

Matthias Pahn, Dirk Bayer, Sven O. Krumke  
Christian Caspari, Tillman Gauer, Dirk Miguel  
Schluppkotten, Michael Holzhauser, Torsten Weiler

# **Großdemonstrator – Multifunktionale Betonfertigteile für energetisch nutzbare Gebäudetragsstrukturen**

F 3135

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0290-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

Endbericht zum Forschungsprojekt:

Großdemonstrator – Multifunktionale Betonfertigteile für  
energetisch nutzbare Gebäudetragstrukturen  
(SWD-10.08.18.7-15.51)

Gefördert durch:



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.51)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

Projektbeteiligte: Prof. Dipl.-Ing. Dirk Bayer  
Prof. Dr. Sven O. Krumke

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Christian Caspari  
Dipl.-Ing. Tillman Gauer  
Dipl.-Ing. Dirk Miguel Schluppkotten  
Dr. Michael Holzhauser  
Dipl.-Ing. Torsten Weiler

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Umsetzung des Großdemonstrators Smallhouse IV. Hierbei wird ein Gebäudeenergiekonzept erarbeitet, welches die Gebäudemasse aktiv zur Wärmespeicherung heranzieht. Ähnlich wie in Solaraktivhäusern soll die gesamte Wärmebereitstellung mittels einem minimalen primärenergetischen Bezug gewährleistet werden. Hierbei soll jedoch die solare Wärme nicht in überdimensionalen Pufferspeichern gespeichert werden, sondern in der vorhandenen Gebäudemasse. Diese Arbeit dokumentiert den gesamten Prozess vom Entwurf bis zum Bau. Daher befasst sich der erste Teil dieses Berichts mit dem konzeptionellen Entwurf und der konstruktiven Durchbildung des Gebäudes in Sandwichbauweise. Hierauf aufbauend wird mittels der statischen Bemessung und thermischen Simulation die Planung in einem iterativen Prozess abgeschlossen. Fokus der weiteren Arbeit liegt auf der energetischen Untersuchung der thermisch aktiven Sandwichbauteile sowie die Einbindung dieser in ein Gebäudeenergiekonzept. Neben der Erhebung von Leistungskennzahlen für thermisch aktive Bauteile, wird mittels einer instationären Gebäudesimulation die Wechselwirkung von Bauteil, Steuerung und Gebäude untersucht. Hierbei wird das Potential des Wärmespeichervermögens der Gebäudemasse im Vergleich zu herkömmlichen Gebäudekonzepten aufgezeigt. Im Abschluss dieses Berichts werden die Herstellung der thermisch aktiven Betonsandwichelemente und deren Montage dokumentiert.

## **Abstract**

The present work deals with the development and implementation of the demonstrator Smallhouse IV. On a basis of this demonstrator, a building energy concept is developed, which actively uses the building mass for heat storage. Similar to solar active houses, the entire heat supply is to be ensured by means of a minimal primary energy reference. However, the solar heat is not to be stored in oversized water storage, but in the existing building mass itself. This paper documents the entire process from design to construction. Therefore, the first part of this work deals with the conceptual and the structural design of the building using sandwich panels. Based on this, the planning is completed in an iterative process by means of static dimensioning and thermal simulations. The further part of the paper is focused on the energetic investigation of the thermally active sandwich components and the integration of them into a building energy concept. In addition to the collection of performance data for thermally active components, the interaction of components, control system and building itself is investigated by means of a thermal transient building simulation. Here, the potential of the heat storage capacity of the building mass in comparison to conventional building concepts is presented. In the conclusion of this work the production of the thermally active concrete sandwich panels and their assembly will be documented.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Motivation</b>	<b>6</b>
<b>2. Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>3. Gebäudeentwurf</b>	<b>8</b>
3.1. Konstruktionsdetails	13
<b>4. Konstruktionsdetails</b>	<b>18</b>
<b>5. Statische Bemessung</b>	<b>20</b>
5.1. Bemessung der Spannschlösser	20
5.1.1. Aussteifung der Betonfertigteile des Großdemonstrators	20
5.2. Bemessung der Verbindungsmittel der Sandwichelemente	23
5.3. Experimentelle Untersuchungen	25
<b>6. Gebäudeenergiekonzept</b>	<b>29</b>
6.1. Multifunktionale Betonfertigteile	31
6.2. Grenzen der Behaglichkeit	32
6.3. Definition der stationären Kenngrößen	34
6.4. Ermittlung der stationären Kenngrößen	38
6.5. Wärmebrücken infolge Verbindungsmittel	40
<b>7. Stationäres Berechnung</b>	<b>42</b>
7.1. Aufbau Gebäudehülle und thermische Randbedingungen	42
7.2. Berechnung des Heizbedarfs und der Norm-Heizlast	44
<b>8. Auslegung und Verschaltung der Komponenten</b>	<b>46</b>
8.1. Auslegung der Komponenten	46
8.1.1. Auslegung des Solarkollektors	46
8.1.2. Auslegung des Speichers	47
8.1.3. Auslegung des Wärmeübertragers	49
8.2. Hydraulische Schaltung	49
<b>9. Regelung, Steuerung und Optimierung</b>	<b>52</b>
9.1. Unterscheidung Steuerung – Regelung	52
9.1.1. Definition Steuerung	52
9.1.2. Definition Regelung	53
9.2. Stand der Technik	54
9.2.1. Aufbau Heizungssystem	54
9.2.2. Steuerung des Wärmeerzeugers	54
9.2.3. Steuerung bzw. Regelung der Wärmeübertrager	55
9.2.4. Regelung und Steuerung von Bauteilaktivierungen	56
9.3. Steuerungskonzepte im Großdemonstrator	56
9.3.1. Steuerung und Regelung der Wärmeerzeuger	56
9.3.2. Steuerung und Regelung der Wärmeübertrager	56
9.3.3. Steuerung der Solarthermieanlage	57

