den HWB nicht decken, wird dessen Deckung durch die FBH sichergestellt.

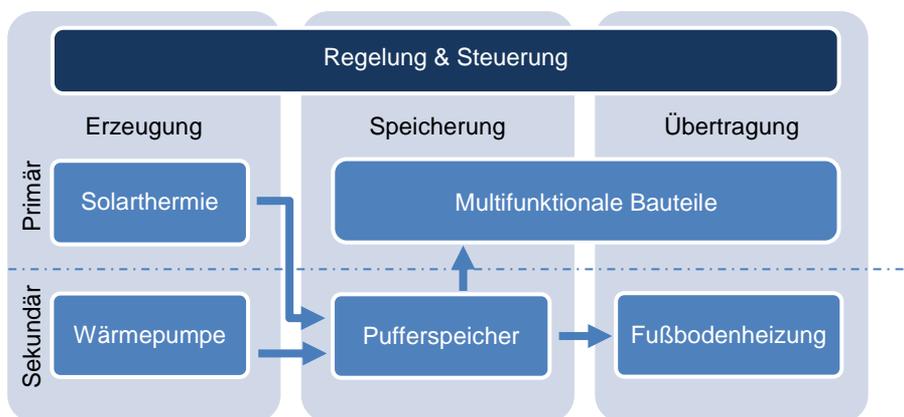


Abbildung 8: Gebäude-Energie-Konzept des Modells inkl. Wärmefluss und Priorisierung der Regelung & Steuerung

2.3.3 Grundlagen der Wärmespeicherung

Wärmespeicher können u. a. anhand des physikalischen Prozesses, welcher zur Speicherung genutzt wird, unterschieden werden. Daneben gibt es weitere Kriterien, welche Speicher z. B. anhand des benötigten Volumens, dem nutzbaren Temperaturbereich oder dem Einfluss auf die Umwelt gruppieren. In *Hauer 2013*, *Mehling 2008* oder *Heimrath 2018* ist zwischen den folgenden drei physikalischen Prozessen der Wärmespeicherung unterschieden, der sensiblen, der latenten und der thermochemischen Wärmespeicherung. Die Speicherung von Wärme kann in einem Temperatur-Wärme-Diagramm, kurz T-Q-Diagramm, dargestellt werden, vgl. Abbildung 9. Mit diesem können die unterschiedlichen thermodynamischen Prozesse während der Speicherung verdeutlicht werden.

1) Sensible Wärmespeicherung

Die sensible Wärmespeicherung erfolgt durch Änderung der Temperatur des Speichermediums und ohne Änderung des Aggregatzustandes. Die Änderung der gespeicherten Wärme ist also immer fühlbar und wird daher als sensibel bezeichnet. In Abbildung 9 ist diese sensible Wärmespeicherung in einem Temperatur-Wärme-Diagramm dargestellt (I). Es zeigt sich der lineare Zusammenhang zwischen Wärme und Temperatur. Diese Temperaturänderung

ist physikalisch gesehen eine Anregung der Elektronen in einen höheren energetischen Zustand. Thermodynamisch kann die gespeicherte Wärmemenge als isobare Änderung des Zustandes zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 beschrieben sowie nach Gleichung (1) quantifiziert werden.

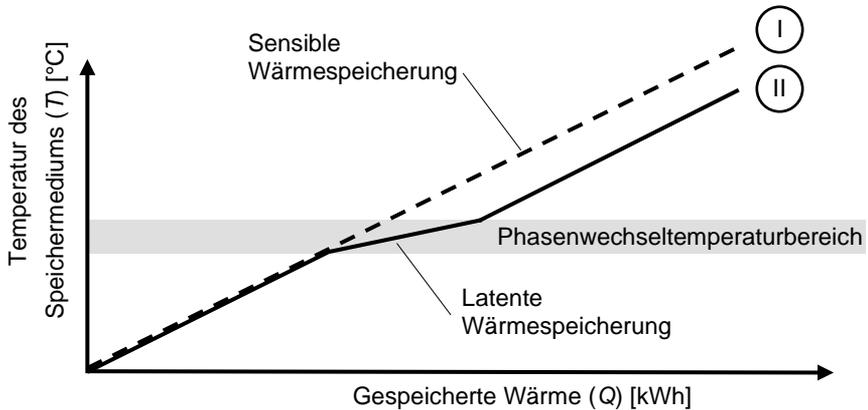


Abbildung 9: Sensible und latente Wärmespeicherung im T-Q-Diagramm (in Anlehnung an [Mehling 2008])

$$Q_{sp} = m * c_p * (T_2 - T_1) \quad (1)$$

mit:

m : Masse [kg]

c_p : Spez. Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg.K)]

T_1, T_2 : Temperatur im Zeitpunkt 1 und 2 [°C]

2) Latente Wärmespeicherung

Die latente Wärmespeicherung erfolgt im Gegensatz zur sensiblen Wärmespeicherung durch Änderung des Aggregatzustandes des Speichermediums. Die Wärme wird in die Lösung der Bindung von einzelnen Molekülen gespeichert. Diese Energie kann als Änderung der Enthalpie ΔH des Materials, der sogenannten Schmelz- bzw. Erstarrungsenthalpie, beschrieben und quantifiziert werden. Im Temperatur-Wärme-Diagramm in Abbildung 9 wird die Wärmespeicherung eines PCMs durch (II) abgebildet. In Grau ist der Temperaturbereich dargestellt, in dem der Phasenwechsel stattfindet. Reale Stoffe weisen immer eine latente und eine sensible Wärmespeicherung auf.

Daher weist die Kurve während des Phasenwechsels eine geringe Steigung auf. Ein Beispiel für latente Wärmespeicherung ist das Schmelzen von Eis zu Wasser.

Berücksichtigt man die zeitgleiche sensible Speicherung, kann die latente Speicherung durch Ergänzung von Gleichung (1) durch die Berücksichtigung des Phasenwechsels als massenbezogene Schmelz- bzw. Erstarrungsenthalpie Δh_{12} beschrieben nach Gleichung (2) werden.

$$Q_{sp} = m * c_p * (T_1 - T_2) + m * \Delta h_{12} \quad (2)$$

mit:

Δh_{12} : Spezifische Enthalpie des Phasenwechsels [kJ/kg]

Wie in Abbildung 9 dargestellt, ist eine latente immer mit einer sensiblen Wärmespeicherung verbunden. Am Beispiel des Wassers bedeutet dies, dass das Eis nicht nur schmilzt, sondern sich auch zeitgleich die Temperatur erhöht.

Grundsätzlich weisen alle Materialien die Phasenwechsel flüssig-fest, flüssig-gasförmig und gasförmig-fest auf. Um Phasenwechsel nutzen zu können, muss dieser möglichst im Arbeitsbereich liegen. Zur direkten Anwendung im Bauteil sind daher Phasenwechsel bei Normaldruck und Phasenwechseltemperaturen von $T_{\text{schmelz/erstarren}} = 18$ bis 30 °C günstig.

3) Thermochemische Wärmespeicherung

Alternativ zur sensiblen und latenten Wärmespeicherung kann diese auch thermochemisch erfolgen. Bei dieser wird die Wärme aufgewendet, um einen Stoff durch einen endothermen Prozess in zwei oder mehr Stoffe zu überführen. Reagieren diese Stoffe wieder miteinander, entsteht ein exothermer Prozess. Aktuell existieren bereits Speicher, welche diese Prozesse nutzen. Im Folgenden werden diese aber nicht weiter betrachtet.

2.3.4 Normative Berücksichtigung von Erneuerbaren Energien

Die Deckung des Wärmebedarfs von Gebäuden wird primär in *DIN V 18599-5* und *DIN 4701-10* sowie *DIN EN 15316-4-3* mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern normativ gefasst. Hierbei wird für die solare Wärmeerzeugung zwischen der reinen Trinkwassererwärmung und der Trinkwassererwärmung inkl. Heizungsunterstützung unterschieden. Nach *DIN 4701-10* wird der solare Wärmeertrag zur Heizungsunterstützung auf 10 % des HWB (Q_H) festgesetzt, wenn die Kollektorfläche mindestens das 1,8-fache der Fläche für die

Trinkwarmwasserbereitung beträgt. Für Mehrfamilienhäuser beträgt dieser Anteil 5 %. Für höhere Anteile wird eine Simulation gefordert. Nach *DIN V 18599-5* wird die minimale benötigte Kollektorfläche sowie der resultierende solare Ertrag für Trinkwarmwasser und zur Heizungsunterstützung aus den geometrischen und geografischen Randbedingungen ermittelt, wie z. B. Orientierung und geographische Lage der Kollektorfläche. In beiden Verfahren wird ein monatsweises Tabellenverfahren mit Korrekturfaktoren, z. B. für abweichende Orientierungen oder Neigungen des Kollektors, genutzt. Der berücksichtigbare solare Ertrag sowie die benötigte Größe des Wärmespeichers ergibt sich bei gegebenen Randbedingungen aus der Größe des Kollektors. Als Wärmespeicher wird mindestens ein wassergefüllter Pufferspeicher vorgesehen, der sich in einen Teil für Trinkwarmwasser und zur Heizungsunterstützung untergliedert. Solarthermie wird in beiden Verfahren immer als Unterstützung eines primären Wärmeerzeugers eingesetzt. Dieser wird so dimensioniert, dass dieser zu jedem Zeitpunkt und unabhängig von Witterungsbedingungen den Wärmebedarf decken kann. Daher reduziert der Ertrag aus der Solarthermie die benötigte Wärmeerzeugung des primären Wärmeerzeugers.

In beiden Verfahren wird zum einen die NUF des zu versorgenden Gebäudes auf $NUF = 3.000 \text{ m}^2$ begrenzt, Limitationen zu erreichbaren Deckungsgraden werden nicht gemacht. Zum anderen wird die solare Wärme nur zur Unterstützung des primären Wärmeerzeugers angesetzt. Wie in *Oschatz 2012* beschrieben und in *DIN V 18599-5* dargelegt, zielt das Verfahren auf eine minimale Fläche ab, was sich auch in der Näherung zeigt, dass der Beitrag der Solarthermie zur Heizung dem solaren Ertrag zur Warmwasserbereitung entspricht. Wird dieser nach *DIN 4701-10* mit $Q_{\text{WW}} = 12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ genähert, ergeben sich für EFH mit $NUF = 100$ bis 250 m^2 solare Erträge von $Q_{\text{ST}} = 1.250$ bis 3.125 kWh/a ; ähnliche Werte finden sich z. B. auch in *Maas 2009*. Daraus lässt sich ableiten, dass eine rein solare Wärmeversorgung nicht zwangsweise durch einen linearen Anstieg von Pufferspeicher- und Kollektorgröße oder überhaupt möglich ist. Bei einem spezifischen HWB von $HWB = 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, wie z. B. nach *Heimrath 2007*, entspricht dies in etwa einem solaren Deckungsgrad von $\eta_{\text{sol}} = 30 \%$.

2.3.5 Stand der Wissenschaft zur Berücksichtigung von Wärmespeichern für Solarthermieanlagen

Der nur für kleine Systeme normativ gefasste, lineare Anstieg an benötigter Kollektorfläche und Wärmespeicherkapazität findet sich auch in der Literatur. Dieses Verhalten lässt sich auf unterschiedliche Begrenzungen wie Angebot, Speicherung und Bedarf zurückführen. Bei kleinen Kollektorgrößen wird wenig solare Wärme erzeugt, die dann aber ohne längere Speicherung zur Deckung

des Bedarfs genutzt werden kann. Daher stellt sich für diese näherungsweise ein lineares Verhältnis zwischen Kollektorfläche und nutzbarem solaren Ertrag ein. Mit steigender Kollektorfläche steigt der Speicherbedarf, da mehr Wärme für größere Dauern von einigen Tagen gespeichert werden muss. Diese lange Speicherdauer führt zu steigenden Verlusten, welche den solaren Ertrag reduzieren. Durch dieses abdämpfende Verhalten stellt sich für sehr große Solarthermieanlagen, bestehend aus Kollektor und Speicher, ein asymptotisches Verhalten zwischen Kollektorgröße und solarem Ertrag und somit dem solaren Deckungsgrad ein. Eine genauere Erläuterung dieses Verhaltens findet sich in Abschnitt 6.4. Zusammenfassend lässt sich für EFH sagen, dass solare Deckungsgrade bis 50 % durch eine näherungsweise lineare Vergrößerung der beiden Komponenten erreicht wird. Bei höheren Deckungsgraden steigt der Bedarf an Kollektorfläche und Wärmespeicherung überproportional an, vgl. z. B. *Al-Addous 2006; Caspari 2017; Gassel 1996; Glembin 2015; Hauer 2013. Stieglitz 2012* unterteilt die solaren Deckungsgrade daher in „Vorwärmanlagen“ mit Deckungsgraden zwischen 25 und 35 %, welche sich durch kleine Anlagengrößen und daher hohen Nutzungsgraden der Kollektoren auszeichnen. Dies wird durch eine Fokussierung auf die Trinkwarmwasserbereitung und eine Anhebung des Rücklaufs der Heizung erreicht. Die „Kosten-Nutzen optimierten Anlagen“ erreichen Deckungsgrade zwischen 35 und 50 % und sind stark abhängig von den Herstellungs- und Wartungskosten der Solarthermieanlage. Als „Anlagen mit optimierter Primärenergieeinsparung“ werden Anlagen mit Deckungsgraden über 50 % bezeichnet und vor allem per Simulation oder Nomogramm dimensioniert werden kann. Die Nomogramme werden i. d. R. von Herstellern bereitgestellt und sind für das jeweilige Produkt gültig. Die enthaltenen Informationen basieren grundsätzlich auf den normativen Ansätzen, z. B. nach *DIN V 18599*, und sind durch produktspezifische Erfahrungswerte ergänzt.

In *Lambrecht 2015* wird der Pufferspeicher anhand der Kollektorgröße mit $V_{PS} = 100 \text{ bis } 150 \text{ l/m}^2_{\text{Kollektorfläche}}$ dimensioniert.

Zusammenfassend wurde gezeigt, dass bei kleinen Kollektorflächen immer ausreichend solares Angebot, Speicherkapazität und Bedarf zur Verfügung steht, sodass eine Verdopplung der Kollektorfläche zu einer Verdopplung des solaren Ertrags führt. Die Effekte und Mechanismen bei größeren Kollektoren und solaren Deckungsgraden werden exemplarisch in Abschnitt 6.1 beschrieben.

2.4 Bewertung von Gebäude-Energie-Konzepten und deren Komponenten

Die Bewertung von GEK und deren Komponenten sind abhängig von den eingesetzten Komponenten und dem Kriterium der Bewertung. Bezogen auf die Zielsetzung werden Kennwerte für die Gruppen Behaglichkeit, Energie, Ökologie und Ökonomie benötigt.

2.4.1 Behaglichkeit

Da das Einhalten der thermischen Behaglichkeit die wichtigste Aufgabe des GEK ist, ist dies das wichtigste Kriterium zu deren Bewertung. Nur GEK, die thermische Behaglichkeit sicherstellen, werden eine breite Akzeptanz finden und perspektivisch in die Baupraxis übernommen werden.

Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit finden sich mehrere Ansätze, welche sich vor allem an Arbeitsplätze und raumluftechnische Anlagen richten. So wird die DIN 1946, welche initial für raumluftechnische Anlagen galt, auch auf frei belüftete Gebäude erweitert. Diese ermittelt die „empfundene Temperatur“ oder „operative Temperatur“ ϑ_e , welche das Zusammenwirken von Raumlufttemperatur $T_{Raumluft}$, Oberflächentemperatur der Raumflächen T_{surf} und mittlerer Strahlungstemperatur der Oberflächen T_{rad} beschreibt. Für diese wird in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur ein Behaglichkeitsbereich definiert, vgl. Abbildung 10. In mehreren Untersuchungen wurde untersucht, wann sich Raumnutzer subjektiv behaglich fühlen (*Fanger 1986; Frank 1975; Roedler 1968*). Die Bewertung nach *Fanger 1986* wurde in die *DIN EN ISO 7730* überführt.

Des Weiteren finden sich Anforderungen an die thermische Behaglichkeit in diversen Normen wie z. B. DIN EN 13779, DIN EN 16798. Alle Normen verweisen für die Bewertung von thermischer Behaglichkeit auf die *DIN EN ISO 7730*. Die *DIN EN ISO 7730* sieht zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit u. a. den *PMV* vor. Dieser bildet sowohl die Raumlufttemperatur als auch die mittlere Strahlungstemperatur ab. Letztere ergibt sich aus der Strahlungsleistung der Oberflächen des betrachteten Raumes und bildet auch dein Einfluss durch Flächen mit unterschiedlichen Oberflächentemperaturen ab. Daher stellt der *PMV* ein geeignetes Bewertungskriterium dar, um Räume zu bewerten, bei denen nicht alle Flächen mit thermisch aktiviert sind.

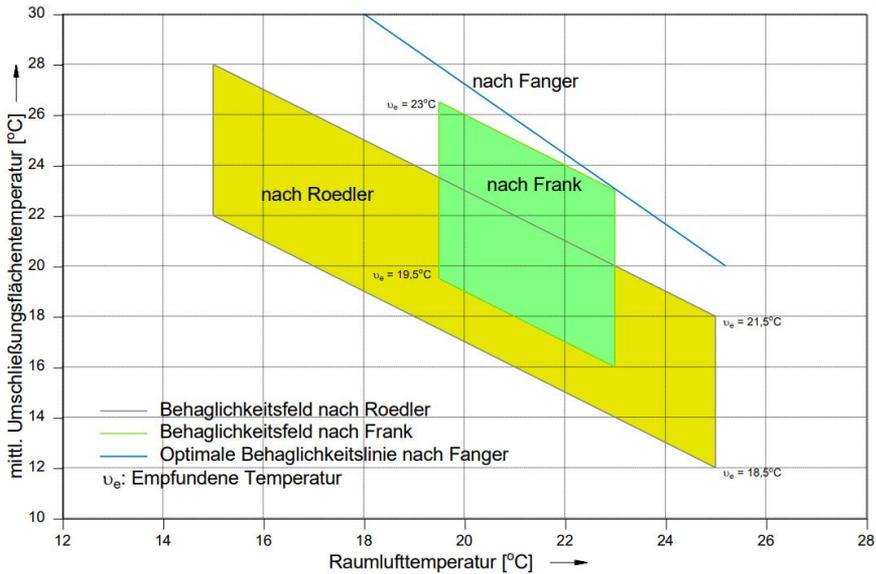


Abbildung 10: Behaglichkeitsfelder (Dentel o. A.)

Der *PMV* gibt das Votum einer großen Personengruppe mit Hilfe einer Skala von kalt -3 bis heiß 3 wieder und wird nach Gleichung (3) berechnet. Der optimale Zustand einer vollständigen thermischen Behaglichkeit weist einen *PMV* = 0 auf. Liegt der *PMV* bei 1 bzw. -1 die Situation als etwas zu warm bzw. etwas zu kühl bewertet. Steigt bzw. sinkt der *PMV* auf 2 bzw. -2 wird die Situation als warm bzw. kühl bewertet. Bei einem *PMV* von 3 bzw. -3 sinkt die Bewertung weiter auf heiß bzw. kalt. Im Folgenden gilt die Behaglichkeit als eingehalten, wenn der *PMV* zwischen -1 und 1 liegt.

$$PMV = [0,303 * \exp(-0,036 * M) + 0,028] \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} &(M - W) - 3,05 * 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] \\ &\quad - 1,7 * 10^{-5} * M(5867 - p_a) - (0,0014 * M(34 - t_a) \\ &\quad - 3,96 * 10^{-8} * f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_{cl}(t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right.$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \{ 3,96 * 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_c h_{cl}(t_{cl} - t_a) \}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 * |t_{cl} - t_{cl}|^{0,25} & \text{for } 2,38 * |t_{cl} - t_{cl}|^{0,25} < 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 * \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 * |t_{cl} - t_{cl}|^{0,25} > 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 l_{cl} & \text{for } l_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 * \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 l_{cl} & \text{for } l_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 * \text{K/W} \end{cases}$$

mit:

M : Energieumsatz⁴ [W/m²]

W : Wirksame mechanische Arbeit [W/m²]

l_{cl} : Bekleidungsisololation [m².K/W]

f_{cl} : Bekleidungsflächenfaktor [-]

t_a : Lufttemperatur [°C]

\bar{t} : Mittlere Strahlungstemperatur [°C]

v_{ar} : Relative Luftgeschwindigkeit [m/s]

p_a : Wasserdampfpartialdruck [Pa]

h_c : Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/(m².K)]

t_{cl} : Oberflächentemperatur der Bekleidung [°C]

2.4.2 Energetische Kennwerte

Die energetische Bewertung von GEK erfolgt für das gesamte System, bestehend aus Heizsystem und Gebäude, oder für die einzelnen Komponenten des Heizsystems.

Zur Einhaltung der thermischen Behaglichkeit muss der Wärmebedarf des Gebäudes durch Wärmeerzeugung $Q_{Erzeugung}$ bzw. gespeicherte Wärme und Wärmeübertragung $Q_{Übertragung}$ an das zu beheizende Volumen gedeckt werden. Die Effizienz des Heizsystems kann mittels der auftretenden Verluste $Q_{Verluste}$ beschrieben werden, vgl. Gleichung (4).

$$Q_{Erzeugung} = Q_{Übertragung} + Q_{Verluste} \quad (4)$$

$Q_{Erzeugung}$: Vom Wärmeerzeuger erzeugte Wärme [kWh]

$Q_{Übertragung}$: Vom Wärmeübertrager an das beheizte Volumen
übertragene Wärme [kWh]

$Q_{Verluste}$: Wärmeverluste im Heizsystem [kWh]

Diese Verluste können in jeder Komponente des Heizsystems auftreten, sodass diese einzeln zu bewerten sind. Allgemein stellt das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand die Effizienz eines Systems dar, vgl. *Incropera 2007* und Gleichung (5).

$$Effizienz = \frac{Nutzen}{Aufwand} \quad (5)$$

⁴ Energieumsatz bezeichnet die von den Personen aufgenommene und wieder abgeben Energiemenge.

Wird die übertragene Wärme als Nutzen definiert und die erzeugte Wärme als Aufwand, kann die Effizienz eines GEK oder Heizsystems durch Einsetzen der Gleichung (4) in Gleichung (5) angegeben werden. Analog kann die Effizienz jeder Komponente des Heizsystems dargestellt werden. Bei Wärmepumpen wird die Effizienz als Jahresarbeitszahl *JAZ* bezeichnet und Gleichung (6) berechnet (DIN 4701-10).

$$JAZ = \frac{E_{Abgabe}}{E_{Aufnahme}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \right] \quad (6)$$

JAZ: Jahresarbeitszahl [-]

E_{Abgabe}: Vom Wärmeerzeuger abgegebene Wärmemenge [kWh]

E_{Aufnahme}: Vom Wärmeerzeuger aufgenommene Energie [kWh]

Die *JAZ* kann zur Bewertung der Effizienz von Wärmepumpen genutzt werden und ist zum einen von der Qualität der Installation und Planung dieser und zum anderen von der Wärmequelle abhängig. Wärmepumpen mit Erdsonden oder -kollektoren als Wärmequelle weisen *JAZ* von *JAZ_{WP}* = 2,5 bis 4 auf, während die Außenluft als Wärmequelle zu *JAZ* von 2 bis 3 führt. Mit Mittel liegen diese bei 3,3, 3,2 bzw. 2,5 (Russ 2010). Luftwärmepumpen weisen also eine deutlich geringere Effizienz auf.

In der Literatur findet sich der solare Deckungsgrad η_{sol} als Kennwert zur Bewertung von Gebäuden mit solarer Wärmeerzeugung. Dieser Kennwert gibt den Anteil solarer Wärme am Wärmebedarf oder der Wärmeerzeugung an. Wird der Ertrag nur auf den Bedarf bezogen, werden zusätzliche Verluste, z. B. durch Speicherung, nicht berücksichtigt. Daher wird der solare Deckungsgrad i. d. R. ermittelt, indem von 1 der Quotient aus nicht-erneuerbarem Anteil der Wärmeerzeugung und Wärmebedarf abgezogen wird, vgl. Gleichung (7).

$$\eta_{sol} = 1 - \frac{Q_{\text{nicht-erneuerbar}}}{Q_{\text{Bedarf}}} \quad (7)$$

η_{sol} : solarer Deckungsgrad [-]

Q_{nicht-erneuerbar}: Nicht-erneuerbar erzeugte Wärme [kWh]

Q_{Bedarf}: Wärmebedarf [kWh]

In einem Heizsystem mit einem erneuerbaren und einem nicht-erneuerbaren Energieträger ist der solare Deckungsgrad proportional zum nicht-erneuerbaren Energieträger.

2.4.3 Ökonomische Kennwerte

Zur Bewertung, ob durch den Einsatz der MFB die Kosten reduziert werden, sind alle Kosten und Erlöse über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes zu bilanzieren. Diese Bilanzierung wird als Lebenszyklusanalyse (engl. *Life cycle analysis* (LCA)) bezeichnet und erfolgt nach *DIN EN 15804*. Diese Kosten ergeben sich aus der Massen- und Energiebilanz, vgl. Absatz 2.4.5.

Der Lebenszyklus von Gebäuden setzt sich nach *DIN EN 15804* aus den Phasen Herstellung & Errichtung A, Nutzung B, Entsorgung C sowie Gutschriften und Lasten außerhalb des Systems D zusammen, vgl. Abbildung 11.

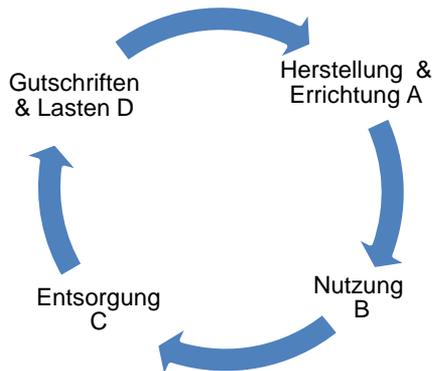


Abbildung 11: Lebenszyklus von Gebäuden nach *DIN EN 15804*

Nach DIN 31051 kann die Nutzungsphase weiter in die Grundmaßnahmen Betrieb, Verwaltung, Instandhaltung und Verbesserung unterteilt werden. Da im Folgenden der Einfluss einzelner Varianten der MFB und der TGA untersucht werden, werden die Grundmaßnahmen Verwaltung und Verbesserung nicht betrachtet, da diese für beide als gleich angenommen werden. Analog wird unter Betrieb nur der elektrische Energiebedarf berücksichtigt, da sich alle anderen Bedarfe – bei gleicher Nutzung – nicht unterscheiden. Analog werden bei der Instandhaltung nur die Bauteile und Komponenten betrachtet, welche die thermische Hülle bzw. die Anlagentechnik bilden.

Barwertmethode

In jeder dieser Phasen fallen Aufwendungen für die Herstellung, Nutzung oder den Rückbau bzw. die Entsorgung von Teilen des Gebäudes an. Diese Kosten treten somit nicht zum gleichen Zeitpunkt auf. Um diese vergleichbar zu machen, wird der BW genutzt und alle Kosten auf das Jahr der Herstellung des Gebäudes bezogen ($t = 0$). Der BW (engl. *present value*) einer Zahlung (engl. *cash flow*) zur Begleichung von zukünftigen Kosten gibt den Betrag an, der zum Zeitpunkt $t = 0$ angelegt werden muss, um diese Kosten zu decken (GEFMA / IFMA 220-1).

Basierend auf den Kosten zum Zeitpunkt $t = 0$ ($Z(t = 0)$) müssen die zukünftigen Kosten im Zeitschritt t unter Berücksichtigung des Preissteigerungsindex i nach Gleichung (8) berechnet werden:

$$Z(t) = Z(t = 0) * (1 + i)^t \quad (8)$$

$Z(t)$: Indexierte Zahlung zum Zeitpunkt t [€]

t : Zeitschritt bzw. Dauer bis zur Zahlung [a]

i : Preissteigerungsindex [-]

Der BW von Kosten zu mehreren unterschiedlichen Zeitschritten ergibt sich nach Gleichung (9) durch Berücksichtigung der Verzinsung des zum Zeitpunkt $t = 0$ mit dem zeitabhängigen Zinssatz $i(t)$ angelegten Kapitals.

$$BW = \sum_{t=0}^T \frac{Z(t)}{\prod_{t=1}^T (1 + i(t))} \quad (9)$$

BW : Barwert aller berücksichtigten Zahlungen [€]

Z : Indexierte Zahlung [€]

T : Betrachtungsdauer [a]

i : Zinssatz [-]

Wird ein konstanter Zinssatz i angenommen, vereinfacht sich Gleichung (9) zu Gleichung (10).

$$BW = \sum_{t=0}^T \frac{Z(t)}{(1 + i)^t} \quad (10)$$

BW : Barwert aller berücksichtigten Zahlungen [€]

Z : Indexierte Zahlung [€]

T : Betrachtungsdauer [a]

i : Zinssatz [-]

2.4.4 Ökologische Kennwerte

Methodik

Analog zur ökonomischen Betrachtung (LCC) muss auch die ökologische Bilanz (engl. *life cycle analysis* (LCA)) der MFB ermittelt werden, um deren Beitrag zu einem klimaneutralen Gebäudebestand zu bewerten.

Die LCA erfolgt auf Grundlage der gleichen Massen- und Energiebilanz wie die LCC. Im Gegensatz zur LCC hat der Zeitpunkt der Nutzung von Massen oder Energie keinen Einfluss auf die Bilanz. Somit ergibt sich der Einfluss einer Nutzung von Masse oder Energie aus dem Produkt mit dem Emissionsfaktor. Analog zu Gleichung (10) ergibt sich der Einfluss der Nutzung von Masse m oder Energie E mit den Emissionsfaktoren $f_{THG,m}$ bzw. $f_{THG,E}$ auf die THG-Emissionen nach Gleichung (11).

$$THG = \sum_{t=0}^T f_{THG,m}(t) * m(t) + f_{THG,E}(t) * E(t) \quad (11)$$

$f_{THG,m}$: Massenbezogener THG-Emissionsfaktor [kg-CO₂-Äq./kg_{Baustoff}]

m : Masse des bilanzierten Baustoffs [kg]

$f_{THG,E}$: Energiemengenbez. THG-Emissionsfaktor [kg-CO₂-Äq./kWh]

E : Bilanzierte Energiemenge [kWh]

Die Emissionsfaktoren $f_{x,y}$ für die LCA können entsprechenden Datenbanken entnommen werden, wie z. B. der ökobaDat. Diese stellt für Bauprodukte Emissionsfaktoren über den gesamten Lebenszyklus bereit. Somit kann auch der zu berücksichtigende Austausch einzelner Bauteile erfolgen. Ist die Nutzungsdauer des Bauproduktes geringer als die Betrachtungsdauer ist dies entsprechend mehrfach zu berücksichtigen.

Stand der Technik zu Lebenszyklusanalysen

Die Untersuchung des LCA erfolgt in der Praxis nur bei einzelnen Gebäuden und vornehmlich bei nicht-Wohngebäuden wie Bürogebäuden. Diese findet wiederum vor allem im Rahmen von übergeordneten Zertifizierungen, z. B. nach DGNB, LEED oder BREEAM, statt. Auf Grund der steigenden Sensitivität von Eigentümern, der Voraussetzung für Förderung durch die KfW sowie der Besteuerung von THG-Emissionen ist ein steigender Einfluss von Lebenszyklusanalysen sowohl ökonomisch als auch ökologisch zu erwarten.

Stand der Wissenschaft zu Lebenszyklusanalysen

Auch in der wissenschaftlichen Betrachtung finden sich vorrangig nicht-Wohngebäude, besonders Bürogebäude. Einen geringeren Anteil weisen die Wohngebäude auf. Folgend wird der Stand für kleine Wohngebäude wie EFH dargestellt.

Unterschiedliche Veröffentlichungen zeigen, dass bei kleinen Wohngebäuden im gemäßigten Klima 50-85 % der THG-Emissionen auf den Betrieb des Heizsystems zurückzuführen sind (*Birgisdottir 2017; Brejnrod 2017; Gauer 2019b, 2017a; Gong 2012; Loewe 2010; Röck 2020; Tersluisen 2018, 2018; Vogdt 2011; Williams 2012*). Die große Spanne ist neben der Bilanzierung von Gebäuden mit unterschiedlicher Kubatur zum einen auf unterschiedliche Bilanzierungen, unterschiedliche Gebäudestandards sowie Eingangsdaten zurückzuführen. Die große Spanne ist zum Teil auf den unterschiedlichen Grad der Berücksichtigung des Innenausbaus zurückzuführen. Analog gilt dies auch für unterschiedliche energetische Gebäudestandards. Steigt dieser, steigen die Emissionen während der Herstellung und sinken im Betrieb. Ein weiterer Grund liegt in den für das Heizsystemen angenommenen Emissionsfaktor. Wird ein geringer Emissionsfaktor für die Bereitstellung der Wärme angenommen, ist deren Anteil am gesamten Wärmebedarf geringer als bei einem hohen Emissionsfaktor.

2.4.5 Massen- und Energiebilanz für LCC und LCA

Zur Ermittlung der LCC und LCA werden die im Lebenszyklus zu bilanzierenden Massen und Energien benötigt. Zur Ermittlung des ökonomischen und ökologischen Einflusses sind sämtliche Massen und Energien, die im Lebenszyklus benötigt werden, zu bilanzieren. Dieser Ermittlung erfolgt anhand zwei grundsätzlicher Ansätze:

- Top-down
- Bottom-up

Beim Top-down-Ansatz wird das zu bilanzierende Objekt in immer kleinere Einheiten unterteilt. Diese Teile werden so gewählt, dass diese möglichst ähnlich sind und gruppiert werden können. Bezogen auf die untersuchten Gebäude bedeutet dies eine Zerlegung in Dach, Geschossdecken, Gründung sowie Außen- und Innenwände.

Im Bottom-up-Ansatz wird der gegenteilige Ansatz verwendet. Basierend auf möglichst kleinen Einheiten werden diese zu größeren Gruppen zusammengefasst. Im hier betrachteten Beispiel des Gebäudes ergibt sich aus

den einzelnen Schichten und Einbauteilen ein Bauteil. Die kleinsten Einheiten ergeben sich aus den verfügbaren Eingangsdaten für die LCC bzw. LCA.

Durch die Kombination dieser beiden Ansätze können Gebäude in kleinere Einheiten zerlegt und vollständig abgebildet werden.

Werden unterschiedliche Varianten des gleichen Systems verglichen, führen diese Ansätze zur Bilanzierung von identischen Bauteilen bzw. Komponenten in jeder Variante. Dies führt zu einer Erhöhung des Aufwandes und der Bilanz, ohne die Aussage zu beeinflussen. Daher werden im Folgenden nur die Bauteile bzw. Komponenten bilanziert, die nicht in allen Varianten identisch sind.

2.4.6 Sensitivität

Die ökonomische und die ökologische Bilanzierung können stark von den Eingangswerten abhängig sein. Dies kann innerhalb der Bilanzierung nicht direkt abgebildet werden, da sich sonst Wertebereiche statt einzelner Werte ergeben würden.

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einzelner Eingangswerte ermittelt. Hierzu wird der Wertebereich des Eingangsparameters definiert und die Bilanzierung mindestens für die Extremwerte sowie den Standardwert durchgeführt. Dieses Vorgehen ist vor allem für Eingangswerte, die nicht-linear in die Berechnung eingehen, sinnvoll. Folgendes Beispiel zeigt den Einfluss des elektrischen Arbeitspreises auf die Energiekosten im ersten Jahr nach Gleichung (10) sowie den Anteil der Anschlussgebühr an den Energiekosten, vgl. Abbildung 12.

Anschlussgebühr [€/a]:	50
Arbeitspreis el. Energie [€/kWh _{el}]:	0,3 (Standardwert); 0,1 (Min.); 0,4 (Max.)
Jährlicher Bedarf [kWh/a]:	1.000
Jährliche Kosten [€/a]:	350; 150; 450

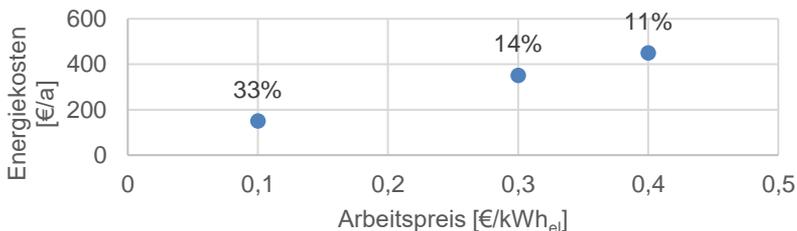


Abbildung 12: Jährliche Energiekosten und Anteil der Arbeitskosten an diesen

2.5 Regelung & Steuerung

Wie in Absatz 2.3.2 beschrieben ist eine Regelung & Steuerung Teil des Heizsystems. Diese regelt bzw. steuert sämtliche aktiven Komponenten wie Pumpen, Ventile und Erzeuger, sodass deren Verhalten aufeinander abgestimmt sind. Daher werden folgend die Begriffe Regelung & Steuerung definiert und differenziert sowie anschließend übliche Regelungen und Steuerungen für Heizsysteme beschrieben.

2.5.1 Definitionen und Ziel von Regelung & Steuerung

Unter einer Regelung versteht man nach *DIN 19226* einen „Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße), fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis statt.“ Bezogen auf die Raumlufttemperatur bedeutet dies, dass der IST-Wert $T_{Luft,mess}$ der Raumlufttemperatur (Regelgröße) fortlaufend gemessen und mit dem Sollwert (Führungsgröße) von $T_{Luft,soll} = 20\text{ °C}$ verglichen wird. Ist $T_{Luft,mess} > 20\text{ °C}$, wird die Umwälzpumpe gestoppt; bei $T_{Luft,mess} < 20\text{ °C}$ wird die Umwälzpumpe gestartet oder weiter betrieben. Folgende Abbildung 13 verdeutlicht diese Mechanismen anhand einer Regulierung des Volumenstroms des Heizkreises.

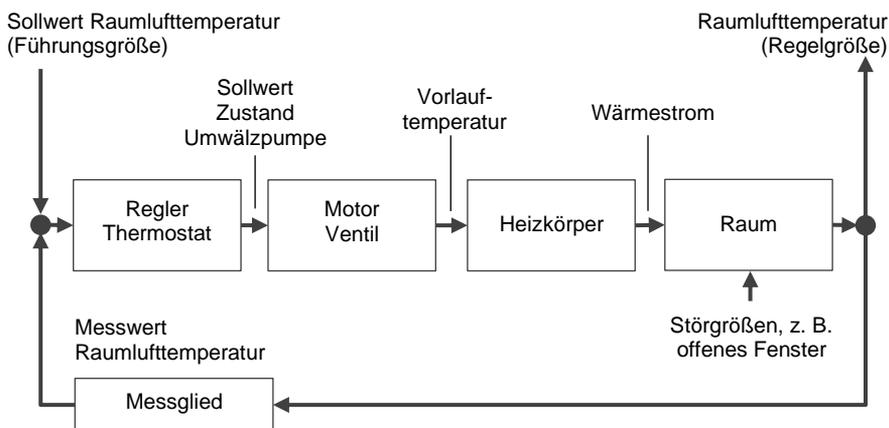


Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Regelung (vereinfacht) in Anlehnung an (Heinrich et al. 2009)

Der Regelungsvorgang unterscheidet sich prinzipiell in seinem Wirkungsablauf von einem Steuerungsvorgang. Nach *DIN 19226* ist die Steuerung „ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen

Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg“.

Im Geschosswohnungsbau und bei der Einzelraumregelung erfolgt eine Regelung, da die Raumlufftemperatur (Regelgröße), vgl. Abbildung 13, gemessen wird und mit Hilfe der Ventile eine Angleichung der Raumlufftemperatur an deren Sollwert erfolgt.

Bei Ein- und Zweifamilienhäusern kommen vor allem Steuerungen zum Einsatz. Hier wird die Außentemperatur (Eingangsgröße) gemessen und eine Stellung des Ventils der Rücklaufbeimischung, vgl. Abbildung 13, (Ausgangsgröße) ermittelt.

Neben den Wärmeübertragern muss auch die Wärmeerzeugung geregelt bzw. gesteuert werden. Diese werden i. d. R. mittels der Pufferspeichertemperatur oder bei Systemen ohne Speicher, wie z. B. Gasheizungen, der Vorlauftemperatur gesteuert.

Ziele der Regelung & Steuerung

Die Regelung bzw. Steuerung hat die Aufgabe aus den gemessenen Eingangsdaten, wie z. B. Raumlufftemperaturen, Signale abzuleiten, wie z. B. Ventilstellungen, die zu dem gewünschten Raumzustand, hier Raumlufftemperatur, führen. Bei konventionellen Heizungssystemen mit fossilen Brennstoffen und ohne Kühlungsoption kann die Regelung bzw. Steuerung wie folgt unterteilt werden.

- 1) Steuerung des Wärmeerzeugers bzw. der Wärmeerzeuger
Das Öffnen und Schließen von Ventilen beeinflusst die Brennstoffmenge je Zeitschritt und somit die vom Wärmeerzeuger abgegebene thermische Leistung.
- 2) Steuerung / Regelung der Vorlauftemperatur
Aus der Raum- bzw. Umgebungslufttemperatur wird mit Hilfe der Heizkurve eine Vorlauftemperatur berechnet. Diese wird durch Mischung des Rücklaufes aus den Heizflächen mit dem Vorlauf aus dem Speicher bzw. direkt aus dem Erzeuger gemischt. Dies wird als Rücklaufbeimischung bezeichnet. Dazu wird das Ventil der Rücklaufbeimischung geregelt und fortlaufend an die Soll-Temperatur angepasst.
- 3) Steuerung des Volumenstroms der Heizflächen
Um eine Überhitzung des Raumes zu verhindern, wird ein Thermostatventil eingesetzt. Dieses passt den Volumenstrom der

Heizflächen in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur an. Liegt die Raumlufttemperatur unter dem Sollwert, wird der Volumenstrom erhöht, liegt sie darunter, wird der Volumenstrom reduziert oder gestoppt.

2.5.2 Regelung und Steuerung von TABS

Die Wärmeübertragung von TABS kann auf Grund der im Vergleich zu anderen Heiz- und Kühlsystem großen Wärmeübertragungsfläche bei geringen Temperaturunterschieden erfolgen. Die benötigten Temperaturen sind somit ähnlich denen anderer Flächenheizungen, wie z. B. FBH. Im Heizfall sind Vorlauftemperaturen zwischen $T_{FBH,VL} = 23$ und 35 °C ausreichend.

Die Lage der thermischen Aktivierung im Kern des Bauteils führt zu einer deutlichen höheren spezifischen thermischen Masse von rd. $\dot{m}''_{MFB} = 460$ kg/m² im Vergleich zu Flächenheizungen mit $\dot{m}''_{MFB} = 115$ kg/m². Diese deutlich höhere thermische Masse führt zu einer höheren Wärmespeicherung und auch zu einer verzögerten Wärmeabgabe. Dieses trägere Verhalten stellt die intendierte Wärmespeicherung dar, muss aber in der Regelung & Steuerung berücksichtigt werden.

In der Literatur finden sich unterschiedlichste Ansätze zur Regelung & Steuerung. Diese reichen von grundsätzlichen Strategien über Verfahren, die auf Heizungssysteme inkl. Wärmespeicherung zugeschnitten sind, bis hin zu Verfahren, die zur Steuerung und Regelung von thermisch aktivierten Bauteilen, dort in aller Regel zur Kühlung von Bürogebäuden, reichen (*Tödttli 2009*).

2.5.3 TABS zur Deckung der Grundlast des Kühlbedarfs

TABS werden in der Praxis fast ausschließlich zur Deckung der Grundlast des Kühlbedarfs eingesetzt. Auf Grund der hohen Trägheit wird mindestens ein weiteres System benötigt, welches schneller die Kühllast decken kann. Die Steuerung zur Deckung der Grundlast basiert in der Regel auf der Rücklauftemperatur und der Tageszeit. Die Bauteile und somit die Räume werden mit kaltem Wasser $T_{TABS,VL} = 16$ bis 20 °C herunter gekühlt, vgl. *Kalz 2016; Kalz 2010; Pfafferoth 2015*. Dies geschieht zu festgelegten Zeiten, meist nachts, und oft mit kaltem Grundwasser. Solch eine Konfiguration erlaubt eine nieder-exergetische und energieeffiziente Kühlung der Räume.

Abbildung 14 zeigt eine grundlegende Strategie zur Regelung von TABS zur Deckung des Kühlbedarfs (*Tödttli 2009*). Im ersten Szenario befindet sich der Raum in (1) am oberen Ende der thermischen Behaglichkeit. Durch den folgenden Wärmeeintrag zwischen 9 und 17 Uhr v.a. über die Fenster und elektrische Geräte, (1 ► 2' ► 3') wird die Raumlufttemperatur über die Grenze der Behaglichkeit erhöht. Analog erhöht sich die innere Oberflächentemperatur

des Bauteils (1 ► 4). Durch den Austrag von Wärme aus dem Bauteil mittels thermischer Aktivierung in der Nacht werden sowohl die Bauteiloberflächen als auch die Raumlufttemperatur reduziert (4 ► 5). Hierdurch kühlt das Bauteil schneller ab als ohne Aktivierung.

Im zweiten Szenario werden die gleichen Randbedingungen angenommen, nur mit thermischer Aktivierung des Bauteils. Dieses wurde in der Nacht aktiv rückgekühlt und hat eine geringere Kerntemperatur. Die Raumluft und Oberflächentemperatur in (1) sind identisch mit denen in Szenario eins. Durch die geringe Kerntemperatur kann es mehr Wärme aufnehmen, ohne die Behaglichkeit zu verletzen (1 ► 4). Diese Wärme führt nicht mehr zu einer Erwärmung des Raumes zwischen 9 und 17 Uhr, sodass sich die Raumlufttemperatur weniger anhebt (1 ► 2 ► 3), vgl. Abbildung 14. Durch die geringe Raumlufttemperatur kann die Behaglichkeit einfacher eingehalten werden. Bei richtiger Dimensionierung der Anlagentechnik wird über Nacht sämtliche überschüssige Wärme aus den Bauteilen und den Räumen ausgetragen, sodass diese zu Beginn des Wärmeintrags aus solarer Strahlung und elektrischen Geräten am unteren Ende der Behaglichkeit sind. Somit kann ein Maximum an Wärme über die thermische Aktivierung entzogen und die Behaglichkeit sichergestellt werden.

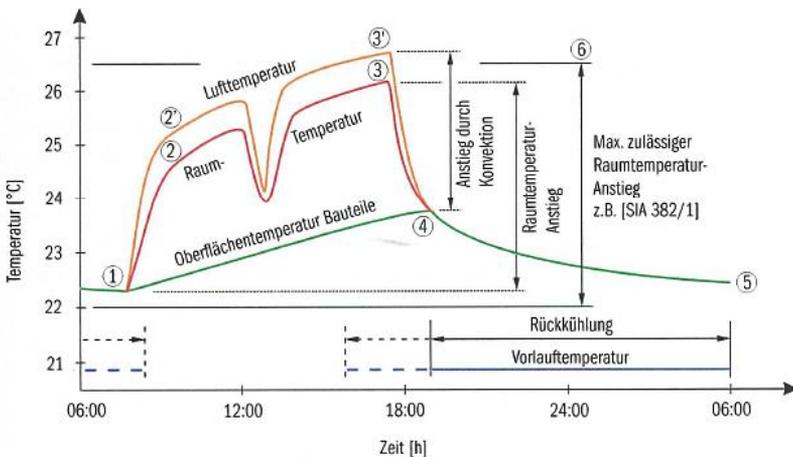


Abbildung 14: Charakteristischer Temperaturzyklus in Räumen mit thermoaktiven Bauteilen (Tödli 2009).

2.5.4 TABS zur Deckung der Grund- und Spitzenlast

Im Gegensatz zur Grundlastdeckung können TABS auch genutzt werden, möglichst den gesamten Bedarf zu decken. Ein Verfahren findet sich in *Tödli 2009*. Hier wird eine Regelung & Steuerung entwickelt, welche sowohl die thermischen Bedarfe als auch die Wärmegewinne von Räumen abschätzt. Dies erfolgt auf Grundlage von Unsicherheiten, aus denen dann eine Regelung & Steuerung für jeden Raum abgeleitet wird. Diese Unsicherheiten gliedern sich nach *Tödli 2009* wie folgt.

- 1) Planungsunsicherheit in der Kenntnis der Wärmegewinne
- 2) Nicht voraussagbare Tag-zu-Tag-Variabilität der Wärmegewinne
- 3) Raum-zu-Raum-Variabilität der Wärmegewinne
- 4) Tägliche Variation der Wärmegewinne
- 5) Voraussagbare Tag-zu-Tag-Variabilität der Wärmegewinne

Aus den oben beschriebenen Anwendungszielen lässt sich keine allgemeingültige Regelung bzw. Steuerung angeben, wie auch in *Heimrath 2018* beschrieben. Die Regelung & Steuerung muss immer an das entsprechende Ziel, i. d. R. Deckung der Grundlast oder Deckung der Grund- und Spitzenlast, angepasst werden. Aus beiden Strategien lassen sich konkrete Konzepte ableiten, wie in *Heimrath 2018* detaillierter beschrieben:

- 1) Konstante Vorlauftemperatur
- 2) Steuerung der Vorlauftemperatur auf Grund der Außentemperatur
- 3) Regelung nach einer Temperatur im Bauteil
- 4) Steuerung des Wasser-Massenstroms
- 5) Vorausschauende / prädiktive Konzepte

Nach *Heimrath 2018* finden sich in der Literatur vor allem für kleine Wohngebäude keine praxiserprobten Erkenntnisse. Diese liegen vor allem für große Bürogebäude und anderen nicht-Wohngebäude vor. Ebenso fehlen entsprechende Langzeituntersuchungen.

3 Parameter der thermischen Simulation sowie Referenzen

Um den Einfluss einzelner Parameter auf das gesamte System, bestehend aus Gebäude und Technischer Gebäudeausrüstung sowie die Lebenszykluskosten und THG-Emissionen zu ermitteln, wird jeder Parameter zuerst allein untersucht. Die untersuchten Parameter bilden den relevantesten Teil der möglichen Parameter ab. Wichtig bedeutet hierbei, dass sich durch die Parameter die thermische Kapazität C , der thermische Widerstand R oder beide Parameter ändern. Diese werden in die Gruppen „Aufbau der MFB“, „Größe und Orientierung der MFB“ sowie „Einfluss der Anlagentechnik“ unterscheiden. Zudem werden Varianten, die dem Stand der Technik entsprechen, zur Einordnung der Ergebnisse genutzt. Die untersuchten Werte je Parameter ergeben sich, wenn nicht anders beschrieben, aus der Verdopplung bzw. Halbierung des Wertes des Parameters nach *Heimrath 2007*.

3.1 Aufbau der MFB

Durch den Aufbau der MFB, insbesondere die Masse der Tragschale, kann deren thermische Kapazität und Wärmeleitfähigkeit beeinflusst werden, vgl. Gleichung (1). Der thermische Widerstand kann durch die Dämmung an der Innen- und Außenseite der aktivierten Tragschale beeinflusst werden. Somit stellen die Schichtdicken der Tragschale sowie der Außen- und einer möglichen Innendämmung die theoretisch relevanten Parameter zu Beeinflussung der Wärmespeicherkapazität sowie der Verzögerung der Wärmeabgabe bezogen auf die Wärmeaufnahme dar, vgl. Abbildung 15.

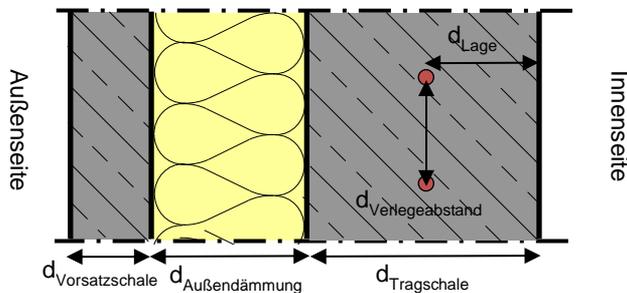


Abbildung 15: Querschnitt MFB

Parameter der thermischen Simulation sowie Referenzen

Die zur weiteren Untersuchung gewählten Schichtdicken der Außendämmung sind analog zu den Schichtdicken der Außenwände bei den EFH mit $HWB^{\circ} = 60$ bzw. $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ SFH60 bzw. SFH100 nach Heimrath 2007. Der thermische Widerstand nach innen ergibt sich neben der Innendämmung auch durch die Lage der Aktivierung in der Tragschale sowie das für diese genutzte Material. Daher werden zusätzlich die Lage und das Material der Aktivierung untersucht. Entsprechend kann durch den Verlegeabstand d_{VA} der thermischen Aktivierung, also dem vertikalen Abstand zwischen den einzelnen horizontalen Rohrteilen, die in das Bauteil einbringbare thermische Leistung variiert werden. Folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten. Im Vergleich zu Abbildung 5 wurden die Schichtaufbau modifiziert, vgl. Abbildung 15.