---

9.4.	<i>Steuerungsalgorithmus</i>	58
9.4.1.	Erweiterungen der Modelle	60
9.5.	<i>Implementierung des Steuerungsalgorithmus</i>	62
9.6.	<i>Optimierung von Parametern in der Steuerung</i>	62
<b>10.</b>	<b>Messkonzept</b>	<b>65</b>
<b>11.</b>	<b>Instationäres Gebäudeenergiemodell</b>	<b>67</b>
11.1.	<i>Systembildung</i>	67
11.2.	<i>Kenngößen</i>	68
11.2.1.	Energetische Kenngößen	68
11.2.2.	Ökologische Kenngößen	68
11.2.3.	Behaglichkeit	69
11.3.	<i>Ergebnisse - Variation Anlagentechnik</i>	70
11.4.	<i>Bewertung der Ergebnisse</i>	76
11.5.	<i>Vergleich von Gebäudeenergiekonzepten</i>	77
11.5.1.	Szenario 1: Äquivalente Pufferspeichergröße	78
11.5.2.	Szenario 2: Einfluss der saisonalen Speicherung	80
11.6.	<i>Zeitliche Auflösung der Speicherverhalten</i>	82
<b>12.</b>	<b>Realisierung</b>	<b>86</b>
12.1.	<i>Standortbewertung</i>	86
12.2.	<i>Herstellung des Erdreichspeichers</i>	88
12.3.	<i>Herstellung der Bodenplatte</i>	89
12.4.	<i>Herstellung der multifunktionalen Betonfertigteile</i>	91
12.5.	<i>Montage</i>	92
12.6.	<i>Einbau der austauschbaren Wände</i>	94
<b>13.</b>	<b>Fazit</b>	<b>96</b>
<b>14.</b>	<b>Ausblick</b>	<b>97</b>
<b>15.</b>	<b>Vorangegangene Forschungsprojekte</b>	<b>98</b>
<b>16.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>