Tabelle 2: Parameter Schichtaufbau MFB

Parameter	Referenz (Median)	Minimum (weitere kleiner als Median)	Maximum (weitere größer als Median)
<i>Dicke Tragschale</i> $d_{\text{Tragschale}} [\text{cm}]$	20	10, 15	30, 40
<i>Dicke</i> <i>Außendämmung</i> (WLS 040) $d_{\text{Außendämmung}} [\text{cm}]$	24	6, 12, 18	30
<i>Dicke</i> <i>Innendämmung</i> (WLS 040) $d_{\text{Innendämmung}} [\text{cm}]$	0	-	2, 4, 6
<i>Lage Aktivierung (von innen)</i> $d_{\text{Lage}} [\text{cm}]$	10	4, 8	12, 16
<i>Material Aktivierung</i> ⁵ (Wärmeleitfähigkeit) $\lambda_{\text{Akt}} [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Polyethylen (PE) (0,4)	-	Eisen (Fe) (80), Kupfer (Cu) (300)
<i>Verlegeabstand</i> <i>Aktivierung</i> $d_{\text{Verlegeabstand}} [\text{cm}]$	10	-	20, 40

⁵ Analog zur Wärmeleitfähigkeit wird auch die spezifische Speicherkapazität des Rohrs der Aktivierung angepasst. Auf Grund der geringen Masse des Rohres, im Vergleich zum angrenzenden Beton, ist diese aber vernachlässigbar.

Parameter der thermischen Simulation sowie Referenzen

Prinzipiell lassen die Änderungen des Schichtaufbaus der MFB folgende Effekte erwarten. Diese können sich grundsätzlich überlagern und somit abschwächen oder verstärken.

- Erhöhung der Speicherkapazität: Steigerung und Verzögerung der Wärmeaufnahme
- Erhöhung des thermischen Widerstandes: Verzögerung und Reduktion der Wärmeabgabe an den Innenraum respektive die Umgebung

Eine Reduktion der Speicherkapazität respektive des Widerstandes lassen gegenläufige Effekte erwarten.

Zur Steigerung des Nutzens sollten die MFB eine Wärmeverschiebung von 12 h ermöglichen und hierbei möglichst viel Wärme aufnehmen und wieder abgeben, ohne die Behaglichkeit im angrenzenden Raum, z. B. durch zu hohe Temperaturen, zu verletzen.

Die oben beschriebenen Parameter ergeben sich durch Variation der Geometrie oder der Materialien. Diese verändern zum Teil gleichzeitig mehrere Eigenschaften. So werden beispielsweise durch die Änderung der Dicke der Tragschale sowohl die thermische Kapazität als auch der thermische Widerstand variiert. Daher wird zusätzlich die Variation der spez. Speicherfähigkeit (c_p) und der Wärmeleitfähigkeit (λ) jeweils individuell untersucht. Somit kann der jeweilige Einfluss separat bewertet werden. Als Referenz werden die Werte für Normalbeton angenommen und durch Halbierung bzw. Verdopplung ergeben sich Minimum bzw. Maximum. Auf diese Weise wird der grundsätzliche Einfluss der beiden Parameter individuell abgebildet, vgl. Tabelle 3.

Tabelle 3: Parameter theoretische Variationen

Parameter	Referenz (Median)	Minimum (weitere kleiner als Median)	Maximum (weitere größer als Median)
<i>Wärmeleitfähigkeit der Tragschale</i> $\lambda_{Tragschale}$ ($c_p = \text{konst.}$) [W/(m.K)]	2,1	1,05	4,2
<i>Spez. Wärmespeicherkapazität der Tragschale</i> $c_{p, Tragschale}$ ($\lambda = \text{konst.}$) [kWh/(m ² .K)]	0,13	0,06	0,26

3.2 Größe und Orientierung der MFB

Analog zum Schichtaufbau der MFB wird durch die Größe der MFB die aktivierte Masse und somit die thermische Speicherkapazität beeinflusst. Zudem beeinflusst die Größe des MFB auch die Herstellungskosten. Daher ist deren Einfluss ebenfalls zu untersuchen.

Im Gegensatz dazu wird durch die Orientierung der MFB beeinflusst, an welchen diese die aufgenommene Wärme abgeben. Diese weisen durch die differente Orientierung, insbesondere der Fenster, einen unterschiedlichen zeitlichen Verlauf der Heizlast Φ auf. Wird für unterschiedliche Orientierungen der MFB immer der bzgl. Zeit und Leistungen gleiche solarthermische Ertrag angenommen, ergeben sich unterschiedliche zeitliche Abstände zwischen Ertrag und Bedarf. Somit ist zu klären, ob diese Abstände einen Einfluss auf die Kenngrößen aufweisen.

Zudem wird die Aktivierung der Wände des nördlichen Raums detaillierter untersucht, vgl. Abbildung 16. Dieser hat auf Grund der geringen solaren Einstrahlung die höchste Heizlast Φ und den höchsten HWB. Daher ist zu untersuchen, wie sich die Größe des MFB sowie die Lage des Raumes, im welchem die MFB eingesetzt sind, auf die Kennwerte auswirkt. Abschließend wird der Einfluss der Orientierung der MFB untersucht, indem jeweils $A_{MFB} = 36 \text{ m}^2$ der vier Außenwände als MFB ausgebildet werden. Folgende Tabelle 4 stellt die initial untersuchten Parameter und Werte zum Aufbau und der Orientierung der MFB dar.

Des Weiteren wird der Einfluss der solaren Strahlung auf die Außenseite der MFB untersucht. Diese kann durch lokale Einflüsse wie Nachbarbebauung oder Bäume gemindert werden. Daher soll geklärt werden, ob dies in einer späteren Auslegung zu berücksichtigen ist.

Tabelle 4: Parameter Größe und Orientierung MFB

Parameter	Referenz (Median)	Minimum (weitere kleiner als Median)	Maximum (weitere größer als Median)
<i>Aktivierte Wand (unterschiedliche Größe) [-]</i>	WO	N, W, S, O	WNO, NWSO, NWSO (nur Erdgeschoss), NWSO (nur Obergeschoss),
<i>Orientierung aktivierte Fläche (17,56 m²) O_{MFB}⁶</i>		NO-Raum: Östliche Wand, nördliche Wand	NW-Raum: Westliche Wand, nördliche Wand
<i>Anteil aktivierte Nordwand⁷ A_{akt} [m² (%)]</i>	23,5 (50)	12,25 (25)	47 (100)
<i>Alle Wände der nördlichen Räume [-]</i>	N, WO je 50 %	-	-
<i>Orientierung aktivierte Wand (36 m²) O_{MFB} [-]</i>	N, S, W, O	-	-
<i>Stockwerk [-]</i>	NWSO	EG (NWSO)	OG (NWSO)

⁶ Fläche der östlichen bzw. westlichen Wand; Außenwand der nördlichen Räume im Erd- und Obergeschoss

⁷ Der Anteil wurde, wenn nicht anders vermerkt, gleichmäßig auf alle Wände aufgeteilt.

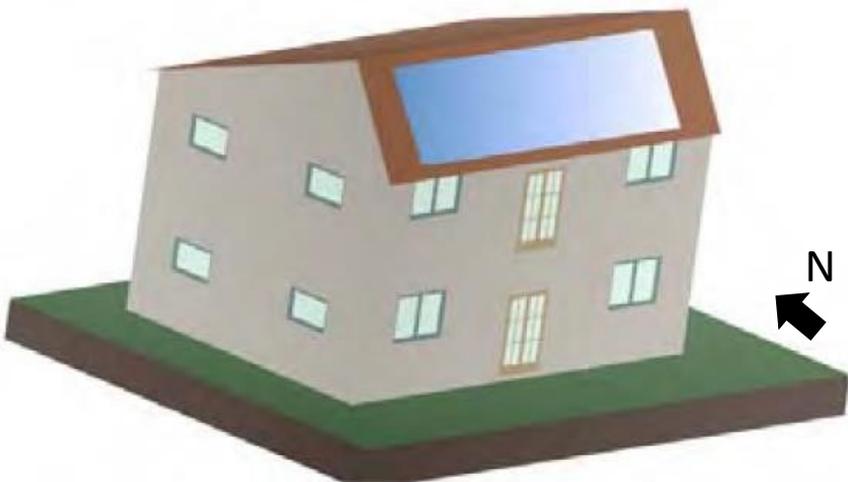
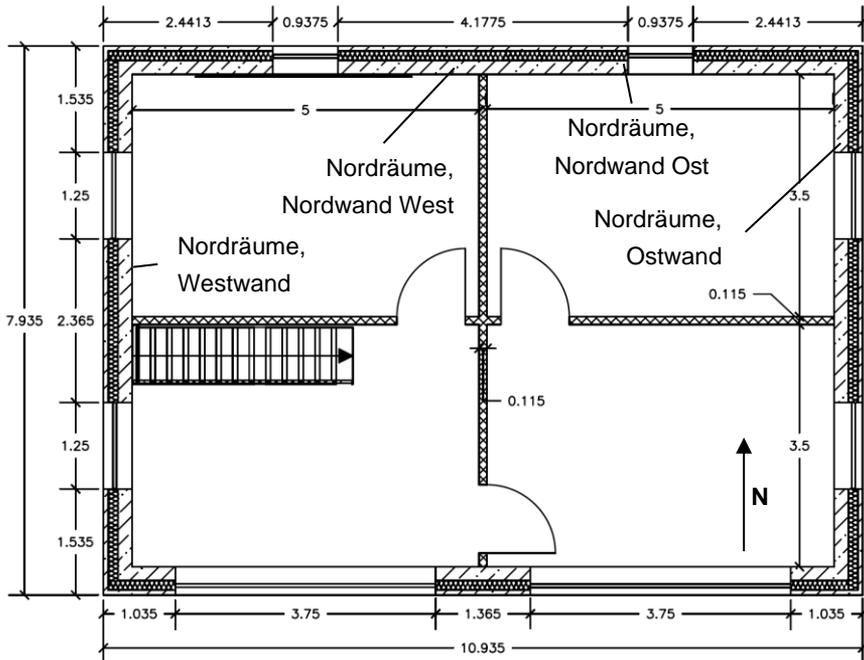


Abbildung 16: Grundriss des Obergeschosses des Referenzgebäudes (oben) und Visualisierung nach Heimrath 2007 (unten)

3.3 Technische Gebäudeausrüstung

Der Ertrag der Solarthermie wird von der Größe der Kollektoren sowie deren Orientierung beeinflusst. Wie in Absatz 2.3.5 dargestellt, führt eine Vergrößerung der Kollektorfläche A_{ST} und eine Orientierung nach Süden O_{ST} zu einer asymptotischen Steigerung des solaren Ertrages. Da die Solarthermie eine deutlich besser JAZ aufweist, ist zu erwarten, dass der gesamte Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ mit steigendem solaren Ertrag Q_{ST} sinkt.

Die Luftwechselrate n_{50} kann sich u. a. durch das Nutzerverhalten oder steigende Undichtigkeit der thermischen Hülle erhöhen. Analog kann durch zusätzliche Maßnahmen, wie z. B. Abdichtungen, der Wärmebedarf auf Grund des Luftwechsels reduziert werden. Sinkt der Wärmebedarf des Gebäudes, ist auch ein geringerer gesamter Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ zu erwarten.

Die Größe des Pufferspeichers wird für einen drei-köpfigen Haushalt nach *DIN V 18599-5* mit $V_{PS} = 300$ l angenommen und orientiert sich am doppelten täglichen Wärmebedarf für Trinkwarmwasser, vgl. Tabelle 5.

Tabelle 5: Parameter Solarthermie

Parameter	Referenz (Median)	Minimum (weitere kleiner als Median)	Maximum (weitere größer als Median)
<i>Kollektorgroße Solarthermie A_{ST} [m²]</i>	40	20, 30	50
<i>Orientierung Kollektor Solarthermie O_{ST} [-]</i>	S	W, O, N	-
<i>Luftwechsel n_{50} [1/h]</i>	0,4	0,2	0,8

3.4 Stand der Technik und MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe

Um die Wirkungen der in den Abschnitten 3.1 bis 3.2 beschriebenen Varianten vergleichen zu können, werden zusätzlich noch Varianten betrachtet, bei denen kein Bauteil als MFB ausgebildet ist. Diese unterscheiden sich untereinander durch die Größe des Pufferspeichers und werden als Stand der Technik bezeichnet. Mit diesen kann die Substitution des Pufferspeichers durch die Nutzung der MFB bewertet werden. Hierzu wird der jährliche Bedarf an elektrischer Energie als Funktion in Abhängigkeit der PufferspeichergroÙe ermittelt. Anhand diesem kann die Variante mit MFB einer äquivalenten PufferspeichergroÙe zugeordnet werden (Caspari 2016).

Zudem werden auch aus der Referenz MFB weitere Varianten abgeleitet, indem die PufferspeichergroÙen variiert werden. Diese werden als „MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe“ bezeichnet. Basierend auf Literaturwerten aus Absatz 2.3.5 und der Kollektorfläche $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ wurde das Volumen des Pufferspeichers mit $V_{PS} = 4.000$ bis 6.000 l dimensioniert.

Tabelle 6: Stand der Technik mit variabler PufferspeichergroÙe sowie mit und ohne MFB

Parameter	Referenz (Median)	Minimum (weitere kleiner als Median)	Maximum (weitere größer als Median)
Volumen Pufferspeicher $V_{PS} [l]$	300	-	600, 1.000, 3.000

3.5 Kaltes Klima und theoretisches Minimum

Zur Absicherung der Simulationsergebnisse wird zum einen eine Variante mit einem kalten Wetter untersucht und zum anderen ein minimal nötiger Bedarf durch eine ausschließliche Versorgung mittels Solarthermie ermittelt.

Um den Nutzen der MFB auch bei ungünstigeren Bedingungen zu untersuchen, wird das Gebäude mit dem Wetterdatensatz für Stockholm simuliert. Dieses weist geringere solare Strahlung und Außenlufttemperaturen auf. Letztere sinkt im Jahresmittel von $T_{amb,Zürich} = 11,7 \text{ °C}$ auf $T_{amb,Stockholm} = 5,3 \text{ °C}$.

Zur Ermittlung eines theoretischen minimalen Bedarfs an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ wird zudem eine rein solare Wärmeversorgung angenommen. Im Detail wird angenommen, dass die Wärme mit einem konstanten Wirkungsgrad der Solarthermie von $JAZ_{ST} = 25$ eingespeichert wird, unabhängig von den Temperaturniveaus der gewonnen Wärme und des Pufferspeichers. Letzterer wird als verlustfrei angenommen. Somit liegt ein Heizsystem vor, welches zu jedem Zeitpunkt genau den Wärmebedarf decken kann.

3.6 Fazit

In Kapitel 3 wurden die Parameter der thermischen Simulation hergeleitet und beschrieben. Diese sind in „Aufbau der MFB“, „Orientierung und Größe der MFB“ sowie „Technische Gebäudeausrüstung“ untergliedert. Erstere umfasst den Aufbau des MFB, bestehend aus Schichtabfolge und Schichtdicke. Somit werden sowohl die Speicherkapazität des MFB als auch dessen Wärmeleitfähigkeit modifiziert. Analog umfasst die zweite Gruppe die Lage des MFB innerhalb des Gebäudes bzw. des angrenzenden Raumes sowie dessen Anteil an der Außenwand. Hierdurch wird die Speicherkapazität sowie der Verlauf der Heizlast Φ des an das MFB angrenzenden Raumes variiert. Zur Untersuchung des Einflusses wird ebenfalls die Größe und Orientierung der Solarthermie-Anlage variiert, was sich auf den zeitlichen Verlauf und die thermische Leistung auswirkt. Mit Hilfe von Referenzen mit und ohne MFB kann der Nutzen der MFB anhand der in Kapitel 5 vorgestellten Kennwerte quantifiziert werden. Somit liegen im Ergebnis dieses Kapitels die zu untersuchen Varianten vor.

4 Referenzgebäude

Um den Einfluss einzelner Parameter zu bewerten, wird eine Referenz mit MFB benötigt, wie in Kapitel 1 beschrieben. Im Folgenden wird die Variante mit vollständig aktivierten Ost- und Westwänden als „Referenz mit MFB“ bezeichnet und zum Vergleich der Kennwerte herangezogen.

4.1 Auswahl des Referenzgebäudes

In *Loga 2015* wird der Wohngebäudebestand in Deutschland in die Größenklassen „Einfamilienhaus“ (EFH), „Reihenhaus“ (RH), „Mehrfamilienhaus“ (MFH), „Großes Mehrfamilienhaus“ (GMFH) und „Hochhaus“ (HH) unterteilt. Ähnliche Typologien gibt es auch für andere Länder und Regionen in Europa, vgl. EPISCOPE-Projekt. Für Deutschland zeigt sich, dass rd. 60 % der Wohnfläche auf EFH und RH entfallen und diese 82 % der Gebäude stellen (*Loga 2015*). Daher werden die MFB im Folgenden an einem repräsentativen EFH untersucht. Im Rahmen des „solar heating and cooling“-Programms (SHC) der internationalen Energieagentur (IEA) werden unterschiedlichste Kennwerte und Gebäude definiert, um einzelne Technologien zu bewerten. Im IEA SHC Task32 „Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings“ wird ein für Europa repräsentatives EFH zur Untersuchung von Wärmespeichern in Gebäuden mit solarer Erzeugung definiert, vgl. Abbildung 17. Dieses verfügt über zwei Etagen und weist eine Nutzungsfläche von $NUF = 140 \text{ m}^2$ auf. Die Nutzung des Gebäudes nach IEA SHC Task32 hat zudem den Vorteil, dass die Ergebnisse dieser Untersuchung auch mit Ergebnissen anderer Arbeiten, welche ebenfalls das Gebäude nach IEA SHC Task32 nutzen, vergleichbar sind.

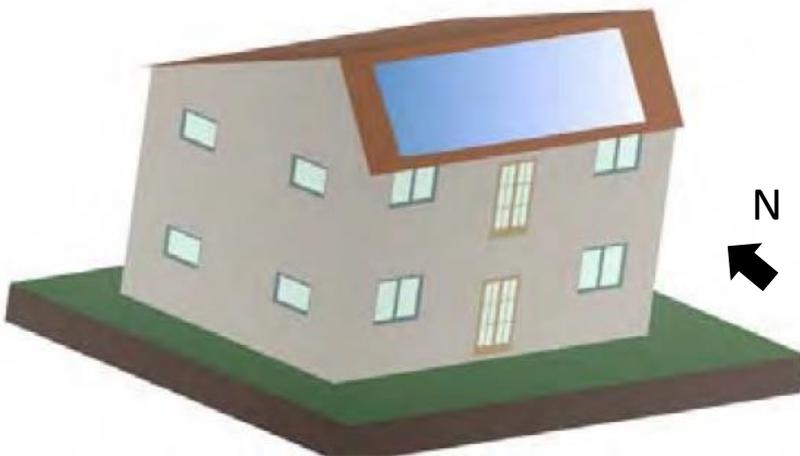


Abbildung 17: Visualisierung des Referenzgebäudes nach IEA SHC TASK 32 (Heimrath 2007)

Das Gebäude wird mit einer Solarthermie-Anlage, vgl. Abbildung 17 unten rechts, und einer elektrischen Wärmepumpe mit Wärme versorgt, womit neben Umweltenergie nur elektrische Energie genutzt wird. Die erzeugte Wärme wird an einen Pufferspeicher abgegeben. Zur Beheizung des Gebäudes werden aus diesem MFB und FBH in Parallelschaltung versorgt, vgl. Abbildung 18.

4.2 Ziel und Aufbau der Referenz

Ziel der Referenz, bestehend aus thermischer Gebäudehülle und technischer Gebäudesaurüstung, ist es den Einfluss der MFB bzw. einzelner Eigenschaften dieser auf ein repräsentatives Wohngebäude anhand des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ und weiterer Kenngrößen zu untersuchen, vgl. Kapitel 5. Hierzu müssen die MFB in das Heizsystem des Gebäudes integriert werden. Ziel ist es, die MFB sowohl als Wärmespeicher als auch als Wärmeübertrager zu nutzen.

Basierend auf dem Stand der Technik zum Aufbau von Heizsystemen werden die MFB in einem Heizsystem mit Solarthermie-Kollektor und elektrischer Luft-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt, vgl. Absatz 2.3.2 sowie Abbildung 7 und Abbildung 8. Die beiden Wärmeversorger speisen einen Pufferspeicher, welcher als hydraulische Weiche, also zum Ausgleich von unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und der Nutzung von unterschiedlichen Medien zur Wärmeübertragung dient. Der Pufferspeicher versorgt das MFB sowie die FBH, vgl. Abbildung 18. Somit entsteht ein Heizsystem, welches ausschließlich mit elektrischer Energie betrieben wird.

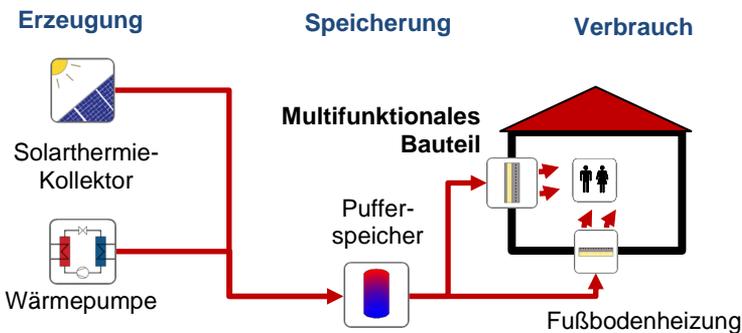


Abbildung 18: Heizsystem mit MFB

Die beiden Wärmeerzeuger unterscheiden sich zum einen durch ihre Effizienz und durch die Regelbarkeit der Wärmeerzeugung. Da solare Wärme effizienter bereitgestellt werden kann, weist diese geringeren Gestehungskosten [€/kWh_{th}] und spezifische THG-Emissionen [kg-CO₂-Äq./kWh_{th}] auf. Im Gegensatz dazu

50

kann die Wärmepumpe zu jedem Zeitpunkt Wärme bereitstellen. Daher wird solare Wärme, wenn verfügbar genutzt und die Wärmepumpe zur Sicherstellung der Wärmeerzeugung zu jedem Zeitpunkt eingesetzt. Analog dazu erfolgt die Wärmespeicherung vorrangig im MFB, da dieses sowohl als Wärmespeicher und Wärmeübertrager fungiert. Die Deckung des Wärmebedarfs zu jedem Zeitpunkt wird über die FBH sichergestellt, welche eine deutlich geringere Trägheit aufweist als das MFB. Dieses Heizsystem wird somit sowohl durch den Wärmebedarf des Gebäudes als auch durch das Angebot an solarer Wärme gesteuert bzw. geregelt.

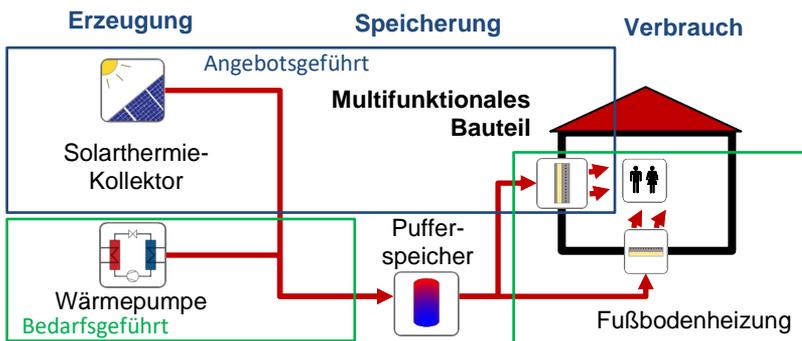


Abbildung 19: Gruppierung der Komponenten des Heizsystems in bedarfs- (grün) und angebotsgeführt (blau)

4.3 Nomenklatur der technischen Gebäudeausrüstung

Die Verschaltung der technischen Gebäudeausrüstung ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Folgende Abbildung 20 zeigt zusätzlich die Vor- und Rückläufe zwischen den wichtigsten Komponenten des Heizsystems.

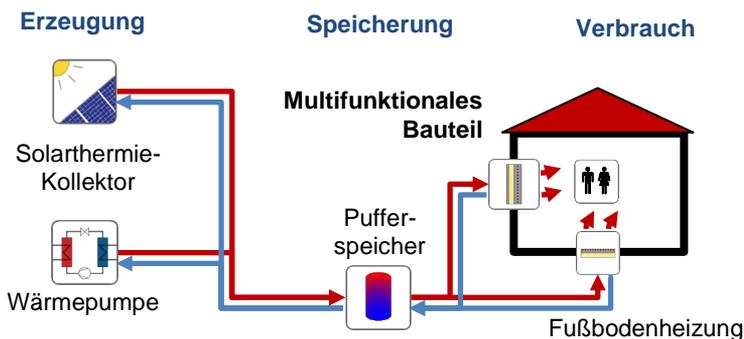
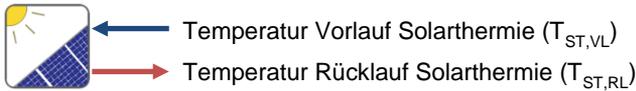


Abbildung 20: Heizsystem mit MFB

Referenzgebäude

Jede Komponente verfügt über jeweils über eine Vor- und eine Rücklauftemperatur sowie einen Massenstrom, da es sich um geschlossene Kreisläufe handelt. Erstere wird von der Komponente abgegeben, zweitere von der Komponente aufgenommen. Werden die Verluste zwischen den Komponenten vernachlässigt, bedeutet dies, dass die Vorlauftemperatur der wärmeabgebenden Komponente $T_{VL,Abgabe}$ die Rücklauftemperatur der aufnehmenden Komponente $T_{RL,Aufnahme}$ ist. Die zwischen den Komponenten ausgetauschten Energiemengen können anhand der Massenströme \dot{m} und den Temperaturen von Vor- und Rücklauf T_{VL} und T_{RL} mit Hilfe von Gleichung (1) ermittelt und z. B. zur Ermittlung der Verluste des Systems nach Gleichung (14) genutzt werden. Folgende Abbildung 21 stellt deren Benennung dar.

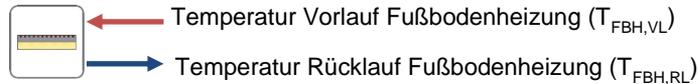
Solarthermie-Kollektor



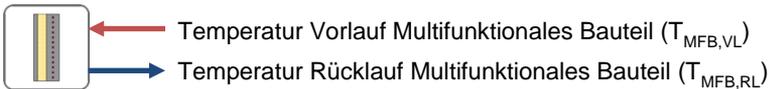
Wärmepumpe



Fußbodenheizung



MFB



Pufferspeicher

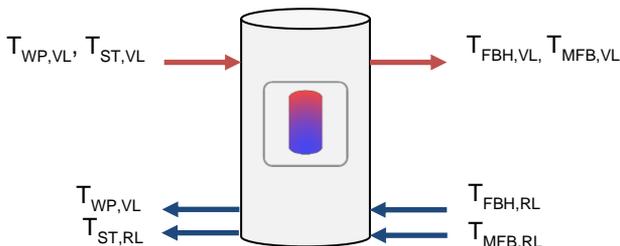


Abbildung 21: Schnittstelle Komponenten TGA

4.4 Geometrie und thermische Hülle des Referenzgebäudes

Mit dem in *Heimrath 2007* beschriebenen Gebäude steht ein für Mitteleuropa repräsentatives Ein-/Zweifamilienhaus mit einer Netto-Grundfläche von $L \times B$ $10 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ zur Verfügung, vgl. Abbildung 22. Dieses verfügt über acht gleich große Räume, verteilt über $\text{NUF} = 140 \text{ m}^2$ auf zwei Etagen. Das Gebäude ist nicht unterkellert und das Satteldach ist nach Süden und Norden ausgerichtet. Somit verfügt das Modell über acht Zonen mit jeweils der gleichen Grundfläche. Als klimatischer Standort wurde Zürich gewählt. Für die gesamte thermische Hülle sind vier Qualitäten angegeben, welche sich durch die Dämmstoffdicke der jeweiligen Bauteile unterscheiden. Neben dem beheizten Satteldach mit Ziegeleindeckung und Zwischensparrendämmung besteht die thermische Hülle des Gebäudes zudem aus Außenwänden aus Beton mit einer Dicke der Tragschale von $d_{\text{AW,TS}} = 20 \text{ cm}$ sowie $d_{\text{AW,Dämm}} = 24 \text{ cm}$ Außendämmung ($U_{\text{AW}} = 0,154 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) sowie Fenster mit einem U-Wert von $U_{\text{W}} = 0,52 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die nach Norden und Süden orientierten Fenster weisen eine gesamte Fläche von $A_{\text{Fenster,Süd/Nord}} = 50 \text{ m}^2$ auf; die nach Osten und Westen jeweils $A_{\text{Fenster,Ost/West}} = 40,5 \text{ m}^2$. Den unteren Abschluss bildet die mit $d_{\text{BP,dämm}} = 22 \text{ cm}$ XPS gedämmte Bodenplatte mit einem U-Wert von $U_{\text{Boden}} = 0,157 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Da die Wärmeübergangskoeffizienten nicht in *Heimrath 2007* definiert sind, wurden diese nach *DIN EN ISO 6946* festgesetzt. Analog wurde für den Sollwert der Raumlufttemperatur $T_{\text{Luft}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ nach *DIN EN 12831* und *DIN EN ISO 7730* gewählt. Dieses erfüllt die Anforderungen nach *GEG 2020*. Weitere Angaben können *Heimrath 2007* entnommen werden. Der resultierende HWB ohne Berücksichtigung der Anlagentechnik beträgt $Q_h = 4.971 \text{ kWh/a}$.

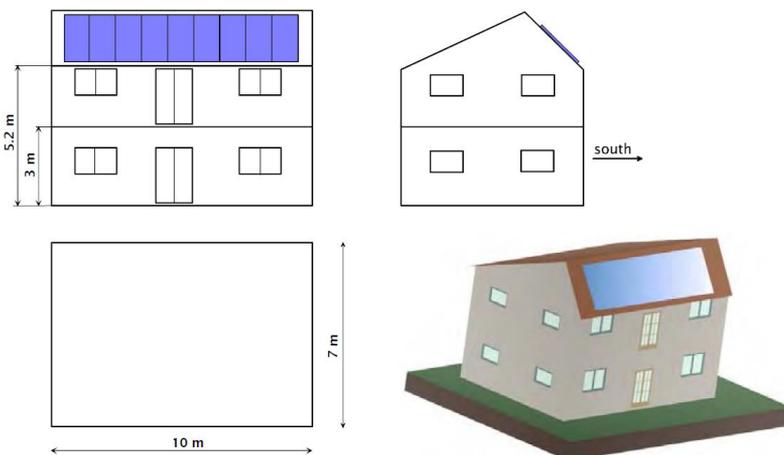


Abbildung 22: Geometrie des Referenzgebäudes nach *Heimrath 2007*

4.5 Regelung & Steuerung der technischen Gebäudeausrüstung des Referenzgebäudes

Die Regelung & Steuerung des Heizsystems dient zur Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit durch die Erzeugung, Speicherung und Übertragung von Wärme. Die verwendete Regelung & Steuerung kann in die Teile Solarthermie, Wärmepumpe, FBH und MFB unterteilt werden. Die Regelungen bzw. Steuerungen der beiden Wärmeerzeuger sowie der FBH erfolgen dem Stand der Technik für Ein-/Zweifamilienhäuser entsprechend auf Grundlage der Außentemperatur.

4.5.1 Steuerung der Solarthermie, der Wärmepumpe und der Fußbodenheizung

Die Steuerung & Regelung des Heizsystems setzt sich aus den Steuerungen bzw. Regelungen der einzelnen Komponenten des Heizsystems zusammen. Für die nicht dargestellten Steuerungen, z. B. für Mischventile, wurde die Regelung bzw. Steuerung nach *Heimrath 2007* genutzt.

Steuerung der Solarthermie

Die Regelung des Kollektors erfolgt in Abhängigkeit des solaren Angebots. Ist die Temperatur im Kollektor mindestens 3 K höher als die Vorlauftemperatur des Kollektors, der aus dem unteren Ende des Pufferspeichers entnommen wird, wird die Solarthermie gestartet. Zum Schutz des Pufferspeichers gegen Bersten wird dieser nicht über $T_{PS,max} = 95\text{ °C}$ beladen, vgl. Abbildung 23.

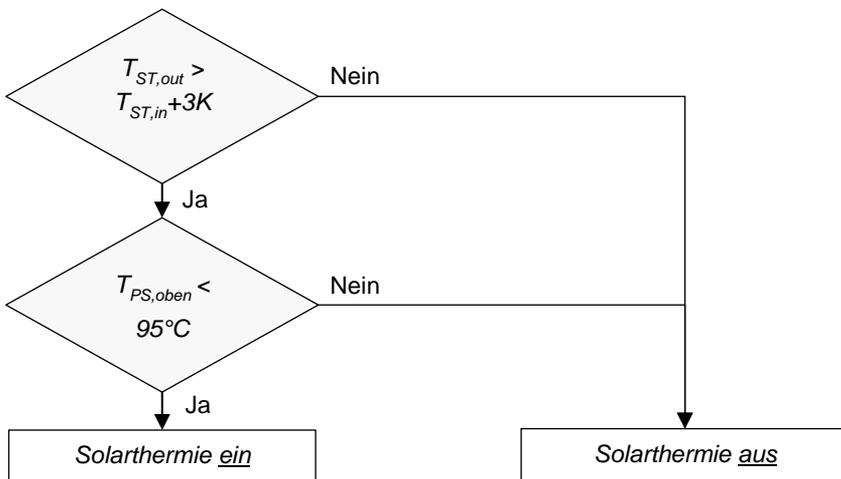


Abbildung 23: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der Solarthermie

Steuerung der Fußbodenheizung

Die Heizkurve stellt den gebäudespezifischen Zusammenhang zwischen Außenlufttemperatur $T_{Luft,au\beta en}$ und Vorlauftemperatur $T_{FBH,VL,soll}$ her und wird mit Gleichung (12) beschrieben. Über den Offset auf die Rücklauftemperatur wird eine Heizleistung sichergestellt, auch wenn die Heizkurve zu geringe Vorlauftemperaturen liefern sollte. Liegt die Raumlufttemperatur über $T_{Luft,innen} = 20\text{ °C}$ wird der Volumenstrom der FBH durch das Thermostat unterbrochen, vgl. Abbildung 24. Somit wird die Raumlufttemperatur im Bereich der Behaglichkeit gehalten, wie in Absatz 2.3.2 beschrieben.

$$T_{FBH,VL,soll} = \text{MAX}(23,5\text{ °C} - (T_{Luft,au\beta en} * 0,225), T_{FBH,RL} + 3\text{ K}) \quad (12)$$

mit:

$T_{FBH,VL,soll}$:	Vorlauftemperatur (Sollwert) [°C]
$T_{FBH,RL}$:	Rücklauftemperatur [°C]
$T_{Luft,au\beta en}$:	Außenlufttemperatur [°C]

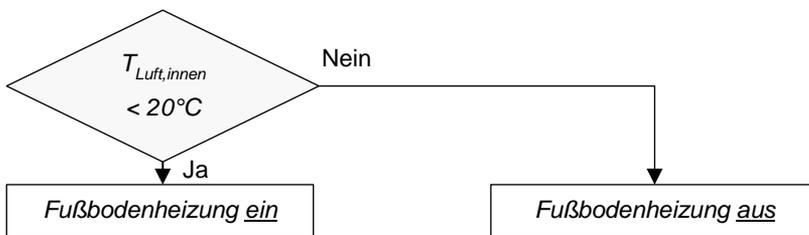


Abbildung 24: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der FBH

Steuerung der Wärmepumpe

Die Regelung der Wärmepumpe erfolgt in Abhängigkeit der Außentemperatur und dem Betriebszustand der Solarthermie. Über die Heizkurve nach Gleichung (12) wird der Sollwert der Vorlauftemperatur der FBH $T_{FBH,VL,soll}$ ermittelt. Die Wärmepumpe wird gestartet, wenn sowohl die Temperatur im Pufferspeicher auf Höhe der Entnahme für den Vorlauf der FBH $T_{PS,Mitte}$ weniger als 3 K über der $T_{FBH,VL,soll}$ als auch kein Massenstrom in der Solarthermie m_{ST} vorliegt, vgl. Gleichung (12). Analog wird die Wärmepumpe gestoppt, wenn die Temperatur im Pufferspeicher um 3 K über der benötigten Vorlauftemperatur $T_{FBH,VL,soll}$ oder über 45 °C liegt. Die Wärmepumpe ist zusätzlich auf eine maximale Vorlauftemperatur von $T_{WP,max} = 65\text{ °C}$ beschränkt, vgl. Abbildung 25.

$$T_{PS,Mitte,soll} = T_{FBH,VL,soll} + 3 \text{ K} \quad (13)$$

mit:

$T_{FBH,VL,soll}$: Vorlauftemperatur (Sollwert) [°C]

$T_{PS,Mitte,soll}$: Sollwert der Pufferspeichertemperatur auf Höhe der Entnahme für die FBH [°C]

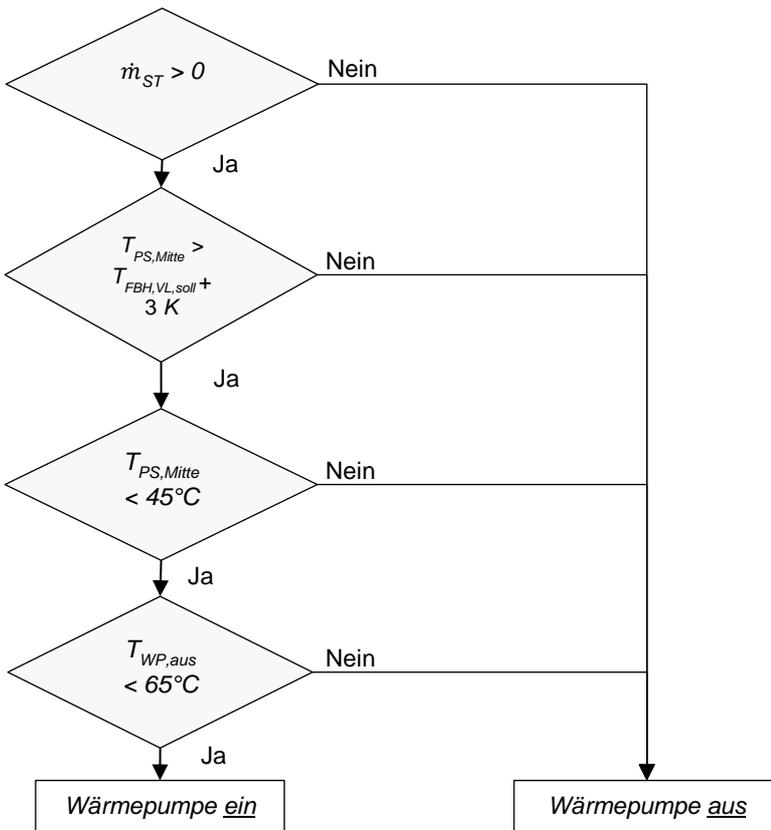


Abbildung 25: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der Wärmepumpe

4.5.2 Steuerung der thermischen Aktivierung der MFB

Die Steuerung der Vorlauftemperatur der thermischen Aktivierung der MFB erfolgt analog zur FBH auf Grundlage der Außenlufttemperatur, vgl. Gleichung (12). Die Steuerung der FBH zielt allerdings auf eine Minimierung des Wärmeeintrags ab. Der Sollwert der Vorlauftemperatur für die MFB orientiert sich an dem der FBH. Zudem wird diese zur Sicherstellung der Behaglichkeit und Schutz der Rohre aus extrudiertem Polyethylen (PE-X) der Aktivierung auf maximal $T_{BTA,max} = 60 \text{ °C}$ begrenzt. Um einen Start der Wärmepumpe zu vermeiden und ausschließlich solare Wärme in die MFB einzuspeichern, wird die verfügbare Temperatur im Pufferspeicher $T_{PS,BTA}$ berücksichtigt sowie ein maximaler Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf von $dT_{BTA,VL} = 15 \text{ K}$ gefordert, um ein zu schnelles Entladen des Pufferspeichers zu vermeiden. Damit kann zum einen der solare Ertrag maximiert und zum anderen ein sicherer Betrieb gewährleistet werden, vgl. Gleichung (14).

$$T_{MFB,VL,soll} = \text{MIN}(\text{MIN}(\text{MAX}(\text{MIN}(T_{BTA,RL}, T_{FBH,vorl,soll}), T_{PS,BTA}), 60 \text{ °C}), T_{BTA,RL} + dT_{BTA,VL}) \quad (14)$$

mit:

$T_{MFB,RL}$: Rücklauftemperatur der Aktivierung [°C]

$T_{PS,MFB}$: Temp. im Pufferspeicher auf Höhe der Entnahme des Vorlaufs [°C]

$dT_{MFB,VL}$: Max. Temperaturhub zw. Vor- und Rücklauf der Aktivierung [K];

hier 15 K

Der Massenstrom der Aktivierung beträgt wie bei der FBH $\dot{m}_{MFB} = 50 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, ist also flächenbezogen. Ähnlich wie bei der Vorlauftemperatur des MFB $T_{MFB,VL}$ wird dieser erst aktiviert, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind. Durch den Abgleich des Sollwertes des Vorlaufes der MFB mit der im Speicher verfügbaren Temperatur wird ein unbeabsichtigtes Be- oder Entladen des MFB verhindert. Um sicherzustellen, dass vorrangig solare Wärme eingespeichert wird, wird das Beladen des MFB an die Wärmegewinnung der Solarthermie geknüpft. Da der Wärmeeintrag aus der Solarthermie in den Pufferspeicher höher sein kann als der vom Pufferspeicher in die MFB, kann sich der Pufferspeicher mit solarer Wärme füllen, obwohl gleichzeitig Wärme an das MFB abgegeben wird. Somit kann es Zustände geben, in denen der Pufferspeicher wärmer als die Solarthermie ist, die MFB aber nicht weiter beladen werden, weil die Solarthermie keine Wärme mehr an den Pufferspeicher abgibt. Durch den Abgleich der oberen Pufferspeichertemperatur $T_{PS,oben}$ mit dem Sollwert der Vorlauftemperatur der MFB zzgl. eines Offsets $T_{FBH,VL,soll} + dT_{PS,oben}$ werden die MFB auch in diesem Zustand beladen. Hierdurch wird zudem die Temperatur im Pufferspeicher reduziert, wodurch auch Wärme auf einer geringeren Temperatur in der

Solarthermie nutzbar gemacht werden kann. Im nächsten Schritt wird die Umgebungstemperatur genutzt, um mit $T_{Luft,au\beta en} < 16\text{ °C}$ den Betrieb der MFB während der Kühlphase zu unterbinden. Die Einhaltung der Behaglichkeit sichergestellt, indem die Raumlufttemperatur mit $T_{Luft,innen} < 22\text{ °C}$ begrenzt wird. Die Dauerhaftigkeit der Aktivierung wird durch die Begrenzung der Vorlauftemperatur auf $T_{MFB,VL} < 65\text{ °C}$ erreicht. Abschließend wird ein unbeabsichtigtes Entladen des MFB verhindert, indem die Vorlauftemperatur des MFB $T_{MFB,VL}$ immer höher als dessen Rücklauftemperatur $T_{MFB,RL}$ sein muss. Abbildung 26 visualisiert diese Bedingungen.

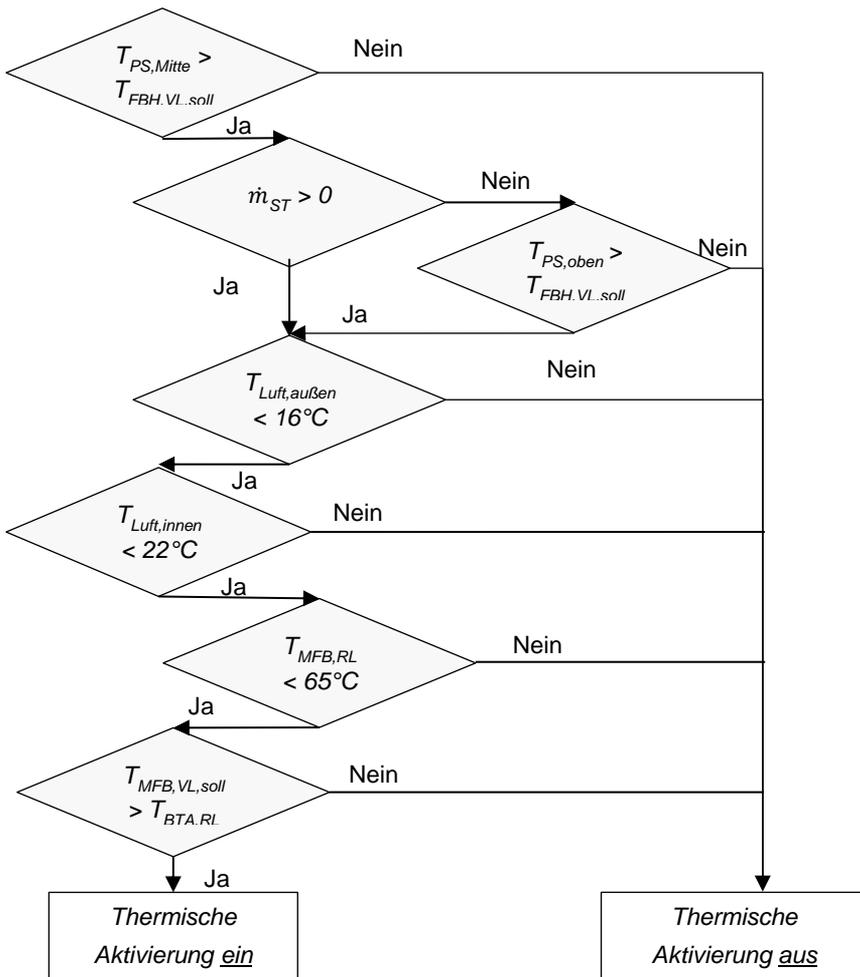


Abbildung 26: Flussdiagramm zur Bestimmung des Betriebs der Aktivierung

4.6 Varianten und Referenzen

Zur Untersuchung der MFB als Wärmespeicher und Wärmeübertrager wird das Referenzgebäude nach Abschnitt 4.1 mit den Parametern aus Kapitel 3 kombiniert. Aus diesen resultieren die zu untersuchenden Varianten. Der Einfluss des einzelnen Parameters auf den gesamten Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ ergibt sich durch den Vergleich mit einer Referenz. Folgende Tabelle 7 stellt die wichtigsten Eigenschaften der untersuchten „Referenz ohne MFB“, „Referenz MFB“ und Varianten dar. Hierbei bildet die „Referenz ohne MFB“ den Stand der Technik für Gebäude mit hohen solaren Deckungsanteilen ab, zur besseren Vergleichbarkeit hat der Pufferspeicher ein Volumen von $V_{PS} = 300$ l. Zur Quantifizierung des Einflusses der MFB werden diese in die „Referenz ohne MFB“ integriert, wodurch die „Referenz mit MFB“ entsteht. Der Einfluss der einzelnen Parameter wird ermittelt, indem die „Referenz mit MFB“ variiert wird, sodass sich Varianten ergeben.

Tabelle 7: Vergleich der untersuchten Varianten und Referenzen

	Referenz ohne MFB	Referenz mit MFB	Varianten
Gebäude- geometrie	Nach Task 32		
Wärmepumpe	Luft-Wasser		
Solarthermie	$A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ nach Süden orientiert		Je nach Variante, i. d. R. wie Referenz
Pufferspeicher	$V_{PS} = 300 \text{ l}$		
MFB	Nein	Ost- und Westwand mit je $A_{MFB} = 23,5 \text{ m}^2$	Ja, Größe und Orientierung je nach Variante, i. d. R. wie Referenz
2. Wärme- übertrager	FBH mit je 1 Heizkreis je Raum		

4.7 Fazit

Das vorliegende Kapitel beschreibt das in der Einleitung eingeführte Referenzgebäude, insbesondere in Bezug auf dessen Kubatur, energetischen Qualitäten sowie der eingesetzten Regelung & Steuerung. Somit liegt im Ergebnis des Kapitels alle Eingangsdaten für das Simulationsmodell vor.

5 Kennwerte, Simulationsmodell, Simulationssoftware und Verifikation des Simulationsmodells

5.1 Kennwerte und Grenzwerte der Bewertung

Die in Abschnitt 2.4 Beschriebenen Kennwerte werden im Folgenden um die einzuhaltenden Grenzwerte ergänzt und wo nötig weiter konkretisiert.

5.1.1 Thermische Behaglichkeit

Zur Bewertung der Behaglichkeit der einzelnen Varianten wird der PMV berechnet. Diese Berechnung erfolgt innerhalb von TRNSYS© für jeden Raum und Zeitschritt. Zur Bewertung der Behaglichkeit wird der betragsmäßig größte Wert der acht Räume berücksichtigt. Somit kann auch eine Überhitzung in einem Nachbarraum, z. B. durch thermische Aktivierung und solare Einstrahlung erfasst werden. Ziel der MFB ist Einhaltung oder Verbesserung der thermischen Behaglichkeit. Daher wird nur die Änderung des PMV im Vergleich zum Stand der Technik betrachtet. Hierzu sind die Fälle nach Tabelle 8 zu unterscheiden. Die Fälle II und IV sollten nur in der Kühlperiode auftreten, da das Gebäude über keine aktive Kühlung verfügt. Fall II ist als eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit positiv zu bewerten. Fall III führt zum Verwerfen der Variante, da durch die MFB die Behaglichkeit verschlechtert wird. Als neutral ist Fall I zu bewerten. Eine Variante hält die thermische Behaglichkeit ein, wenn nicht Fall III auftritt.

Tabelle 8: Mögliche Änderung des PMV durch MFB

Variante \ Referenz	 PMV < 1	 PMV > 1
<i> PMV < 1</i>	I: MFB führen zu keiner signifikanten Verschlechterung	II: MFB führen zu einer signifikanten Verbesserung
<i> PMV > 1</i>	III: MFB führen zu einer signifikanten Verschlechterung	IV: MFB führen zu keiner signifikanten Verschlechterung

5.1.2 Energetische Bewertung

Die energetische Bewertung des Gesamtsystems erfolgt anhand von aggregierten Energiemengen des Heizsystems. Diese ergeben sich aus den einzelnen Energiemengen, welche sich wiederum aus den bilanzierten Energieströmen durch Integration ergeben. Die Energiemengen sind nach Gleichung (4) zu ermitteln. Diese müssen um die Terme für die Berücksichtigung der MFB erweitert und an die Wärmeerzeuger und -verbraucher angepasst

werden. Die einzelnen Summanden sind nach Gleichung (1) zu ermitteln und ergeben sich aus Abbildung 20 und Abbildung 21. Somit ergibt sich die Wärmebilanz des Heizsystems des Gebäudes nach Gleichung (15).

$$Q_{ST} + Q_{WP} = Q_{FBH} + Q_{MFB} + Q_{Verluste} \quad (15)$$

Q_{ST} : Ertrag der Solarthermie-Anlage [kWh]

Q_{WP} : Ertrag der Wärmepumpe [kWh]

Q_{FBH} : Wärmeaufnahme der FBH [kWh]

Q_{MFB} : Wärmeaufnahme des MFB [kWh]

$Q_{Verluste}$: Wärmeverluste des Heizsystems [kWh]

Analog zu Gleichung (15) ergibt sich der gesamte Bedarf des Heizsystems an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ nach Gleichung (16), welche als zweite zentrale Bewertungsgröße dient.

$$W_{el,tot} = W_{WP} + W_{ST,UWP} + W_{FBH,UWP} + W_{MFB,UWP} \quad (16)$$

$W_{el,tot}$: Gesamter elektrischer Bedarf [kWh]

W_{WP} : Elektrischer Bedarf der WP [kWh]

$W_{ST,UWP}$: El. Bedarf der Umwälzpumpe der Solarthermie-Anl. [kWh]

$W_{FBH,UWP}$: Ertrag der WP [kWh]

$W_{MFB,UWP}$: Wärmeaufnahme der FBH [kWh]

Unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten bei der Wärmeverteilung entsprechen die Wärmeverluste aus Gleichung (15) den Wärmeverlusten des Pufferspeichers $Q_{PS,verl}$. Analog zum Pufferspeicher kann auch die Wärmeabgabe des MFB in Verluste über die thermische Gebäudehülle nach außen $Q_{MFB,verl}$ und Wärmeabgaben an den Innenraum, welche zur Deckung der Heizlast Φ beitragen, $Q_{MFB,heiz}$ unterschieden werden.

Zur Bewertung der Reduktion der Transmissionswärmeverluste über das MFB wird die Wärmemenge betrachtet, welche von der angrenzenden Zone an das MFB übertragen wird. Diese wird zur Vergleichbarkeit auf die Fläche des MFB bezogen und diese spez. Heizleistung des MFB nach Gleichung (17) ermittelt.

$$q_{MFB,heiz} = \frac{Q_{MFB,heiz}}{A_{MFB}} \quad (17)$$

$q_{MFB,heiz}$: Spez. Heizleistung des MFB [kWh/(m².a)]

$Q_{MFB,heiz}$: Vom MFB an den Innenraum übertragene Wärme [kWh/a]

A_{MFB} : Fläche des MFB [m²]

5.1.3 Ökonomische Bewertung

Wie in Absatz 2.4.3 beschrieben, erfolgt die ökologische und ökonomische Bilanzierung LCA und LCC nach und *GEFMA / IFMA 220-1*.

In Anlehnung an das „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ (BNB) des Bundes werden die thermische Gebäudehülle und die technische Gebäudeausrüstung, welche nach *DIN 276* in die Kostengruppen (KG) 300 „Bauwerk – Baukonstruktion“ und 400 „Bauwerk – Technische Anlagen“ fallen bilanziert (*Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.) 2019*). Die weiteren Tätigkeiten und Aufwendungen, KG 100, 200, 500 und 600 werden nicht bilanziert, da diese für alle betrachteten Varianten identisch sind. Die KG 700 „Baunebenkosten“ und 800 „Finanzierung“ werden als pauschaler Faktor auf die Kosten der KG 300 und 400 aufgeschlagen. Die Eingrenzung auf die thermisch relevanten Bauteile und Komponenten bedeutet, dass in der KG 300 nur die Untergruppen 310 bis 350 berücksichtigt werden. Analog werden aus der KG 400 nur die Untergruppen 420 „Wärmeversorgungsanlagen“ und 430 „Raumluftechnische Anlagen“ bilanziert. Letztere findet zudem nur im SFH15 nach *Heimrath 2007* Anwendung. Eine genauere Beschreibung der betrachteten Phasen findet sich in *Tersluisen 2018*. In der ökonomischen und der ökologischen Bilanzierung wird nur die Dämmschicht des Daches als oberste Geschossdecke und als oberer Abschluss der thermischen Hülle berücksichtigt. Die Dacheindeckung hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die thermische Gebäudehülle und wird nicht berücksichtigt.

In Anlehnung an die u. a. in „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ definierte Nutzungsdauer von „ ≥ 50 a“ wird für Betrieb und Nutzung eine Nutzungsdauer von 75 Jahren angenommen. In *BKI (Hrsg.) 2020* und *Schmitz 2015* finden sich ähnliche Nutzungsdauern für Außenwände. Diese liegt somit deutlich über den Betrachtungsdauern nach *GEFMA / IFMA 220-1* von 25 bzw. 30 Jahren.

Die Nutzungsdauer der MFB als Außenwände wird mit 75 Jahren angenommen. Wäre die Betrachtungsdauer geringer als die Nutzungsdauer, müsste der Restwert am Ende der Betrachtungsdauer berücksichtigt werden. Bei einer Betrachtungsdauer von 75 Jahren werden die MFB während der Betrachtungsdauer nicht erneuert. Die Nutzungsdauern der anderen Bauteile stammen aus *Schmitz 2015*. Folgende Tabelle 9 fasst die weiteren ökonomischen Eingangsgrößen in die Bilanzierung zusammen. Weitere Angaben finden sich im Anhang B.

Kennwerte, Simulationsmodell, Simulationssoftware und Verifikation des Simulationsmodells

In *GEFMA / IFMA 220-1* wird ein durchschnittlicher Diskontierungszinssatz von 4–5 % angenommen, dieser wird für Energiekosten angenommen. Die für Bauprodukte und -dienstleistungen angenommene Preissteigerungsrate von 2 % basiert auf dem Zielkorridor der EZB und trägt der überdurchschnittlichen Preissteigerungen für Energie Rechnung, vgl. u. a. *Gauer 2017b*. Die Baunebenkosten wurden auf Grundlage der Ertragswertrichtlinie – EW-RL auf 20 % festgelegt, dort finden sich 18 bis 22 % (*Ertragswertrichtlinie - EW-RL*). Die Kosten für Prüfung, Inspektion und Wartung (P,I,W) wurden in Anlehnung an *Rotermund 2011* mit 0,2 % p. a. der Herstellungskosten angenommen und damit doppelt so hoch wie in der Quelle. Somit wird dem neuheitlichen Charakter sowie der vergleichsweise hohen Komplexität der Anlagentechnik Rechnung getragen.

Tabelle 9: Ökonomische Eingangsgrößen (Auszug)

Größe	Wert	Beschreibung
<i>Betrachtungsdauer und Nutzungsdauer der MFB</i>	75 Jahre	-
<i>Allgemeiner Diskontierungszinssatz</i>	3 % p. a.	Verzinsungssatz für (fiktives) Guthaben
<i>Preissteigerungsrate für Bauprodukte und -dienstleistungen</i>	2 % p. a.	Inkl. Technische Gebäudeausrüstung
<i>Preissteigerung Energie sowie P,I,W</i>	4 % p. a.	
<i>Baunebenkosten</i>	20 % der Herstellungskosten	
<i>Instandsetzung</i>	0,2 % p. a. der Herstellungskosten	
<i>Arbeitspreis elektrischer Energie</i>	0,3 €/kWh _{el}	Im Jahr der Herstellung des Gebäudes.
<i>Förderungen & zusätzliche Steuern⁸</i>	Nicht berücksichtigt	

⁸ "Zusätzliche Steuern" sub-summiert alle Steuern und Abgaben, die über die Steuer und Abgaben im Jahr 2020 hinausgehen. In der Betrachtung werden primär die Umsatzsteuer direkte und indirekte sowie Abgaben auf elektrische Energie berücksichtigt. Letztere sind vor allem Kosten, die durch THG-Emissionen entstehen, die unter das *Emission Trading System (ETS)* fallen.

5.1.4 Ökologische Bewertung

Durch den Einsatz der MFB sollen die THG-Emissionen reduziert werden. Daher werden diese über den gesamten Lebenszyklus betrachtet.

Die ökologische Bilanzierung erfolgt auf Grundlage desselben Mengengerüsts wie die ökonomische und ebenso über 75 Jahre. Analog zu den ökonomischen Eingangsgrößen zeigt Tabelle 10 den Emissionsfaktor für elektrische Energie als Eingangsgrößen in die ökologische Bilanzierung LCA. Diese sind der *ökobaodat* entnommen. Weitere Angaben finden sich ebenfalls in Anhang B.

Analog zur ökonomischen Betrachtung werden die Lebenszyklusmodule Herstellung A1-3, Reinvest B4, Betrieb: nur Beheizung B6, Rückbau und Entsorgung C1-4 und D Verwertung D berücksichtigt.

Tabelle 10: Eingangsgrößen LCC

Größe	Wert	Beschreibung
THG-Emissionsfaktor elektrische Energie f_{el} [kg-CO ₂ -Äq. / kWh _{el}]	0,3973 ⁹	Gemittelter Wert nach <i>ökobaodat</i> für die Zeiträume 2020-29, 2030-39, 2040-49, 2050-2095

5.2 Simulationsmodell und Simulationssoftware

Die Untersuchung des MFB als Außenwand wird mit Hilfe von TRNSYS 17© durchgeführt. Diese numerische Gebäudesimulation erlaubt es, Gebäude inkl. des Heizsystems thermisch zu simulieren. Die hierzu notwendigen Modelle für Gebäudehülle und Anlagentechnik sind perimetrisch aufgebaut und können so an das zu simulierende GEK angepasst werden. Da es sich bei den Komponenten des Heizsystems um Standard-Komponenten handelt, kann auf bestehende und verifizierte Modelle, sog. *types*, zurückgegriffen werden. Im Gegensatz wurde das Modell für die MFB und das Gebäude noch nicht verifiziert. Daher erfolgt dies anhand von experimentellen Untersuchungen.

⁹ Es wird nur elektrische Energie für den Betrieb berücksichtigt, da alle anderen Bedarfe mit den Faktoren für die einzelnen Baustoffe enthalten sind. Das GEG schreibt, Stand Januar 2023, einen Emissionsfaktor von $f_{el} = 0,560$ kg-CO₂-Äq./kWh_{el} vor. Dieser ist variabel und bildet daher keine zukünftigen Entwicklungen ab. Wird dieser gesenkt, was auf Grund des steigenden Anteils an EE im Strommix zu erwarten ist, sinken die aus dem Betrieb resultierenden THG-Emissionen. Diese Reduktion kann sich auch auf die THG-Emissionen von Baustoffen und -prozessen auswirken, sodass eine pauschale Aussage zum Einfluss nicht zuverlässig möglich ist.

5.2.1 Modell multifunktionales Bauteil

Das thermisch aktivierte Bauteil wird mit Hilfe des MatLab®-Modells nach *Javanmardi 2021* abgebildet. Dieses Modell bildet den zeitlichen und räumlichen Temperaturverlauf des Bauteils mit Hilfe eines Finite-Differenzen-Modells (FDM) ab. Das entstehende Gleichungssystem wird mit Hilfe des Crank-Nicholson-Methode gelöst. Die ermittelten Temperaturen und Leistungen werden über eine Schnittstelle (*type 155*) mit der restlichen Gebäudesimulation gekoppelt. Folgende Abbildung 27 sowie Tabelle 16 im Anhang A zeigen die zwischen TRNSYS© und MatLab® in jedem Zeitschritt ausgetauschten Größen und folgt der Nomenklatur aus Abschnitt 4.3. Somit kann sowohl der Einfluss der thermischen Aktivierung auf den Temperaturverlauf im Bauteil als auch der Einfluss der Bauteiltemperatur auf das Gebäude abgebildet werden. Insbesondere werden hierbei die Vorlauftemperatur $T_{MFB,VL}$ und der Massenstrom des MFB \dot{m}_{MFB} sowie die Umgebungstemperaturen $T_{Luft,innen}$ und $T_{Luft,außen}$ von TRNSYS© an MatLab® übergeben. Umgekehrt werden die Schicht- und Oberflächentemperaturen $T_{Tragschale}$, $T_{surf,in}$ und $T_{surf,out}$, die Rücklauftemperatur des MFB $T_{MFB,RL}$ sowie die Heiz- und die Verlustleistung des MFB $P_{MFB,heiz}$ und $P_{MFB,verl}$ übergeben. Aus diesen zeitlichen Verläufen kann neben der an den Innenraum abgegebenen Wärme $Q_{MFB,heiz}$ auch die an die MFB übertragene Wärme Q_{MFB} nach Gleichung (1) berechnet werden und u. a. in Gleichung (15) zur energetischen Bilanzierung des Heizsystems genutzt werden.

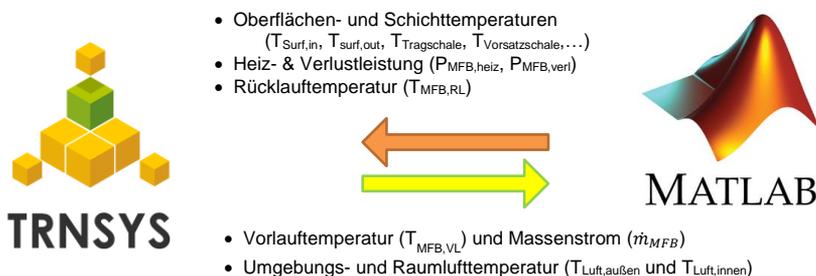


Abbildung 27: Schnittstelle TRNSYS© – MatLab®

Der parametrische Aufbau des Bauteil-Modells ermöglicht es, die einzelnen Eigenschaften der jeweiligen Komponenten separat zu variieren und so deren Einfluss unabhängig von der tatsächlichen Umsetzbarkeit zu untersuchen. Im Vergleich zu anderen Modellen, wie z. B. dem *type399*, erlaubt das Modell nach *Javanmardi 2021* sowohl mehrere Schichten mit unterschiedlichen PCM als auch mehrere thermische Aktivierungen.

5.2.2 Technische Gebäudeausrüstung und Wetterdaten

Neben dem Modell für das MFB wird die technische Gebäudeausrüstung sowie das Wetter mit weiteren Modellen nach *Heimrath 2007* abgebildet. Somit ergibt sich zum einen eine gute und geprüfte Kompatibilität zwischen den Modellen, zum anderen können die gewonnenen Ergebnisse grundsätzlich mit ähnlichen Simulationen, die auf *Heimrath 2007* basieren, verglichen werden. Hiervon abweichende Annahmen oder zusätzlich benötigte Annahmen sind für die wichtigsten Modelle in Tabelle 15 in Anhang A dargestellt. Eine genaue Beschreibung der verwendeten Berechnungsmodelle findet sich in den Handbüchern der jeweiligen *types* (*Klein 2009*).

Als Wetter wird das Referenzwetter für Zürich gewählt. Dieses bildet das durchschnittliche Wetter in Mitteleuropa, also in gemäßigttem Klima, ab. Dieses Referenzwetter bildet ein durchschnittliches Wetter über 20 Jahre ab und ist um Extremwetterereignisse bereinigt. Die Nutzung dieses Wetterdatensatzes führt dazu, dass der Nutzen über die gesamte Betrachtungsdauer ermittelt wird. Implizit bedeutet dies, dass Jahre mit ungünstigem Wetter durch Jahre mit günstigem Wetter ausgeglichen werden.

5.3 Verifikation des Gebäude- und des Bauteilmodells

Da es sich bei dem Modell für das MFB nicht um einen *type* aus der TRNSYS®-library handelt, ist dieser zu verifizieren, analog für die thermische Gebäudehülle. Für beide Verifikationen werden Simulationsergebnisse Messergebnissen gegenübergestellt. Die Messergebnisse werden an einem Bauteil mit Innendämmung im „SmallHouse IV“ bzw. aus dem gesamten „SmallHouse IV“ gewonnen.

5.3.1 Verifikation Modell multifunktionales Bauteil

Versuchsziel

Ziel des Versuches ist es, das Simulationsmodell des MFB anhand von Messdaten zu verifizieren. Dies erfolgt durch Aufheizen und Auskühlen des MFB. Die Verifikation des Modells erfolgt anhand der Temperaturen des Bauteilquerschnittes. Aus diesen lassen sich die im Bauteil gespeicherte Wärme und die Heiz- bzw. Verlustleistung berechnen, vgl. Gleichung (2). Diese stellen die zentralen Ergebnisse der Bauteilsimulation dar, vgl. Abbildung 27.

Versuchsprogramm

Das Bauteil wird nach Installation für $t_{\text{einschwingen}} = 72$ h im „SmallHouse IV“ belassen, sodass sich eine Temperaturverteilung aufgrund der Umgebungs- und der Innenlufttemperatur $T_{\text{Luft,innen}}$ und $T_{\text{Luft,außen}}$ einstellt.

Das Bauteil wird mit Hilfe der thermischen Aktivierung für $t_{\text{beladen}} = 6$ h und mit einer Vorlauftemperatur von $T_{\text{BTA,VL}} = 50$ °C beladen. Direkt danach wird das Bauteil für weitere $t_{\text{entladen}} = 18$ h auskühlen gelassen. Die Raumluft wird mit Hilfe der FBH des „SmallHouse IV“ auf $T_{\text{Luft,innen}} = 20$ °C temperiert.

Die Simulationsdaten zur Verifikation werden mit Hilfe des Bauteilmodells berechnet. Hierzu werden die gleichen Randbedingungen und initiale Bauteiltemperatur aufgebracht und der zeitliche Temperaturverlauf über den Bauteilquerschnitt ausgewertet.

Bauteilbeschreibung

Die Verifikation erfolgt anhand eines Außenwandbauteils in Betonbauweise, bestehend aus Vorsatzschale, Außendämmung, Tragschale mit mittig angeordneter thermischer Aktivierung und Innendämmung, vgl. Abbildung 28 und Abbildung 29. Bei den Dämmungen handelt es sich um Vakuumdämmungen mit einer Dicke von $d_{\text{Vakuumdämmung}} = 1,8$ cm und einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Vakuumdämmung}} = 0,005$ W/(m.K). Zur Reduktion der Wärmeflüsse in Plattenebene an Nachbarbauteile ist das Bauteil umlaufend gedämmt. Durch diese vollflächige Anordnung von Dämmungen werden die Wärmeverluste des Bauteils reduziert und es stellt sich eine höhere Temperatur im Bauteil ein. Folglich wird der Einfluss der Messungengenauigkeit der Temperatursensoren reduziert und im Ergebnis die Genauigkeit des Bauteilmodells erhöht.

Eine detaillierte Beschreibung der Herstellung des Bauteiles findet sich in *Kipf 2020*.

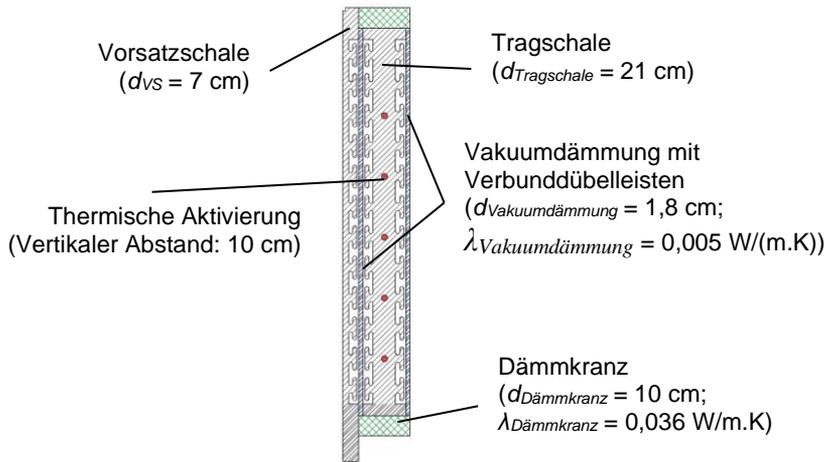


Abbildung 28: Querschnitt des MFB mit thermischer Aktivierung zur Verifikation des Bauteilmodells (Pahn et al. 2020)

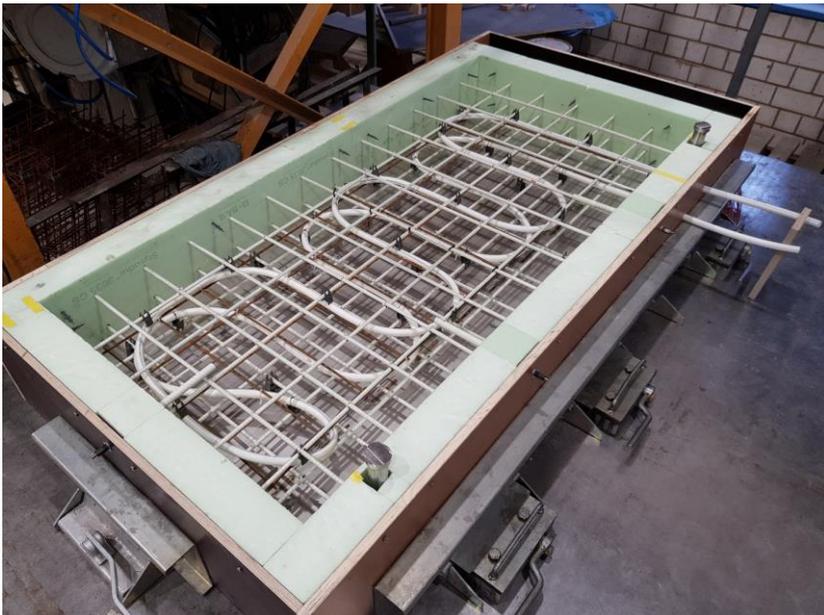


Abbildung 29: MFB als Außenwand zur Verifikation des Bauteilmodells

Messkonzept

Die Temperaturmessung im Bauteil erfolgt an fünf gleichmäßig über die Dicke der Tragschale verteilten Pt100-Sensoren, vgl. Abbildung 32. Zu den dargestellten Sensoren werden die angrenzenden Raumluft- und Umgebungstemperatur $T_{\text{Luft,innen}}$ und $T_{\text{Luft,außen}}$ gemessen. Die Aufnahme der Messdaten erfolgt mit Hilfe der Messtechnik im „SmallHouse IV“.

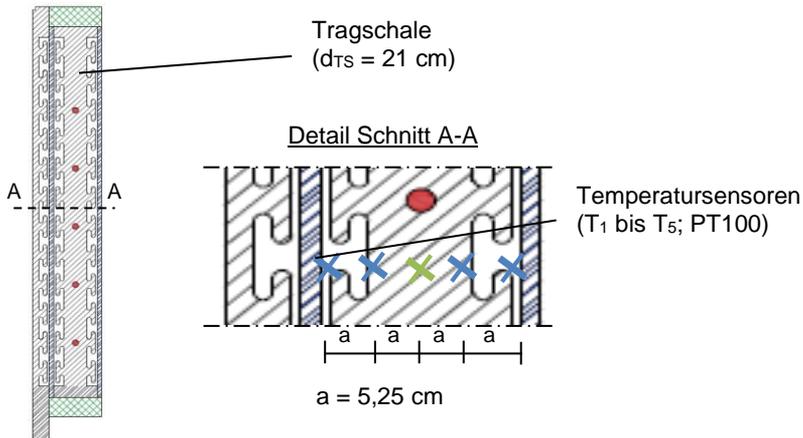


Abbildung 30: Anordnung der Temperaturen im Querschnitt des MFB mit thermischer Aktivierung zur Verifikation des Bauteilmodells (Pahn et al. 2020)

Versuchsdaten

Folgende Abbildung 31 zeigt den Temperaturverlauf des Bauteils über dessen Dicke (vertikal) und die Zeit (horizontal). Deutlich ist der Beginn der Beladung $t_{\text{Beladung,Start}} = 1 \text{ h}$ und das Ende der Beladung $t_{\text{Beladung,Ende}} = 7 \text{ h}$ zu erkennen. Am oberen und unteren Rand sind die beiden Vakuumdämmungen am starken Temperaturgefälle in vertikaler Richtung zu erkennen. Die Aktivierung führt zu einer Erwärmung des Bauteils vom Kern zu den äußeren Oberflächen hin. Folglich tritt die maximale Temperatur im Kern des Bauteils am Ende der Beladung auf. Es zeigt sich zudem, dass sich nur ein geringes Temperaturgefälle von der Mitte zu den Oberflächen der Tragschale einstellt. Dies ist auf die gute Dämmwirkung der Vakuumdämmungen und die somit geringen resultierenden Verluste zurückzuführen.

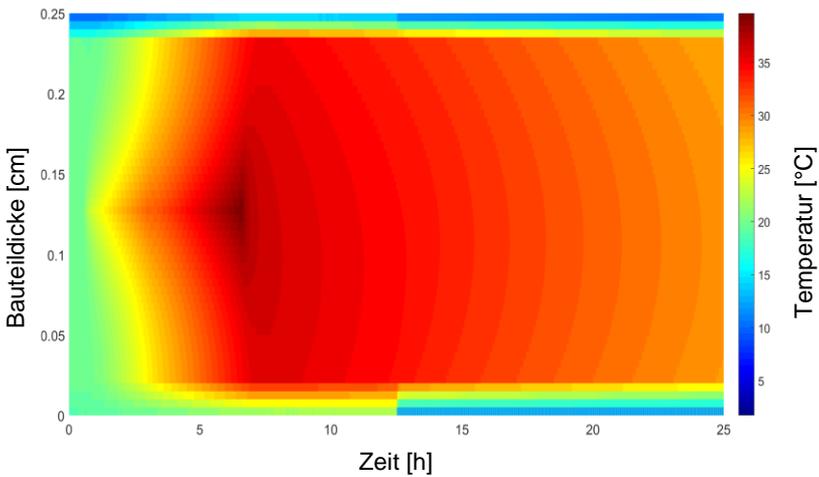


Abbildung 31: Zeitlicher und räumlicher Temperaturverlauf im Bauteil während der Be- und Entladung

Der Vergleich der Temperaturen im Kern (T_3) zeigt, dass diese denselben zeitlichen Verlauf aufweisen, vgl. Abbildung 32. Die Simulation weist einen um $\Delta T_{max} = 0,9$ K höheren maximalen Wert auf und kühlt schneller ab. Die relative Abweichung, also der Quotient aus Simulations- und Messwert, liegt im gesamten Messbereich zwischen 0,97 und 1,04. Die Abweichung beträgt also weniger als 5 % und wird daher als ausreichend gering eingestuft.

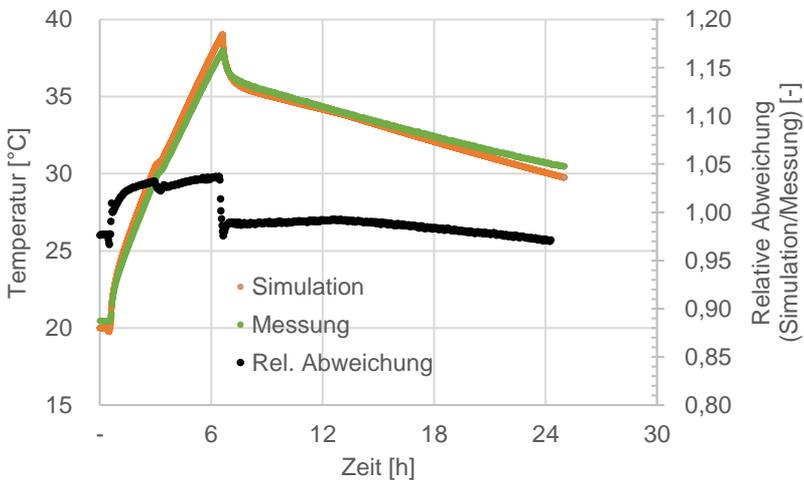


Abbildung 32: Vergleich der gemessenen und der simulierten Temperatur im Kern des Bauteils

Auswertung

Für die anderen Punkte im Querschnitte ergeben sich ähnliche relative Abweichungen, vgl. Tabelle 11 und Anhang C. Deutlich zeigt sich, dass die Temperaturdifferenzen in der Tragschale T_2 und T_4 identisch sind. Dies ist auf das homogene Materialverhalten des Betons zurückzuführen. Weiter auffällig ist, dass die Temperaturen im Bereich der Dämmung T_1 und T_5 durch die Simulation unterschätzt werden. Dies deutet auf eine leichte Überschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmungen hin. Da auch die in diesen Messpunkten die Abweichungen unter 5 % liegen, bildet das Modell auch an diesen Stellen im Bauteil das Temperaturverhalten ausreichend genau ab. Die Kurven zu den Temperaturen T_1 , T_2 , T_4 und T_5 finden sich in Anhang C.

Tabelle 11: Relative Abweichung der gemessenen und der simulierten Temperaturen im Bauteilquerschnitt

	Tragschale		Dämmung	
	Innen T_4	Außen T_2	Innen T_5	Außen T_1
<i>Min</i>	0,99	0,99	0,93	0,95
<i>Max</i>	1,06	1,06	0,97	0,99
<i>Med. <1</i>	1,00	1,00	0,95	0,97
<i>Med. >1</i>	1,02	1,02	-	-

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass das genutzte Bauteilmodell das Temperaturverhalten ausreichend genau beschreibt und für die weitere Untersuchung genutzt werden kann.

5.3.2 Verifikation des Modelles der thermischen Gebäudehülle

Versuchsziel

Analog zum Bauteil muss auch das Simulationsmodell der thermischen Gebäudehülle mit Hilfe von Messdaten verifiziert werden. Das für die Untersuchung verwendete Gebäude nach IEA SHC Task32 ist nicht verfügbar und kann auch nicht mit vertretbarem Aufwand erstellt werden. Ersatzweise wird die Methode zur Erstellung des Modells der thermischen Gebäudehülle anhand des Großdemonstrators „SmallHouse IV“ verifiziert. Die MFB müssen nur die Heizlast Φ decken, unabhängig von der Geometrie, aus der diese resultiert.

Ziel des Versuchs ist daher, die Ermittlung der Heizlast Φ mit Hilfe des Gebäudemodells zu verifizieren. Hierzu wird das Auskühlverhalten des „SmallHouse IV“, welches aus den Transmissions- und Ventilationsverlusten

resultiert, anhand der Raumlufttemperatur $T_{Luft,innen}$ in Verbindung mit der Umgebungstemperatur $T_{Luft,außen}$ untersucht.

Beschreibung „SmallHouse IV“

Bei dem „SmallHouse IV“ handelt es sich um einen einräumigen Großdemonstrator auf dem Campus der RPTU Kaiserslautern mit einer Grundfläche von 5 m x 8 m, vgl. Abbildung 33. Bei diesem wurden die Außenwände als MFB mit Kernaktivierung in Verbindung mit einer Solarthermieanlage und einer Wärmepumpe umgesetzt. Die umfangreiche Messtechnik erlaubt eine Untersuchung unter realen Bedingungen. Weitere Informationen finden sich u. a. in *Caspari 2018, 2017, 2016; Caspari 2015; Pahn 2020a; Pahn 2018*.



Abbildung 33: Großdemonstrator „SmallHouse IV“ in der Süd-West-Ansicht
inkl. des Kollektors der Solarthermie

Versuchsbeschreibung

Die Methodik zur Erstellung des Modells der thermischen Hülle basiert auf den Abmaßen, Lagen und Orientierung der Flächen der thermischen Gebäudehülle. Das „SmallHouse IV“ besteht neben der Bodenplatte, den Elementen des Sheddaches und Außenwänden auch aus den nach Norden orientierten Fenstern, vgl. Abbildung 34.



Abbildung 34: Nord-Ost-Ansicht des „SmallHouse IV“

Die Außenwände und die Fenster führen zu den größten transmissiven Wärmeverlusten. Die Tragschale der Außenwände weist eine Dicke von $d_{\text{Tragschale,AW}} = 21 \text{ cm}$ auf, die Dämmung $d_{\text{Dämmung,AW}} = 14 \text{ cm}$ und die Vorsatzschale eine Dicke von $d_{\text{Vorsatzschale,AW}} = 7 \text{ cm}$, vgl. Abbildung 35. Weitere Details zu den Abmaßen und dem Bauteilaufbau finden sich in *Pahn 2019*.



Abbildung 35: Außenwandelemente des Großdemonstrators „SmallHouse IV“

Die Heizlast Φ ergibt sich nach *DIN V 18599-5* aus den Ventilations- und Transmissionsverlusten sowie der Wärmespeicherkapazität des Gebäudes. Vereinfachend ergeben sich die Ventilations- und Transmissionsverluste für ein Gebäude mit einer homogenen Hüllfläche und ohne Abminderungsfaktoren nach Gleichung (18).

$$\begin{aligned}\Phi &= V * n_{50} * (T_{Luft,innen} - T_{Luft,außen}) + U * A \\ &\quad * (T_{Luft,innen} - T_{Luft,außen}) \\ &= (V * n_{50} + U * A) * (T_{Luft,innen} - T_{Luft,außen})\end{aligned}\tag{18}$$

Da nur die Heizlast Φ des Gebäudes relevant ist und nicht wie sich diese auf die Transmissions- und Ventilationsverluste aufteilt, können das Luftvolumen des Gebäudes V , die Luftwechselrate n_{50} , die U-Werte der Bauteile und deren Fläche A zu einem gebäude-spezifische Wert zusammengefasst werden. Somit ergibt sich die Heizlast Φ lediglich aus dem Temperaturunterschied $T_{Luft,innen} - T_{Luft,außen}$.

Wird das Gebäude bei einer Innenraumlufttemperatur $T_{Luft,innen}$ über der Umgebungstemperatur $T_{Luft,außen}$ keine Wärme zugeführt, kühlt dieses aufgrund der Wärmeverluste nach Gleichung (18) aus. Da diese für ein gegebenes Gebäude nur von den beiden Temperaturen abhängig ist, kann die thermische Gebäudehülle durch Auskühlen des Gebäudes verifiziert werden. Hierzu sind die simulierte und die gemessene Raumlufttemperatur $T_{Luft,innen}$ gegenüberzustellen. Zudem müssen Wärmeeinträge berücksichtigt werden. Deshalb wird das Heizsystem ausgeschaltet und nur die Messtechnik $P_{el,mess}$ betrieben. Solare Gewinne über die Fenster können vernachlässigt werden, da diese nach Norden orientiert sind.

Messkonzept

Im Versuch sind die Raumlufttemperatur sowie die Dauerlast der Messtechnik zu bestimmen. Letztere wird am Hausanschluss des „SmallHouse IV“ gemessen und berücksichtigt so sämtliche elektrischen Leistungen in die thermische Gebäudehülle. Analog werden die Raumluft- und Umgebungstemperatur $T_{Luft,innen}$ und $T_{Luft,außen}$ direkt gemessen.

Anschließend wird das „SmallHouse IV“ modelliert und auf Grundlage der Umgebungstemperatur $T_{Luft,außen}$ und der eingebrachten elektrischen Leistung $P_{el,mess}$ simuliert.

Versuchsprogramm

Das „SmallHouse IV“ wird durch eine kontinuierliche Temperierung auf $T_{Luft,innen} = 20\text{ °C}$ in einem thermisch eingeschwungenen Zustand gebracht und anschließend über die Dauer von 6 Tagen zwischen dem 24.–29.01.2020 auskühlen gelassen. Somit kann der wird verhindert, dass im Gebäude teilweise ausgekühlt oder überhitzt ist und die Messung hierdurch verfälscht wird. Zur Verifikation des Modells werden die Mess- und Simulationswerte der Raumlufttemperatur $T_{Luft,innen}$ gegenübergestellt.

Versuchsdaten

Die elektrische Leistung wurde zu $P_{el,mess} = 200\text{ W}$ gemessen.

Abbildung 36 zeigt den Verlauf der Raumlufttemperatur des „SmallHouse IV“ in Messung (grün) und Simulation (gelb). Deutlich ist die Einschwingphase (grüne Fläche) zu erkennen. Diese wird benötigt, um die gleichen Temperaturen zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Simulationsmodell und der Messung zu garantieren. Des Weiteren ist das asymptotische Auskühlverhalten deutlich zu erkennen. Dieses wird durch die solare Strahlung auf das Gebäude täglich zwischen 11 und 14 Uhr gestört.

Über die ganze Betrachtungsdauer liegt die Umgebungstemperatur $T_{Luft,außen}$ (blau) zwischen -2 und 8 °C . Hieraus resultiert ein kontinuierlicher Wärmestrom von innen nach außen, der zum Auskühlen des Gebäudes führt.

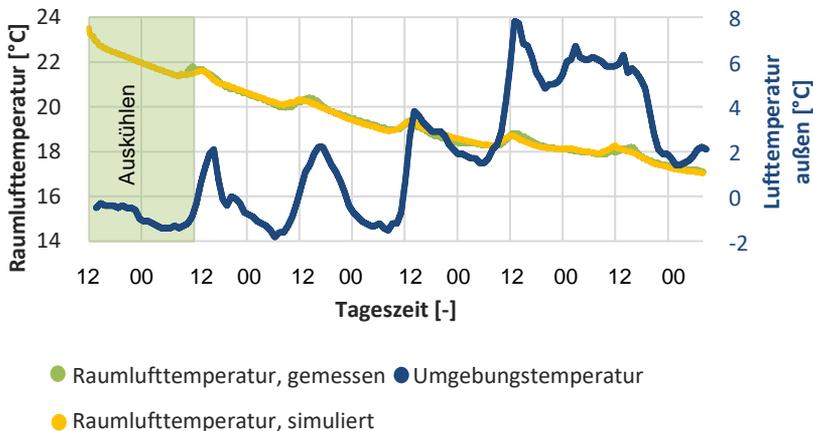


Abbildung 36: Raumlufttemperatur des „SmallHouse IV“ im Zeitraum 24.–29.01.2020 (auskühlen) mit Einschwingphase (hellgrüne Fläche)

Auswertung

Der Vergleich der Kurven zeigt, dass sämtliche Abweichungen der Raumlufttemperaturen $T_{Luft,innen,mess} - T_{Luft,innen,sim} < 0,3$ K liegen. Dies wird durch die statistische Auswertung der Zeitschritte unterstützt, vgl. Tabelle 12. Hier weisen 68 % der Zeitschritte eine Abweichung von weniger als $T_{Luft,innen,mess} - T_{Luft,innen,sim} = 0,1$ K auf. Im Bereich der Messgenauigkeit der Temperaturfühler von $\Delta T_{Sensor} = 0,2$ K liegen 96 % der Messpunkte. Die Simulation weist somit eine sehr gute Übereinstimmung auf.

Tabelle 12: Absolute Abweichung der gemessenen und der simulierten Raumlufttemperaturen

$T_{Luft,innen,sim} - T_{Luft,innen,mess}$	[-0,3 bis -0,2[[-0,2 bis -0,1[[-0,1 bis 0,0[[0,0 bis 0,1[[0,1 bis 0,2[[0,2 bis -0,3]
Häufigkeit [%]	2,6	12,0	34,1	33,7	16,1	1,5

5.4 Fazit

Im Ergebnis dieses Kapitels liegt das Simulationsmodell für das Referenzgebäude inkl. der technischen Gebäudeausrüstung und dessen Regelung & Steuerung vor. Dieses bildet ein für Mitteleuropa repräsentatives EFH ab. Das Modell des MFB wurde mit Hilfe von Versuchen am Großdemonstrator „SmallHouse IV“ verifiziert. Zudem wurden die Kennwerte zur energetischen, ökonomischen und ökologischen Bewertung sowie der thermischen Behaglichkeit definiert. Somit können die in Kapitel 3 dargestellten Parameter untersucht und deren Einfluss durch Vergleich mit der „Referenz mit MFB“ bewertet werden.

6 Ergebnisse der thermischen Simulation

Initial werden die grundlegenden Mechanismen durch Gegenüberstellung von „Referenz mit MFB“ und „Referenz ohne MFB“ beschrieben, die aus der Nutzung des MFB als Speicher und Wärmeübertrager resultieren und zu Änderungen der Temperaturen im Gebäude und Heizsystem sowie den resultierenden Bedarfen an elektrischer Energie führen. Bei der Untersuchung des Einflusses der einzelnen Parameter sind somit die grundlegenden Mechanismen bekannt. Daher wird nur Bedarf an elektrischer Energie sowie Wärmeerzeugung und -bedarf dargestellt. Werden durch die untersuchten Parameter einzelne Effekte signifikant beeinflusst, wird die Betrachtung um entsprechende Zeitreihen ergänzt. Für Parameter, die keinen oder einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperaturen im Gebäude und Heizsystem haben, wird der dominierende Mechanismus beschrieben. Zudem wird bewertet, ob der Parameter für eine umfassende Bewertung bzw. als Parameter einer Auslegungsempfehlung weiter betrachtet wird. Die Werte der Referenz „Stand der Technik“ sind fett dargestellt, vgl. Abschnitt 3.4.

Teile dieser Ergebnisse wurden in *Gauer 2022a, 2022b, 2022c, 2022d, 2022e* veröffentlicht.

6.1 Wirkende Mechanismen und Effekte

Im Folgenden sollen die in der Einleitung beschriebenen Mechanismen und Effekte nachgewiesen werden. Hierfür wird die „Referenz mit MFB“ der „Referenz ohne MFB“ gegenübergestellt, vgl. Abschnitt 4.6. Zusammenfassend sind dies folgende Effekte durch die Nutzung der MFB:

- Geringere Temperaturen im Pufferspeicher
- Höhere solarthermische Erträge durch
 - Zusätzliche solarthermische Erträge bei geringeren Strahlungsleistungen
 - Höheren Wirkungsgrade der Solarthermieanlage bei hohen Strahlungsleistungen
- Reduktion der Transmissionswärmeverluste des Raumes mit MFB über dieses

Die Effekte und Mechanismen werden im Folgenden erst exemplarisch anhand der repräsentativen Zeiträume 1. bis 14. Januar und 1. bis 14. März dargestellt. Der erste Zeitraum stellt den Winter dar, welcher aus energetischer Sicht durch ein mittleres bis geringes solares Angebot bei gleichzeitig hohem Wärmebedarf auszeichnet. Im Gegensatz dazu wird die Übergangszeit durch ein hohes bis mittleres solares Angebot und einen geringen Wärmebedarf charakterisiert. Die

Verteilung des solaren Angebots zeigt, dass es in beiden Zeiträumen Abschnitte gibt, in denen an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen Wärme mittels Solarthermie genutzt werden kann. In anderen Abschnitten folgt auf einen oder mehrere Tage, an denen mit der Solarthermie-Anlage Wärme erzeugt werden kann, Tage, an denen keine solarthermische Wärmebereitstellung möglich ist. Abschließend wird die Jahresbilanz beider Varianten betrachtet.

Die Untersuchung der wirkenden Mechanismen folgt dem Energiefluss im Heizsystem. Daher wird zuerst die Wärmeerzeugung und -speicherung im Pufferspeicher untersucht, bevor die Wirkung der Wärmespeicherung anhand des MFB und des angrenzenden Raumes dargestellt wird. Die Wirkungen werden anhand der Leistungen der einzelnen Komponenten des Heizsystems P_{ST} , P_{WP} , P_{FBH} , P_{MFB} und $P_{PS,verl}$ sowie der JAZ'en der Wärmeerzeuger JAZ_{ST} und JAZ_{WP} untersucht, vgl. Absatz 5.1.2.

6.1.1 Zeiträume in der Übergangs- und der Heizperiode

Folgende Abbildung 37 zeigt die Wärmeerträge aus Solarthermie (gelb) und Wärmepumpe (grün) in den Pufferspeicher sowie die resultierende mittlere Temperatur (dunkelgrau) und den gesamten elektrischen Bedarf (grau bzw. blau) zwischen dem 1. und dem 14. März.

In Abbildung 37 oben ist die „Referenz ohne MFB“ abgebildet. Deutlich sind die solaren Erträge zu erkennen, welche zu einer Steigerung der mittleren Pufferspeichertemperatur $T_{PS,med}$ von rd. 25 °C auf bis zu 80 °C führen. Die eingebrachte Wärme führt zudem dazu, dass der Wärmebedarf in den folgenden 1,5 Tagen vollständig gedeckt werden kann und die Wärmepumpe erst danach Wärme bereitstellen muss, vgl. 4.-7. März. Die Wärmepumpe stellt an Tagen mit geringem solarem Angebot, z. B. 1.-3. März, den Wärmebedarf vollständig bereit, was zu einem getakteten Betrieb und mittleren Pufferspeichertemperaturen $T_{PS,med}$ von rd. 25 °C führt. Daraus resultiert das der elektrische Bedarf fast ausschließlich auf diese Zeitabschnitte zurückzuführen ist. Entsprechend tragen Zeiten mit hohen solaren Erträgen nur geringfügig zum elektrischen Bedarf bei.

Durch den Eintrag von Wärme in die MFB sowie der dortigen Speicherung steigt die mittlere Temperatur $T_{PS,med}$ im Pufferspeicher nur auf bis zu 40 °C, vgl. Abbildung 37 unten. Genau wie bei der Referenz ohne MFB führt die solare Wärme zu einer Verdrängung der Wärmepumpe. Aufgrund der geringen Temperatur im Pufferspeicher steigt der solare Ertrag, da solare Wärme länger und effizienter bereitgestellt werden kann. Der zusätzliche solare Ertrag wird größtenteils in die MFB eingetragen. Da der Wärmebedarf in beiden Varianten identisch ist, führt der zusätzliche solare Ertrag zu einer Verdrängung der

Wärmepumpe. Im Vergleich zur „Referenz ohne MFB“ wird die Wärmepumpe zwischen dem 4. und 9. März nie eingesetzt. Dieser reduzierte Einsatz führt auch zu einem reduzierten elektrischen Bedarf, da dieser zum großen Teil auf den Einsatz der Wärmepumpe zurückzuführen ist.

Diese Mechanismen führen zu signifikanten Differenzen, welche am Beispiel des Zeitraums 1.-14. März quantifiziert werden sollen. Die Nutzung der MFB führt, wie oben beschrieben, dazu, dass ausreichend solare Wärme für mehrere Tage und bis zum nächsten solaren Ertrag erzeugt werden kann, wie z. B. vom 4.-9. März. Konkret bedeutet dies, dass der solare Ertrag Q_{ST} in den beiden betrachteten Wochen von 427 kWh auf 753 kWh gesteigert wurde, also um rd. 75 %. Im gleichen Zeitraum sinkt die Bereitstellung der Wärmepumpe von $Q_{WP} = 282$ kWh auf 132 kWh, die bereitgestellte Wärme steigt also um 23 %. 671 kWh dieser zusätzlichen Wärme werden in die MFB gegeben und führen dort zu einem reduzierten residualen HWB, der durch die FBH bereitgestellt werden muss. Dadurch steigt auch die mittlere Temperatur im Pufferspeicher, was zum reduzierten Betrieb der Wärmepumpe beiträgt. Deren Bedarf an elektrischer Energie W_{WP} sinkt von 91 kWh_{el} auf 58 kWh_{el}. Diese Minderung wird durch den längeren Einsatz der Umwälzpumpen für Solarthermie und MFB teilkompensiert, was zu einer Reduktion des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ von 121 kWh_{el} auf 58 kWh_{el} also um 63 kWh_{el} oder 60 % führt. Die JAZ_{WP} ist in beiden Fällen 3, während die der Solarthermie von $JAZ_{ST} = 33$ auf 82 steigt.

Folgende Abbildung 38 zeigt den die mittleren Temperaturen von Bauteil (grün) und Raumluft (schwarz) sowie die Leistung, die von der FBH (rot) umgesetzt werden. Zudem sind die in die MFB eingebrachte Leistung (gelb) sowie deren Heizleistung für den Innenraum (dunkelblau) und Verluste (hellblau) dargestellt. Als Verluste wird die Wärmeabgabe über die äußere Oberfläche an die Umgebung definiert, unabhängig von der Orientierung des Wärmestroms. Analog werden alle Wärmeströme über die innere Oberfläche als Heizleistung bezeichnet. Die Wärmeverluste sind zyklisch, da die auftreffende solare Strahlung zum Großteil absorbiert und per Transmission an die Umgebung abgegeben wird. Dies sind per obiger Definition Verlust der MFB.

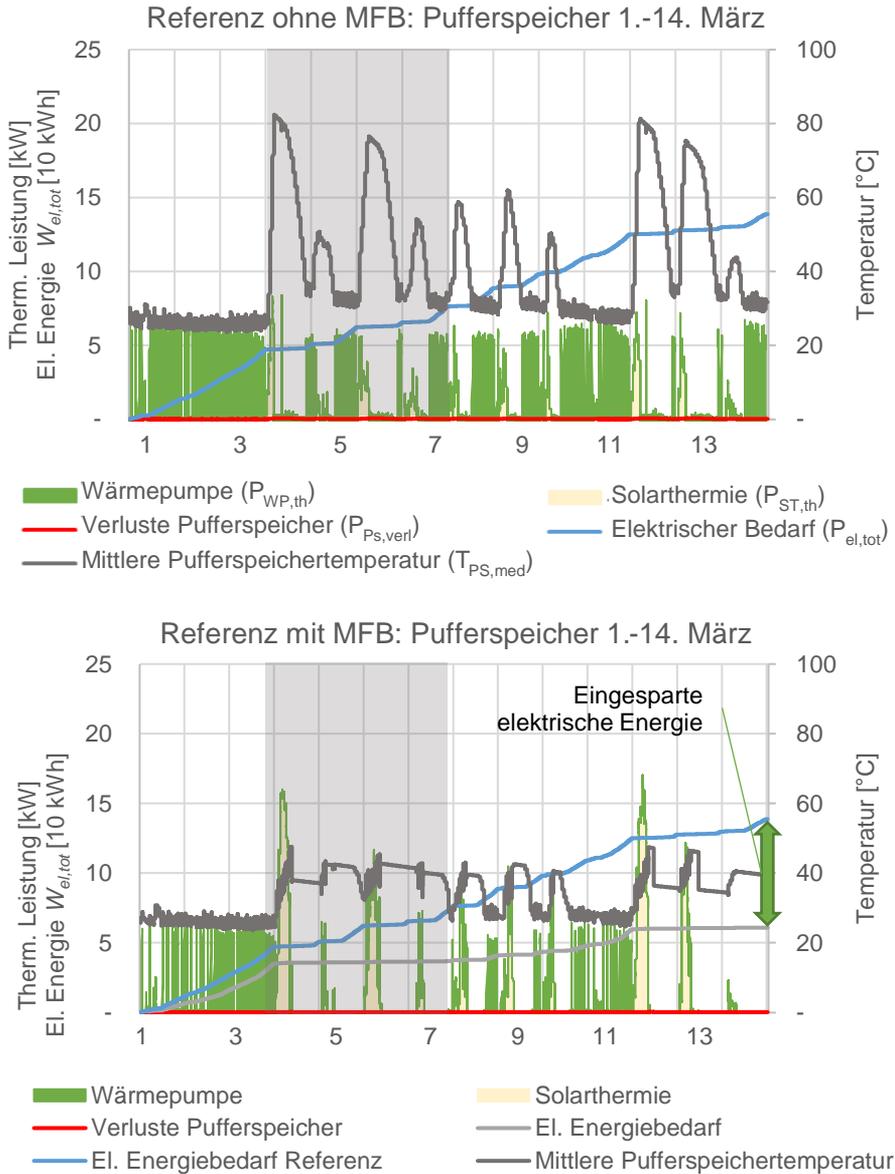


Abbildung 37: Leistung und Temperatur im Pufferspeicher ohne und mit aktivierten Bauteilen sowie gesamter Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ (Referenz ohne MFB und Referenz mit MFB)

In der Referenz ohne MFB, Abbildung 38 oben, ist zu erkennen, dass sowohl die Raumluft- als auch die Bauteiltemperatur konstant $T_{BT,med}$ und $T_{Luft} = 20\text{ °C}$ aufweisen. Die FBH trägt durchgängig zu dieser konstanten Raumlufttemperatur bei und kompensiert so u. a. die Transmissionsverluste (dunkelblau). Die deutlich größeren Leistungen auf der Außenseite des Bauteils sind auf die Berücksichtigung der solaren Strahlung und deren Absorption zurückzuführen.

Der Einsatz der MFB führt im Vergleich zur Referenz ohne MFB zu deutlich erhöhten Bauteil- und leicht erhöhten Raumlufttemperaturen, vgl. Abbildung 38 unten. Dies ist auf den Wärmeeintrag durch die MFB zurückzuführen, welcher zudem mit den solaren Erträgen korreliert, vgl. Abbildung 37 unten. Dieser Wärmeeintrag führt zu einer zeitversetzten Wärmeabgabe an den Raum, was die intendierten Wärmespeicherung ist. In der Folge führt dieser zu einem reduzierten Einsatz der FBH, welche über 1,5 Tage nicht eingesetzt werden muss, vgl. 4.-7. März. Die zusätzlichen Verluste der MFB an die Umgebung sind vernachlässigbar klein.

Über den Zeitraum vom 1.-14. März summiert sich in der Referenz ohne MFB die Heizleistung der betrachteten Wand zu $Q_{MFB,heiz} = -114\text{ kWh}$, vgl. dunkelblau Abbildung 38 oben, während durch den Einsatz der MFB $Q_{MFB,heiz} = 506\text{ kWh}$ von den MFB an den Raum abgegeben werden. Diese zusätzlichen $\Delta Q_{MFB,heiz} = 620\text{ kWh}$ steht ein Eintrag in die MFB von $Q_{MFB,ein} = 671\text{ kWh}$ gegenüber. Somit kann gefolgert werden, dass die zusätzlichen Verluste durch die Nutzung der MFB bei 51 kWh oder 8 % liegen, womit sich nach Gleichung (5) eine Effizienz der MFB von 72 % ergibt. Der Wärmeumsatz der FBH reduziert sich von $Q_{FBH} = 635\text{ kWh}$ auf 154 kWh.

In der Heizperiode, hier am Beispiel des Zeitraums vom 1.-14. Januar, finden sich ähnliche Effekte, vgl. Anhang D. Die solare Wärmeerzeugung wird von $Q_{ST} = 100\text{ kWh}$ auf 233 kWh mehr als verdoppelt, während die Wärmepumpe nur noch $Q_{WP} = 383\text{ kWh}$ statt 542 kWh zur Wärmeerzeugung beisteuert. Die Verschiebung hin zu einer effizienteren Wärmeerzeugung führt zu einer Reduktion des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe von $W_{WP} = 189\text{ kWh}$ auf 136 kWh, also um rd. 28 %. Der gesamte elektrische Bedarf des Heizsystems sinkt von $W_{el,tot} = 213\text{ kWh}$ auf 154 kWh, was einer Reduktion von rd. 28 % entspricht.

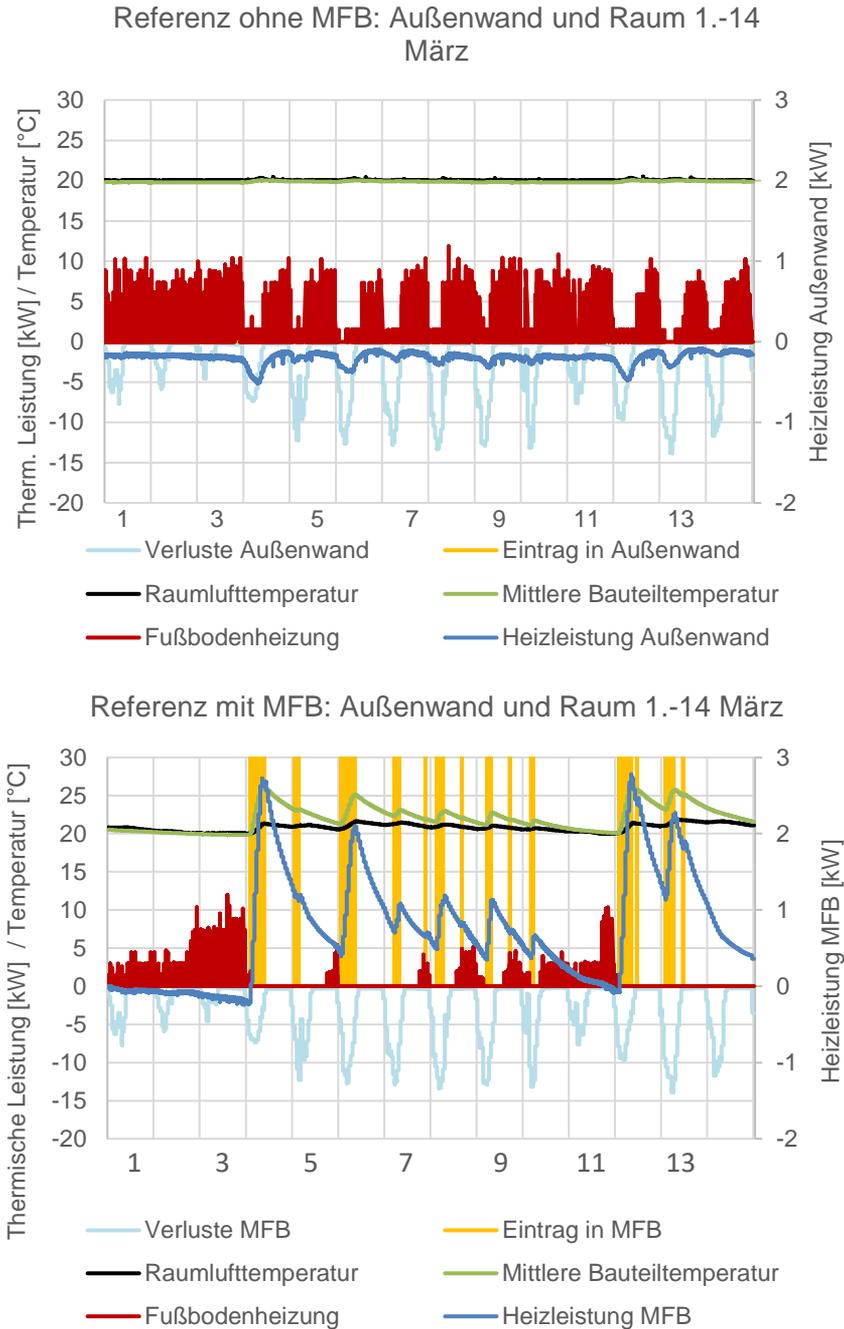


Abbildung 38: Temperatur- und Leistungsverlauf des MFB bzw. der Außenwand und des Raums im März (Referenz ohne MFB und Referenz mit MFB)

6.1.2 Jahresbilanz

In der Jahresbilanz weist die gleichen Zusammenhänge auf wie die beiden betrachteten Perioden. Abbildung 39 zeigt die Wärmebilanz beider Varianten, in der deutlich der um 8 % höhere jährlicher Wärmeumsatz der Variante mit MFB zu erkennen ist. Zudem zeigt sich deutlich die bereits beschriebene Verschiebung der Wärmeerzeugung hin zur Solarthermie, konkret erhöht sich der solare Deckungsgrad an der Wärmeerzeugung von 25 % auf 53 %. Dies resultiert aus einer Erhöhung der solaren Wärmeerzeugung von $Q_{ST} = 1.557 \text{ kWh/a}$ auf 3.532 kWh/a , während die Erzeugung der Wärmepumpe von $Q_{WP} = 4.732 \text{ kWh/a}$ auf 3.193 kWh/a , also um 33 %, sinkt. Die Wärmeverluste des Pufferspeichers $Q_{PS,verl}$ reduzieren sich, bezogen auf den gesamten Wärmeumsatz, nur marginal um 35 kWh/a . Die spezifische Heizleistung der „Referenz ohne MFB“ liegt bei $q_{MFB,heiz,Ref} = -16,7 \text{ kWh/(m}^2\cdot\text{a)}$, die der Referenz mit MFB bei $q_{MFB,heiz,MFB} = 24,4 \text{ kWh/(m}^2\cdot\text{a)}$, somit zeigt sich deutlich, dass das MFB die Transmissionswärmeverluste reduziert.

Es zeigt sich, dass die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen die Wärmepumpe Wärme bereitstellen muss, von 147 auf 109 Tage reduziert wird. Die Tage, an denen durch den Einsatz der MFB die Wärmepumpe nicht betrieben werden muss, verteilen sich über die gesamte Heizperiode.

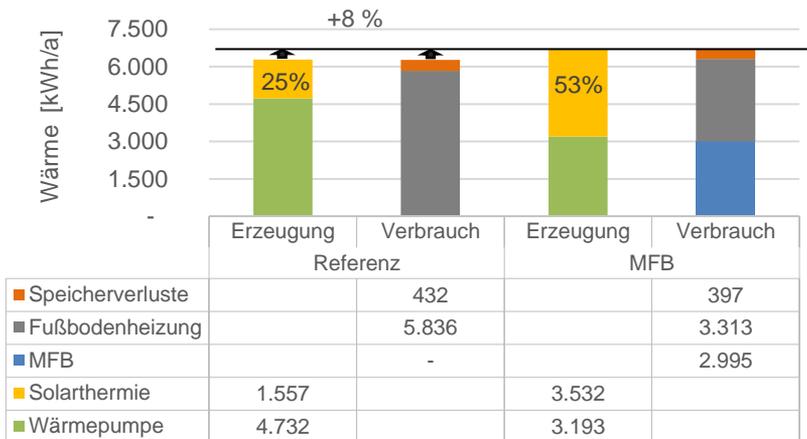


Abbildung 39: Jahreswärmebilanz ohne und mit MFB

Die oben beschriebene Verschiebung der Wärmeerzeugung von der Wärmepumpe hin zur effizienteren Solarthermie spiegelt sich auch im jährlichen elektrischen Bedarf wider, welcher von $W_{el,tot} = 1.880 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$ auf $1.306 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$ sinkt, vgl. Abbildung 40. Diese Minderung um rd. 31 % resultiert fast vollständig aus dem reduzierten Einsatz der Wärmepumpe. Die elektrischen Energiebedarfe

der Umwälzpumpen W_{UWP} machen in beiden Varianten nur rd. 15 % aus und tragen nur marginal zur Reduktion bei. Deutlich ist auch die Reduktion des Einsatzes der FBH zu erkennen, welche von $W_{FBH} = 105 \text{ kWh/a}$ auf 66 kWh/a um rd. 1/3 reduziert wird. Der zusätzliche Bedarf durch die MFB ist mit $W_{MFB} = 3 \text{ kWh/a}$ vernachlässigbar klein und ist auf die deutlich höhere Vorlauftemperatur im Vergleich zur FBH zurückzuführen. Auffällig ist auch der reduzierte Energiebedarf der Umwälzpumpe der Solarthermie, welcher wiederum auf eine reduzierte Betriebsdauer aber effizienteren Betrieb zurückzuführen ist. Diese kann wiederum durch den oben beschriebenen deutlich effizienteren Betrieb erreicht werden, welcher sich bei näherungsweise konstanter Wärmeerzeugung in einer kürzeren Betriebsdauer der Solarthermie widerspiegelt. Wird der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot}$ auf die Wärmeerzeugung $Q_{WP}+Q_{ST}$ bezogen, ergeben sich JAZ des gesamten Systems von $JAZ_{tot,REF} = 3,4$ und $JAZ_{tot,MFB} = 5,3$. Analog ergeben sich für die Wärmepumpe Effizienzen von $JAZ_{WP,REF} = 3,0$ bzw. $JAZ_{WP,MFB} = 2,9$. Somit zeigt sich, dass die Einsparungen vor allem aus der gesteigerten Wärmeerzeugung der Solarthermie und der analog sinkenden Erzeugung der Wärmepumpe resultieren.

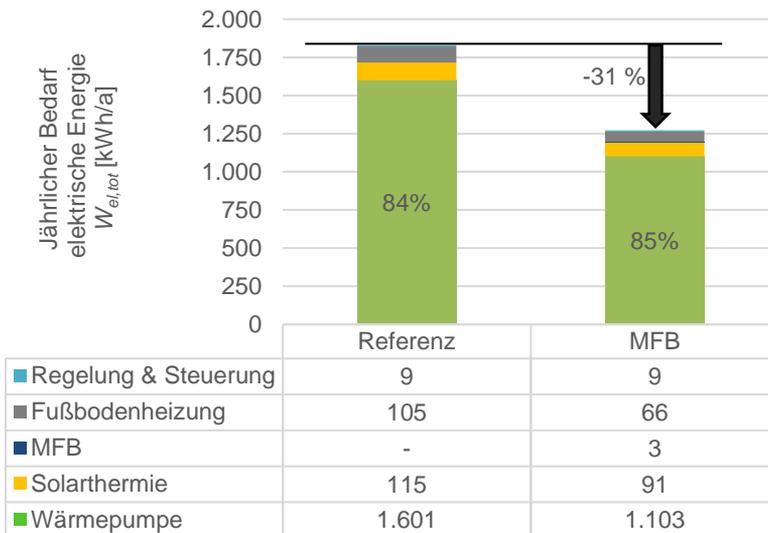


Abbildung 40: Jährlicher elektrischer Energiebedarf W_{el} ohne und mit MFB

6.1.3 Behaglichkeit

Die Bewertung der Behaglichkeit erfolgt wie in Absatz 2.4.1 beschrieben, anhand des *predictive mean vote* PMV. Abbildung 41 zeigt den Verlauf der thermischen Behaglichkeit über das Jahr. Deutlich ist die Kühlperiode am linken und rechten Rand zu erkennen. Dazwischen befindet sich die Heizperiode sowie die beiden Übergangszeiten, die zu tendenziell $PMV < 0$ führen.

Zudem zeigt sich das durch den Einsatz der MFB die Behaglichkeit gesteigert werden kann. In der Referenz wird die Behaglichkeit im April und Mai in 680 h mit einem $PMV < -1$ geringfügig verletzt. Durch die Nutzung der MFB tritt keine Verletzungen der Behaglichkeit auf. Diese Verbesserung resultiert aus um 1-2 K erhöhten Raumlufttemperaturen, vor allem während der Übergangszeiten. In keinem Zeitpunkt wurde die Behaglichkeit durch den Einsatz der MFB verschlechtert.

Die Verletzungen der Behaglichkeit im Sommer sind in beiden Varianten identisch, da die MFB nicht zur Kühlung herangezogen werden und das Gebäude auch nicht anderweitig aktiv gekühlt wird.

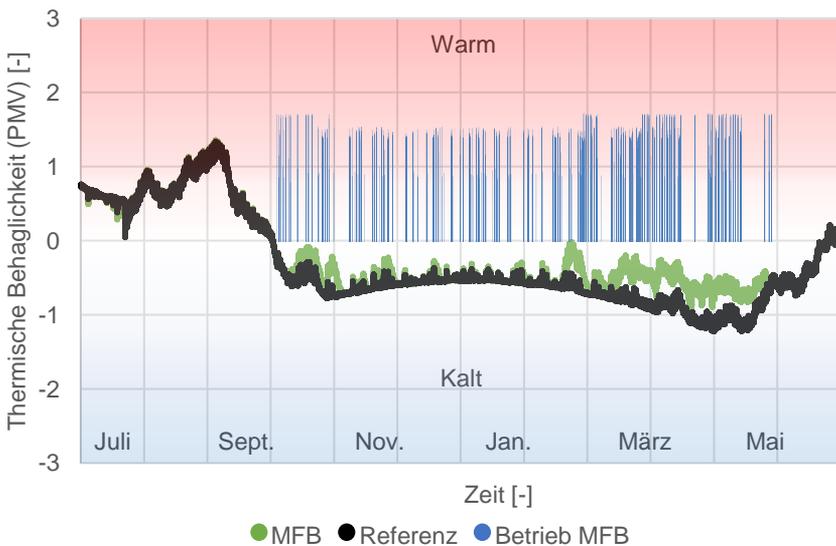


Abbildung 41: Vergleich der Behaglichkeit ausgedrückt als *PMV* mit und ohne MFB

6.1.4 Fazit wirkende Mechanismen und Effekte

Durch den Einsatz der MFB kann der Anteil der Solarthermie von $\eta_{sol} = 25$ auf 53 % deutlich gesteigert werden, was wiederum zu einer Reduktion der Wärmeerzeugung der Wärmepumpe von $Q_{WP} = 4.700$ auf 3.200 kWh/a führt. Die Verluste des Pufferspeichers reduzieren sich nur geringfügig von $Q_{PS,verl} = 432$ auf 395 kWh/a, während gleichzeitig die MFB auf der einen Seite zu keinen zusätzlichen Verlusten an der Außenseite, aber in höheren Raumlufttemperaturen im Inneren des Gebäudes resultieren. Diese führen wiederum in Teilen zu leicht erhöhten Wärmeverlusten, was die Effizienz der MFB geringfügig senkt. Die höhere Raumlufttemperatur von $\Delta T_{Luft,innen} = 0,8$ K führt zu einem reduzierten Einsatz der FBH. Die MFB geben durch eine höhere Vorlauftemperatur Wärme effizienter an die Bauteile und schließlich den Raum ab, wodurch in Summe mehr Wärme mit geringerem Aufwand zur Beheizung bereitgestellt wird. Dieser sinkt der gesamte elektrische Bedarf von $W_{el,tot} = 1.880$ kWh/a auf 1.306 kWh/a.

Bezogen auf die Effizienz führen die MFB zu einem effizienteren Einsatz der Solarthermie, da deren Vorlauftemperaturen geringer als in der Referenz ohne MFB sind. Im Gegensatz dazu kann die Wärmepumpe nicht effizienter eingesetzt werden und weist eine minimale Steigerung von $JAZ_{WP} = 2,9$ auf 3,0 auf. Dies ist auf den Einsatz der Wärmepumpe in Zeiten mit geringeren Außentemperaturen vor allem nachts im Winter zurückzuführen. In diesen Zeiten steht über mehrere Tage bzw. Wochen nur sehr wenig solares Angebot, bezogen auf den HWB, zur Verfügung, sodass eine zusätzliche Speicherung zu keinen weiteren Einsparungen führt.

Während die Verschiebung der Wärmeerzeugung hin zur Solarthermie einen großen Einfluss hat, sind die Effekte, die die Umwälzpumpen und die Pufferspeicherverluste betreffen, als vernachlässigbar bzw. gering einzustufen.

Somit führt der Einsatz der MFB zu zwei Mechanismen, die zu einer Reduktion des gesamten elektrischen Bedarfs $W_{el,tot}$ führen und während der gesamten Heizperiode auftreten:

1. Steigerung des solarthermischen Ertrages Q_{ST} der zu einer Reduktion der Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe Q_{WP} führt
2. Reduktion der Transmissionswärmeverluste über das MFB $Q_{MFB,verl}$

6.2 Einfluss des Aufbaus der MFB

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse, die durch die Änderung des Schichtaufbaus des MFB wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, dargestellt.

6.2.1 Aktiviertes Bauteil: Dicke Außendämmung

Die Außendämmung der Bauteile mit aktivierter Tragschale wirkt sich direkt auf die gesamte erzeugte Wärme aus.¹⁰ Diese sinkt mit steigender Dicke der Dämmung und weist ein Minimum von $Q_{ST+Q_{WP}} = 6.726 \text{ kWh/a}$ bei $d_{\text{dämm}} = 24 \text{ cm}$ auf, vgl. Abbildung 42. Dieses Verhalten ist auf die abnehmende Dämmwirkung zusätzlicher Dämmung mit steigender Dämmstoffdicke zurückzuführen. Die Wärmeerzeugung der Wärmepumpe hingegen sinkt mit steigender Außendämmung von $Q_{WP} = 4.989$ auf 3.132 kWh/a und weist ein asymptotisches Verhalten auf. Dies resultiert aus der begrenzten Verfügbarkeit solarer Strahlung. Mit steigender Dämmstoffdicke steigt die spezifische Heizleistung des MFB von $q_{MFB,heiz} = -8,1$ auf $24,6 \text{ kWh/(m}^2\cdot\text{a)}$.

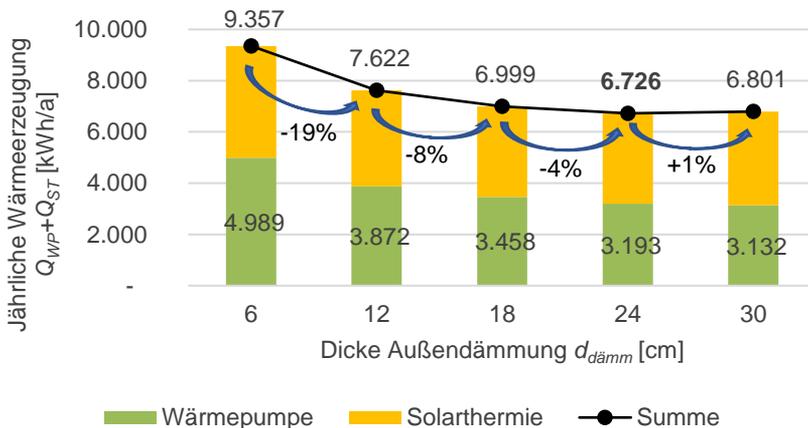


Abbildung 42: Jährliche Wärmeerzeugung Q_{ST+WP} : Dicke Außendämmung $d_{\text{dämm}}$

¹⁰ Die Dicken aller Dämmungen beziehen sich auf eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (WLS040).

Analog zur Wärmeerzeugung sinkt auch der Bedarf an elektrischer Energie mit steigenden Dicken der Außendämmung von $W_{el,tot} = 1.921$ auf 1.287 kWh/a, wie Abbildung 43 zeigt. Da der Einfluss der Wärmepumpe auf den gesamten Bedarf an elektrischer Energie dominierend ist, nähert sich der Bedarf an elektrischer Energie ebenfalls asymptotisch einem globalen Minimum. Ausgehend von $d_{dämm} = 6$ cm Dämmung wird der Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ durch jeweils zusätzliche 6 cm Dämmung um 24, 10, 7 bzw. 1 %, bezogen auf die nächstkleinere Dämmstoffdicke reduziert. Ein ähnliches Verhalten findet sich auch bei nicht aktivierten Bauteilen, wie z. B. in *Gauer 2013*; *Jochum 2014*. Wird die Wärmeerzeugung $Q_{WP+Q_{ST}}$ auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ bezogen, ergeben sich $JAZ_{tot} = 5,3$ bis $5,6$. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,9$.

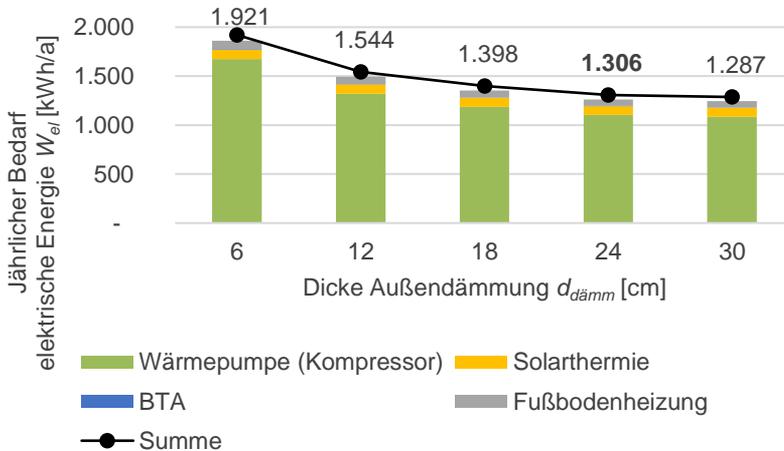


Abbildung 43: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$.
Dicke Außendämmung $d_{dämm}$

Ergebnisse der thermischen Simulation

Da durch die Änderung der Dämmung sowohl der Wärmebedarf als auch das Verhalten der MFB variiert, werden beide separat betrachtet. Folgende Abbildung 44 zeigt jeweils die Einsparung an elektrische Energie, welche sich durch die Änderung der Dämmung (blau) und durch die Nutzung der MFB (orange) ergibt. Die Einsparung durch MFB ist auf die jeweilige Referenz ohne MFB, also ohne thermische Aktivierung, bezogen. Die Einsparung durch die Änderung der Dämmstoffdicke bezieht sich auf die Referenz MFB mit $d_{dämm} = 24$ cm. Deutlich ist zu erkennen, dass die Einsparungen durch die MFB näherungsweise konstant sind, während die durch Änderung der Dämmungen mit steigenden Dämmstoffdicken absinkt. Bei einer Außendämmung von $d_{dämm} = 6$ cm sind die Einsparungen fast gleich verteilt. Mit steigender Dämmstoffdicken von $d_{dämm} = 12$ bzw. 18 cm sinken die Einsparungen an elektrischer Energie auf $W_{el,tot} = 238$ bzw. 92 kWh_{el}/a, was einem Anteil von 29 bzw. 14 % entspricht. Die Dämmung der aktivierten Bauteile wird daher mit $d_{dämm} = 24$ cm festgesetzt. Die zusätzlichen Einsparungen bei Dicken von $d_{dämm} = 30$ cm werden vor dem Hintergrund des zusätzlichen Materialaufwandes als zu gering eingestuft, entsprechende Erkenntnisse finden sich z. B. in *Gauer 2019a*.

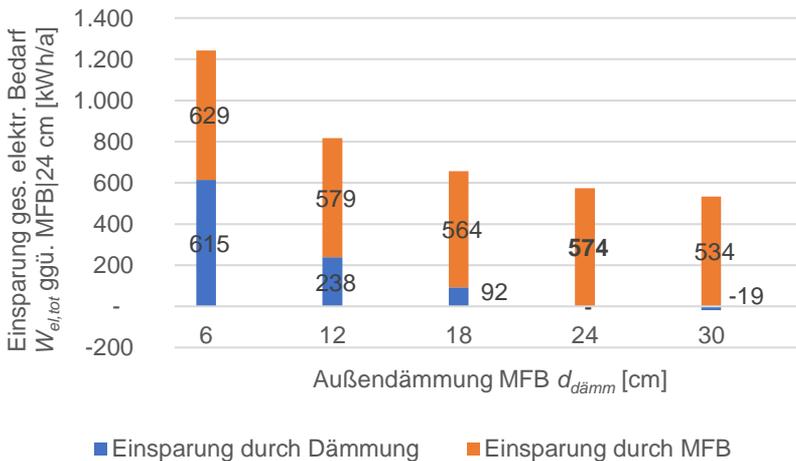


Abbildung 44: Einsparung gesamte elektrische Energie $W_{el,tot}$ durch Nutzung von MFB und Änderung der Dicke der Außendämmung $d_{dämm}$

6.2.2 Aktiviertes Bauteil: Dicke Tragschale

Abbildung 45 zeigt den Einfluss der Dicke der Tragschale auf die Wärmeerzeugung. Deutlich ist zu erkennen, dass die Solarthermieanlage und die Wärmepumpe in allen Varianten näherungsweise je 50 % der rd. 6.700 kWh/a Wärme bereitstellen $Q_{ST} + Q_{WP}$. Die auftretenden Abweichungen zwischen den Summen der erzeugten Wärme liegen bei rd. 0,4 % und können daher vernachlässigt werden. Bis zu einer Dicke von $d_{TS} = 20$ cm sinkt die Wärmeerzeugung der Wärmepumpe mit steigender Dicke der Tragschale d_{TS} ; für Dicken der Tragschale zwischen $d_{TS} = 20$ und 40 cm ist die solare Erzeugung Q_{ST} konstant. Die solare Wärmeerzeugung verhält sich kongruent. Mit steigender Dicke der Tragschale steigt die spezifische Heizleistung des MFB von $q_{MFB,heiz} = 21,2$ auf $22,5$ kWh/(m².a).

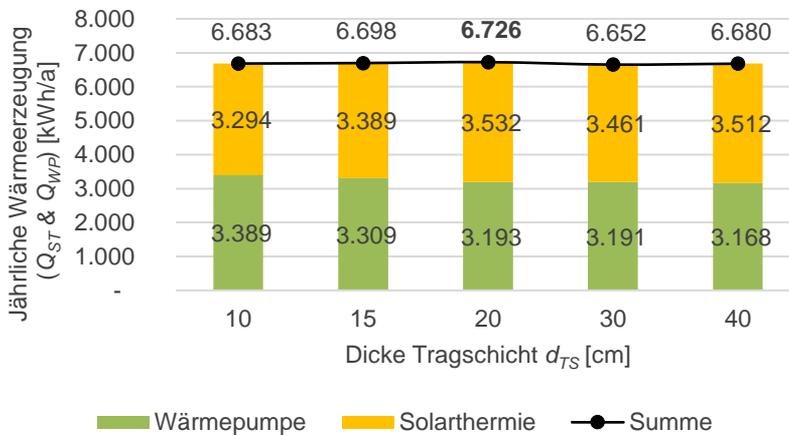


Abbildung 45: Jährliche Wärmeerzeugung Q_{ST+WP} : Dicke Tragschale d_{TS}

Diese Substitution der Wärmeerzeugung führt zu einer Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie, vgl. Abbildung 46. Der gesamte Bedarf an elektrischer Energie reduziert sich signifikant mit steigenden Bauteildicken von $W_{el,tot} = 1.374$ kWh/a bei $d_{TS} = 10$ cm bzw. 1.346 kWh/a bei $d_{TS} = 15$ cm auf 1.306 kWh/a, bei $d_{TS} = 20$ cm. Dies entspricht einer Reduktion um 5 bzw. 3 %, bezogen auf die Referenz MFB mit einer Dicke der Tragschale von $d_{TS} = 20$ cm. Größere Dicken der Tragschale führen zu keinen zusätzlichen Reduktionen. Die Effizienz der Wärmepumpe ist in allen Varianten mit einer Jahresarbeitszahl von 2,9 identisch. Im Gegensatz dazu steigt die JAZ der Solarthermie von 35 auf 37, also um 5 %, mit Steigerung der Bauteildicke von $d_{TS} = 10$ auf 20 cm. Bei höheren Bauteildicken bleibt die JAZ der Solarthermie gleich. Wird die Wärmeerzeugung $Q_{WP} + Q_{ST}$ auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ bezogen, ergibt sich für $d_{TS} = 10$ cm eine $JAZ_{tot,d_{TS}=0,1} = 5,7$. Liegt die Dicke der

Tragschale über $d_{TS} > 10$ cm ergeben sich bis $JAZ_{tot} = 6,0$ bis $6,1$. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,9$.

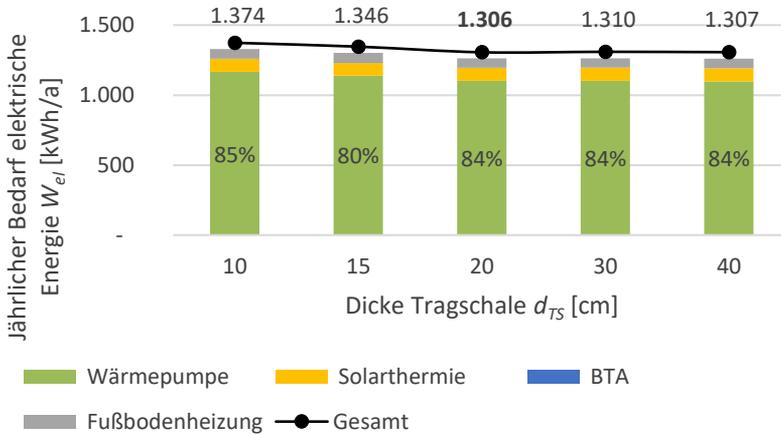


Abbildung 46: Jährlicher Bedarf elektrische Energie W_{er} . Dicke Tragschale d_{TS}
Daher kann schlussgefolgert werden, dass aus energetischer Sicht die Tragschale auf $d_{TS} = 20$ cm festzulegen ist, da größere Dicken zu keinen signifikanten zusätzlichen Einsparungen führen. Ähnliche Ergebnisse, nämlich eine effektive Eindringtiefe von 10 cm in beide Richtungen der Aktivierung, finden sich u. a. auch in *DIN V 18599-1*; *Tödttli 2009*. Ein asymptotisches Verhalten für steigende Pufferspeichergößen findet sich ebenfalls in der Literatur, wie z. B. in *Schabbach 2014*.

Die Dicke der Tragschale wirkt sich sowohl auf die resultierenden thermischen Widerstände zwischen Innenraum, Aktivierung und Umgebung als auch die thermische Kapazität der Tragschale aus. Diese Eigenschaften sind nur durch Änderung der bauphysikalischen Eigenschaften des Betons der Tragschale unabhängig voneinander veränderbar.

6.2.3 Aktivierung: Lage, Material und Verlegeabstand

Neben dem Einfluss des Schichtaufbaus des aktivierten Bauteils wurde auch die Aktivierung untersucht. Damit sind die wasserführenden Rohre im Inneren des Bauteils gemeint, die vom Heizsystem aus dem Pufferspeicher versorgt werden. Hierdurch kann der Einfluss der Aktivierung auf die Temperaturen im Bauteil und die Wärmeübertragung bewertet werden. Somit wird geklärt, ob die Aktivierung selbst oder der umgebende Beton den größeren thermischen Widerstand darstellen und ein anderes Material für die Aktivierung potenziell zu einer höheren Wärmeübertragung an den Beton führt. Das Material der Aktivierung

bzw. dessen Wärmeleitfähigkeit weist nur einen geringen Einfluss auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ auf. Mit Gleichung (1) kann die thermische Kapazität und der thermische Widerstand mit *Incropera 2007* bestimmt werden. Der Beton weist schon bei einer Dicke von $d_{TS} = 2$ cm einen mehr als vierfach höheren thermischen Widerstand als alle anderen betrachteten Materialien des MFB auf. Daher limitiert dieser den Wärmefluss und wird maßgebend. Analog weist der Beton eine über 50-fach höhere thermische Kapazität auf. Daher ist in Bezug auf die thermische Kapazität auch der Beton maßgebend, vgl. Tabelle 13.

Tabelle 13: Thermischer Widerstand und Kapazität der Aktivierung

	PE	Kupfer	Eisen	Beton (2 cm)
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m.K)]	0,4	300	80	2,1
Spezifische Kapazität c_p [kJ/(kg.K)]	1,9	0,385	0,449	1
Dichte ρ [kg/m³]	95	892	7.874	2.400
Therm. Widerstand $R \times 10^4$ [K/W]	19,4	0,03	0,10	84,5
Thermische Kapazität C [Wh/(m.K)]	0,02	0,03	0,03	1,74

Auch die Lage der Aktivierung im Bauteil, also der Abstand zwischen Aktivierung und innerer Oberfläche, hat einen vernachlässigbaren Einfluss. Letzteres ist analog zur Bauteildicke auf die Eindringtiefe der Wärme ins Bauteil von 10 cm zurückzuführen. Einen größeren Einfluss weist der Verlegeabstand der Aktivierung auf. Bei diesem steigt der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot}$ um 5 %, wenn der Abstand von 10 auf 40 cm erhöht wird. Dies ist analog zur Dicke der aktivierten Tragschale auf einen geringeren Wärmeeintrag ins Bauteil zurückzuführen. Hieraus resultiert ein geringerer solarer Ertrag Q_{ST} , was wiederum zu einer höheren Erzeugung der Wärmepumpe Q_{WP} führt, vgl. Anhang E. Ähnliche Ergebnisse zum Verlegeabstand finden sich z. B. für Zwischengeschosssdecken in *Friembichler 2016*. Für alle Varianten liegen die Effizienzen bei $JAZ_{tot} = 6,1$ bzw. $JAZ_{WP} = 2,9$.

Mit steigendem Verlegeabstand sinkt die spezifische Heizleistung des MFB von $q_{MFB,heiz} = 15,0$ auf $24,4$ kWh/(m².a). Analog steigt mit steigender λ_{Akt} auch $q_{MFB,heiz} = 24,2$ auf $29,8$ kWh/(m².a). In beiden Fällen führt, wie oben beschrieben, die Wärmespeicherung im Beton zur Reduktion der Verluste, was in Summe zu höheren $q_{MFB,heiz}$ führt. Im Gegensatz dazu hat die Lage der Aktivierung mit $q_{MFB,heiz} = 22,3$ kWh/(m².a) einen vernachlässigbaren Einfluss.

Zur Maximierung des Wärmeeintrags wird eine Aktivierung in der Mitte der Tragschale mit einem Verlegeabstand von 10 cm sowie PE als Material für die folgenden Untersuchungen gewählt.

6.2.4 Aktiviertes Bauteil: Dicke Innendämmung

Eine Innendämmung an der Innenseite des Bauteils mit aktivierter Tragschale führt auch zu einer höheren Zeitverzögerung bei der Wärmeabgabe an den Innenraum. Primär führt eine Innendämmung aber zu einer Steigerung des thermischen Widerstandes zwischen der Aktivierung und dem Innenraum. Diese führt zu einer höheren Wärmeabgabe an die Umgebung und folglich zu einer geringeren Wärmeabgabe an den Innenraum. Bei einer Innendämmung von 2 cm erhöht sich der innere Widerstand von $R_{in} = 0,17$ auf $1,17$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) versechsfacht sich also. Der äußere Widerstand bleibt konstant bei $R_{out} = 6,12$ ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$). dementsprechend ändert sich das Verhältnis aus äußerem zu innerem Widerstand von 35 zu 5 und somit auch die Wärmeflüsse vom MFB zum Innenraum bzw. der Umgebung. Auf Grund dieses Effektes erhöht sich der gesamte jährliche Bedarf an elektrischer Energie durch eine Innendämmung von $W_{el,tot} = 1.306$ auf 1.373 kWh/a, also um +5 %. Einhergehend sinkt auch die Effizienz des Heizsystems von $JAZ_{tot} = 6,1$ auf $5,7$. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,9$. Für höhere Dicken stellt sich ein analoges Verhalten ein, vgl. Anhang E. Die steigende Wärmeabgabe des MFB nach außen führt auch zu sinkenden Heizleistung des MFB: $q_{MFB,heiz} = 24,4$ auf $17,9$ kWh/($\text{m}^2\cdot\text{a}$).

Daher wird im Folgenden keine Innendämmung betrachtet.

Innendämmung ohne Aktivierung der Tragschale

Der Vergleich der Variation der Innendämmung ohne Aktivierung der Tragschale zeigt ein gegenläufiges, aber auch vernachlässigbares Verhalten. Durch eine Innendämmung werden die Transmissionswärmeverluste reduziert. So wird, verglichen mit der Referenz MFB ohne Innendämmung, die jährliche Wärmeerzeugung des Gebäudes durch eine Innendämmung von $d_{dämm} = 6$ cm von $Q_{ST+Q_{WP}} = 6.289$ kWh/a auf 6.180 kWh/a reduziert. Analog wird der Bedarf an elektrischer Energie von $W_{el,tot} = 1.880$ kWh/a auf 1.823 kWh/a vermindert, vgl. Anhang E. Beide Änderungen entsprechen rd. -3 %.

6.2.5 Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmespeicherkapazität

Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmespeicherkapazität auf die Wärmeerzeugung ist in Abbildung 47 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass mit steigender spezifischer Wärmespeicherkapazität auch die solare Wärmeerzeugung zunimmt und die Erzeugung der Wärmepumpe abnimmt. Wird die spezifische Wärmespeicherkapazität von $c_{p,red}'' = 0,065$ kWh/($\text{m}^2\cdot\text{K}$) auf den Referenzwert von $c_{p,ref}'' = 0,13$ kWh/($\text{m}^2\cdot\text{K}$) verdoppelt, steigt der solare Wärmeertrag von rd.

$Q_{ST} = 3.300$ auf 3.500 kWh/a. Gleichzeitig sinkt die Erzeugung der Wärmepumpe von rd. $Q_{WP} = 3.400$ auf 3.200 kWh/a; die Solarthermie substituiert somit die Wärmepumpe. Bei Verdopplung der Wärmespeicherkapazität auf $c_{p,gest} = 0,26$ kWh/(m².K) steigt der solare Ertrag nur geringfügig um $\Delta Q_{ST} = 100$ kWh/a auf $Q_{ST} = 3.600$ kWh/a.

Während durch die Verdopplung der Wärmeleitfähigkeit die Wärme schneller an den Innenraum abgegeben wird, wird durch die Halbierung der Wärmeleitfähigkeit die Wärme länger im Bauteil gehalten, sie wird also länger gespeichert. Diese längere Speicherung führt zu einer höheren Bauteiltemperatur und somit zu einem geringeren Speicherpotential für solare Wärme der MFB. Die längere Verweildauer führt aber zu einer besseren Deckung des Wärmebedarfs, was sich in einer geringeren Wärmeerzeugung der Wärmepumpe zeigt. Die Verdopplung der Wärmeleitfähigkeit von rd. $\lambda = 1$ auf 2 W/K führt zu einer Reduktion des solaren Ertrages von $Q_{ST} = 3.500$ auf 3.300 kWh/a, analog erhöht sich die Erzeugung der Wärmepumpe von $Q_{WP} = 3.200$ auf 3.400 kWh/a. Wird die Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda = 0,5$ W/K halbiert, sinkt der solare Ertrag um $\Delta Q_{ST} = 400$ kWh/a auf $Q_{ST} = 3.100$ kWh/a. Die Erzeugung der Wärmepumpe reduziert sich ebenfalls um $\Delta Q_{WP} = 200$ kWh/a. Die Heizleistung des MFB verhält sich näherungsweise proportional zum solaren Ertrag Q_{ST} und steigt mit steigender Wärmespeicherfähigkeit von $q_{MFB,heiz} = 20,7$ auf $25,0$ kWh/(m².a); analog mit steigender Wärmeleitfähigkeit λ_{TS} von $q_{MFB,heiz} = 19,3$ auf $29,4$ kWh/(m².a).

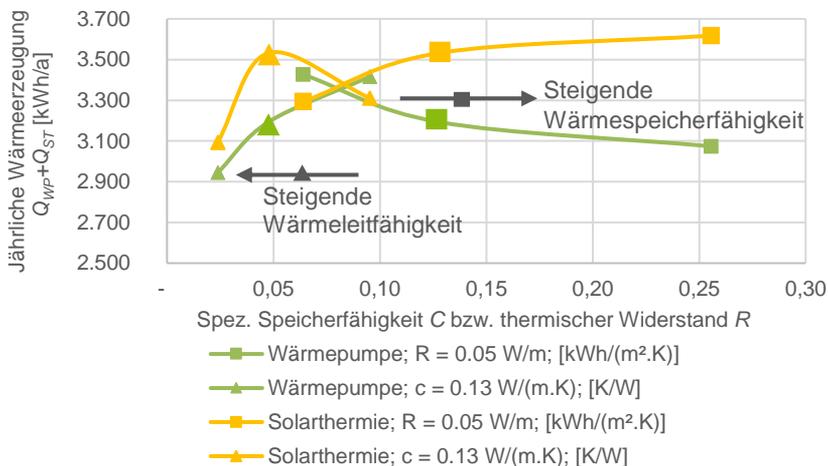


Abbildung 47: Einfluss der thermischen Betoneigenschaften auf die Wärmeerzeugung Q_{ST+WP}

Ergebnisse der thermischen Simulation

Die oben beschriebenen Verschiebungen der Wärmeerzeugung wirkt sich auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ aus. Dieser wird durch den Bedarf der Wärmepumpe dominiert, sodass dieser näherungsweise proportional zu diesem ist, vgl. Abbildung 48 und Abbildung 47, und zwischen $W_{el,tot} = 1.178$ kWh/a und 1.022 kWh/a liegt. Die Spreizung zwischen höchstem und niedrigstem jährlichem elektrischem Bedarf liegt für die Wärmeleitfähigkeit bei rd. 15 %, für die Wärmespeicherfähigkeit bei geringeren 10 %. Bezogen auf die „Referenz MFB“ ergeben sich Reduktionen von 6 % bzw. 3 % für die Wärmeleitfähigkeit λ bzw. die thermische Speicherfähigkeit c_p .

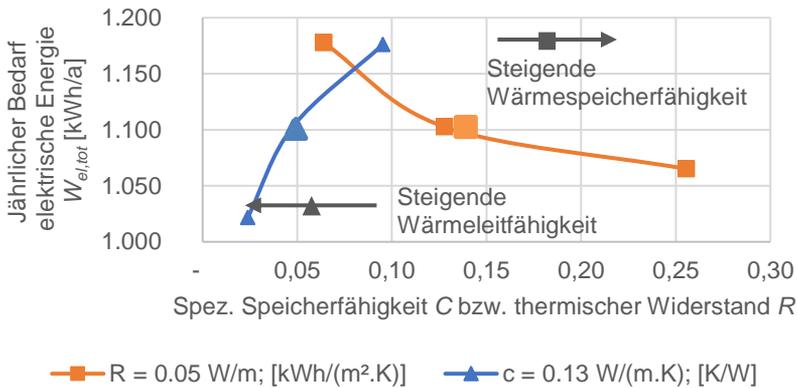


Abbildung 48: Einfluss der thermischen Eigenschaften des Betons auf den kumulierten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$

Wird sowohl die Wärmeleitfähigkeit λ als auch die spezifische Speicherkapazität c_p verdoppelt, reduziert sich der solare Ertrag nur vernachlässigbar um 3 % ggü. der „Referenz MFB“ auf $Q_{ST} = 3.409$ kWh/a. Die Erzeugung der Wärmepumpe reduziert sich aber um 14 % ggü. der „Referenz mit MFB“ von $Q_{ST} = 3.193$ auf 2.735 kWh/a. Diese geringere Wärmebereitstellung führt auch zu einer Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie um 12 % von $W_{el,tot} = 1.306$ auf 1.149 kWh_{el}/a. Wird die Wärmeerzeugung $Q_{WP}+Q_{ST}$ auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ bezogen, ergeben sich Effizienzen für das Heizsystem von $JAZ_{tot} = 5,7$ bis 6,3. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,9$.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit λ und die spez. Speicherfähigkeit c_p mit Minderung des gesamten elektrischen Bedarfs $W_{el,tot}$ von 6 bzw. 3 % - unter Berücksichtigung der jeweiligen Verdopplung - vernachlässigbar gering ausfallen. Die kombinierte Änderung der Materialeigenschaften zeigt, dass diese mit einer Reduktion des gesamten

elektrischen Bedarfs $W_{el,tot}$ zu einer höheren Einsparung von 15 % führen als die einzelnen Änderungen.

Dies bedeutet, dass die Wärmeleitfähigkeit λ und die spez. Speicherfähigkeit c_p der Tragschale möglichst hoch gewählt werden sollten. Aufgrund der statischen und betontechnologischen Anforderungen sowie den daher unbekanntem ökonomischen und ökologischen Eigenschaften, wie z. B. Herstellungskosten oder spezifisches THG-Potential, bei der Entwicklung entsprechender Werkstoffe und Bauteile werden die Wärmeleitfähigkeit und die spez. Wärmespeicherfähigkeit nicht weiter betrachtet.

6.2.6 Fazit Aufbau MFB

Die Untersuchung des Bauteilaufbaus zeigt, dass die Außendämmung den größten Einfluss auf den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ hat und Dämmungen mit einer Dicke von $d_{Dämm} > 24$ cm zu keinen zusätzlichen Einsparungen führt. Die Einsparungen resultieren hierbei aus der Reduktion des Wärmebedarfs des Gebäudes, was bei einer näherungsweise konstanten solarthermischen Produktion von rd. $Q_{ST} = 3.700$ kWh/a, zu einem steigenden η_{sol} führt. Die Dicke der Tragschale d_{TS} , der horizontale Abstand der Aktivierung zur inneren Oberfläche sowie der vertikale Verlegeabstand haben nur einen geringen Einfluss auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$. Analog hat das Material der thermischen Aktivierung nur einen vernachlässigbaren Einfluss. Im Gegensatz dazu führt eine Innendämmung zu einem höheren gesamten Bedarf an elektrischer Energie $W_{el,tot}$, was aus dem zusätzlichen thermischen Widerstand zwischen MFB und zu beheizendem Innenraum resultiert. Die $q_{MFB,heiz}$ verhält sich näherungsweise proportional zum solaren Ertrag Q_{ST} und zur $d_{Dämm}$. Daher liegt zwischen $q_{MFB,heiz} = -8,1$ und $29,8$ kWh/(m².a).

Daraus lässt sich ableiten, dass die aktuell üblichen und als Referenz MFB verwendeten Parameter zu Lage, Material und Verlegeabstand der Aktivierung nicht weiter zu variieren und untersuchen sind.

6.3 Orientierung und Größe der MFB

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, verfügt das untersuchte Gebäude über zwei Stockwerke, die wiederum in je vier Räume á $NUF = 17,5 \text{ m}^2$. Diese Räume sind thermisch über Innenwände bzw. Geschossdecke gekoppelt, sodass eine Temperaturänderung in einem Raum die Temperatur in einem angrenzenden Raum beeinflusst. Analog gilt dies für die MFB. Somit kann der Einfluss der Orientierung des MFB auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ untersucht werden.

6.3.1 Orientierung MFB

Der Einfluss der Orientierung der MFB wird mit einer aktivierten Fläche von 36 m^2 untersucht. Folgende Abbildung 49 zeigt den Einfluss der Orientierung auf die Wärmeerzeugung und den kumulierten jährlichen Bedarf an elektrischer Energie. Deutlich zeigt sich zum einen eine deutliche Symmetrie – Ost und West – und ein deutlich geringerer kumulierter jährlicher Bedarf an elektrischer Energie, wenn die MFB nur an die nördlichen Räume angrenzen. Dieser reduzierte Bedarf ist wieder auf den reduzierten Betrieb der Wärmepumpe und diese wiederum auf den gesteigerten Ertrag der Solarthermie zurückzuführen. Dieses Verhalten resultiert aus dem höheren HWB der nördlichen Räume im Vergleich zu den anderen Räumen. Dieser resultiert wiederum aus den deutlich geringeren passiven solaren Erträgen über die Fenster.

Der solare Ertrag fällt für die Orientierung des MFB nach Süden, verglichen mit den anderen Orientierungen mit $Q_{ST} = 2.700 \text{ kWh/a}$ um 10 % geringer aus. Im Gegensatz dazu fällt die Erzeugung der Wärmepumpe mit $Q_{WP} = 2.800 \text{ kWh/a}$ am geringsten aus, wenn die MFB nach Norden orientiert sind. Bei einer Orientierung nach Osten oder Westen steigt die Erzeugung auf $Q_{ST} = 2.900 \text{ kWh/a}$, nach Süden sogar auf $Q_{ST} = 3.000 \text{ kWh/a}$. Die im Vergleich zur Orientierung nach Norden zusätzlich erzeugten Wärmemengen der Solarthermie führen zu leicht erhöhten Raumlufttemperaturen und werden als zusätzliche Verluste ohne zusätzlichen Nutzen an die Umwelt abgegeben. Die spezifische Heizleistung verhält sich wieder näherungsweise proportional zum solaren Ertrag Q_{ST} und liegt bei $q_{MFB,heiz} = 33,6$ bis $43,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Es zeigt sich, dass eine Orientierung der MFB nach Süden mit einem gesamten elektrischen Bedarf von $W_{el,tot} = 1.740 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$ nur minimale Einsparungen ggü. der Referenz MFB mit $W_{el,tot} = 1.800 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$ aufweist. Die Bedarfe an elektrischer Energie fallen bei einer Orientierung nach Osten bzw. Westen mit $W_{el,tot} = 1.260 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$ deutlich geringer aus. Dies entspricht einer Einsparung von 30 %. Mit 41 % fällt bei einer Orientierung nach Norden die Einsparung nochmals höher aus und resultiert in $W_{el,tot} = 1.090 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$. Wird dieser auf die

Ergebnisse der thermischen Simulation

Wärmeerzeugung $Q_{WP}+Q_{ST}$ bezogen, ergibt sich eine Effizienz des Systems von $JAZ_{tot} = 4,8$ bis $6,3$. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,8$ bis $3,0$.

Ähnlich wie in den anderen bisher untersuchten Parametern entfallen in allen Varianten rd. 80 % des elektrischen Bedarfs auf die Wärmepumpe; daher wird auf eine weitere Aufgliederung verzichtet.

Aufgrund der größten Einsparungen an elektrischer Energie wird die Aktivierung der Wände der nördlichen Räume weiterverfolgt.

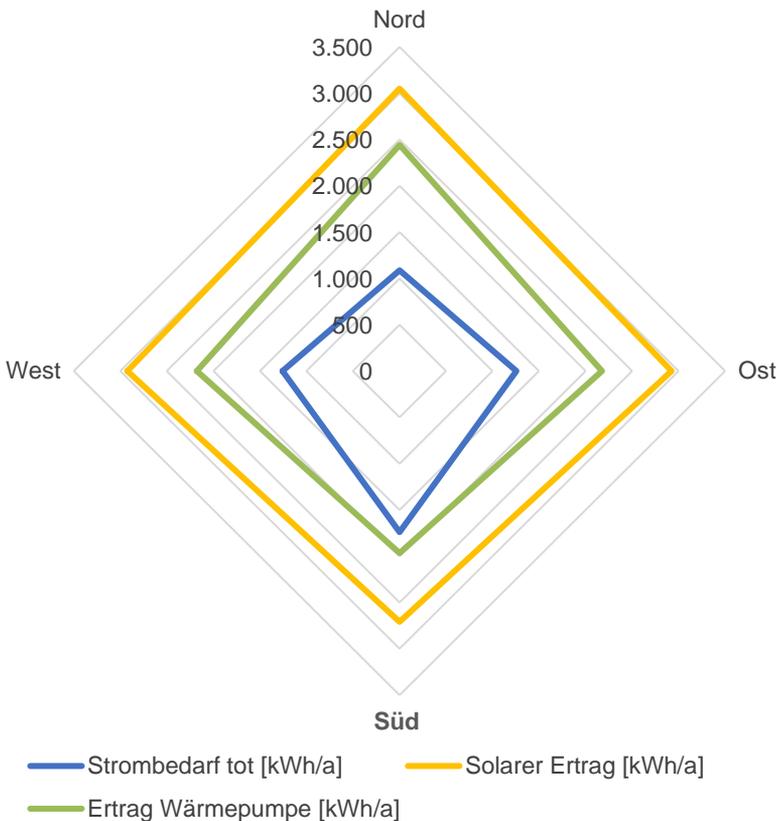


Abbildung 49: Jährliche Energieerzeugung und -bedarf: Orientierung MFB

6.3.2 Aktivierter Anteil der Außenwände der nördlichen Räume

Da die nördlichen Räume einen höheren HWB als die nach Süden ausgerichteten aufweisen, werden diese zur Untersuchung des Einflusses des Flächenanteils genutzt.

Die Nutzung der nördlichen Außenwand mit $A_{MFB} = 47 \text{ m}^2$ bzw. 16 % der NUF führt auch schon in Teilen von 8 bzw. 4% der NUF , zu einer signifikanten Reduktion der Wärmeerzeugung der Wärmepumpe auf 70 bis 53 %, verglichen mit der Referenz ohne MFB, also ohne Aktivierung. Lediglich die zusätzliche Nutzung der Ost- und Westwand führen zu einer Steigerung der Wärmeerzeugung sowohl aus Solarthermie als auch Wärmepumpe, vgl. Abbildung 50. Die Wärmeerzeugung der Wärmepumpe sinkt mit steigender Größe des MFB von $Q_{WP} = 4.732 \text{ kWh/a}$ ohne Aktivierung auf Aktivierung auf $Q_{WP} = 2.589 \text{ kWh/a}$ bei Aktivierung aller Wände der nördlichen Räume. Dies wird durch eine Steigerung der Erträge der Solarthermie von $Q_{ST} = 1.557 \text{ kWh/a}$ ohne Aktivierung auf $Q_{ST} = 3.165 \text{ kWh/a}$ kompensiert. Die gesamte Wärmeerzeugung sinkt mit steigender aktivierter Fläche der Nordwand von $Q_{ST+Q_{WP}} = 6.289 \text{ kWh/a}$ ohne Aktivierung, auf $Q_{ST+Q_{WP}} = 5.561 \text{ kWh/a}$. Die Nutzung aller Wände weist eine leicht höhere Erzeugung von $Q_{ST+Q_{WP}} = 5.754 \text{ kWh/a}$ auf, was auf zusätzliche Verluste mit steigender Größe des MFB zurückzuführen ist, vgl. Abschnitt 6.1. Mit steigender aktivierter Fläche A_{MFB} steigt auch $q_{MFB,heiz} = 33,6$ auf $152 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, da der solare Ertrag Q_{ST} deutlich geringer sinkt als die aktivierte Fläche A_{MFB} .

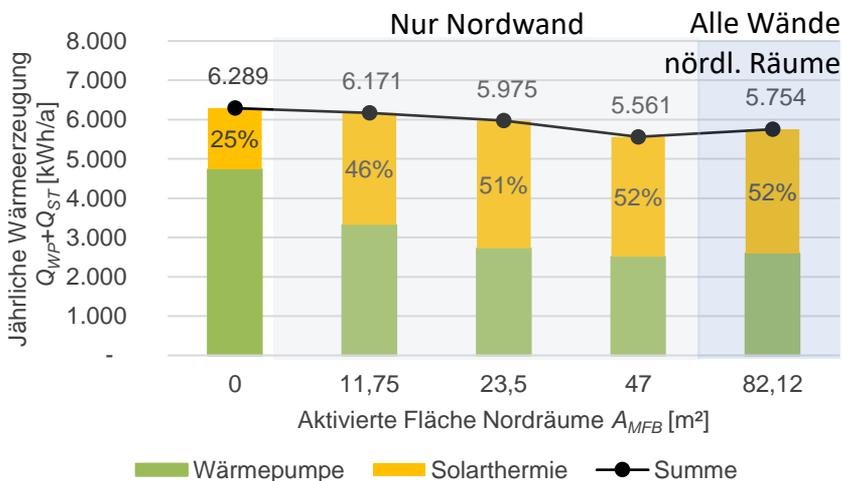


Abbildung 50: Jährliche Wärmeerzeugung Q_{ST+WP} :
Aktivierter Anteil der Außenwände der Nordräume

Durch diese Verschiebung der Wärmeerzeugung von der Wärmepumpe hin zur Solarthermie sinkt auch der Bedarf an elektrischer Energie der Wärmepumpe, welche den gesamten Bedarf an elektrischer Energie dominiert. Die zusätzliche Wärmeerzeugung bei Nutzung der östlichen und westlichen Außenwände durch die Wärmepumpe führt zu einem geringfügig höheren Bedarf an elektrischer Energie ggü. der Variante mit vollständig aktivierter Nordwand, vgl. Abbildung 51. Dieser sinkt von $W_{el,tot} = 1.880$ kWh/a ohne Aktivierung auf $W_{el,tot} = 1.087$ kWh/a. Auffällig ist zudem, dass der Bedarf an elektrischer Energie ein asymptotisches Verhalten bzgl. der aktivierten Fläche aufweist. Dies ist auf die bereits oben beschriebene Verschiebung der Wärmeerzeugung hin zur effizienteren Solarthermie zurückzuführen. Wird der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot}$ auf die Wärmeerzeugung $Q_{WP}+Q_{ST}$ bezogen, ergibt sich eine Effizienz des Systems von $JAZ_{tot} = 5,4$ bis $6,3$. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,8$ bis $2,9$.

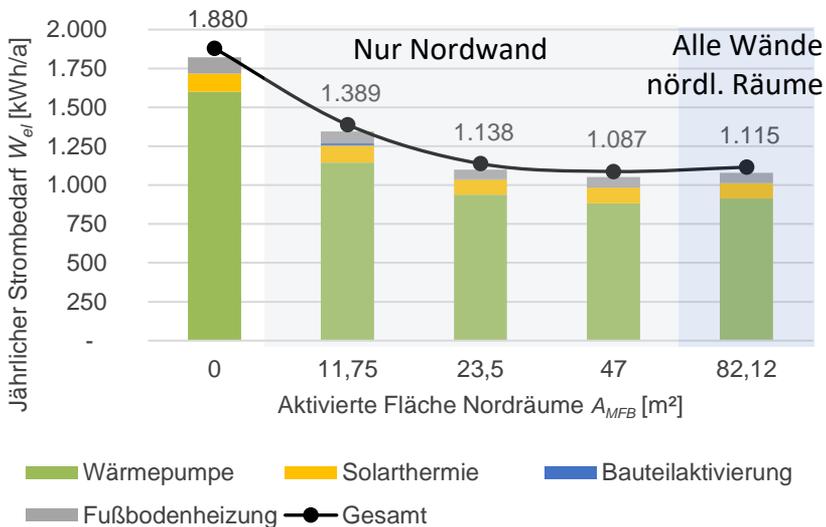


Abbildung 51: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} : Aktivierter Anteil Außenwände der nördlichen Räume

6.3.3 Orientierung und aktivierte Fläche in den nördlichen Räumen

Folgend wird untersucht, ob die Orientierung der MFB innerhalb eines Raumes einen Einfluss haben. Hierzu werden jeweils $A_{MFB} = 17,56$ m² bzw. 4 % der NUF der nördlichen, östlichen bzw. westlichen Wand der nördlichen Räume aktiviert, vgl. Abbildung 52. Dies entspricht der östlichen bzw. westlichen Außenwand der nördlichen Räume ohne Fensterflächen.

Abbildung 53 zeigt die Wärmeerzeugung der vier resultierenden Varianten. Die Varianten „Nordräume; Ostwand“ und „Nordräume; Nordwand Ost“ unterschieden sich nur in der Orientierung der aktivierten Fläche. Bei Ersterer ist diese nach Osten orientiert, bei Letzterer nach Norden. Es ist zu erkennen, dass sich die Wärmeerzeugung der Wärmepumpe bei $Q_{WP,O} = 2.779 \text{ kWh/a}$ bzw. $Q_{WP,NO} = 2.764 \text{ kWh/a}$ liegt und sich somit lediglich um 0,5 % unterscheidet. Analog dazu weicht die Erzeugung der Solarthermie mit $Q_{ST,O} = 2.637 \text{ kWh/a}$ bzw. $Q_{ST,NO} = 2.710 \text{ kWh/a}$ um rd. 2 % ab. Während die Abweichung der Wärmepumpe vernachlässigbar ist, ist die leicht erhöhte Erzeugung der Solarthermie auf die deutlich geringere solare Einstrahlung auf die Nordwand zurückzuführen. Diese resultiert in einer leicht reduzierten Oberflächentemperatur, welche zu leicht erhöhten Transmissionsverlusten führt. Daraus folgt wiederum eine geringere Bauteiltemperatur, welche mehr solare Wärme mittels Aktivierung aufnehmen kann. Ein Teil der zusätzlichen solaren Gewinne bei aktivierter Nordwand führen zu einer Kompensation der zusätzlichen Transmissionsverluste aufgrund der geringeren solaren Einstrahlung.

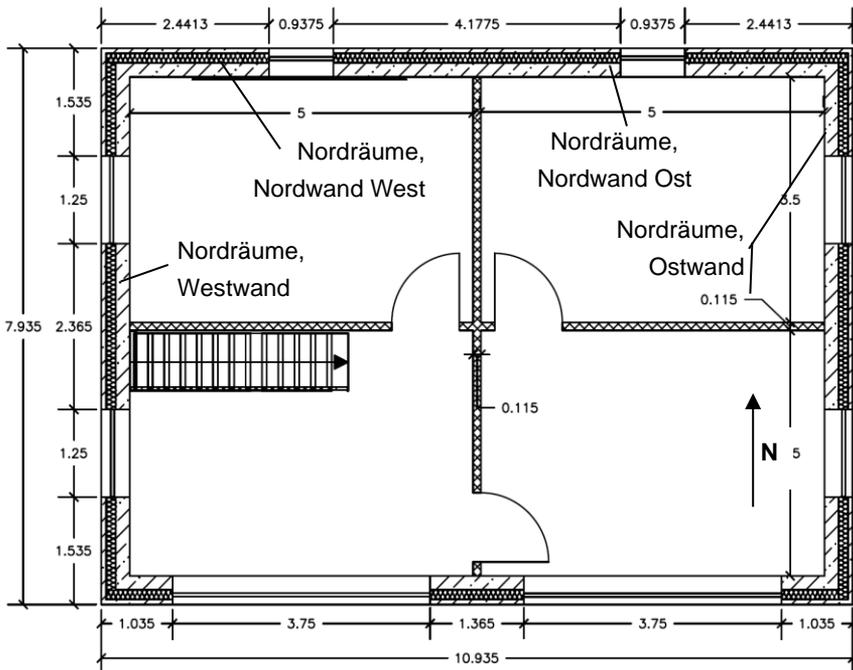


Abbildung 52: Grundriss des Obergeschosses des Referenzgebäudes

Beim Vergleich der Aktivierung der Außenwände des nord-westlichen Raums zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Die Aktivierung der westlichen Nordwand führt zu einer rd. 4 % geringeren Wärmeenergieerzeugung der Wärmepumpe $Q_{WP,NW} = 4.241 \text{ kWh/a}$ statt $Q_{WP,W} = 4.418 \text{ kWh/a}$, vgl. Abbildung 53. Dieser steht nur eine geringe gesteigerte Wärmeenergieerzeugung der Solarthermie von $Q_{ST,NW} = 2.659$ bzw. $Q_{ST,W} = 2.614 \text{ kWh/a}$ also rd. 2 % gegenüber. Auf Grund der Regelung, welche vorrangig solare Wärme in die MFB leitet, reduziert sich der Wärmeeintrag in die MFB. Dies führt wiederum zu einem geringeren Wärmeeintrag in den angrenzenden Raum und Verluste an die Umgebung. Daraus folgt, dass die Heizleistung des MFB $P_{heiz,MFB}$ die Heizlast Φ seltener übersteigt, was wiederum zu einer leicht geringeren Raumlufttemperatur führt. Der annähernd gleiche solare Ertrag führt zu einer geringeren Wärmeenergieerzeugung der Wärmepumpe. Analog zum solaren Ertrag Q_{ST} wird auch $q_{MFB,heiz}$ nur geringfügig durch die Lage des MFB in den nördlichen Räumen beeinflusst. Die bei $q_{MFB,heiz} = 82,1, 84,1, 83,5$ bzw. $81,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

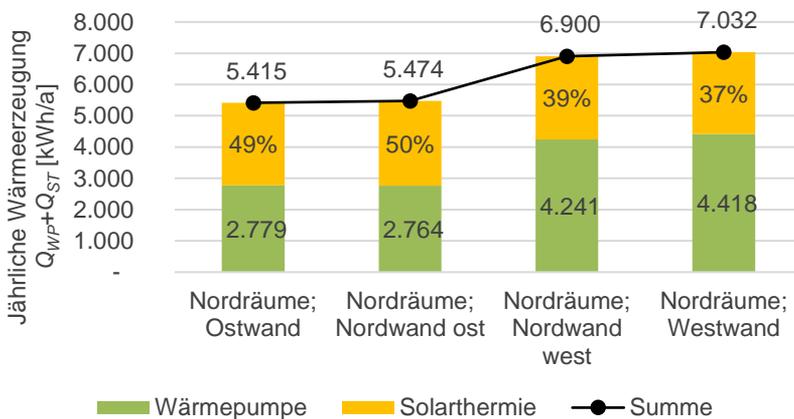


Abbildung 53: Jährliche Wärmeenergieerzeugung Q_{ST+WP} : Orientierung und angrenzender Raum

Ergebnisse der thermischen Simulation

Beim Nord-Ost-Raum führt die geringere Wärmeerzeugung der Wärmepumpe, bei gleicher JAZ_{WP} zu einem mit $W_{el,tot,O} = W_{el,tot,NO} = 1.260 \text{ kWh}_{el}/a$, $W_{el,tot,W} = 1.780 \text{ kWh}_{el}/a$ bzw. $W_{el,tot,NW} = 1.725 \text{ kWh}_{el}/a$ ebenfalls geringeren Bedarf an elektrischer Energie, vgl. Abbildung 54. Analog liegt die systemische Effizienz bei $JAZ_{tot} = 5,7$ bzw. $4,7$, die der Wärmepumpe bei $JAZ_{WP} = 3,0$ bzw. $2,9$.

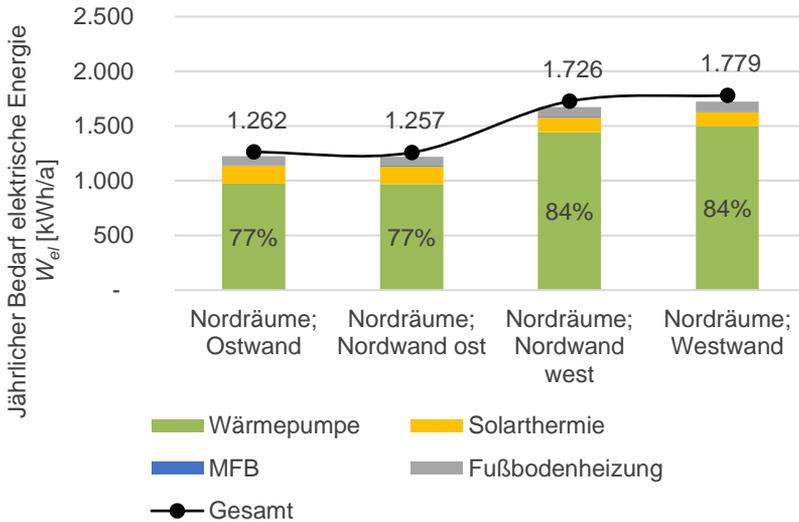


Abbildung 54: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} .
Pufferspeichergroße V_{PS}

Beim Vergleich der Aktivierung der östlichen bzw. westlichen Hälfte der Nordwand zeigt sich eine deutlich erhöhte Wärmeerzeugung der Wärmepumpe, vgl. Abbildung 53. Dies resultiert bei annähernd gleicher Effizienz in einem gesteigerten Bedarf an elektrischer Energie der Wärmepumpe und des gesamten Systems, vgl. Abbildung 54. Dieses Verhalten ist nicht auf eine signifikante unterschiedliche Beladung der MFB zurückzuführen, sondern auf deren Entladung. Bei der östlichen Variante führt die Entladung zur Deckung des HWB des angrenzenden Raums. Bei der westlichen führt diese zu einer Erhöhung der Raumtemperatur, da die Heizlast auf Grund der solaren Strahlung niedriger ist als in der östlichen Variante. Die Heizleistung des MFB $P_{heiz,MFB}$ führt also zu einer Verdrängung der Heizleistung der FBH. Diese wird auf Grund des geringen solaren Angebots primär durch die Wärmepumpe versorgt. Folgend wird dies am Beispiel des Zeitraums vom 1. bis 14. Februar verdeutlicht. Bei der Aktivierung der östlichen Wandhälfte wird deutlich die Leistung der FBH P_{FBH} (orange) durch den Wärmeeintrag der aktivierten Bauteile (blau) verdrängt, vgl.

z. B. 1. bis 5. Februar. Bei Aktivierung der westlichen Wandhälfte führt der Wärmeeintrag der MFB nicht zu einer Reduktion der Heizleistung der FBH P_{FBH} , vgl. Abbildung 55 mit Abbildung 56 gleicher Zeitraum. Dieses unterschiedliche Verhalten bei sonst sehr ähnlichen kumulierten Wärmeeinträgen und -abgaben der MFB ist auf den Verlauf der Heizlast Φ der beiden Räume zurückzuführen. Dessen zeitlicher Verlauf wird durch die solare Einstrahlung beeinflusst. In beiden Varianten führt die solare Strahlung, die vormittags durch die Fenster in den Raum fällt, zu einem niedrigeren HWB im Vergleich zum westlichen Raum. Beim westlichen Raum erfolgt die Einstrahlung nachmittags und führt somit zu einem verkleinerten HWB ggü. dem östlichen Raum. Da der Wärmeeintrag in die Aktivierung gleichzeitig erfolgt und die zeitliche Verschiebung ähnlich ist, führt der Wärmeeintrag bzw. die reduzierten Transmissionsverluste zu unterschiedlichen residualen Heizlast Φ , die durch die FBH gedeckt werden. Dies soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden. Am 3. Februar wird in beiden Varianten jeweils rd. $Q_{MFB, ein} = 15$ kWh in die MFB eingespeichert, was zu einer kumulierten Heizleistung von jeweils rd. 10 kWh führt. Die zeitliche Verschiebung der *peaks* zwischen Ein- und Ausspeichern beträgt in beiden Varianten rd. 4 h. Bei der östlichen Variante findet daher eine bessere Deckung des HWB durch die MFB statt, da dieser rd. 4 h nach dem Wärmeeintrag in die MFB maximal wird. Durch diese teilweise Deckung der Heizlast Φ beträgt die Wärmeabgabe der FBH für das gesamte Gebäude $Q_{FBH} = 186$ kWh. In der Variante mit Aktivierung der westlichen Wandhälfte überlappen sich die Wärmeeinträge durch direkte solare Strahlung und Wärmeabgabe der aktivierten Bauteile deutlich und führen zu einer verlangsamten Wärmeabgabe der MFB und zu höheren Lufttemperaturen. Die FBH gibt $Q_{FBH} = 246$ kWh an die Räume ab. Da die solaren Erträge deutlich geringer sind als der Wärmebedarf, erfolgt die Wärmebereitstellung für die FBH größtenteils durch die Wärmepumpe, vgl. Tabelle 14.

Tabelle 14: Wärmeerzeugung und -bedarf sowie Bedarf an elektrischer Energie bei Aktivierung des östlichen und westlichen Teils der Nordwand

Variante	Solarthermie Q_{ST}	Wärmepumpe Q_{WP}	MFB Q_{MFB}	FBH Q_{FBH}	MFB heiz	Elektrische Energie W_{el}
Ost	177	339	15	186	10	151
West	169	604	15	246	10	236

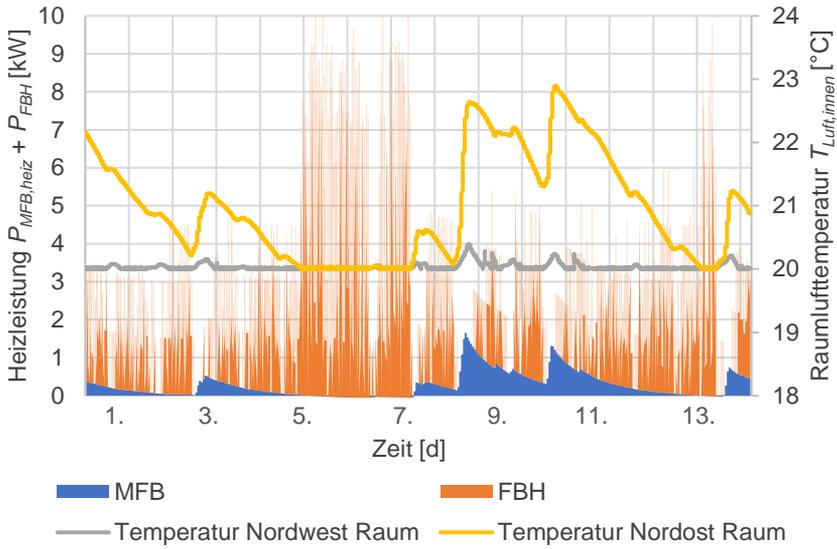


Abbildung 55: Aktivierte Nordwand Ost (1.-15. Februar)

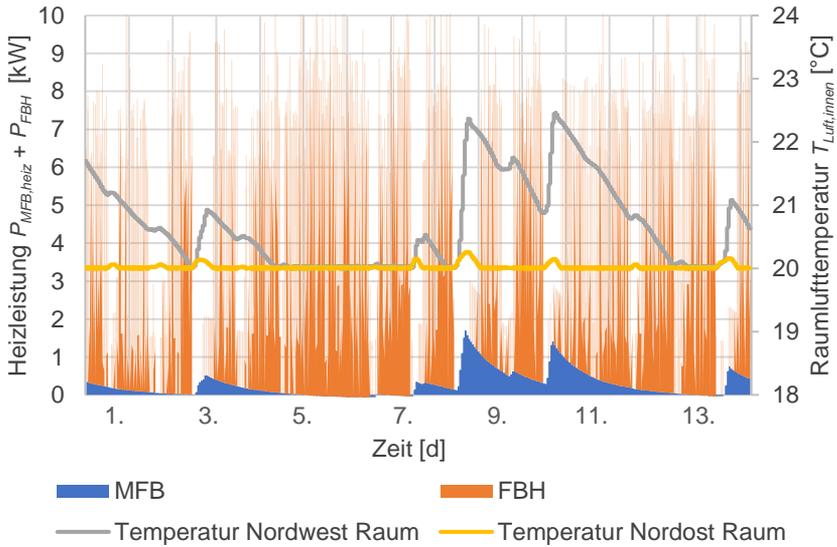


Abbildung 56: Aktivierte Nordwand West (1.-15. Februar)

Dieser Zusammenhang bedeutet im Umkehrschluss auch, dass der Einfluss des angrenzenden Raums auf den elektrischen Bedarf mit sinkender Bauteiltemperatur, z. B. durch eine größere aktivierte Fläche bei gleichbleibender eingebrachter Wärme, abnimmt.

Über die flächengewichteten Mittelwerte der Leistungen, Eintrag und Heizleistung, kann eine Verschiebung der Wärme berechnet werden. Diese beträgt bei der östlichen Variante $\Delta t = 25$ h, bei der westlichen $\Delta t = 20,5$ h. Bei einer Sonnenscheindauer von $t_{ST} = 9-10$ h im Februar entspricht dies einer Verschiebung um rd. die Hälfte.

Da die Reduktion der aktivierten Fläche zu höheren elektrischen Bedarfen führt und die Orientierung einen vernachlässigbaren Einfluss hat, wird die Aktivierung der Nordfassade und der Außenwände des nord-östlichen Raums weiter untersucht.

6.3.4 Solare Strahlung auf MFB

Die solare Strahlung hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Energiebilanz der MFB und keinen auf den kumulierten elektrischen Energiebedarf. Dies ist auf die geringe Absorption auf der äußeren Oberfläche der MFB sowie den hohen thermischen Widerstand der Dämmung zurückzuführen. Da die Strahlung auf die Außenseite der MFB zudem nur reduziert werden kann, z. B. durch Nachbarbebauung oder Vegetation, wird diese nicht weiter betrachtet.

6.3.5 Fazit Orientierung und Größe MFB

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Orientierung der Fenster des an die MFB angrenzenden Raumes einen großen Einfluss auf den Bedarf an elektrischer Energie haben. So führen geringe solare Erträge über transparente Flächen zu höheren Wärmebedarfen und zu einem höheren Deckungsanteil der MFB sowie der Solarthermie am HWB dieser Räume. Bezogen auf die Größe der MFB zeigt sich, dass diese bis zu einer spezifischen Größe von $A_{MFB} = 0,33 \text{ m}^2_{MFB}/\text{m}^2_{NUF}$ zu signifikanten Reduktionen des jährlichen gesamten elektrischen Bedarfs $W_{el,tot}$ von bis zu 40 % ggü. der Referenz führen. Höhere Verhältnisse führen zu keinen weiteren Reduktionen. Im Gegensatz dazu hat die Lage der MFB innerhalb eines Raumes sowie die solare Strahlung auf das MFB keinen Einfluss. Die $q_{MFB,heiz}$ liegt zwischen 33,6 auf 152 kWh/(m².a) und verhält sich für den untersuchten Aufbau des MFB näherungsweise proportional zum solaren Ertrag Q_{ST} .

6.4 Einfluss der technischen Gebäudeausrüstung

6.4.1 Solarthermie: Kollektorfläche

Die Wärme aus Solarthermie steigt mit zunehmender Kollektorgröße an. Diese ist bis einschließlich $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ Kollektorfläche linear ($R^2 = 0,9999$). Bei einer konstanten gesamten Wärmeenergieerzeugung von rd. $Q_{ST}+Q_{WP} = 6.700 \text{ kWh}$ folgt hieraus eine korrespondierende Reduktion der Wärmeenergieerzeugung der Wärmepumpe, vgl. Abbildung 57. Die Zuwachsrate des solaren Ertrages Q_{ST} beträgt rd. 50 kWh/m^2 . Würde diese Zunahme auf $A_{ST} = 50 \text{ m}^2$ Kollektorfläche extrapoliert, wäre der solare Ertrag rd. $Q_{ST} = 4.300 \text{ kWh/a}$. Die tatsächliche Zunahme beträgt lediglich 224 kWh/a , also nur rd. 45% . Die $q_{MFB,heiz}$ ist wieder näherungsweise proportional zum solaren Ertrag Q_{ST} und steigt mit der Kollektorfläche A_{ST} von $q_{MFB,heiz} = 10,0$ auf $27,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

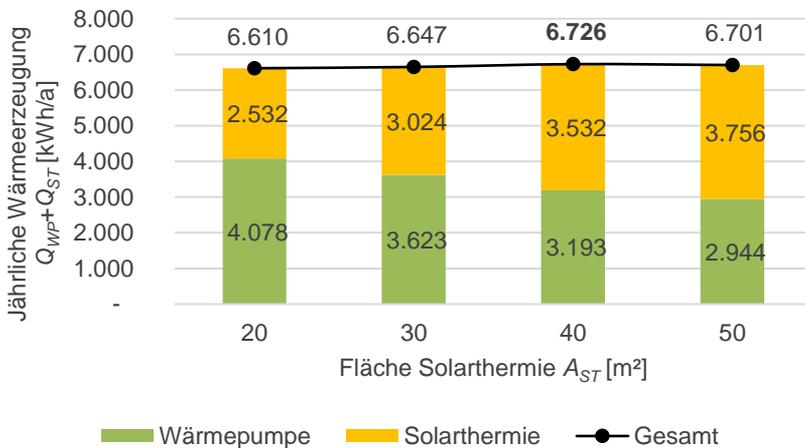


Abbildung 57: Jährliche Wärmeenergieerzeugung Q_{ST+WP} :
Größe Kollektor Solarthermie A_{ST}

Die reduzierte Zuwachsrate des solaren Ertrages von $A_{ST} = 40$ auf 50 m^2 kann auf die begrenzten solaren Gewinne in den Übergangszeiten zwischen Heiz- und Kühlperiode zurückgeführt werden. Ist die Speicherkapazität erschöpft, kann keine zusätzliche solare Wärme gewonnen werden. Folgende Abbildung 58 zeigt das Verhältnis aus dem täglichen solaren Ertrag und täglichem HWB des Gebäudes im Dezember und Februar für $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$. Ist dieses >1 wird mehr Wärme erzeugt als zum Heizen benötigt wird. Die überschüssige Wärme wird, wenn möglich, gespeichert. Zudem ist der Mittelwert des Verhältnisses über drei Tage dargestellt. Deutlich zeigt sich, dass durch die größere Kollektorfläche mit $A_{ST} = 50 \text{ m}^2$ die Anzahl der Tage, an denen mehr solare Wärme gewonnen

werden kann als HWB besteht, im Dezember von 3 auf 5 Tage steigt und im Februar bei 11 bleibt, vgl. Abbildung 59.

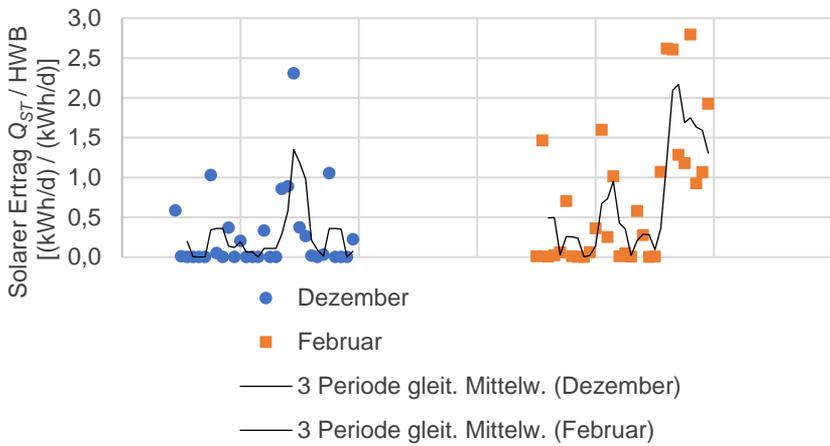


Abbildung 58: Verhältnis zw. täglichem solarem Ertrag und täglichem Heizwärmebedarf bei einer Kollektorfläche von $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$

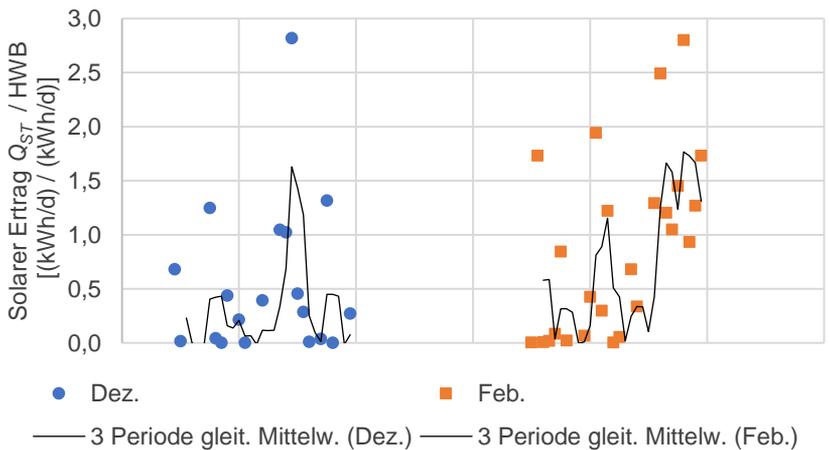


Abbildung 59: Verhältnis zw. täglichem solarem Ertrag und täglichem Heizwärmebedarf bei einer Kollektorfläche von $A_{ST} = 50 \text{ m}^2$

Ergebnisse der thermischen Simulation

Diese geringere Verdrängung spiegelt sich auch im Bedarf an elektrischer Energie wider, wie Abbildung 60 zeigt. In dieser sind die Monate Oktober bis März aufgetragen, da nur diese einen Bedarf an elektrischer Energie der Wärmepumpe aufweisen. Im Dezember reduziert sich der Bedarf an elektrischer Energie um 20 kWh je 10 m² zusätzlicher Kollektorfläche der Solarthermie. Im Gegensatz dazu belaufen sich die Reduktionen im Februar auf $\Delta Q_{ST} = 30$ kWh je 10 m² Kollektorfläche, mit Ausnahme der Reduktion von $A_{ST} = 40$ auf 50 m², welche lediglich $\Delta Q_{ST} = 20$ kWh je 10 m² beträgt.

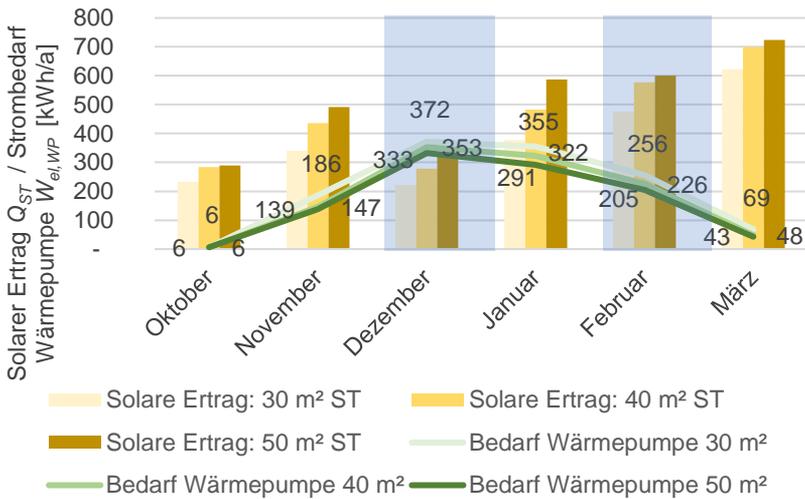


Abbildung 60: Solarer Ertrag und Bedarf an elektrischer Energie der Wärmepumpe W_{WP} bei unterschiedlichen Kollektorgößen der Solarthermie A_{ST}

Aus der energieeffizienteren Wärmeerzeugung mit steigender Kollektorgöße resultiert ein sinkender gesamter Bedarf an elektrischer Energie von $W_{el,tot} = 1.621$ kWh/a auf 1.258 kWh/a. Die Einsparungen an elektrischer Energie der Wärmepumpe sind deutlich höher als die zusätzlichen Bedarfe der Solarthermie. Bis zu einer Kollektorgöße von $A_{ST} = 40$ m² hat die Steigerung der Kollektorgöße um jeweils 10 m² eine Reduktion des gesamten elektrischen Bedarfs $W_{el,tot}$ um jeweils rd. 10 % zur Folge. Die Steigerung der Kollektorfläche von $A_{ST} = 40$ auf 50 m² führt hingegen nur zu einer Reduktion um 4 %, was wiederum auf die reduzierte Verschiebung der Wärmeerzeugung zurückzuführen ist, siehe Abbildung 61. Aus dieser Verschiebung der Wärmeerzeugung resultiert auch eine Steigerung der systemischen Effizienz von $JAZ_{tot} = 4,7$ auf 6,6. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei $JAZ_{WP} = 2,9$.

Der beschriebene asymptotische Zusammenhang zwischen mit steigender Kollektorfläche findet sich ebenfalls in der Literatur, wie z. B. in *Oliva 2019*; *Schabbach 2014*.

Da sich die Kollektorgröße i. d. R. an der Geometrie und Größe des Daches des Gebäudes orientiert, muss die Kollektorgröße als Variable behandelt werden.

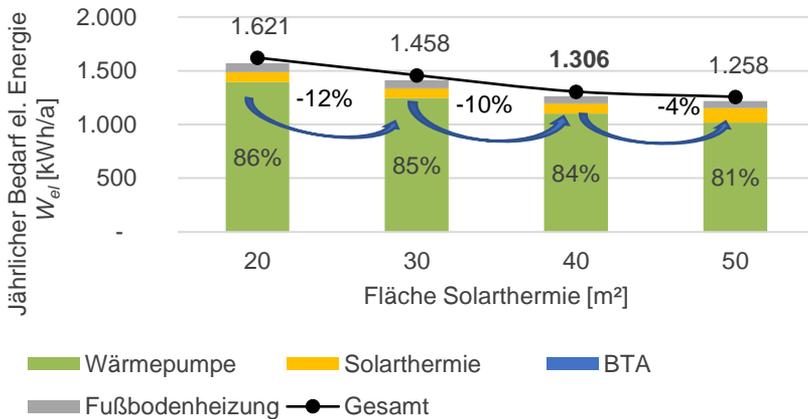


Abbildung 61: Jährlicher kumulierter Bedarf an elektrischer Energie W_{el} .
Größe Kollektor Solarthermie A_{ST}

6.4.2 Solarthermie: Orientierung des Kollektors

Die Orientierung des Kollektors weist aufgrund der sich mit der Orientierung ändernden solaren Strahlung auf den Kollektor ein ähnliches Verhalten wie die Variation der Kollektorgröße auf. Folgende Abbildung 62 zeigt den gesamten jährlichen Bedarf an elektrischer Energie sowie die jährliche Wärmeerzeugung aus Solarthermie und Wärmepumpe. Deutlich ist zu erkennen, dass der solare Ertrag bei einer Orientierung nach Süden mit $Q_{ST} = 3.532$ kWh/a maximal ist und die Wärmeerzeugung der Wärmepumpe mit $Q_{WP} = 3.139$ kWh/a minimal. Bei maximalem solarem Ertrag ist auf Grund der bereits beschriebenen Substitution auch der gesamte Bedarf an elektrische Energie minimal. Abbildung 61 zeigt auch, dass eine Orientierung nach Westen günstiger ist als eine nach Osten, $Q_{ST,West} = 2.029$ kWh/a bzw. $Q_{ST,Ost} = 1.779$ kWh/a. Eine Orientierung nach Südwest führt zu einem um 6 % erhöhten solarem Ertrag im Vergleich zu einer Orientierung nach Südost, was wiederum zu einem reduzierten Betrieb der Wärmepumpe und somit zu geringeren Bedarfen an elektrische Energie von $W_{el,tot,West} = 1.801$ kWh/a bzw. $W_{el,tot,Ost} = 1.887$ kWh/a führt. Diese Bedarfe führen zu Effizienzen von $JAZ_{tot} = 3,4$ bis $6,1$, bezogen auf das gesamte System

Ergebnisse der thermischen Simulation

und von $JAZ_{WP} = 2,9$ bis $3,0$ für die Wärmepumpe. Mit steigendem solaren Ertrag Q_{ST} steigt $q_{MFB,heiz} = -9,9$ auf $24,4$ kWh/(m².a).

Vergleicht man die Orientierung nach Osten und West, ist eine leichte Asymmetrie zu erkennen. Diese ist auf den Zeitpunkt des solaren Ertrages im Tagesgang zurückzuführen. Eine Orientierung nach Osten führt zu einem Wärmeeintrag, bevor die solaren Gewinne über die Fenster im Tagesgang erzielt werden. Dies führt zu einer höheren Raumluft und Bauteiltemperatur, weswegen die Wärmeabgabe der MFB an den Innenraum leicht reduziert ist. Der Effekt wird in Absatz 6.3.3 im Detail erläutert.

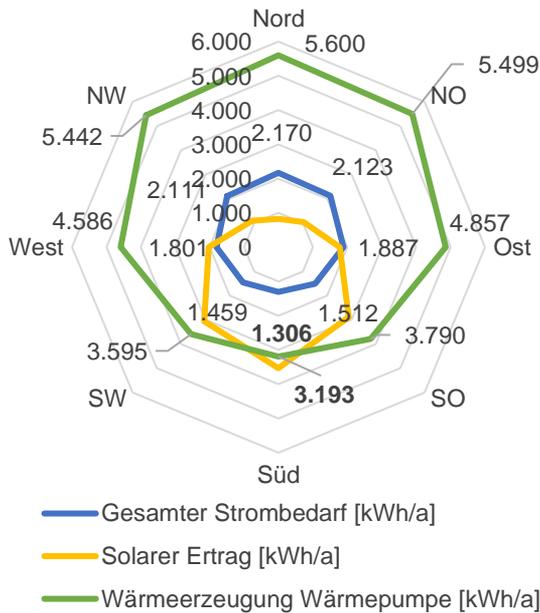


Abbildung 62: Jährliche Energiemengen des Kollektors und der Wärmepumpe Q_{ST+WP} in Abhängigkeit der Orientierung des Kollektors O_{ST} ($A_{ST} = 40$ m²)

Analog zur Kollektorgröße wird die Orientierung des Kollektors weiter als Variable behandelt.

6.4.3 Fazit Technische Gebäudeausrüstung

Die untersuchte solarthermische Wärmeerzeugung verdrängt die Wärmeerzeugung der Wärmepumpe. Daher führt eine Reduktion des solaren Ertrags z. B. durch Reduktion der Kollektorfläche oder der hier nicht betrachteten Neigung des Kollektors zu einer Steigerung der Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe. Da immer über 80 % des Bedarfs an elektrischer Energie aus der Wärmepumpe resultieren, reduziert sich der Bedarf an elektrischer Energie mit steigenden solaren Erträgen. Diese Steigerungen weisen ein asymptotisches Verhalten auf, da nicht ausreichend Speicherkapazität zur Verfügung steht, um ausreichend solare Wärme zu speichern. Zudem bedingen die daraus resultierenden längeren Speicherdauern höhere Verluste, die zusätzlich gewonnen und gespeichert werden müssen. Daher führen zusätzliche Kollektorflächen nur bedingt zu größeren solaren Erträgen und zu Einsparungen an elektrischer Energie. Dieses asymptotische Verhalten findet sich sowohl bei Systemen mit als auch ohne MFB. Wie in den anderen Betrachtungen ist von $q_{MFB,heiz}$ näherungsweise proportional zum solaren Ertrag Q_{ST} .

Daher werden die Orientierung und Größe des Solarthermie-Kollektors als Parameter betrachtet, da diese zum Teil vom Einzelfall abhängig sind. Das Volumen des Pufferspeichers wird auf $V_{PS} = 300\text{ l}$ festgesetzt, da größere Volumina durch die MFB vermieden werden sollen.

6.5 Stand der Technik ohne und mit MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe

Folgend wird der Einfluss durch die Variation der PufferspeichergroÙe – mit und ohne MFB – dargestellt und untersucht. Diese Varianten werden zudem als Grundlage genutzt, um die äquivalente PufferspeichergroÙe zu ermitteln. Mit dieser kann der Nutzen der MFB auch als reduziertes Pufferspeichervolumen ausgedrückt werden.

6.5.1 Stand der Technik ohne MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe

Beim Vergleich der Varianten Stand der Technik ohne MFB mit variabler PufferspeichergroÙe zeigt sich, dass mit steigender PufferspeichergroÙe auch der solare Ertrag von $Q_{ST} = 1.550$ auf 4.600 kWh/a bzw. von 25 auf 62 % an der Wärmebereitstellung anwächst. Mit dem solaren Ertrag steigen allerdings auch die Verluste des Pufferspeichers von $Q_{PS,verl} = 430$ auf 1.580 kWh/a, sodass ein Großteil der zusätzlichen Gewinne durch diese kompensiert wird. Die Erzeugung der Wärmepumpe sinkt von $Q_{WP} = 4.730$ auf 2.870 kWh/a, vgl. Abbildung 63.

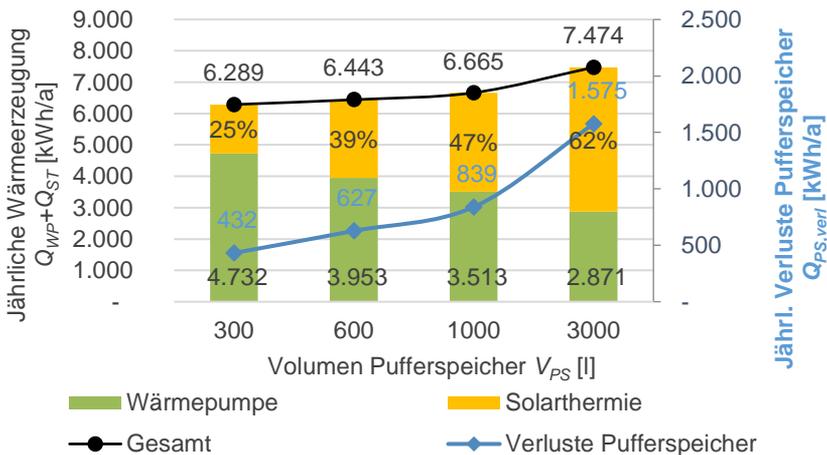


Abbildung 63: Jährliche Wärmeerzeugung Q_{ST+WP} :
Stand der Technik ohne MFB mit variabler PufferspeichergroÙe V_{PS}

Die Reduktion der Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe führt zu einer analogen Reduktion des kumulierten jährlichen elektrischen Bedarfs der Wärmepumpe und auch des gesamten Heizsystems, vgl. Abbildung 64. Durch die Erhöhung der Pufferspeichergöße von $V_{PS} = 300$ auf 1.000 bzw. 3.000 l wird der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot} = 1.800$ auf 1.370 bzw. 1.150 kWh/a reduziert. Somit ergeben sich systemische Effizienzen von $JAZ_{tot} = 3,9$ bis 8,3. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei $JAZ_{WP} = 3,0$ bis 3,2.

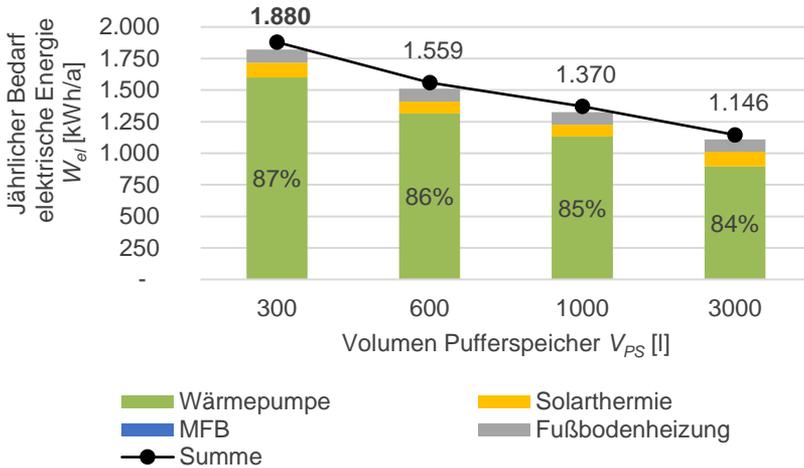


Abbildung 64: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} .
Stand der Technik ohne MFB mit variabler Pufferspeichergöße V_{PS}

6.5.2 Referenz mit MFB unter Variation der PufferspeichergroÙe

Im Gegensatz zur Variation der Solarthermie führt die Variation der Größe der Pufferspeicher zu einer Änderung der Speicherkapazität. Deutlich ist zu erkennen, dass die Wärmeerzeugung mit der Größe des Pufferspeichers ansteigt. Analog dazu steigen auch die Verluste des Pufferspeichers an, vgl. Abbildung 65. Beim Vergleich der Änderung dieser Wärmemengen zwischen den Varianten zeigt sich, dass in allen drei Fällen 80 % der zusätzlichen Wärmeerzeugung zur Deckung der zusätzlichen Verluste dienen. Im Gegensatz dazu nehmen die zusätzlichen solaren Erträge mit steigender PufferspeichergroÙe ab. Somit sinken auch die zusätzlichen solaren Erträge zur Verdrängung der Wärmeerzeugung der Wärmepumpe. Deren Erzeugung nähert sich asymptotisch einem Wert von $Q_{ST+Q_{WP}} = 2.700 \text{ kWh/a}$. Dieses Verhalten kann wieder auf die zeitliche Diskrepanz zwischen solarem Angebot und Bedarf, welcher nicht durch Speicherung in Übereinstimmung gebracht werden kann, zurückgeführt werden. Wie in den vorherigen Betrachtungen steigt $q_{MFB,heiz}$ von 24,1 auf 24,8 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ mit steigendem solarem Ertrag Q_{ST} .

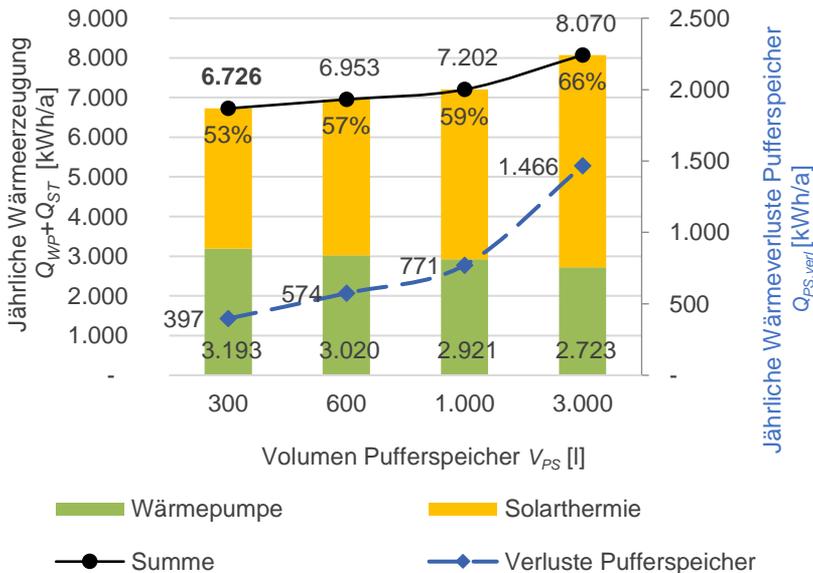


Abbildung 65: Jährliche Wärmeerzeugung Q_{ST+WP} :
Referenz mit MFB und variabler PufferspeichergroÙe V_{PS}

Diese Steigerung der solaren Erzeugung und die resultierende reduzierte Wärmeerzeugung der Wärmepumpe führen zu einem reduzierten elektrischen Bedarf, vgl. Abbildung 66. Der Großteil des Bedarfs an elektrischer Energie ist auf die Wärmepumpe zurückzuführen. Daher resultiert analog zur Wärmeerzeugung der Wärmepumpe ein asymptotisches Verhalten. Die Reduktion des gesamten elektrischen Bedarfs von $W_{el,tot} = 1.263$ auf $1.013 \text{ kWh}_{el}/a$ führt zu einer Steigerung der systemischen Effizienz von $JAZ_{tot} = 6,1$ auf $9,4$. Die der Wärmepumpe steigt von $JAZ_{WP} = 2,9$ auf $3,2$.

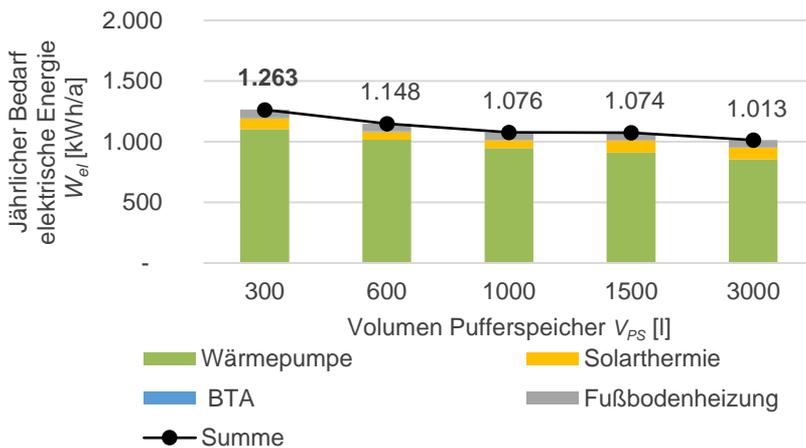


Abbildung 66: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie W_{el} .
Referenz mit MFB und variabler Pufferspeichergöße V_{PS}

Da große Pufferspeicher von deutlich über $V_{PS} = 300 \text{ l}$ durch den Einsatz von MFB substituiert werden sollen, wird die Pufferspeichergöße auf $V_{PS} = 300 \text{ l}$ festgesetzt. Die Ergebnisse mit größeren Pufferspeichern werden aber zur weiteren Einordnung der anderen Simulationsergebnisse herangezogen.

6.6 Kaltes Klima und theoretisches Minimum

6.6.1 Theoretisches Minimum

Wird die Wärmeerzeugung des Referenzgebäudes mit dem Stand der Technik zur Ermittlung des minimalen Bedarfs genutzt, ergibt sich ein HWB von $HWB = 6.289 \text{ kWh}/a$, vgl. Abbildung 63. Wird eine Effizienz der Solarthermie von $JAZ_{ST} = JAZ_{tot} = 25 \text{ kWh}/\text{kWh}_{el}$ angenommen, ergibt sich ein theoretischer minimaler gesamter Bedarf an elektrischer Energie für die Solarthermie von $W_{el,ST} = 252 \text{ kWh}_{el}/a$. Dieser liegt somit deutlich unter dem Wert der Referenz ohne MFB mit $W_{el,ST} = 1.716 \text{ kWh}_{el}/a$.

6.6.2 Kaltes Klima

Durch die Änderung des Klimas steigt der Wärmeumsatz und somit auch die Wärmeerzeugung des Gebäudes von rd. $Q_{ST+WP,ZürichP} = 6.726 \text{ kWh/a}$ auf $Q_{ST+WP,StockholmP} = 9.312 \text{ kWh/a}$, vgl. Abbildung 67. Wie beim mitteleuropäischen Klima steigt die solarthermische Erzeugung von $Q_{ST} = 1.698$ auf 3.385 kWh/a , was einem solaren Deckungsgrad an der Wärmeerzeugung von $\eta_{sol} = 18$ bzw. 35% entspricht. Analog steigt der Wärmeumsatz durch die Nutzung der MFB um 4% . Die MFB nehmen $Q_{MFB} = 2.174 \text{ kWh/a}$ auf, wodurch sich der Einsatz der Fußbodenheizung von $Q_{FBH} = 8.917$ auf 6.479 kWh/a reduziert. Durch das kältere Klima sinkt die Heizleistung des MFB auf $q_{MFB,heiz,Ref} = -21,6$ und steigt durch die Aktivierung auf $27,0 \text{ kWh/(m}^2\cdot\text{a)}$.

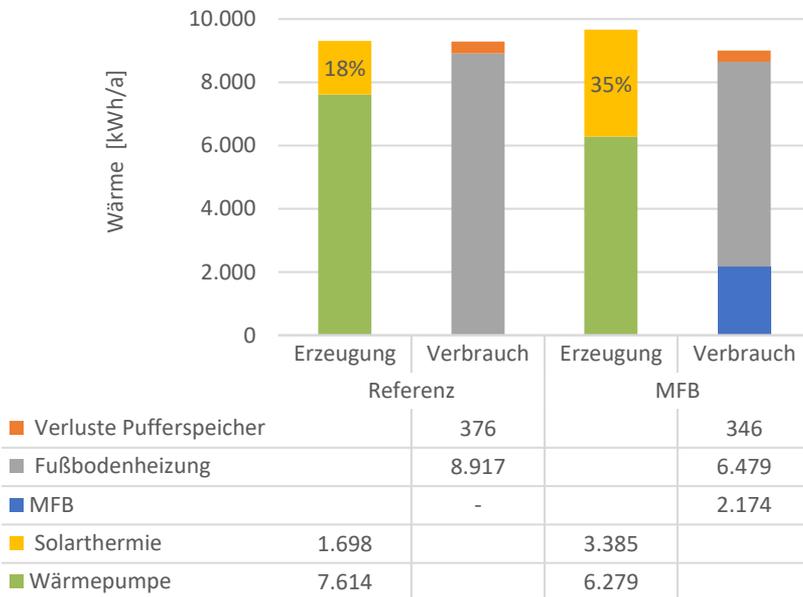


Abbildung 67: Jahreswärmebilanz mit und ohne MFB im kalten Klima

Der gesteigerte Wärmeumsatz auf Grund des kälteren Klimas führt auch zu einem höheren elektrischen Bedarf. Dieser steigt der gesamte elektrische Bedarf von $W_{el,tot,Zürich} = 1.306$ auf $3.112 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$. Durch den Einsatz der MFB sinkt dieser auf $W_{el,tot,Stockholm} = 2.590 \text{ kWh}_{el}/\text{a}$. Bezogen auf die erzeugten Wärmen, sinkt die systemische Effizienz durch das kältere Klima von $JAZ_{tot,Ref} = 3,9$ auf $3,4$. Durch den Einsatz der MFB sinkt dieser von $JAZ_{tot} = 6,1$ auf $4,2$.

Somit zeigen beim kalten Klima die grundsätzlich gleichen Mechanismen und Effekte wie für das gemäßigte Klima wirken.

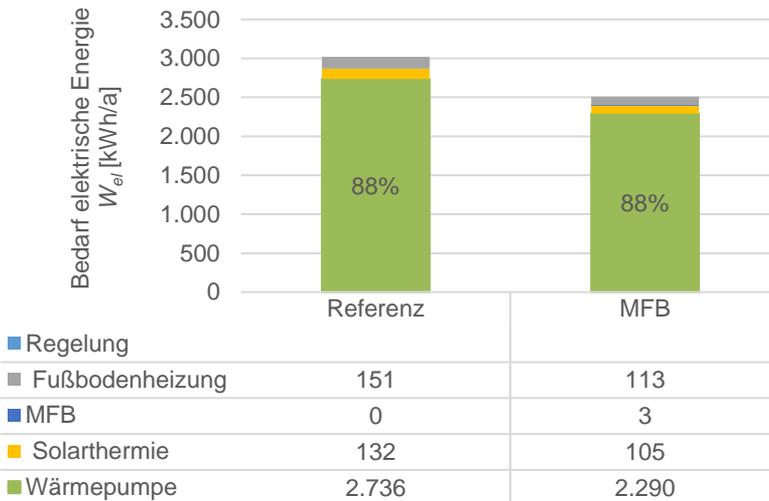


Abbildung 68: Jährlicher elektrischer Bedarf W_{el} mit und ohne MFB im kalten Klima

6.7 Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse

6.7.1 Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und Eingrenzung der Parameter für die weitere Betrachtung

Zur Ableitung möglichst allgemeingültiger Aussagen und Empfehlungen zur Auslegung werden die Einflüsse der untersuchten Parameter zusammengefasst. Zugleich sollen auch möglichst praxisgerechte Empfehlungen abgeleitet werden, was u. a. durch eine Reduktion der Eingangswerte erreicht wird. Daher werden in einem ersten Schritt die in den Abschnitten 6.2 bis 6.4 gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Parameter auf den Bedarf an elektrischer Energie in einer grafisch zusammengefasst, vgl. Abbildung 69. Zur besseren Einordnung der einzelnen Bedarfe wurden diese zum einen auf den Bedarf der Referenz mit MFB normiert. Zum anderen wurden diese nach der Gruppierung aus Kapitel 3 untergliedert.

Abbildung 69 zeigt, dass die Parameter, welche die Größe und Orientierung des MFB betreffen (grau), einen signifikanten Einfluss von 80 bis 130 %, bezogen auf den gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ der „Referenz mit MFB“ haben. Im Gegensatz dazu weisen die Eigenschaften der Tragschicht (blau) mit 95 bis

105 % einen deutlich geringeren Einfluss auf. Während die Erhöhung der Außendämmung nur zu vernachlässigbaren Einsparungen führt, führt eine Reduktion zu einer deutlichen Steigerung des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie $W_{el,tot}$ auf bis zu 150 %. Die Nutzung einer Innendämmung resultiert in jedem Fall in höheren Bedarfen von bis zu +10 %. Art und Geometrie der Aktivierung weisen einen ähnlich geringen Einfluss von maximal +10 % auf. Ähnlich groß wie der Einfluss der Dämmung fällt auch der Einfluss der TGA aus. Eine kleinere oder weniger nach Süden ausgerichtete Solarthermie führen zu deutlich geringeren solaren Ertrag Q_{ST} und auf bis zu 145 % erhöhtem gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$. Analog führen mehr nach Süden ausgerichtete oder größere Kollektoren sowie größere Pufferspeicher zu geringeren Bedarfen an elektrischer Energie von bis zu -20 %. Der Einfluss der solaren Strahlung auf das MFB ist vernachlässigbar.

Der große Einfluss der Solarthermie schlägt sich auch in der systemischen Effizienz nieder, welche mit steigendem solarthermischem Ertrag von $JAZ_{tot} = 3,4$ auf 9,4 steigt. Die Effizienz der Wärmepumpe liegt bei allen Varianten bei $JAZ_{WP} = 2,9$ bis 3,0.

Daher lässt sich die Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter reduzieren. Hierzu werden zum einen alle Parameter, die einen Einfluss von weniger als 5 % haben, vernachlässigt. Zum anderen werden die Parameter festgesetzt, welche durch eine Abweichung von Stand der Technik oder regulatorischen Anforderung zu einer Verschlechterung führen.

Somit sind die folgenden Eigenschaften der MFB und der TGA im Folgenden als variable Parameter zu berücksichtigen. Alle anderen Parameter werden mit denen in Kapitel 4 dargelegten Werten als konstant angenommen und nicht weiter betrachtet.

Multifunktionale Bauteile

- Orientierung nach Norden und Nord-Osten
- Anteil der Fläche der aktivierten Außenwand

Technische Gebäudeausrüstung

- Orientierung des Kollektors
- Größe des Kollektors

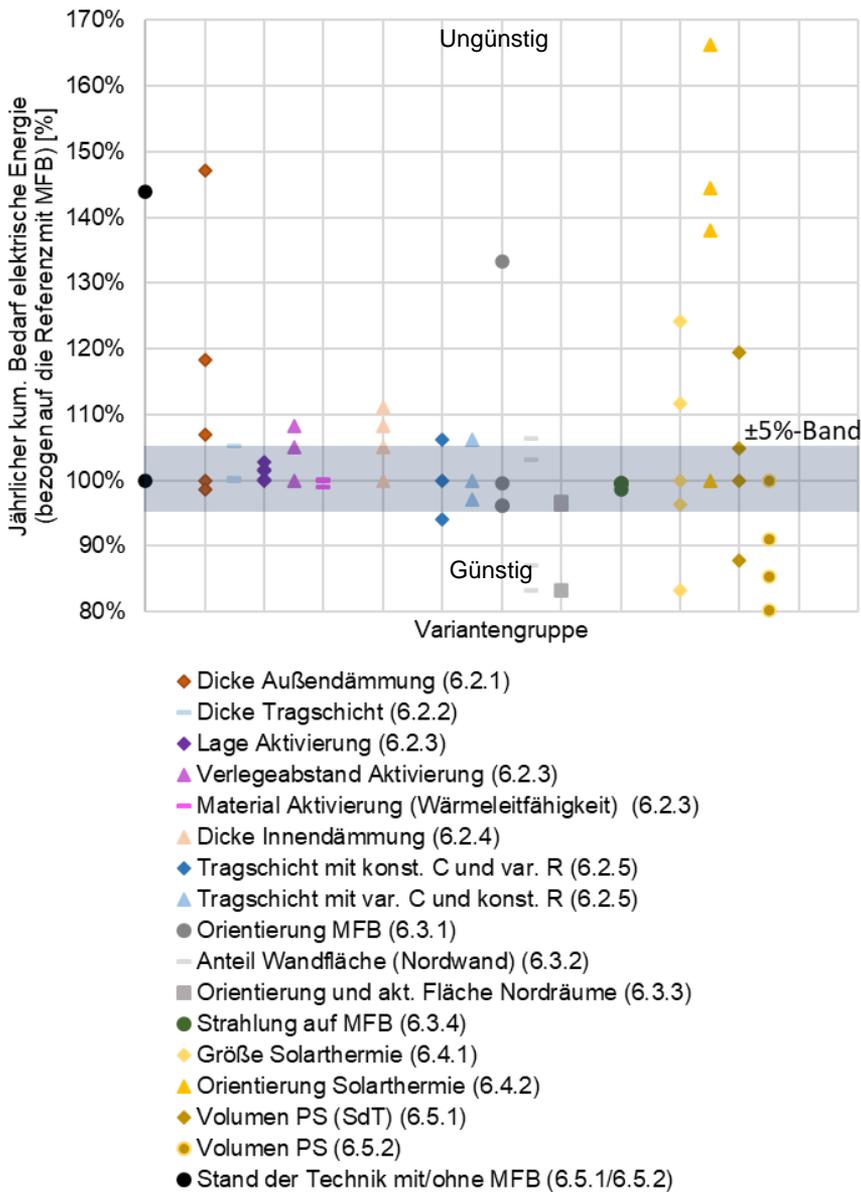


Abbildung 69: Übersicht des relativen Einflusses der untersuchten Parameter auf den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie bezogen auf die Referenz mit MFB

6.7.2 Gleichung zur Beschreibung der eingegrenzten und interpolierten Simulationsergebnisse

Basierend auf den Simulationsergebnissen aus Abbildung 70 wird eine vorläufige Empfehlung zur Auslegung der MFB als Fassade der nördlichen Räume erstellt. Diese umfasst nur die Einsparungen im Betrieb durch die Nutzung der MFB, nicht aber die anderen Phasen im Lebenszyklus. Die Gleichung gilt auch, wenn die anderen Außenwände des entsprechenden Raumes als MFB ausgebildet sind, vgl. Absatz 6.3.3.

Wird eine ausreichende Größe des MFB, hier von 16 % der *NUF* vorausgesetzt, können die Zusammenhänge zwischen Kollektorgröße und Orientierung und dem gesamten jährlichen Bedarf an elektrischer Energie sowie dem jährlichen Ertrag der Solarthermie mit Hilfe von drei Polynomen genähert werden, vgl. Abbildung 70. Bei kleineren aktivierten Flächen wird die Verfügbarkeit der Speicherkapazität maßgebend und werden daher nicht weiter betrachtet. Die Struktur der Gleichung ergibt sich aus der für die solare Einstrahlung auf eine geneigte Fläche nach z. B. *Quaschnig 2011*. Die trigonometrische Form wird mit einem Polynom angenähert, also einer Taylor-Reihe. Somit kann eine Gleichung zur Bestimmung dieser beiden Größen hergeleitet werden, vgl. Gleichung (19) und Gleichung (20).

$$\begin{aligned}
 W_{el,tot} = & \left(-\frac{1,67}{100.000} * O^2 - \frac{44,22}{100.000} * O + 0,2667 \right) * A_{ST}^2 \\
 & + \left(\frac{2,31}{1.000} * O^2 + \frac{36,4}{1.000} * O - 32,918 \right) * A_{ST} \\
 & + \left(\frac{21,1}{1000} * O^2 - \frac{93,33}{1.000} * O + 1.974,3 \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{ST,tot} = & \left(-\frac{1,8463}{100.000} * O^2 - \frac{22,2778}{100.000} * O - 0,3339 \right) * A_{ST}^2 \\
 & + \left(-\frac{377,5370}{100.000} * O^2 - \frac{37,2833}{1.000} * O + 55,315 \right) * A_{ST} \\
 & + \left(-\frac{39,8352}{1.000} * O^2 - \frac{179,3888}{1.000} * O + 1287,1 \right)
 \end{aligned} \tag{20}$$

mit:

A_{ST} = Kollektorfläche Solarthermie [m²]

O = Orientierung Kollektorfläche (-90 = West, 0 = Süd, 90 = Ost)

Das Bestimmtheitsmaß, also der mittlere Abstand der Simulationsergebnisse zur Funktion als Qualitätskriterium, beträgt 99,75 %. Bei aktivierten Flächenanteilen über 16 % der *NUF* bzw. 50 % der nördlichen Fassade ergeben sich leicht

höhere solare Erträge sowie leicht geringere elektrische Bedarfe. Die gewählte Auslegung mit 16 % der NUF stellt eine Rundung zur sicheren Seite dar.

6.7.3 Graphische Darstellung der eingegrenzten Simulationsergebnisse

Für die vollständige und teilweise Aktivierung der Fassade der nördlichen Räume kann die Abhängigkeit des gesamten jährlichen Bedarfs an elektrischer Energie dargestellt werden, vgl. Abbildung 70. Die Interpolation zwischen den Simulationsergebnissen ist zulässig, da der Zusammenhang zwischen solarem Ertrag, Bedarf an elektrischer Energie und Größe des Solarthermie-Kollektors mathematisch stetig, also ohne Sprünge, ist.

Deutlich ist der Unterschied zwischen einer Orientierung nach Osten und Westen zu erkennen, wie in Absatz 6.4.2 bereits beschrieben. Mit steigender Kollektorgröße weist ein nach Westen orientierter Kollektor 10 bis 15 % mehr solaren Ertrag und somit einen reduzierten jährlichen gesamten elektrischen Bedarf auf. Klar erkennbar ist ebenfalls, dass die Unterschiede zwischen einer vollständigen und halben Aktivierung der nördlichen Fassade vernachlässigbar sind; unabhängig von Größe der MFB oder des Solarthermie-Kollektors. In Bezug auf die Kollektorgröße zeigt sich das bereits oben beschriebene asymptotische Verhalten. Dieses ist auf den asymptotisch steigenden solaren Ertrag mit steigender Kollektorgröße zurückzuführen.

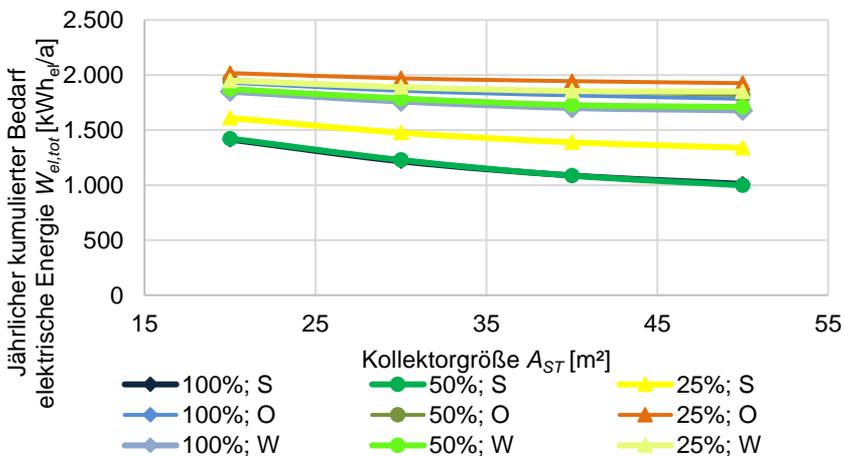


Abbildung 70:
 Jährlicher elektrische Energiebedarf $W_{el,tot}$ bei Aktivierung der nördlichen Fassade
 (Prozentsatz ist der Anteil der Nordfassade, der als MFB ausgebildet ist und
 Orientierung des Kollektors O_{ST})

6.7.4 Einordnung der Ergebnisse anhand der äquivalenten PufferspeichergroÙe

Wie in Abbildung 64 in Absatz 6.5.1 dargestellt, variiert der Bedarf an elektrischer Energie der Varianten ohne MFB von $W_{el,tot} = 1.146$ bis 1.880 kWh_{el}/a. Dies bedeutet, dass alternativ zur Nutzung der MFB der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot}$ auch durch die Vergrößerung des V_{PS} reduziert werden kann. Im Umkehrschluss folgt, dass der Nutzen der MFB auch einer Reduktion des V_{PS} zugeordnet werden kann. Diese Reduktion führt zu den eingangs beschriebenen Vorteilen, vor allem reduzierte Platz- bzw. Volumenbedarfe und geminderte mechanische Lasten sowie Kosten. Dieses V_{PS} wird als äquivalentes Pufferspeichervolumen $V_{PS,\ddot{a}q.}$ bezeichnet.

Wird dem gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ in Abbildung 64 in Absatz 6.5.1 die entsprechenden Bedarfe bei Nutzung von MFB, vgl. Absatz 8.1.2 gegenübergestellt, kann der Nutzen der MFB in eine äquivalente PufferspeichergroÙe ausgedrückt werden. Für einer Orientierung des Kollektors nach Süden, $A_{ST} = 40$ m² und einer MFB als Außenwand der nördlichen Räume mit $A_{MFB}/NUF > 0,16$ kann die $V_{PS,\ddot{a}q.}$ mit Gleichung (21) für 1.150 kWh_{el}/a $< W_{el,tot} < 1.900$ kWh_{el}/a genähert werden.

$$V_{PS,\ddot{a}q.} = -19,2 \cdot 10^{-6} \cdot W_{el,tot}^3 + 94,6 \cdot 10^{-3} \cdot W_{el,tot}^2 - 155,6 \cdot W_{el,tot} + 85.950 \quad (21)$$

Wird eine Orientierung des Kollektors nach Süden und eine Kollektorfläche von $A_{ST} = 40$ m² angenommen, führt ein Pufferspeicher mit $V_{PS} = 300$ l Volumen und eine Ausbildung von mind. der halben nördlichen Fassade zu äquivalenten PufferspeichergroÙen von $V_{PS,\ddot{a}q.} = 2.900$ l, bei gleichem gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$. Das benötigte Pufferspeichervolumen kann also auf rd. 10 % reduziert werden.

6.8 Fazit

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass primär die bereitgestellte Wärmemenge und der Wärmebedarf des an das MFB angrenzenden Raum für die Effizienz entscheidend sind. Die benötigte Speicherkapazität der MFB kann leicht erreicht werden und führt mit steigender Größe der MFB zu keinen weiteren Vorteilen. Zudem konnte gezeigt werden, dass für viele bauliche Parameter, wie z. B. die Lage der Aktivierung, der Stand der Technik einen günstigen Wert darstellt oder der Einfluss vernachlässigbar ist, wie z. B. beim Material der Aktivierung. Zudem liegen Gleichungen zur überschlägigen Dimensionierung der Anlagentechnik aus energetischer Sicht vor. Für das Referenzgebäude mit einem nach Süden orientierten Kollektor von $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ konnte durch die Nutzung der MFB das benötigte Pufferspeichervolumen von rd. $V_{PS} = 3.000 \text{ l}$ auf 300 l , also auf 10% , reduziert werden, bei gleichem gesamtem elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$.

Bezogen auf die erste Forschungsfrage [I.] konnte gezeigt werden, dass durch die Nutzung von MFB die Effizienz der Wärmezeugung gesteigert und die Transmissionswärmeverluste über das MFB reduziert werden.

Analog konnte für die zweite Forschungsfrage [II.] gezeigt werden, dass eine Dämmstoffdicke (WLG 040) von $d_{Dämm} = 24 \text{ cm}$ und eine Dicke der aktivierten Schale von $d_{TS} = 20 \text{ cm}$ ausreichend sind und Letztere nur einen geringen Einfluss hat.

Der Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine Steigerung des Ertrages der Solarthermie-Anlage zu einer höheren Deckung des Wärmebedarfs durch die MFB führt, was die dritte Forschungsfrage [III.] beantwortet.

In der Gleichung zur überschlägigen Dimensionierung wurden die wesentlichen Parameter zusammengefasst und somit die vierte Forschungsfrage [IV.] geklärt.

7 Ökonomische und ökologische Bilanzierung

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, setzt sich die ökonomische und ökologische Bilanzierung aus den Phasen Herstellung & Errichtung A, Nutzung B, Entsorgung C sowie Gutschriften und Lasten außerhalb des Systems D zusammen. Die in Kapitel 6 ermittelten jährlichen elektrischen Bedarfe sind der Phase „Nutzung B“ zuzuordnen. Die ferner zu bilanzierenden Mengen und Prozesse ergeben sich aus der initialen Herstellung des Gebäudes sowie den vorgelagerten Prozessen sowie dem Rückbau, der Verwertung und dem Recycling am Ende des Lebenszyklus des Gebäudes. Auf Grundlage der relevanten Norm *DIN EN 15804* wurde eine Massenbilanz erstellt. In diese gehen die einzelnen Mengen, wie z. B. Außenwände aus Beton mit WDVS, und die benötigten Prozesse, z. B. Wartung und Instandhaltung, ein. Die Indikatoren, hier THG-Emissionen ausgedrückt als GWP100 und BW, ergeben sich aus dem Mengengerüst und den entsprechenden Faktoren vgl. Absatz 0.

7.1 Ökonomische Bilanz LCC

Die ökonomische Betrachtung erfolgt auf Grundlage des in Kapitel 3 beschriebenen bottom-up-Ansatzes und einer LCC. Die verwendeten Kostenkennwerte stammen aus *BKI (Hrsg.) 2020* und bilden somit das Preisniveau in 2019, also vor der Preissteigerungen in den Jahren 2020 bis 2023 ab.

7.1.1 Lebenszyklusanalyse der Referenz mit MFB und der ohne MFB

Analog zur energetischen Betrachtung in Abschnitt 6.1 wird die Auswirkung der Nutzung der MFB auf die LCC untersucht. Die Bewertung der Varianten erfolgt anhand des BW aller Zahlungen. Wie in Absatz 2.4.5 beschrieben, erfolgt die Bilanzierung anhand des *bottom-up*-Ansatzes. Hierzu wird eine Variante mit MFB als gesamte nördliche Wand einer identischen Variante ohne MFB gegenübergestellt. Beide Varianten haben einen nach Süden orientierten Kollektor mit $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ und einen Pufferspeicher von $V_{PS} = 300 \text{ l}$.

Abbildung 71 zeigt, dass in der Referenz ohne MFB der BW der Investition bei 546.100 € bzw. $3.900 \text{ €/m}^2_{\text{NUF}}$ liegt. Es entfallen 62.400 €, $450 \text{ €/m}^2_{\text{NUF}}$ bzw. 11 % des BW auf die Heizkosten. Mit 258.000 € bzw. $1.850 \text{ €/m}^2_{\text{NUF}}$ entfallen rd. 47 % auf den Reinvest und Abbruch. Die initiale Herstellung des Gebäudes schlägt mit 207.000 €, $1.480 \text{ €/m}^2_{\text{NUF}}$ bzw. 38 % zu buche. Die Kosten für P,I,W tragen mit 3 % zum BW der Lebenszykluskosten bei.

Durch die Nutzung der MFB sinkt der BW der Investitionen im Lebenszyklus auf rd. 538.200 € bzw. $3.840 \text{ €/m}^2_{\text{NUF}}$, wobei rd. 43.400 € bzw. $310 \text{ €/m}^2_{\text{NUF}}$ also rd. 8 % auf die Heizkosten entfallen. Die Kosten für Reinvest und Abbruch steigen

um rd. 8.700 € auf 267.100 €, was einem Anteil von 50 % oder 1.910 €/m²_{NUF} entspricht. Die initialen Herstellungskosten steigen um 2.300 € auf 209.300 € bzw. 1.500 €/m²_{NUF}, was einem Anteil von 39 % entspricht. Wie in der Referenz entfallen 3 % der Lebenszykluskosten auf P,I,W.

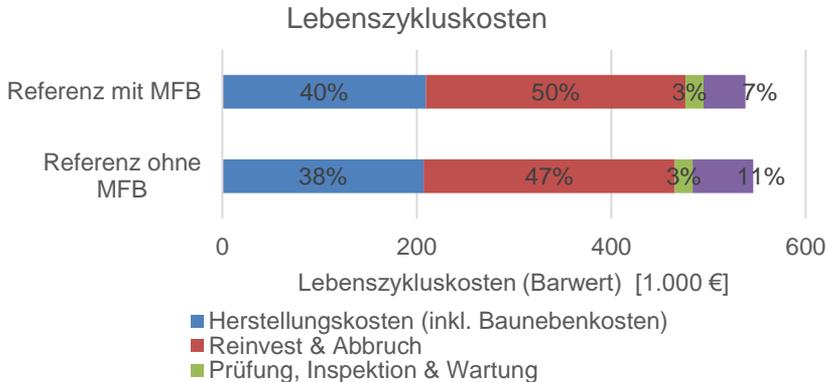


Abbildung 71: Lebenszykluskosten mit und ohne Aktivierung

Somit zeigt sich, dass in beiden Varianten primär die baulichen Maßnahmen (>90 %) zu den Lebenszykluskosten beitragen. Die Energiekosten tragen nur untergeordnet zu den gesamten Kosten im Lebenszyklus bei. Die Herstellung der MFB schlägt mit rd. 10.000 € bzw. 70 €/m²_{NUF} also rd. 1 % der Lebenszykluskosten zu Buche und kann daher als vernachlässigbar angenommen werden. Diese zusätzlichen Herstellungskosten können durch die eingesparte Energiekosten im Lebenszyklus von 75 Jahren amortisiert werden.

7.1.2 Ökonomische Bilanzierung mit Variation der TGA

Im Folgenden soll geprüft werden, ob durch die Reduktion der Kollektorfläche die Wirtschaftlichkeit, bezogen auf die Referenz ohne MFB, verbessert werden kann. In Anlehnung Abbildung 70 wird zudem der Einfluss der Orientierung des Kollektors und der Größe des MFB untersucht. Somit werden die in Absatz 6.7.2 energetisch untersuchten Varianten mit aktivierter Nordfassade ökonomisch bilanziert. Die Herstellungs- und Rückbaukosten sind hierbei nur von der Größe der Aktivierung sowie der Solarthermie-Anlage abhängig. Die Orientierung der Solarthermie-Anlage hat nur Einfluss auf die Heizkosten, nicht auf die Kosten der anderen Phasen des Lebenszyklus.

Folgende Abbildung 72 zeigt den Einfluss der Kollektorgröße und der MFB auf die Lebenszykluskosten. Deutlich ist das lineare Verhältnis zwischen Kosten und Kollektorgröße zu erkennen. Die BW aller betrachteten Zahlungen liegen zwischen 451.000 und 467.000 € bzw. 3.220 und 3.340 €/m²_{NUF} bei $A_{ST} = 20 \text{ m}^2$

Ökonomische und ökologische Bilanzierung

Kollektorfläche und steigen auf 551.00 bis 569.000 € bzw. 3.940 bis 4.060 €/m²_{NUF} und steigenden mit steigender Kollektorfläche an. Die Anteile der Heizungskosten liegen zwischen 3 und 7 % der gesamten Kosten. Während die Orientierung des Kollektors nach Osten oder Westen zu den höchsten Anteilen führt, folgt aus einer Orientierung nach Süden die geringsten Anteile. Diese korrelieren also mit dem solaren Ertrag. Da bei gleicher Orientierung und Größe des Kollektors sich nur die Heizkosten unterschieden, spiegelt sich dies auch in den gesamten Kosten wider.

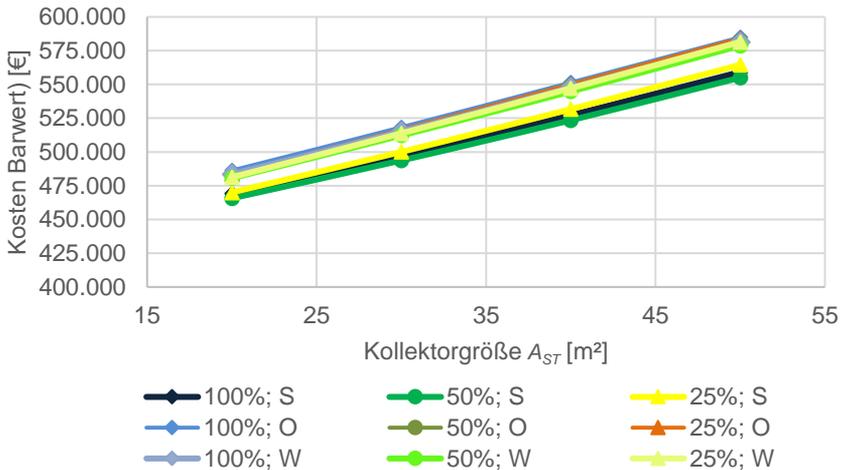


Abbildung 72: Einfluss der Fläche der MFB A_{MFB} und der Solarthermie A_{ST} auf die Lebenszykluskosten (Prozentsatz ist der Anteil der Nordfassade, der als MFB ausgebildet ist und Orientierung des Kollektors)

Somit kann zusammengefasst werden, dass die Solarthermie auch aus ökonomischer Sicht möglichst nach Süden orientiert werden sollte. Durch die Nutzung der MFB ergeben sich keine Vorteile gegenüber der Referenz ohne MFB.

7.2 Ökologische Bilanz LCA

Wie im Kapitel 3 beschrieben, basiert die LCA, wie die LCC auf einem *bottom-up*-Ansatz. Die hieraus gewonnen Mengen und Massen werden mit Hilfe der ökobaudat in THG-Emissionen umgerechnet.

7.2.1 Lebenszyklusanalysen einer Variante mit MFB und der Referenz ohne MFB

In der ökologischen Betrachtung zeigt sich, dass durch den Einsatz der MFB auch Einsparungen an THG-Emissionen erzielt werden. Im Gegensatz zur ökonomischen Bilanz enthält die ökologische Bilanz auch Gutschriften, welche das stoffliche Recycling und die energetische Verwertung der eingesetzten Stoffe berücksichtigen. Werden die Emissionen der Herstellung um diese Gutschriften reduziert, zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der ökonomischen Bilanzierung, bezogen auf die Anteile von Herstellung, Reinvest & Abbruch sowie Heizung, vgl. Abbildung 73. Während bei der Referenz rd. 56 t-CO₂-Äq. bzw. 61 % der THG-Emissionen auf die Beheizung entfallen, sinkt dieser Anteil durch die Nutzung der MFB auf 32 t-CO₂-Äq. bzw. 47 %. Wird die Gutschrift nicht berücksichtigt, sinkt der Anteil auf 27 bzw. 34 %. Diese Größenordnung deckt sich mit den Werten aus der Literatur aus Abschnitt 2.4.

Die MFB führen unter Vernachlässigung der Heizung und inkl. der Gutschriften für Rückbau und Entsorgung zu zusätzlichen THG-Emissionen von rd. 1,5 t-CO₂-Äq. Diesen stehen Einsparungen von rd. 23,6 t-CO₂-Äq. durch den reduzierten Betrieb der Wärmepumpe über den gesamten Lebenszyklus gegenüber.

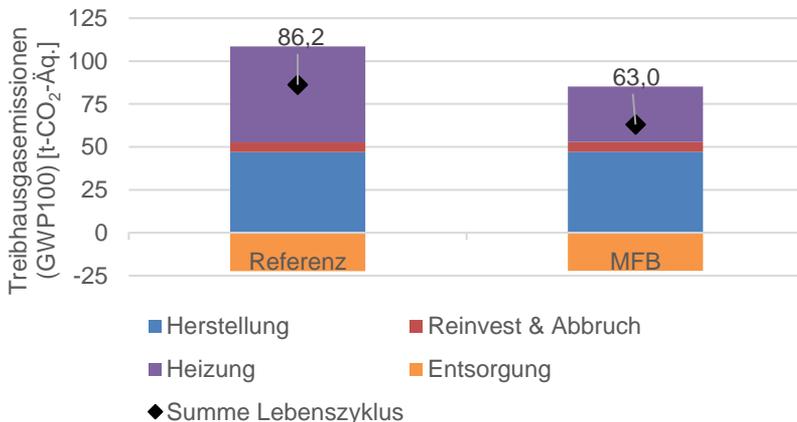


Abbildung 73: THG-Emissionen der Referenz und einer Variante mit MFB

7.2.2 Ökologische Bilanzierung mit Variation der TGA

Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, korrelieren die Einsparungen an elektrischer Energie und somit THG-Emissionen mit dem solaren Ertrag des Heizsystems. Diesen Einsparungen stehen die zusätzlichen Emissionen v. a. für die Herstellung gegenüber. Abbildung 74 zeigt den Einfluss der THG-Emissionen im gesamten Lebenszyklus in Abhängigkeit der Kollektorfläche und der Fläche der MFB. Deutlich ist eine Einteilung in drei Gruppen, ähnlich wie beim Bedarf an elektrischer Energie und den Lebenszykluskosten zu erkennen, vgl. Abbildung 70 und Abbildung 72.

Im Gegensatz zu den Lebenszykluskosten weisen alle Kurven ein lokales Minimum für die betrachteten Kollektorgrößen auf. Während alle Varianten mit einem nach Süden orientierten Kollektor ein Minimum bei $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ Kollektorfläche aufweisen, wiesen die Varianten mit nach Westen orientierten Kollektoren und aktivierten Flächen von $A_{MFB} = 23,5$ bzw. 47 m^2 ein lokales Minimum bei $A_{MFB} = 30 \text{ m}^2$ auf. Bei allen anderen Varianten steigen die THG-Emissionen im Lebenszyklus mit steigender Kollektorgröße. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zusätzlichen Emissionen aus der Herstellung der Solarthermieanlage nicht im Betrieb kompensiert werden können.

Auffällig ist der Unterschied zwischen Anlagen, welche sich nur in der Orientierung des Kollektors unterscheiden. Orientierungen nach Süden weisen deutlich höhere solare Erträge und somit reduzierte Einsätze der Wärmepumpe auf. Dasselbe Verhalten zeigt sich bei Orientierungen nach Osten und Westen, vgl. Absatz 6.4.2. Der reduzierte elektrische Bedarf bei einer Orientierung nach Westen führt zu einer deutlich besseren THG-Bilanz.

Aufgrund der geringen Emissionen während der Herstellung führt auch eine Verdopplung der aktivierten Fläche von $A_{MFB} = 23,5$ auf $A_{MFB} = 47 \text{ m}^2$, unabhängig von der Orientierung des Kollektors, zu keinen signifikanten Änderungen vgl. mit der THG-Bilanz in Abbildung 74.

Bezogen auf die Referenz mit einer nach Süden orientierten Kollektorfläche von $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ führt jede Nutzung der MFB zu signifikanten Reduktionen von 14 bis 25 % an THG-Emissionen im Lebenszyklus für Kollektorgrößen zwischen $A_{ST} = 20$ und 50 m^2 . Für die Orientierung nach Osten und Westen reduzieren sich die Einsparungen signifikant auf 2 bis 9 % bzw. 3 bis 10 %.

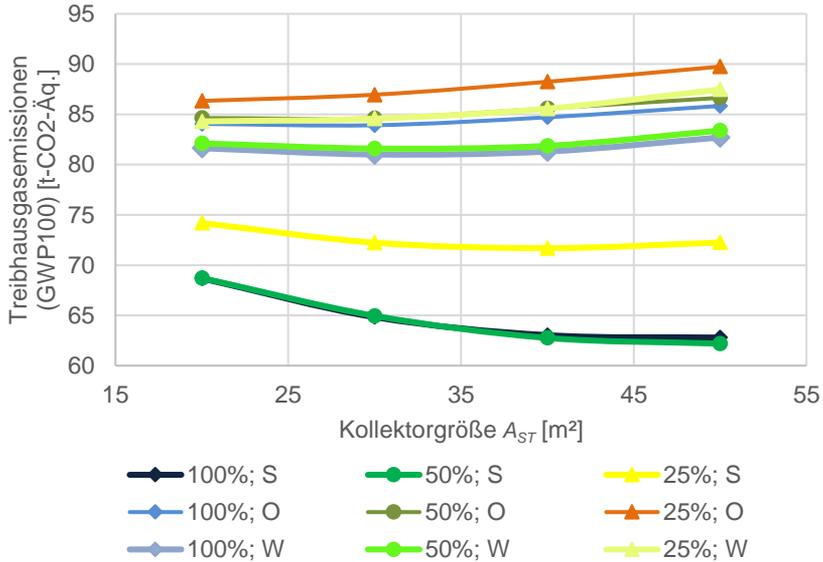


Abbildung 74: Einfluss der Fläche der MFB A_{MFB} und der Solarthermie A_{ST} auf die THG-Emissionen im Lebenszyklus (Prozentsatz ist der Anteil der Nordfassade, der als MFB ausgebildet ist und Orientierung des Kollektors)

Zusammenfassend zeigt die ökologische Bilanzierung, dass der Einsatz von MFB nur ökologische Vorteile bringt, wenn der Kollektor nach Süden orientiert ist. Dies bedeutet im Umkehrschluss und überraschenderweise, dass die zusätzlichen Emissionen für die Produktion des Kollektors nicht bei einer Orientierung nach Osten oder Westen im Betrieb vermeiden werden können. Der Nutzen der MFB steigt deutlich mit dem solaren Angebot, welches wiederum primär durch die Orientierung des Kollektors beeinflusst wird. Daher führen nach Süden orientierte Kollektoren zu den größten Einsparungen an THG-Emissionen von bis zu 25 %. Ist der Kollektor nach Osten oder Westen orientiert, fallen die Einsparungen durch den Einsatz von MFB mit 2 bis 10 % deutlich geringer aus. Nach Westen orientierte Kollektoren führen zu höheren Einsparungen als nach Osten orientierte Kollektoren. Bei gegebener Orientierung des Kollektors sollte die aktivierte Fläche mindestens $A_{MFB} = 23,5 \text{ m}^2$ betragen, größere Flächen führen nur zu vernachlässigbaren Einsparungen.

Allgemein korreliert die ökologische Bewertung wie die ökonomische stark mit dem Bedarf an elektrischer Energie, da auf diesen ein Großteil der zu bilanzierenden Kosten bzw. Emissionen entfallen.

7.3 Sensitivität der Zinssätze

Analog zu den konstruktiven Parametern und Eingangswerten aus Kapitel 5 unterliegen auch die ökonomischen Eingangsdaten gewissen Unsicherheiten. Um diese bewerten zu können, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, vgl. Absatz 2.4.6.

Im Folgenden wird exemplarisch der Einfluss der Zinssätze für Konstruktion, TGA und Energie auf die Lebenszykluskosten untersucht.

Initial werden die Einflüsse der Diskontierungzinssätze auf die Lebenszykluskosten der in Absatz 6.7.2 dargestellten Varianten mit variabler Kollektorgroße und -orientierung sowie unterschiedlichen Größen des MFB untersucht. Die Lebenszykluskosten werden wie folgt gruppiert:

- Alle Varianten (blau), Varianten mit $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ Kollektorfläche und vollständiger Ausbildung der nördlichen Fassade als MFB (grün)
- Referenz (rot)
- Mittelwert aller Varianten (Strich, blau)

Die Diskontierungzinssätze und Preissteigerungsraten werden, bezogen auf den initialen Wert jeweils verdoppelt und halbiert.

Abbildung 75 zeigt den Einfluss der Preissteigerung für Konstruktionskosten auf die Lebenszykluskosten. Die Spannen der Lebenszykluskosten für Preissteigerungsraten von 1 bzw. 2 % liegt bei 118.000 € bzw. 843 €/m²_{NUF} und steigt weiter auf 121.000 € bzw. 864 €/m²_{NUF} für eine Preissteigerungsrate von 4 %. Dies ist auf den geringen Anteil der Konstruktionskosten nach der Herstellung zurückzuführen. Dies bedeutet, dass ein geringes Preisänderungsrisiko durch steigende Reinvestitionskosten besteht. Die mittleren Lebenszykluskosten steigen aus demselben Grund mit steigender Preissteigerungsrate von 489.000 €, 510.000 € bzw. 612.000 €, respektive bzw. 3.493 €/m²_{NUF}, 3.643 €/m²_{NUF} bzw. 4.371 €/m²_{NUF}. Die minimalen und maximalen Kosten liegen bei 431.000 € bzw. 674.000 €, respektive 3.079 €/m²_{NUF} bzw. 4.814 €/m²_{NUF}. In Abbildung 75 sind vier Gruppen je Preissteigerungsrate zu erkennen. Diese Gruppen ergeben sich aus den vier Kollektorgrößen. Dieser Einfluss resultiert aus den vergleichsweise hohen Kosten für Reinvest während des Lebenszyklus mit rd. 7.000 € bzw. 50 €/m²_{NUF} je 10 m² Kollektorfläche. Dies entspricht einem Anteil von bis zu 15 % bezogen auf die gesamten Kosten für den Reinvest. Bezogen auf die gesamten Lebenszykluskosten ergeben sich Anteile von 6 %. Somit liegen diese im Bereich der Energiekosten.

Die Lebenszykluskosten der optimierten Variante variieren zw. 504.000 € und 627.000 € respektive 3.600 und bzw. 4.479 €/m²_{NUF} und steigen ebenfalls mit steigender Preissteigerungsrate. Im Vergleich dazu weist die Referenz Lebenszykluskosten von 501.000 €, 521.000 € bzw. 623.000 € respektive 3.579 €/m²_{NUF}, 3.721 €/m²_{NUF} bzw. 4.450 €/m²_{NUF} auf.

In allen Varianten liegt der Anteil der Heizkosten bei 2 bis 5 %.

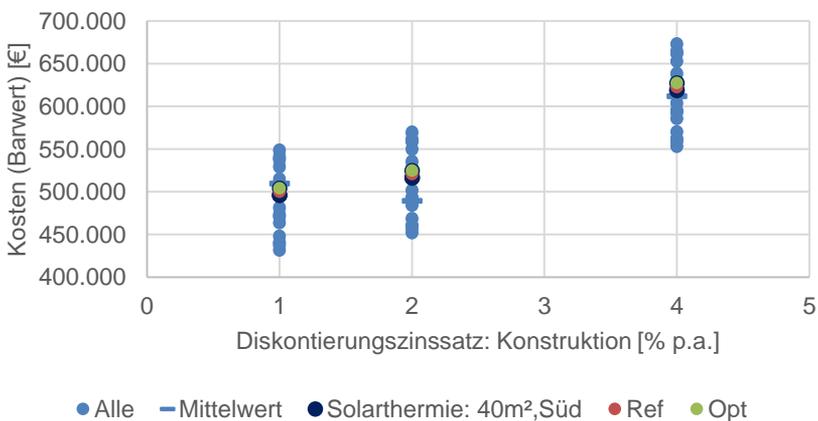


Abbildung 75: Einfluss des Diskontierungszinssatzes für Konstruktion & Geldanlage auf die Lebenszykluskosten

Ökonomische und ökologische Bilanzierung

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei einer variablen Preissteigerung für die Energiekosten, vgl. Abbildung 76. Die Spanne der Lebenszykluskosten liegt bei 118.000 €, 119.000 € bzw. 124.000 €, respektive 843, 850 bzw. 886 €/m²_{NUF} und im Bereich derer bei variabler Preissteigerung der Konstruktionskosten. Das Verhalten ist hier allerdings auf die Energiekosten zurückzuführen, die mit steigender Preissteigerung ansteigen. Der Mittelwert der Lebenszykluskosten steigt von 503.000 € über 510.000 € auf 539.000 €, also um 36.000 € bzw. 7 % an. Auf die NUF bezogen bedeutet dies eine Steigerung von 3.593 €/m²_{NUF} über 3.643 €/m²_{NUF} auf 3.850 €/m²_{NUF}. Die minimalen und maximalen Kosten liegen bei 445.000 € bzw. 601.000 €, respektive 3.179 bzw. 4.293 €/m²_{NUF}.

Die Lebenszykluskosten der optimierten Variante variieren zw. 520.000 €, 525.000 € und 544.000 €, respektive 3.714 €/m²_{NUF}, 3.750 €/m²_{NUF} und 3.886 €/m²_{NUF} bei einer Preissteigerung von 1, 2 bzw. 4 % p. a.. Die Referenz weist Lebenszykluskosten von 513.000 €, 521.000 € bzw. 553.000 €, respektive 3.664 €/m²_{NUF}, 3.721 €/m²_{NUF} bzw. 3.950 €/m²_{NUF} auf.

Der Anteil der Energiekosten an den gesamten Kosten steigt mit steigendem Preisindex von 2 bis 5 % über 3 bis 7 % auf 6 bis 13 % an.

Somit zeigt sich, dass eine Steigerungsrate der Energiepreise von über rd. 3 % p. a. zu einem ökonomischen Nutzen der MFB führt. Die Preissteigerung für Endverbraucher zwischen 2009 und 2019 von Erdgas lag bei rd. -0 %, die von elektrischer Energie bei rd. 25 %.

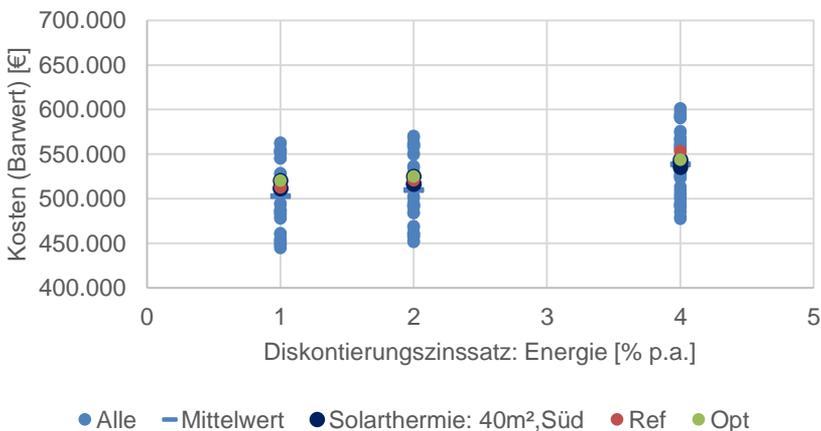


Abbildung 76: Einfluss des Diskontierungszinssatzes der Energiekosten auf die Lebenszykluskosten

Abbildung 77 zeigt den Einfluss der Preissteigerungsrate für die technische Gebäudeausrüstung auf die Lebenszykluskosten. Dieser ist deutlich größer als die der anderen Preisindizes. Die Spannen der Lebenszykluskosten liegen bei 77.000 €, 119.000 € bzw. 362.000 €, respektive 550 €/m²NUF bzw. 2.586 €/m²NUF, und sind somit deutlich volatiler als die anderen Kostenspannen. Genauso wie die Kostenspannen nehmen auch die Lebenszykluskosten mit steigender Teuerungsrate für TGA zu. Deren Mittelwert steigt von 415.000 € über 510.000 € auf 1.049.000 €, respektive bzw. 2.964 €/m²NUF über 3.643 €/m²NUF auf bzw. 7.493 €/m²NUF. Die minimalen und maximalen Kosten liegen bei 377.000 € bzw. 1.231.000 € oder auf die Nutzfläche bezogen bei 2.693 €/m²NUF bis 8.793 €/m²NUF.

Dieser Zusammenhang ist auf die Kosten für die Solarthermieanlage zurückzuführen, deren Anteil auf bis zu 46 % der Lebenszykluskosten ansteigt. Die Solarthermie hat daher das größte Preisänderungsrisiko aller betrachteten Komponenten und Bauteile.

Die Lebenszykluskosten der optimierten Variante variieren zw. 520.000 €, 525.000 € und 544.000 €, respektive 3.714 €/m²NUF, 3.750 €/m²NUF und 3.886 €/m²NUF. Diesen stehen Lebenszykluskosten von 513.000 €, 521.000 € und 553.000 €, respektive 3.664 €/m²NUF, 3.721 €/m²NUF bzw. 3.950 €/m²NUF, der Referenz gegenüber. Dies bedeutet auch, dass auch bei einer Preissteigerung für TGA von über 3 % p. a. die Nutzung der MFB ökonomisch vorteilhaft ist.

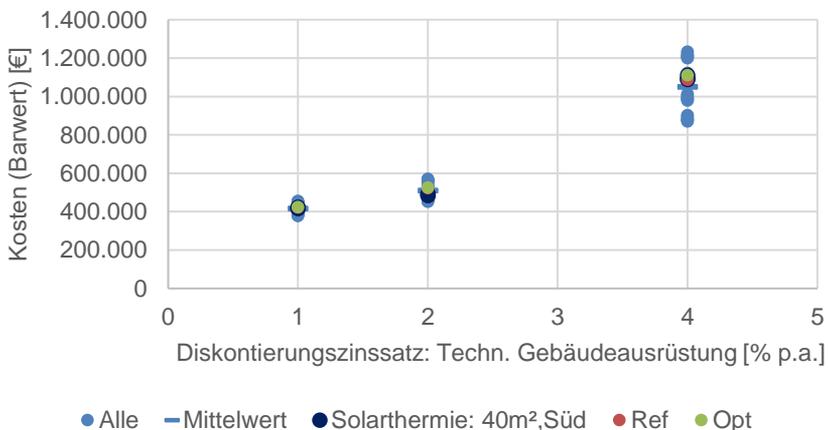


Abbildung 77: Einfluss des Diskontierungszinssatzes der Kosten für TGA auf die Lebenszykluskosten

Folgende Abbildung 78 zeigt die Lebenszykluskosten der optimierten Variante sowie der Referenz unter Variation der drei Preissteigerungsraten. Deutlich ist zu erkennen, dass für beide Varianten eine deutliche Sensitivität des Zinssatzes für die TGA bzgl. der Lebenszykluskosten aufweisen. In beiden Fällen führen höhere Zinssätze zu höheren Lebenszykluskosten von 421.000 € bis 1.110.000 €, respektive 3.007 €/m²_{NUF}, bis 7.929 €/m²_{NUF}, auf. Eine deutlich geringere Sensitivität weist die Verzinsung der Kosten für Konstruktion auf, welche zwischen 500.000 € und 628.000 €, respektive 3.571 €/m²_{NUF} und 4.486 €/m²_{NUF}, liegen. Ähnlich geringe Sensitivitäten werden für die Preissteigerung der Energiekosten erzielt. Hier liegen die Lebenszykluskosten zwischen 513.000 € und 544.000 € bzw. 3.664 €/m²_{NUF} und 3.886 €/m²_{NUF}.

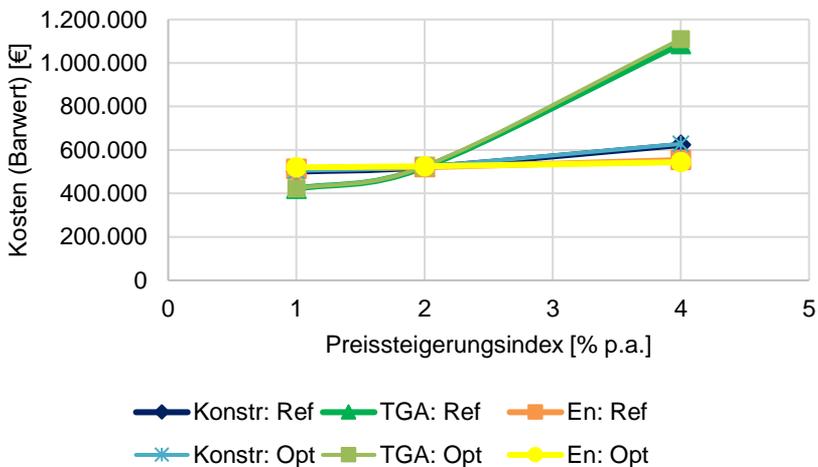


Abbildung 78: Einfluss des normierten Diskontierungszinssatzes auf die Lebenszykluskosten

7.4 Limitationen und Anmerkungen zur Auslegung

Die hier dargestellten Ergebnisse sind nur für die gewählten Eingangsdaten und Randbedingungen valide. Diese grundlegenden Aussagen lassen sich aber auf ähnliche Gebäude und ähnliche Eingangswerte und Randbedingungen übertragen, da die zugrunde liegenden physikalischen, ökonomischen und ökologischen immer gelten.

7.4.1 Limitationen der ökonomischen und ökologischen Bilanzierung

Die dargestellten Zusammenhänge gelten für die oben beschriebenen Eingangsdaten in die Bilanzierungen. Diese können sich sowohl zeitlich als auch geografisch ändern. Besonders interessant, vor allem mit Blick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse, ist zum einen der Einfluss der geografischen Lage. Zum anderen, vor allem mit Blick auf Abbildung 74, die nötigen Voraussetzungen, um mehr Varianten mit einer ggü. der Referenz reduzierten THG-Bilanz zu erhalten.

Die geografische Lage fließt direkt in die Energiebilanz und daher auch in den Bedarf an elektrischer Energie ein. Höhere solare Einstrahlungen und Erträge führen zu reduzierten elektrischen Bedarfen und höheren Einsparungen an THG-Emissionen. Diese höheren Einstrahlungen sind i. d. R. mit höheren mittleren Außenlufttemperaturen verbunden, was wiederum den Bedarf an elektrischer Energie der Referenz mit geänderter Strahlung senkt. Somit sinken die zu erwartenden Einsparungen ebenfalls. Es ist also das gleiche Verhalten wie bei einer Solarthermie-Anlage ohne MFB zu erwarten. Wird diese an einem Standort mit höherer solarer Strahlung eingesetzt, wie z. B. näher am Äquator, steigt der potenzielle Ertrag. Gleichzeitig steigt die mittlere Temperatur während der Heizperiode, was zu reduzierten Bedarfen an Heizwärme und elektrischer Energie führt.

Abbildung 74 zeigt, dass vor allem Orientierung nach Osten und Westen vor allem in Verbindung mit steigender Kollektorgröße zu vernachlässigbaren Einsparungen an oder sogar höheren THG-Emissionen führen. Diesem Effekt kann auf technologischer Ebene entgegengewirkt werden, wenn zum einen die THG-Emissionen durch die Herstellung reduziert werden und/oder zum anderen die Effizienz des Solarthermie-Kollektors und damit dessen solarer Ertrag gesteigert wird. Dies könnte zum einen durch die Substitution energieintensiver Materialien wie z. B. Glas oder Stahl, oder wenn bei deren Herstellung weniger THG-Emissionen erzeugt werden. Dies könnte z. B. durch den Einsatz Erneuerbarer Energien erreicht werden. Für das betrachtete Beispiel würde eine Reduktion um rd. 35 % ausreichen, sodass eine größere Kollektorfläche immer zu geringeren THG-Emissionen führt. Vor allem eine längere Nutzungsdauer von

25 statt 20 Jahren und die Nutzung EE für die Herstellung bieten ein hohes Potential.

Limitierend ist zudem die verfügbare Dachfläche der gewählten Orientierung, da zusätzliche Kosten für Aufständungen nicht berücksichtigt wurden und zu einer geringeren optimalen Kollektorfläche führen können.

7.4.2 Anmerkungen zur Auslegung

Auf Grundlage der Ergebnisse lassen sich mehrere Empfehlungen zur konkreten baulichen Umsetzung und Dimensionierung treffen.

1) Kreise der Aktivierung

Da die thermische Aktivierung nur in der Herstellungsphase zu amortisierbaren Kosten eingebaut werden kann, sollte diese in alle Außenwände von Räumen eingebaut werden, die keine Fenster nach Süden besitzen. Dementsprechend ergänzen die solaren Gewinne über die Fenster den Wärmeeintrag über die MFB. Die Aktivierung sollte zum einen in möglichst viele Kreise aufgeteilt werden, um die Redundanz des Systems zu erhöhen. So können defekte Kreise, z. B. durch Leckage im Bauteil, nicht weiter versorgt werden, ohne die Effizienz deutlich zu verringern. Defekte Kreise können so separat instandgesetzt oder außer Betrieb genommen werden.

2) Steuerung der Kreise der Aktivierung

Aus der gleichen Überlegung ergibt sich auch die Lage der Stell- bzw. Mischventile. Ähnlich wie bei FBH sollten diese möglichst gut zugänglich sein, um somit eine separate Steuerung sowie Instandsetzung der Kreisläufe zu ermöglichen.

3) Dimensionierung der Solarthermie

Aus der ökologischen Betrachtung ergibt sich auch, dass Solarthermie-Kollektoren mit reduzierten Erträgen, z. B. auf Grund der Orientierung nach Osten oder Verschattung, möglichst klein dimensioniert werden sollten. Umgekehrt ist hier auch ein hoher Einfluss der Eingangsdaten gegeben. Dies bedeutet, dass mit geringeren THG-Emissionen während der Herstellung sich der ökologische Vorteil einstellen bzw. vergrößern könnte.

7.5 Fazit

Sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht führt die Nutzung von MFB in Verbindung mit Solarthermie zu Einsparungen ggü. der Referenz. In der für das Referenzgebäude empfohlenen Auslegung mit Aktivierung der gesamten nördlichen Fassade sowie einem nach Süden orientierten Kollektor mit $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ können rd. 34 % der Lebenszykluskosten und 27 % der THG-Emissionen eingespart werden. Die Einsparungen resultieren aus der Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie sowie vernachlässigbaren Aufwendungen bzw. Emissionen für die Herstellung der MFB ggü. der Referenz.

Die Orientierung der Solarthermie bzw. der resultierende Ertrag haben einen signifikanten Einfluss auf die ökonomische und ökologische Bilanz. Während im Betrachtungsraum bei einer Orientierung nach Süden eine größere Kollektorfläche immer zu geringeren Lebenszykluskosten führt, weisen Orientierung nach Osten oder Westen zu einer optimierten Kollektorgröße von $A_{ST} = 30$ bis 40 m^2 . Die THG-Emissionen können nur bei einer Orientierung des Kollektors nach Süden mit steigender Kollektorgröße weiter reduziert werden. Die Orientierung des Kollektors nach Osten oder Westen führt hingegen zu steigenden THG-Emissionen mit steigender Kollektorfläche. Dieser Zusammenhang ist auf die sinkenden solaren Erträge der Solarthermie, bei Ausdrehung nach Osten oder Westen sowie gleichzeitig hohen Emissionen für deren Herstellung zurückzuführen. In allen Fällen ist eine ausreichende Größe der MFB notwendig, vgl. Absatz 6.7.2. Größere MFB führen nur zu vernachlässigbaren zusätzlichen Einsparungen.

Aufgrund der Kostenstruktur, die wiederum in der vergleichsweise langen Betrachtungsdauer von 75 Jahren begründet liegt, weisen die Energiekosten einen hohen Anteil an den Kosten und den THG-Emissionen auf, jeweils bezogen auf den gesamten Lebenszyklus. In der für das Referenzgebäude empfohlenen Auslegung beträgt der Anteil der elektrischen Energie für das Heizsystem 71 % der Lebenszykluskosten und 51 % der THG-Emissionen. Dieser hohe Anteil findet sich in allen untersuchten Varianten und führt zu einer signifikanten Korrelation zwischen Bedarf an elektrischer Energie und Lebenszykluskosten sowie THG-Emissionen. Diese starke Korrelation führt auch zu hohen Sensitivitäten der Lebenszykluskosten bzgl. der Energiekosten.

Bezogen auf die fünfte Forschungsfrage [V.] kann zusammengefasst werden, dass sich bei einer ausreichenden Dimensionierung der MFB von rd. $AMFB = 0,16 \text{ m}^2\text{MFB}/\text{m}^2\text{NUF}$ vor allem die Größe des Solarthermie-Kollektors auf die ökologische Bilanz auswirkt. So können ab einer Kollektorgröße von $A_{ST} = 30 \text{ m}^2$ die zusätzlichen THG-Emissionen nicht mehr im Betrieb amortisiert

Ökonomische und ökologische Bilanzierung

werden. Die zusätzlichen Herstellungskosten für die Solarthermie-Anlage können im Lebenszyklus nicht amortisiert werden.

8 Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

Um MFB flächendeckend nutzbar zu machen, müssen diese normativ fassbar sein. Daher wird ein Vorschlag zur normativen Fassung von MFB als Außenwänden erarbeitet. Abschließend wird eine aus Grundlage der vorherigen Kapitel eine Methodik zur Bewertung von MFB abgeleitet.

8.1 Normative Berücksichtigung

Wie in Absatz 2.3.4 beschrieben, berücksichtigen die aktuellen Normen hohe solare Deckungsgrade nur mit Hilfe von Simulation. Um die MFB in Verbindung mit Kollektorflächen von über $A_{ST} = 10 \text{ m}^2$ normativ erfassen zu können, wird eine Funktion für den solaren Ertrag $Q_{ST,MFB}$ abgeleitet, die den solaren Ertrag $Q_{h,out}$ nach an *DIN V 18599-5* als Eingangswert in die Teile 1, 6 und 9 ersetzt. Zudem wird eine Funktion für den elektrischen Bedarf der Wärmepumpe $W_{WP,MFB}$ hergeleitet. Diese berücksichtigen den Einfluss der MFB sowie die zusätzlich auftretenden Verluste und Effekte in Abhängigkeit der Kollektorgröße A_{ST} und dessen Orientierung O_{ST} , vgl. Absatz 6.4.

8.1.1 Limitationen, gewählte Annahmen und Randbedingungen

Da der solaren Ertrag Q_{ST} auf den oben beschriebenen Simulation beruhen, haben diese die gleichen Limitationen. Diese sind vor allem aber nicht abschließend.

- Nutzung als Wohngebäude
- Maximal 2 Stockwerke
- Gemäßigtes Klima
- $HWB = 35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
- Ausreichende, auf die NUF bezogene Größe der MFB von $A_{MFB} = 23,5 \text{ m}^2/140 \text{ m}^2_{NUF} \approx 15 \%$ bzw. $A_{MFB}/NUF = 8 \%$
- MFB bilden die Außenwände von Räumen, die keine nach Süden ausgerichteten Fenster haben¹¹
- Tragschale der MFB aus Beton oder einem Baustoff mit ähnlicher Wärmeleitfähigkeit λ und Speicherfähigkeit c_p
- Aufbau der MFB folgt den Festlegungen aus Abschnitt 6.5.

Da Speicher möglichst vollständig substituiert werden sollen, wird die Pufferspeichergröße in Anlehnung an *DIN V 18599-5* auf $V_{PS} = 300 \text{ l}$ festgesetzt. Unberücksichtigt hiervon ist der Speicherbedarf für Trinkwarmwasser. Somit soll

¹¹ Analoge Einschränkungen gelten für alle anderen Wärmequellen, die den täglichen Verlauf der Heizlast Φ in ähnlicher Weise reduzieren.

das primäre Ziel, die Reduktion der benötigten Pufferspeichergröße erreicht werden.

8.1.2 Gleichung zur Beschreibung des Nutzens der MFB

Wie in Absatz 2.3.4 beschrieben, verdrängt der solare Ertrag Q_{ST} die von der Wärmepumpe bereitzustellende Wärmemenge Q_{WP} . Der solare Ertrag nach Gleichung (20) beinhaltet neben der nutzbaren Wärme auch die zusätzlichen Verluste, welche keinen direkten Beitrag zur Deckung des HWB leisten. Um den Beitrag der MFB zur Deckung des HWB zu bewerten, muss daher die Reduktion des Ertrages der Wärmepumpe Q_{WP} gegenüber der Referenz ohne Solarthermie und MFB $Q_{WP,Ref}$ erfolgen. Somit ergibt sich, analog zu Gleichung (20) aus Absatz 6.7.2, der in der Norm zu berücksichtigende Ertrag der Solarthermie $Q_{h,out}$ in Abhängigkeit der Größe und Orientierung des Kollektors nach Gleichung (22).

$$Q_{ST} = Q_{h,out} = \left(\frac{0,05}{1.000} * O^2 - \frac{0,67}{1.000} * O - 0,65 \right) * A_{ST}^2 + \left(-\frac{6,5}{1.000} * O^2 - 0,07 * O + 87 \right) * A_{ST} + (-0,7 * O^2 - 0,4 * O + 1.120) \quad (22)$$

mit:

A_{ST} = Kollektorfläche Solarthermie [m²]

O = Orientierung Kollektorfläche (-90 = West, 0 = Süd, 90 = Ost)

Das Bestimmtheitsmaß, also der mittlere Abstand der Simulationswerte zur Funktion als Qualitätskriterium, beträgt 98,51 %.

Bei aktivierten Flächenanteilen $A_{MFB} > 8 * NUF$ ergeben sich leicht höhere solare Erträge sowie leicht geringere elektrische Bedarfe $W_{el,tot}$. Somit stellt diese Auslegung eine Rundung zur sicheren Seite dar.

Wird die aktivierte Fläche auf $A_{MFB} = 8 \% * NUF$ reduziert, sinkt der Nutzen der MFB. Der normativ anzusetzende solare Ertrag Q_{ST} ergibt sich durch Anpassung von Gleichung (21) aus Gleichung (22). Aufgrund der geringen aktivierten Fläche A_{MFB} , ist diese nur für Kollektorflächen bis $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ gültig.

$$Q_{ST,8\%} = Q_{h,out} = \left(\frac{0,04}{1.000} * O^2 - \frac{0,4}{1.000} * O - 0,5 \right) * A_{ST}^2 + \left(-\frac{5}{1.000} * O^2 - 0,04 * O + 66 \right) * A_{ST} + (-0,06 * O^2 - 0,6 * O + 999) \quad (23)$$

8.2 Ansatz zur Bewertung von MFB – Herleitung

Wie in Kapitel 1 festgelegt, muss die Methode zur Bewertung von MFB eine energetische, ökonomische und ökologische Bilanzierung ermöglichen und so eine umfassende Bewertung des Bauteils zulassen. Diese muss den gesamten Lebenszyklus des MFB abbilden. Um diese Bewertung auf möglichst viele Bauteile übertragen zu können, werden die Untersuchungen aus Kapitel 6 sowie deren Bewertung aus Kapitel 7 in einen allgemeineren Ansatz zur Bewertung von MFB als Wärmespeicher überführt. Dieser Ansatz wird auf zwei MFB angewandt.

1) Festlegung der Funktion des MFB

Definition der aktiven energetischen Funktionen des Heizsystems, welche das MFB übernehmen soll, vgl. Absatz 2.3.2. Grundsätzlich können auch Bauteile ohne aktive energetische Funktion mit diesem Ansatz bewertet werden. Entsprechend entfallen einige Schritte bzw. müssen adaptiert werden.

2) Einbindung des MFB in das GEK bzw. das Heizsystem

Zur Erfüllung der definierten Funktionen muss das MFB mit aktiver energetischer Funktion in das GEK integriert werden. Hierzu muss zum einen die hydraulische Einbindung des MFB in das Heizsystem definiert werden und zum anderen die Regelung & Steuerung adaptiert werden.

3) Wahl der zu untersuchenden Parameter des MFB bzw. des Heizsystems

Um den Einfluss einzelner Parameter zu bewerten und die relevanten Parameter zu identifizieren, müssen diese festgelegt werden. Die möglichen Parameter umfassen die des MFB, die der technischen Gebäudeausrüstung sowie die Regelung & Steuerung. Jede Variation eines Parameters ergibt eine neue Variante, welche sich zur ursprünglichen Kombination aus MFB und Heizsystem nur durch diese Variation unterscheidet. Zur Eingrenzung der möglichen Parameter kann auf Untersuchungen zu MFB mit ähnlichen oder gleichen Funktionen bzw. Aufbauten des MFB zurückgegriffen werden. Alternativ kann mit einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss einzelner Parameter abgeschätzt werden, vgl. Absatz 2.4.6.

4) Festlegung der Kennwerte zur Bewertung

Um die einzelnen Varianten vergleichen zu können, muss mindestens ein Kennwert zur Bewertung definiert werden. Dieser Kennwert ergibt sich aus dem übergeordneten Ziel des MFB. Bei mehreren Zielen können diese in einer

Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

Kenngroße zusammengefasst werden oder einzelne Kennwerte zur sekundären Bewertung genutzt werden.

- 5) Darstellung der Ergebnisse und Eingrenzung der Parameter, die allein einen signifikanten Einfluss haben
Möglichst Gruppierung der Parameter nach deren Wirkmechanismus

Die in Schritt 3 gebildeten Varianten sind zu untersuchen. Zur besseren Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse ist eine numerische Gebäudesimulation eines repräsentativen Gebäudes zu wählen. Die Simulationsergebnisse werden anhand der in Schritt 4 definierten Kennwerte bewertet und zu gruppieren. Die Gruppierung erfolgt anhand der Sensitivität des Parameters auf die Kenngroße und sollte mindestens zwischen einem vernachlässigbaren und einem signifikanten Einfluss unterscheiden. Für ein grundlegendes Verständnis sind die wirkenden Mechanismen, welche zur Änderung des Kennwertes führen, darzulegen und die Parameter dahingehend weiter zu gruppieren.

- 6) Ermittlung der Einflüsse mehrerer Parameter

Zur normativen Fassung muss der Einfluss mehrerer Parameter auf den gewählten Kennwert bekannt sein. Dieser ist für die in Schritt 5 als sensitiv bewerteten Parameter kreuzweise zu bestimmen, also unter Variation von mehreren Parametern.

- 7) Ableitung einer vorläufigen Auslegungsempfehlung für MFB und das Heizsystem auf Grundlage der energetischen Betrachtung

Aus den in Schritt 6 ermittelten Ergebnissen und Einflüssen ist eine Empfehlung zur Auslegung von MFB sowie dem Heizsystem abzuleiten. Diese ist, um ein Verfahren zur Berechnung des gewünschten Kennwertes zu ergänzen, sodass für definierte Eingangswerte ein Kennwert errechnet werden kann.

- 8) Ökonomische und ökologische Bewertung der Auslegungsempfehlung

Basierend auf den in Schritt 7 definierten Verfahren zur Berechnung ist eine ökonomische und ökologische Bilanzierung über den gesamten Lebenszyklus durchzuführen; nur so kann der Einfluss des MFB auf den gewünschten Kennwert umfassend bewertet werden.

9) Ableitung einer Auslegungsempfehlung für MFB und das Heizsystem

Basierend auf den in Schritt 8 gewonnenen Erkenntnissen ist die Auslegungsempfehlung für das MFB sowie das Heizsystem aus Schritt 7 zu ergänzen. In diese können auch getroffene Vereinfachungen integriert werden, so kann z. B. nur eine minimale Größe des Bauteils gefordert werden und den Kennwert so unabhängig von diesem Parameter zu machen.

10) Normative Fassung der Auslegungsempfehlung

Abschließend ist die in Schritt 9 abgeleitete Empfehlung zur Auslegung der MFG sowie des Heizsystems normativ zu fassen, z. B. nach *DIN V 18599*. Hierzu können aus denen in Schritt 9 gewonnenen Auslegungsempfehlungen Vorfaktoren abgeleitet werden. Diese Vorfaktoren müssen die in Schritt 5, 6 oder 9 als relevant identifizierten Parameter widerspiegeln. Zudem ist die Gleichung der *DIN V 18599*, in welcher diese zu berücksichtigen sind, anzugeben.

8.3 Anwendung des Ansatzes zur Bewertung von MFB

Im Folgenden wird der Ansatz zur Bewertung von MFB auf zwei Bauteile als nördliche Außenwand des Referenzgebäudes angewendet. Das erste Bauteil verfügt über eine schaltbare Wärmedämmung an der Innenseite, wodurch die Wärmeabgabe des MFB an den Bedarf des angrenzenden Raumes angepasst werden kann. Im zweiten Beispiel wird der Ansatz auf ein Bauteil mit PCM angewendet. Dieses hat durch den zusätzlich nutzbaren Phasenwechsel eine höhere Wärmespeicherkapazität. Alle anderen Parameter, wie Gebäudegeometrie oder GEK, sind identisch zu den in der Untersuchung aus Kapitel 4.

8.3.1 Anwendung des Ansatzes zur Bewertung auf MFB mit schaltbarer Wärmedämmung

Wie oben beschrieben wird der Ansatz zur Bewertung auch auf schaltbare Wärmedämmungen an der Innenseite des MFB angewendet, vgl. Abbildung 80. Diese kann eine von zwei Wärmeleitfähigkeiten haben. Somit ist es möglich, die Wärmeabgabe des MFB an den Wärmebedarf des angrenzenden Raumes anzupassen. Wie im bisherigen GEK wird die Wärme über eine Aktivierung in das Bauteil eingebracht.

Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

Die schaltbare Wärmedämmung wurde im Rahmen des Projektes „MuFuBisS“ entwickelt und untersucht. Sie weist eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{SWD} = 0,005$ bzw. $0,086 \text{ W/(m.K)}$ auf. Weitere Details sowie Ergebnisse finden sich in *Gauer 2019b*; *Kiesche 2019*; *Pahn 2020b* sowie dem Endbericht.

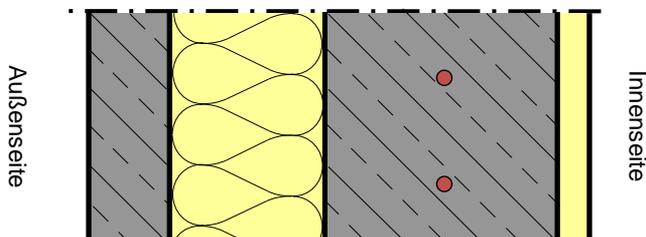


Abbildung 80: Schematischer Aufbau einer Außenwand mit Innendämmung (gelb) thermischer Aktivierung (rot) in der Tragschale (rechts), Außendämmung (gelb schraffiert) und Vorsatzschale (links)

1) Festlegung der Funktion des MFB

Das MFB soll als Außenwand eingesetzt werden, thermisch aktivierbar sein und die Wärmeabgabe an den angrenzenden Innenraum aktiv regeln können. Hierzu wird eine Außenwand mit einer Tragschale aus Beton mit einer thermischen Aktivierung sowie einer SWD an der Innenseite ausgebildet. Alle notwendigen Nachweise, z. B. Lastabtrag, GEG, werden vorausgesetzt und nicht betrachtet.

2) Einbindung des MFB in das GEK bzw. das Heizsystem

Die Einbindung der MFB in das GEK erfolgt, wie oben beschrieben, parallel zur FBH. Auch alle weiteren Parameter sind identisch zur „Referenz mit MFB“.

3) Wahl der zu untersuchenden Parameter des MFB bzw. des Heizsystems

Anteil der nördlichen Außenwand, der als MFB mit SWD ausgebildet wird.

4) Festlegung der Kennwerte zur Bewertung

Die Bewertung erfolgt anhand des gesamten jährlichen Bedarfs an elektrischer Energie inkl. dem Bedarf für die SWD.

Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

- 5) Darstellung der Ergebnisse und Eingrenzung der Parameter, die allein einen signifikanten Einfluss haben
Möglichst Gruppierung der Parameter nach deren Wirkmechanismus

Folgende Abbildung 81 zeigt den gesamten jährlichen Bedarf an elektrischer Energie mit und ohne SWD. Deutlich ist die Einsparung durch die SWD beim Betrieb der Wärmepumpe (grün) zu erkennen. Diese Einsparung wird allerdings durch den Betrieb der SWD fast vollständig kompensiert. Somit ergibt sich auch keine Änderung in der Effizienz des Systems und die JAZ beider Systeme ist gleich.

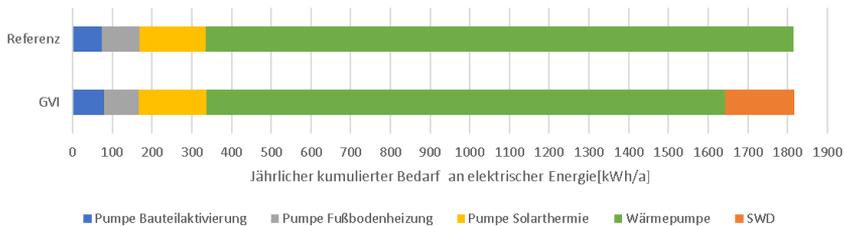


Abbildung 81: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie des Gebäudes mit und ohne schaltbare Wärmedämmung.

Durch Variation der Größe des MFB mit SWD kann deren Einfluss ermittelt werden. Deutlich ist zu erkennen, dass die Einsparungen an elektrischer Energie mit steigender Größe des MFB steigen, vgl. Abbildung 82. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch für die Variante ohne SWD und findet sich auch in Absatz 8.3.1. Für kleine Größen können keine Vorteile durch eine SWD erreicht werden. Ab etwa der halben nördlichen Fassade führt die Nutzung von SWD zu Einsparungen von elektrischer Energie. Mit weiter steigender Größe steigen auch die Einsparungen. Diese resultieren aber nicht aus der Schaltbarkeit der SWD, wie der Bedarf an elektrischer Energie zeigt, sondern aus den reduzierten Transmissionsverlusten.

Wird die gesamte Fassade genutzt, betragen die Einsparungen an elektrischer Energie $\Delta W_{el,tot} = 173 \text{ kWh}_{el}/a$ bzw. $\Delta W_{el,tot}^* = 3,7 \text{ kWh}_{el}/(\text{m}^2 \cdot a)$. Dies entspricht einer Einsparung von rd. 11 %.

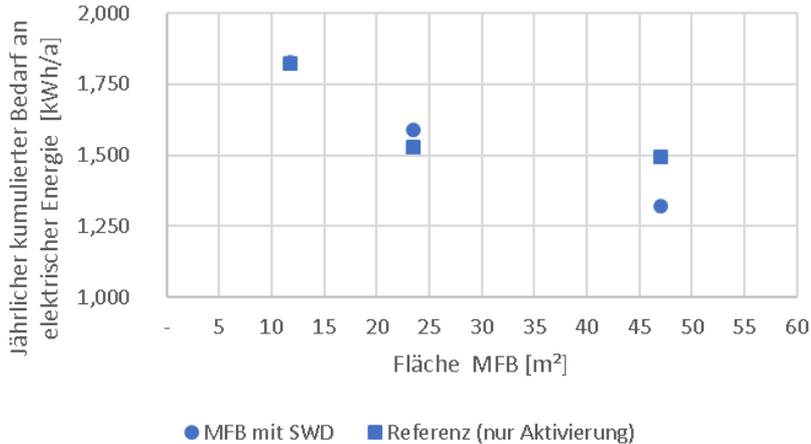


Abbildung 82: Einfluss der Fläche des MFB mit SWD auf den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie

6) Ermittlung der Einflüsse mehrerer Parameter

Es wird nur ein Parameter untersucht, daher entfällt dieser Schritt.

7) Ableitung einer vorläufigen Auslegungsempfehlung für MFB und das Heizsystem auf Grundlage der energetischen Betrachtung

Da nur die vollständige Nutzung der nördlichen Fassade zu einer Einsparung an elektrischer Energie führt und dies nicht aus der Schaltbarkeit resultiert, erfolgt keine weitere Betrachtung.

Anmerkung: Im Sinne einer Produktentwicklung kann die SWD auf Grundlage der Ergebnisse weiterentwickelt werden und die Methode zur Bewertung wieder angewendet werden.

8) Ökonomische und ökologische Bewertung der Auslegungsempfehlung

Da es keine technisch sinnvolle Variante gibt, entfällt dieser Schritt.

9) Ableitung einer Auslegungsempfehlung für MFB und das Heizsystem

Da es keine technisch sinnvolle Variante gibt, entfällt dieser Schritt.

10) Normative Fassung der Auslegungsempfehlung

Da es keine Auslegungsempfehlung gibt, entfällt dieser Schritt.

Mit Hilfe des Ansatzes zur Bewertung konnte gezeigt werden, dass die gewählte SWD zu keiner Einsparung an elektrischer Energie führt und somit nicht zu reduzierten THG-Emissionen. Zudem konnte mit dem Betrieb der SWD eine Möglichkeit zur Verbesserung aufgezeigt werden.

Die Auswertung zeigt, dass die Speicherfähigkeit der Betonschale ausreichend ist, um das Wärmeangebot zu speichern. Daher lässt die SWD vor allem bei leichten Bauweisen einen hohen Nutzen erwarten. Bei diesen muss die Temperatur höher sein als bei Betonbauweisen, um die gleiche Wärmemenge zu speichern. Diese höheren Temperaturen führen zu einem höheren Gradienten zwischen Bauteil und Raumluft, welcher in einer schnellen Entladung und höhere Heizleistungen des MFB resultieren. Zudem kann durch die Reduktion des elektrischen Bedarfs für den Betrieb der Nutzen gesteigert werden.

8.3.2 Anwendung des Ansatzes zur Bewertung auf MFB mit integrierten PCM

Analog zur schaltbaren Wärmedämmung wird der Ansatz auf ein MFB mit PCM angewendet. Durch die Nutzung des PCM wird die Wärmespeicherkapazität des Bauteiles erhöht, da Wärme nicht nur sensibel, sondern auch latent gespeichert werden kann, vgl. Abschnitt 2.4. Ein Aufbau des MFB ist in Abbildung 83 dargestellt. In diesem beträgt der Abstand zwischen PCM und Außendämmung 3 cm.

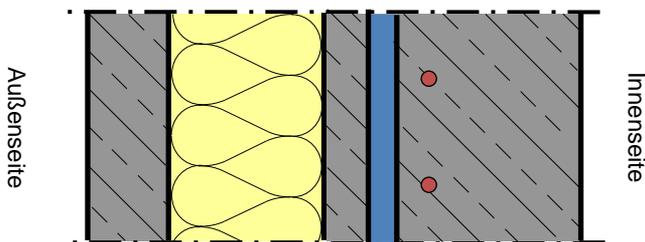


Abbildung 83: Schematischer Aufbau einer Außenwand mit thermischer Aktivierung (rot) und PCM (blau) in der Tragschale (rechts), Außendämmung (gelb) und Vorsatzschale (links)

1) Festlegung der Funktion des MFB

Das MFB soll als Außenwand eingesetzt werden, thermisch aktivierbar sein und die Wärmeabgabe an den angrenzenden Innenraum aktiv regeln können. Hierzu wird eine Außenwand mit einer Tragschale aus Beton mit einer thermischen Aktivierung sowie einer zusätzlichen Schicht aus PCM in der Tragschale ausgebildet. Alle notwendigen Nachweise, z. B. Lastabtrag, GEG, werden vorausgesetzt und nicht weiter betrachtet.

2) Einbindung des MFB in das GEK bzw. das Heizsystem

Die Einbindung der MFB in das GEK erfolgt wie oben beschrieben parallel zur FBH. Auch alle weiteren Parameter, wie u. a. Nutzung der Solarthermie-Anlage, sind identisch.

3) Wahl der zu untersuchenden Parameter des MFB bzw. des Heizsystems

Es soll der Einfluss der Lage sowie der Schmelztemperatur des PCM untersucht werden. Die Lage wird über den horizontalen Abstand zwischen der PCM-Schicht und der Außendämmung definiert. Es werden Abstände von 3 cm, 10,5 cm und 18 cm untersucht, welche als Außen, Mitte und Innen bezeichnet werden. Zur Untersuchung der Schmelztemperatur werden reale Stoffdaten der Fa. Rubitherm herangezogen. Bei diesen gibt der Produktname Aufschluss über die Schmelztemperatur. Genutzt werden die Paraffine RT21, RT22 HC und RT24. Die Aktivierung liegt immer an der Innenseite der PCM-Schicht, 3 cm von dieser entfernt. Die PCM-Arten wurden so ausgewählt, dass der Phasenwechseltemperaturbereich zum einen knapp über der gewünschten Raumlufttemperatur liegt, sodass während des Erstarrens das PCM wärmer als der Raum ist und Wärme an diesen abgeben kann. Zudem wurde die Phasenwechseltemperatur nach oben beschränkt, um einen Phasenwechsel zu ermöglichen. Würde diese zu hoch gewählt, würde auf Grund des begrenzten solaren Angebots nicht ausreichend Wärme zur Verfügung stehen, um eine ausreichende Bauteiltemperatur zu erreichen.

4) Festlegung der Kennwerte zur Bewertung

Es werden dieselben Kennwerte wie oben herangezogen, somit erfolgt die Bewertung anhand des Bedarfs an elektrischer Energie.

- 5) Darstellung der Ergebnisse und Eingrenzung der Parameter, die allein einen signifikanten Einfluss haben
Möglichst Gruppierung der Parameter nach deren Wirkmechanismus

Die Betrachtung der gesamte elektrische Bedarf $W_{el,tot}$ zeigt, dass der Einsatz von PCM zu einer Reduktion führt. Diese liegt nahezu unabhängig von Lage und Art des PCM bei $\Delta W_{el,tot} = 50 \text{ kWh/a}$. Eine herstellungstechnisch günstige Lage zwischen Tragschale und Dämmung führt zu leicht höheren Einsparungen von rd. $\Delta W_{el,tot} = 75 \text{ kWh/a}$. Dies entspricht Einsparungen von 3-4 bzw. 6-7 %, vgl. Abbildung 84.

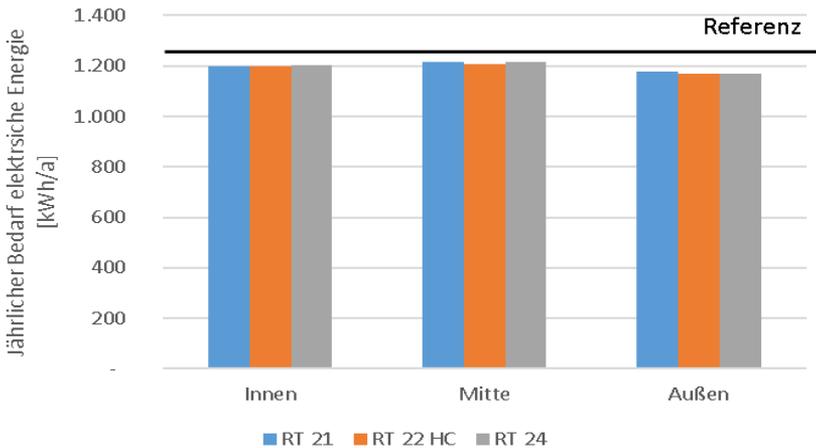


Abbildung 84: Bedarf an elektrischer Energie in Abhängigkeit der Lage und der Art des PCM

Die zusätzliche PCM-Schicht führt zu mehreren Änderungen. Wie intendiert wird zudem die Wärmespeicherfähigkeit durch eine zusätzliche latente Wärmespeicherung gesteigert. Zum anderen wird auch die Wärmeleitfähigkeit des Bauteils beeinflusst, da die der untersuchten PCM Wärmeleitfähigkeiten von $\lambda = 0,2 \text{ W/(m.K)}$ aufweisen. Da diese rd. 10 % der von Beton entspricht, wirkt das PCM auch als Wärmedämmung. Folgende Abbildung 85 zeigt den Zustand des von RT21 als Anteil der maximalen Schmelzenthalpie. Deutlich zu erkennen ist, dass alle drei Lagen ein ähnliches Verhalten aufweisen. Dieses lässt sich auf die Verfügbarkeit von solarer Wärme und den HWB zurückführen. Zudem zeigt sich, dass die innere und mittlere Lage zu fast identischen Kurven führen. Die äußere Lage weist fast durchgehend einen geringeren Anteil an latent gespeicherter Wärme auf. Was aus der leicht geringeren Temperatur an der Außenseite der Tragschale resultiert. Dies führt auch zu den geringeren Mengen an latent gespeicherter Energie. Des Weiteren ist auffällig, dass die Phasen des PCM über mehrere Tage gleichbleiben, die Wärme also im PCM verbleibt und nicht aktiv

Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

zur Beheizung beiträgt. Eine höhere Zyklenzahl, also ein häufigeres Be- und Entladen des PCM, würde zu einer höheren Wärmeaufnahme und -abgabe führen. Somit würde der Nutzen des PCM gesteigert.

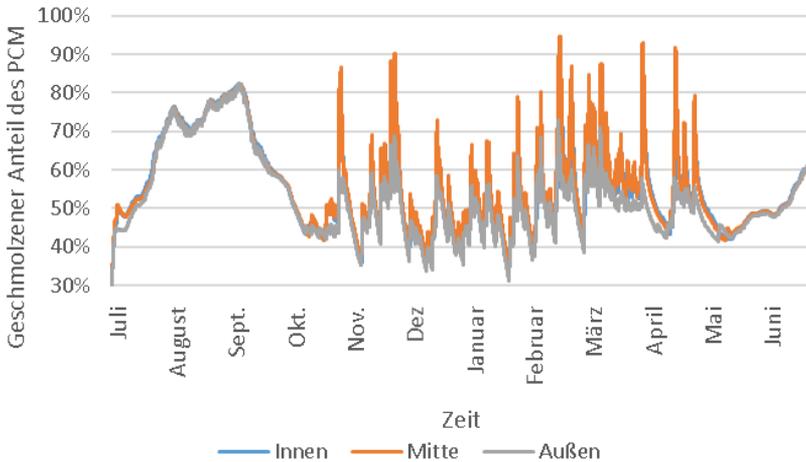


Abbildung 85: Phase der PCM im Jahresgang

Die geringen Einsparungen an elektrischer Energie müssen dahingehend interpretiert werden, dass die Wärmespeicherfähigkeit der MFB nicht limitierend in Bezug auf die Einsparung von elektrischer Energie wirkt. Beim Vergleich mit Absatz 6.2.1 zeigt sich, dass eine Erhöhung der Dämmung des MFB zu ähnlichen Einsparungen führt und die Einsparungen daher zumindest teilweise auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des PCM zurückgeführt werden können.

6) Ermittlung der Einflüsse mehrerer Parameter

In 5) wurden bereits alle Parameter und deren Kombinationen dargestellt.

7) Ableitung einer vorläufigen Auslegungsempfehlung für MFB und das Heizsystem auf Grundlage der energetischen Betrachtung

Aus energetischer Sicht ist vor allem die Lage des PCM zwischen Tragschale und Dämmung relevant. Die Art des PCM hat nur einen untergeordneten Einfluss, eine maximale Schmelzenthalpie von 2-4 K über der gewünschten Raumlufttemperatur führt zu minimalen zusätzlichen Vorteilen.

8) Ökonomische und ökologische Bewertung der Auslegungsempfehlung

Da für makroverkapselte PCM als Bauprodukte keine Langzeitdaten vorliegen, werden die THG-Emissionen für die Makroverkapselung über den gesamten Lebenszyklus ermittelt und so ein Budget für das PCM ermittelt. Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

- Einsparung an el. Energie durch PCM $\Delta W_{el,tot}$: 75 kWh_{el}/a
- Verkapselung PCM: Aluminium-Folie
- Nutzungsdauer (PCM+Folie): 40 a¹²
- Betrachtungsdauer: 75 a
- Abmaß PCM-Element (l x b x h): 2,5 m x 1,25 m x 0,02 m
- Dichte Aluminium ρ_{Al} : 2.700 kg/m³
- Emissionsfaktor Aluminium (GWP100) f_{Al} : 3 kg-CO₂-Äq./kg
- Emissionsfaktor elektrische Energie f_{el} : 0,04 kg-CO₂-Äq./kWh_{el}

In der Literatur finden sich Emissionsfaktoren für Paraffin ohne Verkapselung oder Einbringung in Bauprodukte von rd. $f_{PCM} = 2$ kg-CO₂-Äq./kg, vgl. z. B. Nienborg 2018. Somit verursacht die Herstellung des benötigten Paraffins Emissionen von 3.474 kg-CO₂-Äq.

Für die Herstellung der Aluminium-Folie ohne weitere Bearbeitung oder Einfüllen des PCM ergibt sich ein Materialbedarf von rd. $m_{PCM} = 260$ kg/40 a bzw. 520 kg/75 a. Mit dem Emissionsfaktor von $f_{Al} = 3$ kg-CO₂-Äq./kg ergeben sich die THG-Emissionen zu rd. 1.559 kg-CO₂-Äq. über den gesamten Lebenszyklus.

Diesem Aufwand stehen die Einsparungen von $\Delta W_{el,tot} = 75$ kWh_{el}/a bzw. 5-6 % gegenüber. Über die gesamte Betrachtungsdauer führt dies zu Einsparungen von 2.250 kg-CO₂-Äq. oder 48 kg-CO₂-Äq./m²_{MFB}.

Somit zeigt sich, dass nur die Herstellung des benötigten Paraffins die Einsparungen aus dem Betrieb übersteigen. Ein ähnliches Verhältnis ergibt sich bei der Betrachtung der Verkapselung des PCM. Die Herstellung der Aluminium-Folie rd. 70 % der Einsparungen ausmacht. Die Berücksichtigung von weiteren Materialien, wie z. B. Stützmaterial für die Folienelemente, Kleber, und Arbeitsschritten, wie Verschweißung der Folie oder Transport, führt zu weiteren THG-Emissionen. In Summe ist davon auszugehen, dass sich keine signifikanten Einsparungen an THG-Emissionen generieren lassen.

¹² Es wird angenommen, dass das PCM die maximale Anzahl an Phasenwechsel erreicht hat und mit der Außendämmung ausgetauscht wird.

Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

Wird ein Preis für die Folienelemente aus Aluminium inkl. PCM von 150 €/m² angenommen, ergeben sich über den gesamten Lebenszyklus Herstellungskosten mit einem BW von rd. 12.000 € (Bergia Boccardo 2019). Da die Elemente zusammen mit einer neuen Außendämmung angebracht werden, werden die zusätzlichen Kosten für die Installation als vernachlässigbar angenommen. Bei einer kürzeren Nutzungsdauer von 25 Jahren steigt der BW der Herstellungskosten auf rd. 17.000 €.

Diesen Einsparungen steht ein BW der eingesparten Kosten für elektrische Energie $W_{el,tot}$ von rd. 1.191 € gegenüber.

Bei Lebenszykluskosten von rd. 525.000 € bedeutet dies um 11.000 € bzw. 2 % höhere Kosten im Lebenszyklus. Bei einer kürzeren Lebensdauer von 25 Jahren steigen die zusätzlichen Kosten auf 16.000 € bzw. 3 %.

9) Ableitung einer Auslegungsempfehlung für MFB und das Heizsystem

Entfällt, da keine signifikanten Einsparungen an THG-Emissionen erzielt werden.

10) Normative Fassung der Auslegungsempfehlung

Entfällt.

Die Methode zeigt, dass die ökonomische und ökologische Bewertung entgegengesetzt ausfallen können. Bezogen auf die Nutzung von PCM zeigt sich Folgendes:

- Nutzung von PCM führt zu Einsparungen an elektrischer Energie von bis zu $W_{el,tot} = 75 \text{ kWh}_{el}/a$ bzw. 4 %
- PCM sollte zwischen Tragschale und Dämmung angeordnet werden
- Verkapselung des PCM kompensiert 70 % der Einsparungen an THG-Emissionen durch reduzierten gesamten elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$
- Die zusätzlichen Herstellungskosten von rd. 11.000 € können nicht über die reduzierten Betriebskosten amortisiert werden

8.4 Fazit

Basierend auf den Erkenntnissen der Simulation aus Kapitel 7 wurde ein Vorschlag erarbeitet, um die MFB in der DIN 18599 zu berücksichtigen und die sechste Forschungsfrage [VI.] beantwortet. Die Berücksichtigung erfolgt anhand einer Erhöhung des solaren Ertrages sowie einer Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie, welche als Zwischenergebnisse in der DIN 18599 dienen. Zudem wurde das in den vorherigen Kapiteln umgesetzte Verfahren zur

Vorschlag zur normativen Berücksichtigung und Bewertungsmethodik

Bewertung von MFB in einem Ansatz zur MFB verallgemeinert. Dieser Ansatz wurde am Beispiel eines MFB mit schaltbarer Innendämmung sowie eines MFB mit PCM exemplarisch durchgeführt. Für die beiden Varianten des MFB konnten mit Hilfe der Bewertung die aktuellen Ansatzpunkte zur Verbesserung systematisch ermittelt werden. Somit wird auch die letzte Forschungsfrage [VII.] beantwortet.

9 Fazit, Limitationen und Ausblick

9.1 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Multifunktionale Bauteile als Wärmespeicher für eine GEK vorgestellt und energetisch, ökonomisch und ökologisch bewertet.

Initial wurde der Stand der Wissenschaft und Technik erhoben, der bis dato keine Betrachtung von thermisch aktivierten Außenwänden zur Wärmespeicherung und

-übertragung umfasste. Zur Untersuchung der MFB wurde das Bauteilmodell nach *Javanmardi 2021* verifiziert, um eine Regelung & Steuerung ergänzt und in das Modell eines repräsentativen EFH integriert. Mit Hilfe dessen wurde das thermische Verhalten des Heizsystems bei der Nutzung von MFB untersucht. Im Beispiel zeigte sich, dass der jährliche solare Ertrag von $\eta_{sol} = 25$ auf 53% und die Effizienz der Solarthermie von $JAZ_{ST} = 13,5$ auf 38,8 gesteigert werden. Dies führt zu einer Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie um bis zu 43 %. Die flächenbezogenen Wärmeverluste des MFB sinken von $q_{MFB,heiz,Ref} = -17$ auf 24 kWh/(m².a), sodass das MFB im Jahresgang mehr Wärme abgibt als über dieses verloren geht, vgl. Forschungsfrage [I.]. Dies kann auf einen effizienteren Betrieb der Solarthermieanlage, die einhergehende Reduktion der Wärmeerzeugung der Wärmepumpe sowie reduzierte Transmissionswärmeverluste über das MFB zurückgeführt werden. Zudem wurde der Einfluss der baulichen und anlagentechnischen Parameter des Gebäude-Energiekonzeptes auf den elektrischen Bedarf, die Lebenszykluskosten sowie die THG-Emissionen im Lebenszyklus untersucht. Allen untersuchten Varianten gemein ist, dass die Wärmepumpe rd. 80 % des Bedarfs an elektrischer Energie ausmacht. Die Bewertung der einzelnen Varianten erfolgte gegenüber einer „Referenz mit MFB“.

Es zeigt sich, dass Schichtaufbauten mit Dämmstoffdicken (WLS 040) von mehr als 14 cm und Dicken der aktivierten Tragschale von über 24 cm zu keinen weiteren Einsparungen führen, vgl. [IV.]. Ab diesen Dicken ist sowohl die Speicherkapazität des MFB als auch der thermische Widerstand nach außen ausreichend sind, um die solare Wärme zu speichern und zu speichern. Änderungen der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Speicherfähigkeit sowie des inneren thermischen Widerstandes führten zu keinen weiteren Reduktionen, vgl. [II.]. Die Lage des Raumes, an den die MFB grenzen, hat den größten Einfluss, da diese über die Höhe und den Zeitpunkt des Wärmebedarfs im Tagesgang entscheidet. Die Ausbildung von Außenwänden, von Räumen, die keine oder nur sehr kleine Fensterflächen nach Süden oder Westen besitzen, führt zu den höchsten Einsparungen von bis zu 43 % des Bedarfs an elektrischer

Energie gegenüber der Referenz. Da die Einsparungen u. a. aus dem effizienteren Betrieb der Solarthermieanlage resultieren, hat deren Ertrag einen signifikanten Einfluss auf die Einsparungen, vgl. [III.]. Für das Referenzgebäude mit einem spez. Heizwärmebedarf von $HWB^* = 35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ führte eine Steigerung der Kollektorfläche bis $A_{ST} = 40 \text{ m}^2$ zu einer Reduktion des elektrischen Bedarfs; analog führt eine Ausrichtung nach Osten oder Westen zu einem Anstieg des elektrischen Bedarfs.

Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus zeigt sich, dass die Steigerung des nutzbaren solaren Ertrages essenziell ist, um die höheren Kosten und THG-Emissionen zu kompensieren, die aus der Herstellung der Solarthermie resultieren. Daher ist eine ökonomisch und ökologisch optimale Orientierung des Kollektors nach Süden zu empfehlen, vgl. [V.]. Die Größe und damit Speicherkapazität der MFB muss lediglich ein Mindestmaß übersteigen, welches bei dem betrachteten EFH bei 16 % der NUF beträgt. Mit diesen Dimensionierungen können, im Vergleich zur Referenz ohne MFB und bei gleichen Lebenszykluskosten, die THG-Emissionen um bis zu 25 % reduziert werden. Bei einer Ausbildung der Außenwand als MFB von nur 8 % ergeben sich rd. 30 % geringere Einsparungen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Empfehlung zur Dimensionierung und normativen Berücksichtigung nach DIN V 18599 vorgeschlagen. Diese besteht im Wesentlichen aus der Anpassung des solarthermischen Ertrages nach Teil 5, was zu einer Reduktion der Wärme führt, welche durch den zweiten Wärmeerzeuger bereitgestellt werden muss, vgl. [VI.]. Somit liegt ein praxisnaher Vorschlag zur normativen Berücksichtigung der MFB als Wärmespeicher und -übertrager vor.

Die genutzte Methodik zur Bewertung der Einflüsse der Parameter wurde in einen Ansatz zur Bewertung von MFB verallgemeinert. Mit diesem Ansatz wurden MFB mit schaltbarer Innendämmung sowie PCM untersucht. Hierbei zeigt sich, dass bei Ausbildung der halben Nordfassade die schaltbare Innendämmung zu Einsparungen an elektrischer Energie führen, diese aber durch den Betrieb der schaltbaren Dämmung überkompensiert werden. Bei vollständiger Aktivierung der Nordfassade übersteigen die zusätzlichen Herstellungskosten und THG-Emissionen die Einsparungen während der Nutzungsphase. Ähnlich führt die untersuchte Nutzung von PCM in der nördlichen Fassade zu Einsparungen an elektrischer Energie im Betrieb des Gebäudes. Die Untersuchung des Lebenszyklus zeigt allerdings, dass weder die zusätzlichen Kosten noch THG-Emissionen für die Herstellung kompensiert werden können, vgl. [VII.].

Erwartungsgemäß haben die Eingangsdaten einen großen Einfluss auf die ökologische und ökonomische Bilanz. Besonders sind dies die Nutzungsdauern der Bauteile und Komponenten der TGA sowie die Preise und Emissionsfaktoren für elektrische Energie. Analog hat die verwendete Regelung & Steuerung einen großen Einfluss und muss sowohl das Angebot an EE, das thermische Verhalten der MFB als auch den HWB berücksichtigen.

9.2 Limitation

Die Limitationen und der erzielten Ergebnisse ergeben sich vor allem aus den gewählten Randbedingungen und Annahmen für die Gebäudesimulation. Dies umfasst insbesondere, dass nur eine Wohnnutzung sowie ein gemäßigtes Klima betrachtet wurden. Zusätzlich ist die Auslegungsempfehlung auf die oben dargelegten Annahmen limitiert. Für die Praxis ist insbesondere der $HWB = 35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ sowie die Nutzung von Normalbeton ($c_p = 2.400 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\lambda = 2,1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) für die thermisch aktivierte Tragschale als Limitationen zu nennen. Zudem wurden ein normiertes Nutzerverhalten sowie eine gleichmäßige Aufteilung der Räume angenommen. Vor allem das Nutzerverhalten lässt einen Einfluss auf die Ergebnisse erwarten. Analog zum Wärmebedarf wurde auch die Erzeugung mit normierten Annahmen berücksichtigt, wie z. B. einem Kollektor- bzw. Wärmepumpentyp und der Vernachlässigung von Verschattungen des Kollektors. Wie dargelegt, ist zu erwarten, dass diese Einflüsse direkt in den elektrischen Bedarf $W_{el,tot}$ eingehen.

Aus methodischer Sicht ist als Limitation vor allem die fehlende Verifikation des gesamten Gebäudemodells inkl. technischer Gebäudeausrüstung zu nennen. Diese ist allerdings mit sehr hohen Aufwänden und Kosten verbunden und gibt auch nur bedingt Aufschluss, wie robust das Modell und die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind. Hier sind insbesondere die frei wählbare Kubatur und Orientierung des Gebäudes sowie die Größe der Fenster zu nennen.

9.3 Ausblick

Die Bewertung von GEK mit MFB lässt sich grundsätzlich noch erweitern: Zum einen durch Indikatoren wie Flächenverbrauch, zum anderen durch ökonomische Kennwerte wie den *cashflow*, da dieser besonders aus Sicht des Endverbrauchers relevant ist. Analog ist auch zu untersuchen, inwieweit die Technologie auch auf den Bestand übertragbar ist.

Zum anderen können auch andere Bauteile, wie z. B. Innenwände, als MFB ausgebildet und als Wärmespeicher genutzt werden. Analog können andere Wärmeerzeuger betrachtet werden, wie z. B. Anlagen zur Kraft-Wärmekopplung

oder Festbrenner. Zudem sind in diesem Zusammenhang auch Bewertungen der Netzdienlichkeit, z. B. Wärmepumpen in Verbindung mit einem zeitvariablen Tarif oder angebotsgerechte Entnahme aus einem Nah- oder Fernwärmenetz denkbar. Ein ähnlicher Ansatz stellt die Integration von Wettervorhersagen zur bedarfsgerechten Bereitstellung von Wärme, vor allem mit einem weniger effizienten Erzeuger wie z. B. einer Erdgasheizung dar.

Die Lebenszyklusbewertungen von Bauteilen oder anderen Speichern mit PCM könnten durch kostengünstigere und langlebigere Materialien weiter verbessert werden. Dies kann neben der Wahl anderer PCM auch durch die Skalierung der Produktion solcher Stoffe erreicht werden. Aus Sicht der Wissenschaft und Nachhaltigkeit sind vor allem langlebige Stoff mit geringer Umweltauswirkung interessant, welche zudem geringe Anforderungen an die Verkapselung stellen.

Auf Ebene der Bauteile bzw. Materialien sind durch die gezielte Anpassung der Materialeigenschaften weitere Potentiale zu heben. So kann, wie dargelegt, der Bedarf an elektrischer Energie durch eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherfähigkeit der wärmespeichernden Schicht reduziert werden. Diese Modifikationen können durch weitere Zuschläge, wie z. B. Graphen, Stahlfasern o. Ä. erreicht werden.

10 Literaturverzeichnis

10.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- Al-Addous 2006** Al-Addous, M.: Berechnung der Größe von Wasserspeichern zum saisonalen Speichern von Wärme bei der ausschließlichen Wärmeversorgung von Häusern mit Solarkollektoren, 2006.
- Arteconi 2014** Arteconi, A.; Costola, D.; Hoes, P.; Hensen, J.: Analysis of control strategies for thermally activated building systems under demand side management mechanisms. *Energy and Buildings*, S. 384–393, Elsevier, 2014.
- Bauer 2017** Bauer, K.; Benzarti, A.; Gauer, T.; Hauffe, P.; Jäger, S.; Leborg, N.; Maar, K.; Maul, J.; Nasrollahi, K.; Pahn, M.; Röhrenbeck, S.; Tersluisen, A.; Wellßow, W. H.: Assisting Renewable Energy Integration by Price Based Load Shifting using Heat Pumps with Thermal Storage, in: Speh, Rainer (Hg.), in: *International ETG Congress 2017*, 28-29 Nov. 2017. VDE, Frankfurt am Main 2017, S. 1–6.
- Benzarti 2018** Benzarti, A.; Hamilius, M.; Röhrenbeck, S.; Wellßow, W. H.: Potential of a PCM-Based Storage Concept Combined with an Electric Heat Pump, in: *3rd International Hybrid Power Systems Workshop*, Teneriffa 2018.
- Bilgin 2017** Bilgin, D.; Carrigan, S.; Friedrich, T.; Kornadt, O.: Raumkonditionierung durch Sandwichfertigteildecken mit integrierten Phasenwechselmaterialien. *Bauphysik*, H. 5, S. 299–305, 2017.
- BINE Informationsdienst (Hrsg.) 2009**: Latentwärmespeicher in Gebäuden 2009.
- Birgisdottir 2017** Birgisdottir, H.; Moncaster, A.; Wiberg, A.; Chae, C.; Yokoyama, K.; Balouktsi, M.; Seo, S.; Oka, T.; Lützkendorf, T.; Malmqvist, T.: IEA EBC annex 57 'evaluation of embodied energy and CO2-eq for building

- construction'. Energy and Buildings, S. 72–80, Elsevier, 2017.
- BKI (Hrsg.) 2020** BKI (Hrsg.): Baukosten Gebäude, Positionen und Bauelemente Neubau 2020 - Teil 1-3 - Statistische Kostenkennwerte, Eigenverlag, Köln 2020.
- Bollin 2012** Bollin, E.; Feldmann, T.: Prädikativer Betrieb von thermisch aktiven Bauteilsystemen (TABS). Beiträge aus Forschung & Technik, S. 61–65, Eigenverlag, 2012.
- Bollin 2014** Bollin, E.; Feldmann, T.: Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort im Gebäudebetrieb durch den Einsatz prädiktiver Betriebsverfahren (PräBV) - Abschlussbericht, Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart 2014.
- Bollin 2016** Bollin, E.: Regenerative Energien im Gebäude nutzen, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden 2016.
- Bollinger 2011** Bollinger, K.: Bauen mit Beton. Beton- und Stahlbetonbau, H. 3, S. 197–210, 2011.
- Brejnorod 2017** Brejnorod, K.; Kalbar, P.; Petersen, S.; Birkved, M.: The absolute environmental performance of buildings. Building and Environment, S. 87–98, Elsevier, 2017.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.) 2019**
Leitfaden Nachhaltiges Bauen -
Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden, 2019.
- Bürger 2016** Bürger, V.; Hesse, T.; Quack, D.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S.; Engelmann, P.: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Umweltbundesamt, 2016.
- Büttner 2014** Büttner, C.; Steinweg, J.; Glembin, J.; Rockendorf, G.; Rudolph, N.; Rust, J.: Bauteilaktivierung als Grundlastheizung in einem neuen Sonnenhauskonzept - Modellvergleich und Simulation, in: van Treeck, C.; Müller, D. (Hg.), in: *Human-centred building(s)*, BauSIM 2014 : proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference : RWTH Aachen University, September 22-

- 24, 2014 2014. RWTH Aachen University, Aachen 2014.
- Caspari 2015** Caspari, C.; Krumke, S.; Pahn, M.: Entwicklung multifunktionaler Bauteile mit Hilfe mathematischer Optimierungsmethoden, in: *Tagungsband der Bauphysiktagung Kaiserslautern 2015*, Kaiserslautern 2015, S. 103–106.
- Caspari 2016** Caspari, C.; Pahn, M.: Fertigteile zur multifunktionalen thermischen Nutzung, in: *Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016*, Dresden, Germany 2016, S. 449–456.
- Caspari 2017** Caspari, C.; Pahn, M.: Multifunktionale Betonfertigteile – Großdemonstrator „Smallhouse IV“, in: *Bauphysiktagung Kaiserslautern 2017* 2017, S. 53–56.
- Caspari 2018** Caspari, C.; Pahn, M.: Wärmespeicherung in der Gebäudestruktur - Umsetzung eines Großdemonstrators, in: Both, Petra von; Wagner, Andreas & Graf, Katharina (Hg.), in: *BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz : 26.-28. September 2018, Karlsruhe, Germany ; Tagungsband*, Tagungsband 2018. Karlsruhe, Karlsruhe 2018, S. 278–285.
- Chen 2015** Chen, C.; Liu, W.; Wang, H.; Peng, K.: Synthesis and performances of novel solid–solid phase change materials with hexahydroxy compounds for thermal energy storage. *Applied Energy*, S. 198–206, Elsevier, 2015.
- Cui 2015** Cui, Y.; Xie, J.; Liu, J.; Pan, S.: Review of Phase Change Materials Integrated in Building Walls for Energy Saving. *Procedia Engineering*, S. 763–770, Elsevier, 2015.
- Dequaire 2012** Dequaire, X.: Passivhaus as a low-energy building standard: contribution to a typology. *Energy Efficiency*, H. 3, S. 377–391, Springer, 2012.

- Ebert 2015** Ebert, H.-P.; Kuhn, T.; Maurer, C.; Krus, M.; Schmidt, D.: Chancen und Potenziale innovativer Wärmedämmung. FVEE, S. 70–74, Eigenverlag, 2015.
- Ebert 2019** Ebert, H.-P.: Fassaden mit variablen Wärmedämmwerten. IKZ Gebäude- und Energietechnik, Strobel, 2019.
- Fanger 1986** Fanger, P.: Thermal environment — Human requirements. The Environmentalist, H. 4, S. 275–278, 1986.
- Frank 1975** Frank, W.: Raumklima und thermische Behaglichkeit - Literatúrauswertung ; mit 21 Bildern und 12 Tabellen, Ernst, Berlin, München, Düsseldorf 1975.
- Fricke 2003** Fricke; Horn; Hetfleisch; Stark: Schaltbare Wärmedämmung (SWD) zur Nutzung der Sonnenenergie in Gebäuden, 2003.
- Friembichler 2014** Friembichler, F.; Bednar, T.; Handler, S.; Gladt, M.; Neusser, M.; Hofer, R.; Schöberl, H.: Thermische Bauteilaktivierung - Entwicklung eines Rechenkerns, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2014.
- Friembichler 2016** Friembichler, F.; Handler, S.; Kreč, K.; Kuster, H.: Energiespeicher Beton - Thermische Bauteilaktivierung - Planungsleitfaden - Einfamilien- und Reihenhäuser, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2016.
- Gassel 1996** Gassel, A.: Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme, 1996.
- Gauer 2013** Gauer, T.: Energy efficiency potential of the European building stock: Case study for Germany, 2013.
- Gauer 2016** Gauer, T.; Nasrollahi, K.; Pahn, M.: Simulation of solid absorber in combination with a heat pump. TRNSYSdays 2016.

- Gauer 2017a** Gauer, T.; Pahn, M.: Gebäude als thermische Batterien für das elektrische Netz – Einfluss der Wärmepumpengröße auf eine netzdienliche Betriebsweise, in: *Bauphysiktag Kaiserlautern 2017* 2017, S. 37–40.
- Gauer 2017b** Gauer, T.; Kurzrock, B.-M.: Zeitgemäße Wandkonstruktionen: Zur ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit monolithischer Bauweisen - Zur ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit monolithischer Bauweisen. Zeitschrift für Immobilienökonomie, H. 2, S. 73–90, Springer, 2017.
- Gauer 2019a** Gauer, T.; Kurzrock, B.-M.: Economic and ecological sustainability of the thermal building envelope: a cross-European perspective, in: *Proceedings of the 4th Central European symposium on building physics*, Prag 2019, S. 2003.
- Gauer 2019b** Gauer, T.; Pahn, M.: Multifunctional components for the active energetic use of the building envelope, in: *14th Conference on Advanced Building Skins, 28-29 October 2019, Bern, Switzerland*, Bern 2019, S. 715–725.
- Gauer 2022a** Gauer, T.; Pahn, M.: Energietragwerk - Multifunktionale Betonfertigteile im Großdemonstrator "SmallHouse IV", in: *Technische Universität Kaiserslautern (Hrsg.) – Bauphysiktag Kaiserlautern 2022* 2022, S. 151–155.
- Gauer 2022b** Gauer, T.; Pahn, M.: Increased Solar Shares From Multifunctional Building Parts, in: *Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics 2022*, Bratislava 2022.
- Gauer 2022c** Gauer, T.; Pahn, M.: Multifunctional building parts Increased solar shares with activated building parts. E3S Web of Conferences, S. 6004, 2022.

- Gauer 2022d** Gauer, T.; Pahn, M.: Multifunctional building parts to increase the use of solar thermal heat in residential buildings – Mechanisms, saving potentials and application under real conditions. *Journal of Building Engineering*, S. 104278, 2022.
- Gauer 2022e** Gauer, T.; Pahn, M.: Multifunktionale Bauteile, in: *Proceedings BauSIM2022*, Weimar 2022, S. 522–527.
- Glembin 2015** Glembin, J.; Steinweg, J.; Rockendorf, G.; Rudolph, N.-K.; Rust, J.: Entwicklung eines Konzepts zur temperaturoptimierten Wärmebedarfsdeckung in Solaraktivhäusern - Abschlussbericht, 2015.
- Gong 2012** Gong, X.; Nie, Z.; Wang, Z.; Cui, S.; Gao, F.; Zuo, T.: Life Cycle Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission of Residential Building Designs in Beijing. *Journal of Industrial Ecology*, H. 4, S. 576–587, Wiley, 2012.
- Grove-Smith 2016** Grove-Smith, J.; Feist, W.; Krick, W.: Optimising Buildings based on Renewable Energy, in: *Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016*, Dresden, Germany 2016, S. 183–189.
- Hauer 2013** Hauer, A.; Hiebler, S.; Reuß, M.: *Wärmespeicher*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2013.
- Hausladen 2014** Hausladen, G.; Auer, T.; Schneegans, J.; Klimke, K.; Riemer, H.; Trojer, B.; Qian, L.; Borja Torrejon, M.: Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme - Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden - Endbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2014.
- Hegger 2011** Hegger, J.; Claßen, M.; Feldmann, M.; Döring, B.; Schaumann, P.; Sothmann, J.; Bohne, D.; Hargus, S.; Barben, D.; Aarden, E.; Schielke, S.: Integrierte und nachhaltigkeitsorientierte Deckensysteme im Stahl-

- und Verbundbau. Stahlbau, H. 10, S. 728–733, Ernst & Sohn, 2011.
- Hegger 2014** Hegger, J.; Claßen, M.; Gallwoszus, J.; Schaumann, P.; Weisheim, W.; Sothmann, J.; Feldmann, M.; Pyschny, D.; Bohne, D.; Hargus, S.: Multifunktionale Verbunddecke mit integrierter Gebäudetechnik. Stahlbau, H. 7, S. 452–460, Ernst & Sohn, 2014.
- Heimrath 2007** Heimrath, R.; Haller, M.: The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32 - A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32 "Advanced storage concepts for solar and low energy buildings", Graz 2007.
- Heimrath 2018** Heimrath, R.; Lerch, W.; Mach, T.; Ramschak, T.; Fink, C.: Hohe solare Deckungsgrade durch thermisch aktivierte Bauteile im urbanen Umfeld - solSPONGEhigh, Wien 2018.
- Hennings 2011** Hennings, W.; Linssen, J.; Markewitz, P.; Vögele, P.: Energiespeicher. Brennstoff-Wärme-Kraft, H. 5, Springer-VDI, 2011.
- Incropera 2007** Incropera, F.; DeWitt, D.; Bergman, T.; Lavine, A.: Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley, Hoboken, NJ 2007.
- Javanmardi 2021** Javanmardi, R.: Analyse des Potenzials von Phasenwechselmaterialien in mehrschichtigen Bauteilen, 2021.
- Jochum 2014** Jochum, P.; Mellwig, P.: Grenzen der Dämmung opaker Bauteile. Bauphysik, H. 6, S. 289–297, Ernst & Sohn, 2014.
- Kalz 2007** Kalz, D.; Pfafferott, J.; Schossig, P.; Herkel, S.: Thermoaktive Bauteilsysteme mit integrierten Phasenwechselmaterialien – eine Simulationsstudie. Bauphysik, H. 1, S. 27–32, Ernst & Sohn, 2007.

- Kalz 2010** Kalz, D.: Heating and cooling concepts employing environmental energy and thermo-active building systems for low-energy buildings - System analysis and optimization, Fraunhofer ISE, Stuttgart 2010.
- Kalz 2011** Kalz, D.; Pfafferott, J.; Herkel, S.; Wagner, A.: Energy and efficiency analysis of environmental heat sources and sinks: In-use performance. *Renewable Energy*, H. 3, S. 916–929, Elsevier, 2011.
- Kalz 2012** Kalz, D.; Pfafferott, J.; Koenigsdorff, R.: Betriebserfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen. *Bauphysik*, H. 2, S. 66–75, Ernst & Sohn, 2012.
- Kalz 2016** Kalz, D.; Koenigsdorfer, R.; Bachseitz, M.; Nüssle, F.; Pfafferott, J.; Steblow, R.: Nichtwohngebäude effizient heizen und kühlen - Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. *BINE Themeninfo*, H. 2, S. 3–24, Eigenverlag, 2016.
- Kempkes 2009** Kempkes, C.: Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile - Dynamisch thermische Simulation, messtechnische Validation, vereinfachte Bewertungsansätze, Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart 2009.
- Kiesche 2019** Kiesche, M.; Pahn, M.: Transient thermal behaviour of switchable vacuum insulation panels, in: *14th Conference on Advanced Building Skins, 28-29 October 2019, Bern, Switzerland*, Bern 2019, S. 700–709.
- Kipf 2020** Kipf, O.; Wißbach, M.; Friedrich, T.; Vidi, S.; Pahn, M.; Keller, M.-L.; Kiesche, M.; Penkert, F.; Gauer, T.: Großflächige, multifunktionale Bauelemente mit thermisch aktiven Bewehrungsstrukturen für energieeffiziente Gebäude, mit integriertem Wärmespeicher und geregelter Raumklimatisierung, mittels regelbarer, metallisch ummantelter Vakuum-Wärmedämmung zur verstärkten Nutzung

- erneuerbarer Energien; Kürzel: MuFuBisS (Multifunktionale Bauelemente mit schaltbarer Wandisolation und Speicher) : Abschlussbericht : zur Fördermaßnahme: EnOB - Forschung für energieoptimiertes Bauen : Laufzeit: 01.07.2016 bis 30.06.2020, [KÖNIG METALL GmbH & Co. KG], Gaggenau 2020.
- Klein 2009** Klein, S.; Beckmann, W.; Mitchell, J.: TRNSYS 17a TRaNsient SYstem Simulation program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2009.
- Knotzer 2018** Knotzer, A.; Weiss, T.: Energieflexibilität von Gebäuden - Potenzial, Anwendung, Zukunft. erneuerbare energie – Zeitschrift für eine nachhaltige Energiezukunft, H. 3, S. 6–8, Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE, 2018.
- Konersmann 2008** Konersmann, L.; Haller, M.; Frank, E.: PelletSolar - Leistungsanalyse und Optimierung eines Pellet-Solkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser, in: *18. Symposium Thermische Solarenergie* 2008.
- Konuklu 2015** Konuklu, Y.; Ostry, M.; Paksoy, H.; Charvat, P.: Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy and Buildings*, S. 134–155, 2015.
- Kuckelkorn 2015** Kuckelkorn, J.; Kirschbaum, A.; Volz, F.; Biank, M.: Neubau der Fach- und Berufsoberschule in Erding: Nachhaltiges Passivhaus mit extrem niedrigem Gesamt-Primärenergiebedarf - AZ 26170/03, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück 2015.
- Kuznik 2011** Kuznik, F.; David, D.; Johannes, K.; Roux, J.-J.: A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, H. 1, S. 379–391, Elsevier, 2011.

- Laible 2019** Laible, J.: Passivhaus Kompendium 2019 - Spürbar besser bauen : Autarkie mit Passivhausstandard : versagt? Politik und Energieeffizienz : Tipps erfahrener Passivhausfuchse : Komponenten für Neubau und Sanierung, Verlag Laible Verlagsprojekte, Allensbach 2019.
- Lambrecht 2015** Lambrecht, K.; Jungmann, U.; Blau, T.; Drück, H.; Kobelt, S.; Hiltz, W.: Spezifikation von Schnittstellen zwischen Solarsimulation und den Normen DIN V 18599 sowie DIN V 4701-10 zur Erstellung von Nachweisen im Rahmen der Energieeinsparverordnung – Definition eines offenen Standards (kurz: Solarsimu-EnEV), 2015.
- Lehmann 2011** Lehmann, B.; Dorer, V.; Gwerder, M.; Renggli, F.; Tödtli, J.: Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system. Applied Energy, H. 1, S. 180–191, Elsevier, 2011.
- Lehmden 2013** Lehmden, A.: Funktionsweise der Ziegelwand-Temperierung. Mauerwerk, H. 2, S. 88–93, Ernst & Sohn, 2013.
- Lim 2014** Lim, J.-H.; Song, J.-H.; Song, S.-Y.: Development of operational guidelines for thermally activated building system according to heating and cooling load characteristics. Applied Energy, S. 123–135, Elsevier, 2014.
- Lin 2019** Lin, Y.; Zhu, C.; Fang, G.: Synthesis and properties of microencapsulated stearic acid/silica composites with graphene oxide for improving thermal conductivity as novel solar thermal storage materials. Solar Energy Materials and Solar Cells, S. 197–205, 2019.
- Liu 2018** Liu, Z.; Yu, Z.; Yang, T.; Di Qin; Li, S.; Zhang, G.; Haghighat, F.; Joybari, M.: A review on macro-encapsulated phase change material for building

envelope applications. *Building and Environment*, S. 281–294, 2018.

Loewe 2010

Loewe, K.; Albrecht, S.; Wittstock, B.; Fischer, M.; Sedlbauer, K.: Anforderungen an den ökobilanziellen Vergleich verschiedener Bauweisen am Beispiel 1-2 Familienhaus, in: *Building performance simulation in a changing environment 2010*, S. 459–466.

Loga 2015

Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.: Deutsche Wohngebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks", IWU, Darmstadt 2015.

Lu 2017

Lu, S.; Li, Y.; Kong, X.; Pang, B.; Chen, Y.; Zheng, S.; Sun, L.: A Review of PCM Energy Storage Technology Used in Buildings for the Global Warming Solution, in: Zhang, Xin Rong; Dincer, Ibrahim (Hg.), in: *Energy Solutions to Combat Global Warming 2017*. Springer International Publishing, Cham 2017, S. 611–644.

Mehling 2008

Mehling, H.; Cabeza, L.: Heat and cold storage with PCM - An up to date introduction into basics and applications, Springer, Berlin 2008.

Mehling 2018

Mehling, H.: Heizen und Kühlen mit Kombination mehrerer Wärmespeicher-Technologien im neuen Forschungs- und Entwicklungsgebäude des ZAE Bayern. Klima Forum.

Nabe 2009

Nabe, C. Dr.; Beyer, C.; Brodersen, N.; Schäffler, H. Dr.; Adam, D.; Heinemann, C.; Tusch, T.; Eder, J. Dr.; de Wyl, C. Dr.; vom Wege, J.-H.; Mühe, S.: Einführung von lastvariablen und zeitvariablen Tarifen, Bundesnetzagentur, Bonn 2009.

- Nabe 2011** Nabe, C. Dr.; Hasche, B.; Offermann, M.; Papaefthymiou, G.; Seefeldt, F.; Thamling, N.; Dziomba, H.: Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strommarkt und zur Netzintegration erneuerbarer Energien, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2011.
- Oliva 2019** Oliva, A.; Bockelmann, F.; Peter, M.; Bestenlehner, D.; Drück, H.: SolSys - Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme (Wärme/Strom) für Gebäude, 2019.
- Oschatz 2012** Oschatz, B.; Hartmann, T.; Händel, C.: Gebäude- und Anlageneffizienz ganzheitlich bewerten - DIN V 18599 in der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik. IKZ-Fachplaner, H. 10, S. 14–27, Strobel, 2012.
- Pahn 2018** Pahn, M.; Caspari, C.: Multifunktionale Betonfertigteile - Großdemonstrator „Smallhouse IV“. BFT INTERNATIONAL, H. 2, Bauverlag, 2018.
- Pahn 2019** Pahn, M.; Bayer, D.; Krumke, S.; Caspari, C.; Gauer, T.; Schluppkotten, D.; Holzhauser, M.; Weiler, T.: Großdemonstrator - multifunktionale Betonfertigteile für energetisch nutzbare Gebäudetragsstrukturen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2019.
- Pahn 2020a** Pahn, M.; Bayer, D.: Energie-Speicher-Potenziale - Ein Forschungsprojekt. Deutsches Architekten Blatt (DAB), H. 6, planet c, 2020.
- Pahn 2020b** Pahn, M.; Penkert, F.; Gauer, T.; Kiesche, M.; Keller, M. L.; Kerspe, J.; Friedrich, T.; Fischer, M.: Multifunktionale Betonfertigteilelemente mit schaltbarer Vakuumdämmung, in: Müller, Dirk (Hg.), in: *Energiewendebauen*, Forschungserkenntnisse von der Komponente bis zum Quartier 2020 2020, S. 221–228.
- Pfafferott 2007** Pfafferott, J.; Herkel, S.; Kalz, D.; Zeuschner, A.: Comparison of low-energy office buildings in summer

- using different thermal comfort criteria. *Energy and Buildings*, H. 7, S. 750–757, Elsevier, 2007.
- Pfafferott 2015** Pfafferott, J.; Kalz, D.; Koenigsdorff, R.: Bauteilaktivierung - Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen, Fraunhofer IRB Verl., Stuttgart 2015.
- Pomianowski 2012** Pomianowski, M.; Heiselberg, P.; Jensen, R.: Dynamic heat storage and cooling capacity of a concrete deck with PCM and thermally activated building system. *Energy and Buildings*, S. 96–107, Elsevier, 2012.
- Pomianowski 2013** Pomianowski, M.; Heiselberg, P.; Zhang, Y.: Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings*, S. 56–69, Elsevier, 2013.
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.) 2010** Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010.
- Quaschnig 2011** Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme - Technologie, Berechnung, Simulation ; mit 113 Tabellen, Hanser, München 2011.
- Rathore 2019** Rathore, P.; Shukla, S.: Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, S. 723–744, 2019.
- Röck 2020** Röck, M.; Saade, M.; Balouktsi, M.; Rasmussen, F.; Birgisdottir, H.; Frischknecht, R.; Habert, G.; Lützkendorf, T.; Passer, A.: Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, S. 114107, Elsevier, 2020.
- Roedler 1968** Roedler, F.: Grundlagen Systeme Ausführung, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l. 1968.

- Röhrenbeck 2016** Röhrenbeck, S.; Benzarti, A.; Wellßow, W. H.: Prädiktive Betriebsoptimierung drehzahlvariabler Wärmepumpen in Kombination mit preisvariablen Stromtarifen, VDE Verlag, Berlin 2016.
- Röhrenbeck 2017** Röhrenbeck, S.; Benzarti, A.; Wellßow, W. H.: EE-Integration und Netzentlastung durch preisgeführte Wärmepumpen mit thermischen Speichern, in: *Sektorkopplung Strom, Wärme und Kälte* 2017.
- Rotermund 2011** Rotermund, U.; Nendza, S.: Modelle und Verfahren zur Lebenszykluskosten-Berechnung von Gebäuden - Berechnung der Lebenszykluskosten in der Gebäudezertifizierung. Facility Management, H. 3, 2011.
- Rühm 2013** Rühm, B.: Energieplushäuser - Nachhaltiges Bauen für die Zukunft, Dt. Verl.-Anst, München 2013.
- Russ 2010** Russ, C.; Miara, M.; Platt, M.; Günther, D.; Kramer, T.; Dittmer, H.; Lechner, T.; Kurz, C.: Feldmessung Wärmepumpen im Gebäudebestand - Kurzfassung zum Abschlussbericht. Fraunhofer-Insitut für Solare Energiesysteme, 2010.
- Schabbach 2014** Schabbach, T.; Leibbrandt, P.: Solarthermie - Wie Sonne zu Wärme wird, Springer Vieweg, Berlin 2014.
- Schalk 2009** Schalk, K.; Felsmann, C.: DIN V 18599 und die Bewertung von thermisch aktivierten Bauteilen. Bauphysik, H. 3, S. 192–195, Ernst & Sohn, 2009.
- Schenke 2006** Schenke, A.; Drück, H.; Müller-Steinhagen, H.: Optimierung großer solarer Kombianlagen in Theorie und Praxis, in: *16. Symposium Thermische Solarenergie* 2006, S. 130–135.
- Schmelas 2016** Schmelas, M.; Feldmann, T.; Wellnitz, P.; Bollin, E.: Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression

- algorithm: First practical test. *Energy and Buildings*, S. 367–377, Elsevier, 2016.
- Schmelas 2017** Schmelas, M.; Feldmann, T.; Bollin, E.: Savings through the use of adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS): A case study. *Applied Energy*, S. 294–309, Elsevier, 2017.
- Schmidt 2013** Schmidt, M.: Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden 2013.
- Schmidt 2016** Schmidt, C.; Altgeld, H.; Groß, B.; Luther, G.; Schmidt, D.: LEXU II – Einsatz von außenliegender Wandtemperierung bei der Gebäudesanierung, in: *Proceedings of the CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016*, Dresden, Germany 2016, S. 843 -850.
- Schmidt 2017** Schmidt, C.; Luther, G.; Altgeld, H.; Maas, S.; Groß, B.; Scholzen, F.: „Außenliegende Wandtemperierung“ - LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermischen Aktivierung der Bestandswand: theoretische Grundlagen und Kennwerte. *Bauphysik*, H. 4, S. 215–223, Ernst & Sohn, 2017.
- Schmidt 2018** Schmidt, C.; Altgeld, H.; Groß, B.; Luther, G.; Maas, S.; Scholzen, F.: „Außenliegende Wandtemperierung“. *Bauphysik*, H. 4, S. 187–202, Ernst & Sohn, 2018.
- Schmidt 2019** Schmidt, W.: Feldtest und dynamische Simulation der außenliegenden Wandtemperierung, 2019.
- Schmitz 2015** Schmitz, H.; Krings, E.; Dahlhaus, U.; Meisel, U.: Baukosten - Arbeitshilfen zur Konstruktionswahl und Planung, Kostenschätzung und Kostenberechnung, Wingen Verl. für Wirtschaft und Verwaltung, Essen 2015.
- Siemens Schweiz AG (Hrsg.) 2011**: DESIGO - Energieeffiziente Applikationen: TABS Control - Applikationsdatenblatt, Zug 2011.

- Simader 2005** Simader, G. R.; Rakos, C.: Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz: Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO₂-Reduktionspotenziale - Materialband - Stand der Technologie, Wirtschaftlichkeit, Potenziale, Emissionen und Fallstudien. Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, 2005.
- Sonnenhaus-Institut e.V. (Hrsg.) o. A.**
Sonnenhaus-Institut e.V. (Hrsg.): Sonnenheizung.
- Stieglitz 2012** Stieglitz, R.; Heinzl, V.: Thermische Solarenergie - Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2012.
- Tanzer 2019** Tanzer, B.: Solarthermische Massivabsorber und Langzeitwärmespeicher, 2019.
- Tersluisen 2018** Tersluisen, A.; Nasrollahi, K.; Bauer, K.; Khalatbari, M.; Leborg, N.; Shirani, M.; Kurzrock, B.-M.; Gauer, T.; Völker, C.; Lichtenheld, T.: Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften - Abschlussbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2018.
- Tödtli 2009** Tödtli, J.; Gwerder, M.; Lehmann, B.; Renggli, F.; Dorer, V.: TABS Control - Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen; Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb, FAKTOR Verlag AG, Zürich 2009.
- United Nations (Hrsg.) 2015** United Nations (Hrsg.): Adoption of the Paris Agreement - Proposal by the President. United Nations Framework Conventions on Climate Change (UNFCCC), 2015.
- Vogdt 2011** Vogdt, F.; Piesker, J.: Konstruktiv-technische Gestaltung von Bauwerken und Bauteilen im Abgleich mit zukünftigen nationalen und europäischen Vorgaben

zur Energieeffizienz von Gebäuden. Mauerwerk, H. 5, S. 264–272, Ernst & Sohn, 2011.

Vogdt 2015

Vogdt, F.; Helbach, M.: Eine thermisch aktiv gedämmte, monolithische Außenwand aus Infrareichtbeton als nachhaltiges, zukunftsfähiges Wandsystem? Bauphysik, H. 1, S. 38–51, Ernst & Sohn, 2015.

Williams 2012

Williams, D.; Elghali, L.; Wheeler, R.; France, C.: Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: Case study of a UK mixed-use development. Energy and Buildings, S. 112–126, Elsevier, 2012.

Wystrcil 2014

Wystrcil, D.; Kalz, D.: Prädikative Regelung thermoaktiver Bauteilsysteme unter Berücksichtigung der hydraulischen Topologie, in: van Treeck, C.; Müller, D. (Hg.), in: *Human-centred building(s)*, BauSIM 2014 : proceedings of the 5th German-Austrian IBPSA Conference : RWTH Aachen University, September 22-24, 2014. RWTH Aachen University, Aachen 2014.

Zhang o.A.:

Energy Solutions to Combat Global Warming, o.A..

10.2 Normen und Richtlinien**DIN 4701-10**

Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH.

DIN 19226

Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 19226: Regelungstechnik und Steuerungstechnik*.

DIN EN 15316-4-3

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 15316-4-3: Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen*, Beuth Verlag GmbH.

DIN 276

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 276: Kosten im Bauwesen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN ISO 7730** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005)*;; Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2006.
- DIN V 18599-5** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *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 Heizsystemen*, Beuth Verlag GmbH, 2007.
- DIN EN 12831** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 12831: Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, September 2017.
- DIN V 18599-1** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN V 18599-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*, Beuth Verlag GmbH, 2018.
- DIN EN ISO 6946** DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 6946: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, März 2018.
- DIN EN 15804** *DIN EN 15804:2022-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken_- Umweltproduktdeklarationen_- Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN_15804:2012+A2:2019_+ AC:2021*, Berlin, Beuth Verlag GmbH.

GEFMA / IFMA 220-1 German Facility Management Association (Hrsg.),
*GEFMA / IFMA 220-1: Lebenszykluskostenrechnung
im FM - Einführung und Grundlagen*, Berlin, Beuth
Verlag GmbH, 2010.

10.3 Gesetze und Verordnungen

Ertragswertrichtlinie - EW-RL Bekanntmachung Richtlinie zur Ermittlung
des Ertragswerts.

GEG Gesetz zur Einsparung von Energien zur Wärme- und
Kälteerzeugung in Gebäuden.

11 Anhang

A Weitere Angaben zu den Simulationsmodellen

Neben bzw. abweichend von den in *Heimrath 2007* gemachten Parameter und Eingangswerte in die einzelnen Untermodelle wurden folgende Annahmen für die Simulation getroffen.

Tabelle 15: Eingangsdaten in die Simulation

Untermodell	Parameter	Wert	Begründung
<i>Tragschale der Außen- und Innenwände</i>	Material	Beton (2,1 W/(m.K) 1 J/(kg.K))	Integration der thermischen Aktivierung möglich
	<i>Pufferspeicher</i>	<i>Double Port</i> MFB	Out = Koll_in In = Koll_out
<i>Solarthermie</i>	Wärmeleitfähigkeit Dämmung	0,03 W/(m.K)	
	Kollektortyp	Vakuum (mode 4)	-
<i>Wärmepumpe (type 401)</i>	Typ	Luft-Wasser-WP (alpha innotec LW71_A)	Wärmepumpe (type 401)
<i>Umwälzpumpen (type 803)</i>	Elektrische Leistungsaufnahme ($P_{UP,el}$)	50 W	Abschätzung des el. Bedarfs
<i>FBH (aktive layer in type 56)</i>	Aufbau	6 cm Estrich mit Aktivierung in der Kernlage, 2 cm Dämmung (WLS040) und 15 cm Beton	
	Unterteilung	Raumweise (8 Kreise mit je 17,5 m ²)	-
<i>Luftwechselrate Wetterdatensatz</i>		0,4 /h	Lt. <i>Heimrath 2007</i>
		Zürich	

Tabelle 16: Zwischen MatLab® und TRNSYS© ausgetauschte Größen
 Bei Werten ist die jeweilige Einheit in [] angegeben. Zudem sind bei Werten, die sich innerhalb einer Simulation nicht ändern, die Werte für die Referenz angegeben.

Von MatLab® an TRNSYS©	Von TRNSYS© an MatLab®
Oberflächen- und Schichttemperaturen ($T_{\text{Surf,in}}$, $T_{\text{surf,out}}$, $T_{\text{Tragschale}}$, $T_{\text{Vorsatzschale}}$)	Vorlauf-temperatur ($T_{\text{MFB,VL}}$) und Massenstrom (\dot{m}_{MFB})
Heiz- & Verlustleistung ($P_{\text{MFB,heiz}}$, $P_{\text{MFB,verl}}$)	Umgebungs- und Raumlufttemperatur ($T_{\text{Luft,außen}}$ und $T_{\text{Luft,innen}}$)
Rücklauf-temperatur ($T_{\text{MFB,RL}}$)	Strahlung auf Oberfläche (I) [W/m^2]
	Anzahl Schichten [3]
	Layer-mode [112]
	trnsys_timestep [180s]
	Wärmeübergangskoeffizient innen und außen α [8 bzw. 25 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
	Größe des MFB [47 m^2]
	Wärmeleitfähigkeit der Schicht i [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
	Dichte der Schicht i [m]
	Spez. Speicherfähigkeit der Schicht i [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
	Anzahl der Elemente Schicht i [50/m]
	Starttemperatur der Schicht i [20 °C]
	Abstand der Aktivierung zur inneren Oberfläche [0,1 m]
	Durchmesser der Aktivierung [0,01 m]
	Manteldicke der Aktivierung [0,001 m]
	Wärmeleitfähigkeit der Aktivierung [0,24 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
	Anzahl und Lage der Schichttemperaturen [3 und 0,2 m, 0,09 m, 0,02 m]

B Ökonomische und ökologische Eingangsgrößen

Tabelle 17: Ökonomische Eingangsgrößen

Größe	Wert	Beschreibung
<i>Regionalfaktor</i>	1	
<i>Baunebenkosten</i>	20 %	Bezogen auf die Herstellungskosten
<i>Kosten für P,I,W</i>	0,2 %	Bezogen auf die Herstellungskosten

Tabelle 18: Ökologische Eingangsgrößen der variierten Parameter

Bauteil / Material	Wert	Einheit
<i>Dämmstoff (WDVS)</i>	15,828	kg/m ³
<i>Beton</i>	225,774	kg/m ³
<i>Kollektor Solarthermie</i>	42,661	kg/m ²

Alle Angaben zzgl. einem Sicherheitsaufschlag von 20 %.

C Modellverifikation

Temperaturverläufe zur Verifikation des Bauteilmodells sowie relative Abweichung zwischen Messung und Simulation für die Punkte T₁, T₂, T₄ und T₅.

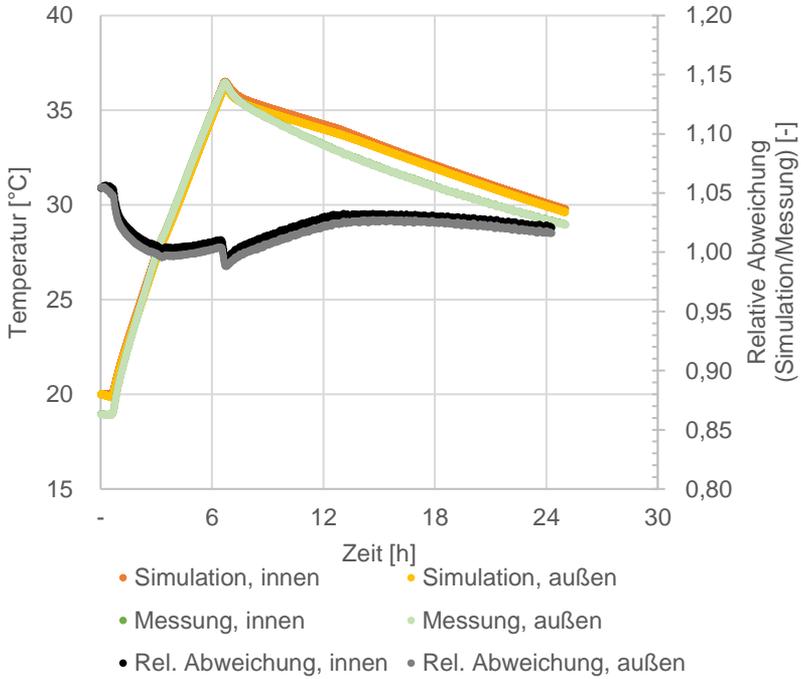


Abbildung 86: Vergleich des Temperaturverlaufs in der Tragschale des Bauteils T₂ und T₄

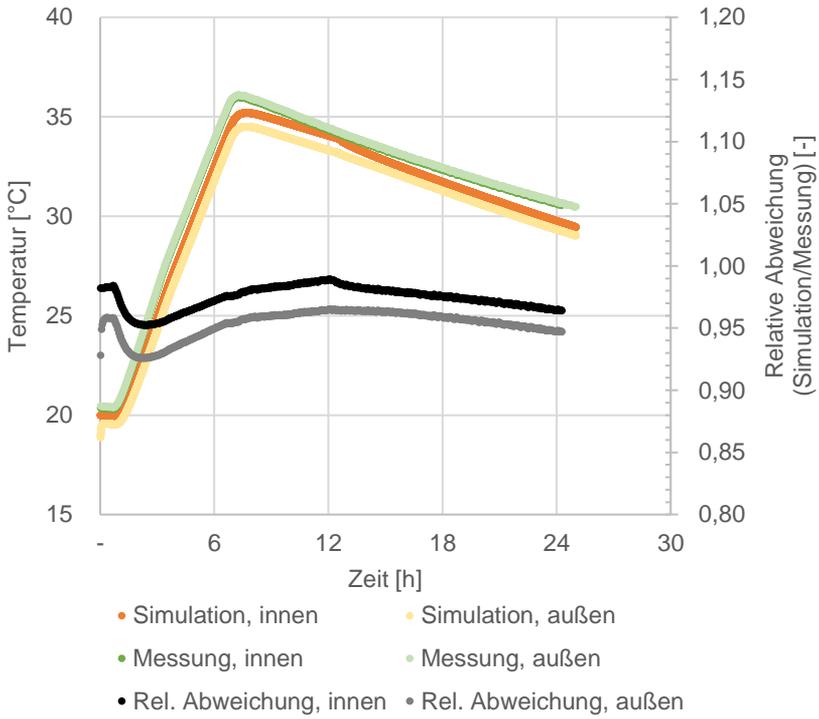


Abbildung 87: Vergleich des Temperaturverlaufs an der Kontaktfläche zwischen Dämmungen und Tragschale des Bauteils T₁ und T₅

D Mechanismen in MFB (Heizperiode)

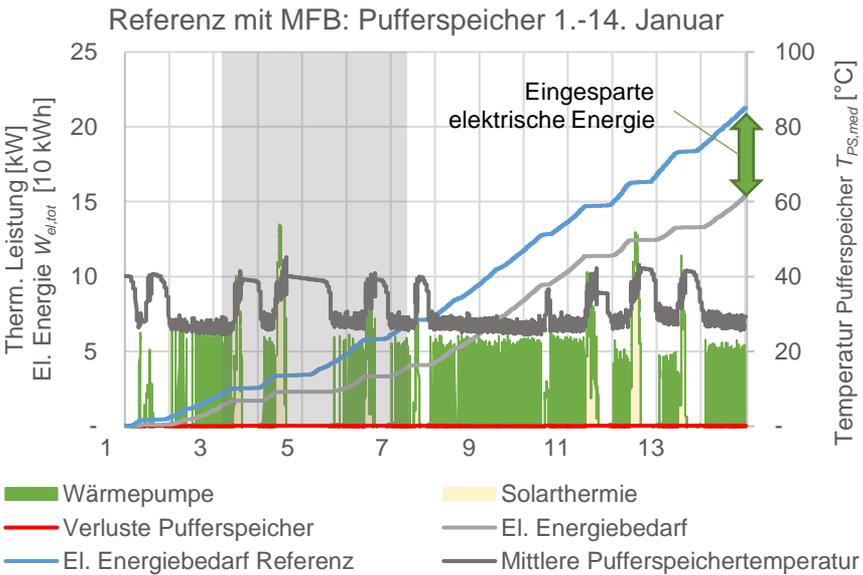
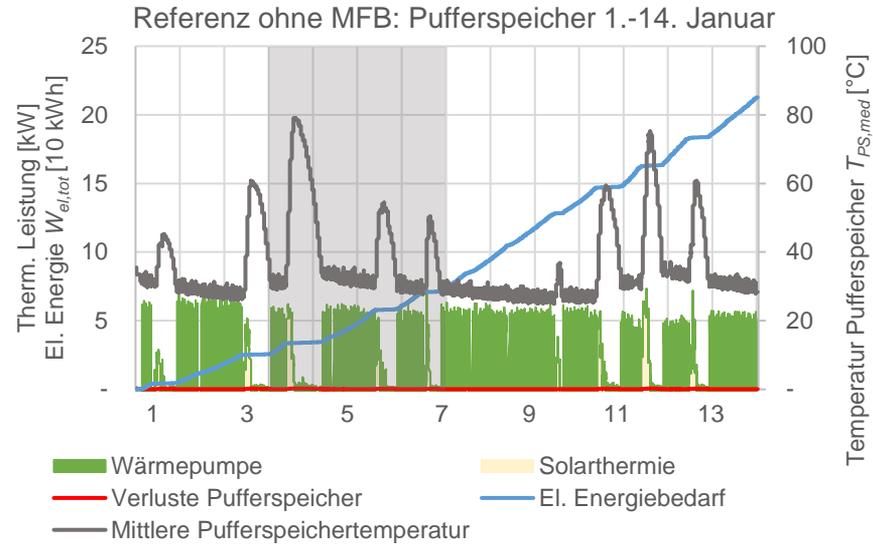


Abbildung 88: Leistung und Temperatur des Pufferspeichers ohne und mit aktivierten Bauteilen im Januar

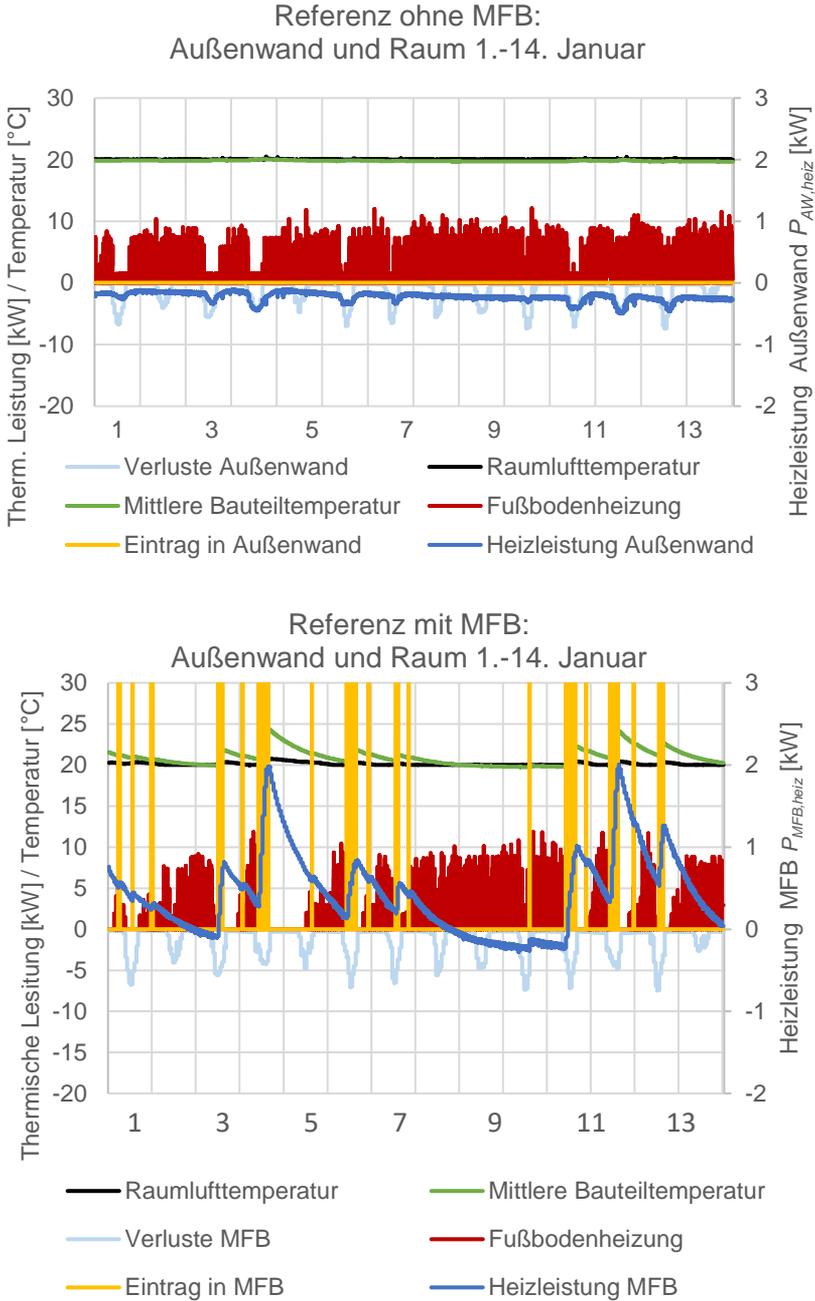


Abbildung 89: Temperatur- und Leistungsverlauf des MFB bzw. der Außenwand und des Raums im Januar

E Simulationsergebnisse

Einfluss der Dicke der Innendämmung der MFB

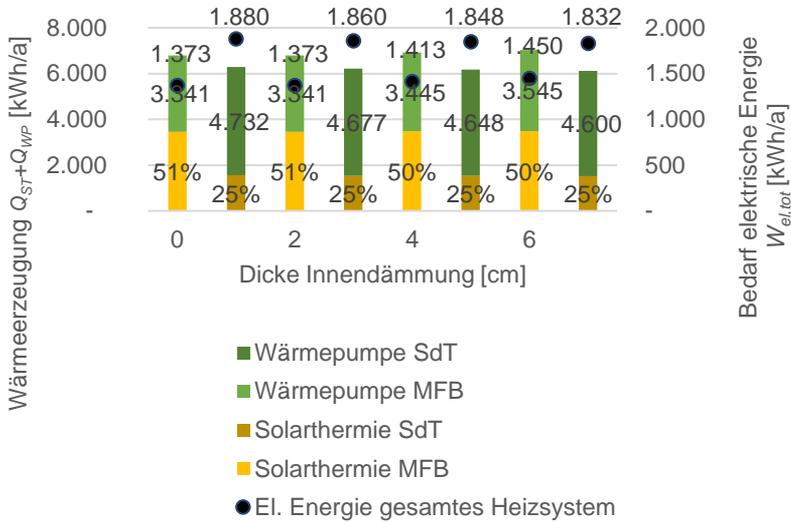


Abbildung 90: Einfluss der Innendämmung

Einfluss der Dicke der Tragschale der MFB

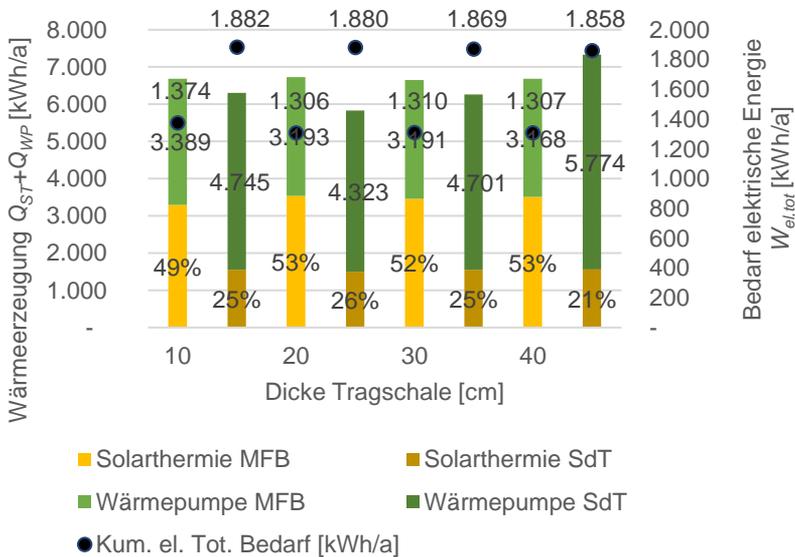


Abbildung 91: Einfluss der Dicke der Tragschale der MFB

Einfluss der Dicke der Außendämmung der MFB

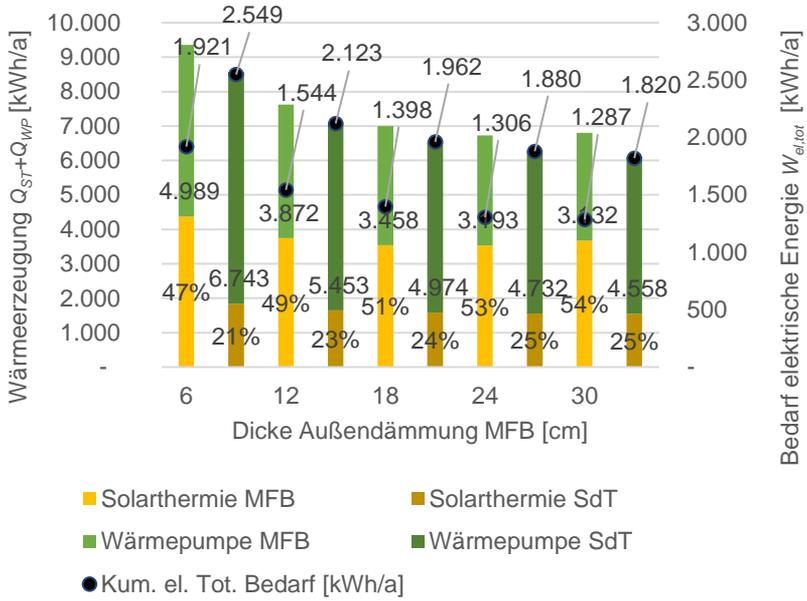


Abbildung 92: Einfluss der Dicke der Außendämmung der MFB

12 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Tillman Valentin Gauer

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Beruflicher Werdegang

Seit 01/2023: io-consultants GmbH & Co. KG

05/2014 – 12/2022: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der
TU Kaiserslautern am Fachgebiet
Massivbau & Baukonstruktion bei Prof. Pahn

05/2014 – 12/2019: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der
TU Kaiserslautern am Fachgebiet
Immobilienökonomie bei Prof. Kurzrock

Hochschulausbildung

04/2007 – 05/2013 Studium „Maschinenbau & Verfahrenstechnik“
(Vertiefung Energietechnik) an der Technischen
Universität Kaiserslautern
Abschluss als Diplom-Ingenieur

08/2012 – 05/2013 Auslandsjahr (ERASMUS) an der Chalmers Tekniska
Högskola in Göteborg, Schweden

08/2009 – 01/2010 Auslandssemester (study abroad) an der University
of Technology Sydney, Australien

Schulausbildung

03/2007 Allgemeine Hochschulreife am Hohenstaufen-
Gymnasium Kaiserslautern