## 1. Motivation

Die Umstellung der nicht-nachhaltigen Nutzung fossiler Energieträger zu einer nachhaltigen Energieversorgung durch Erneuerbare Energien führt zu neuen Anforderungen an Gebäude und Nutzer. Der Wärmeverbrauch von Gebäuden spielt hierbei eine zentrale Rolle, da hier ein großes Einsparpotential existiert. Alleine 27% des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs entfällt auf die Raumwärme [1]. Um die Ziele der Energiewende im Bereich Raumwärme umzusetzen bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten: das Verringern der Wärmeverluste und/oder das Steigern des Anteils Erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung. Ersteres findet beispielsweise im Passivhaus-Konzept seine Anwendung. Der Wärmewiderstand und die Dichtheit der Gebäudehülle werden dabei massiv gesteigert, um die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste auf ein Minimum zu reduzieren. Hierdurch wird der Wärmebedarf gesenkt. Die zweite Möglichkeit besteht in der effizienten Nutzung Erneuerbarer Energien. Der Fokus liegt hierbei nicht primär im Senken des Wärmebedarfs, sondern im Steigern des Anteils Erneuerbarer Energien am Endenergiebedarf, was eine Reduzierung der Primärenergie zur Folge hat. Bei der Nutzung Erneuerbarer Energien existiert ein zentrales Problem: Die Wärmespeicherung. Fossile Brennstoffe können bei Bedarf einfach verbrannt werden. Das Angebot Erneuerbarer Energien steht lediglich fluktuierend und nicht regelbar zur Verfügung. Daher werden Speicher benötigt, die einen Ausgleich zwischen Bedarf und Bereitstellung herstellen. Im Allgemeinen werden hierzu Pufferspeicher herangezogen. Die üblichen Pufferspeicher sind für eine effektive Speicherung von Heizwärme jedoch zu klein. Hierzu sind Speichervolumen von mehr als 10 m<sup>3</sup> erforderlich [2]. Um das Pufferspeichervolumen nicht in solche Dimensionen steigern zu müssen und trotzdem ein großes Wärmespeichervermögen aufzuweisen, bietet sich die Gebäudestruktur als Wärmespeicher an. Die massiven Bauteile verfügen über eine hohe Masse, eine hohe Wärmeleitfähigkeit, eine hohe spezifische Wärmespeicherkapazität und sind somit ein geeignetes Speichermedium. Insofern bietet sich die Nutzung der Tragstruktur als Wärmespeicher für solare Energiegewinne in Form von Nutzenergie an. Durch im Kern integrierte Rohrregister können Wände, Decken, Fußböden usw. aktiv zur Wärmespeicherung beitragen und das Pufferspeichervolumen somit minimieren [3].

## **2. Einleitung**

An der TU Kaiserslautern entsteht eine kleine Siedlung von begehbaren Musterbauten, das sogenannte Smallhouse Village. Hierbei handelt es sich um Gebäude innovativer Bauweise. Sie dienen der Umsetzung und Validierung von Forschungsergebnissen unter realen Bedingungen. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wird das Smallhouse Village um den Großdemonstrator Smallhouse IV erweitert. Dieser Großdemonstrator soll zeigen, inwiefern die Gebäudestruktur aktiv dazu beitragen kann, Erneuerbare Energie effizient zu nutzen. Neben der statischen Funktion sind die Bauteile ebenfalls für thermischen Funktionen wie Wärmedämmung, Wärmespeicherung und Temperierung ausgelegt. Der Entwicklungsschritt vom monofunktionalen zum multifunktionalen Bauteil soll neben den thermischen Vorteilen dem dynamischen Anforderungsprofil seiner Nutzer entsprechen.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, das Zusammenwirken multifunktionaler Bauteile sowohl in konstruktiver als auch in energetischer Hinsicht zu erforschen. Hierbei liegt der Fokus auf der nachhaltigen Nutzung der massiven Tragstruktur zur Wärmespeicherung und Temperierung des Innenraumes. Die Zielsetzung besteht aus einem solaren Deckungsgrad von 50 % des Großdemonstrators.

### 3. Gebäudeentwurf

Der Großdemonstrator ist Teil des sogenannten Smallhouse Village, einer Reihe von unterschiedlichen Versuchs- und Musterbauten auf dem Campus der TU Kaiserslautern. Der der Planung zugrundeliegende Bauplatz bildet den nördlichen Abschluss dieser Anlage und befindet sich in unmittelbarer Nähe einer Brücke, die das Smallhouse Village vom übrigen Campus trennt.

Als architektonische Antwort auf die besonderen konstruktiven und energetischen Anforderungen einerseits und die örtlichen Gegebenheiten andererseits entwickelt sich die Schnittfigur des modular aufgebauten Gebäudes als eine Sequenz von drei Sheds, die in südlicher Richtung eine optimale Integration der Solarthermie ermöglichen und in nördlicher Richtung eine Blickbeziehung zu der rege genutzten Brücke herstellen. Über das rein Funktionale einer gleichmäßigen und blendfreien Belichtung des Hauptraumes hinaus wird so Einblick in die Vorgänge im Inneren des Forschungsgebäudes gewährt und das Interesse der Passanten auf der Brücke geweckt.

Die Idee des Einblicks wiederholt sich auch auf der Ebene des konstruktiven Details. Bullaugenähnliche Glasbausteine gliedern und beleben die äußere Erscheinung des Baukörpers und sorgen gleichzeitig für immer neue Lichtstimmungen im Innenraum.



Abbildung 1: Blick vom Smallhouse Village in Richtung Campus der TU Kaiserslautern

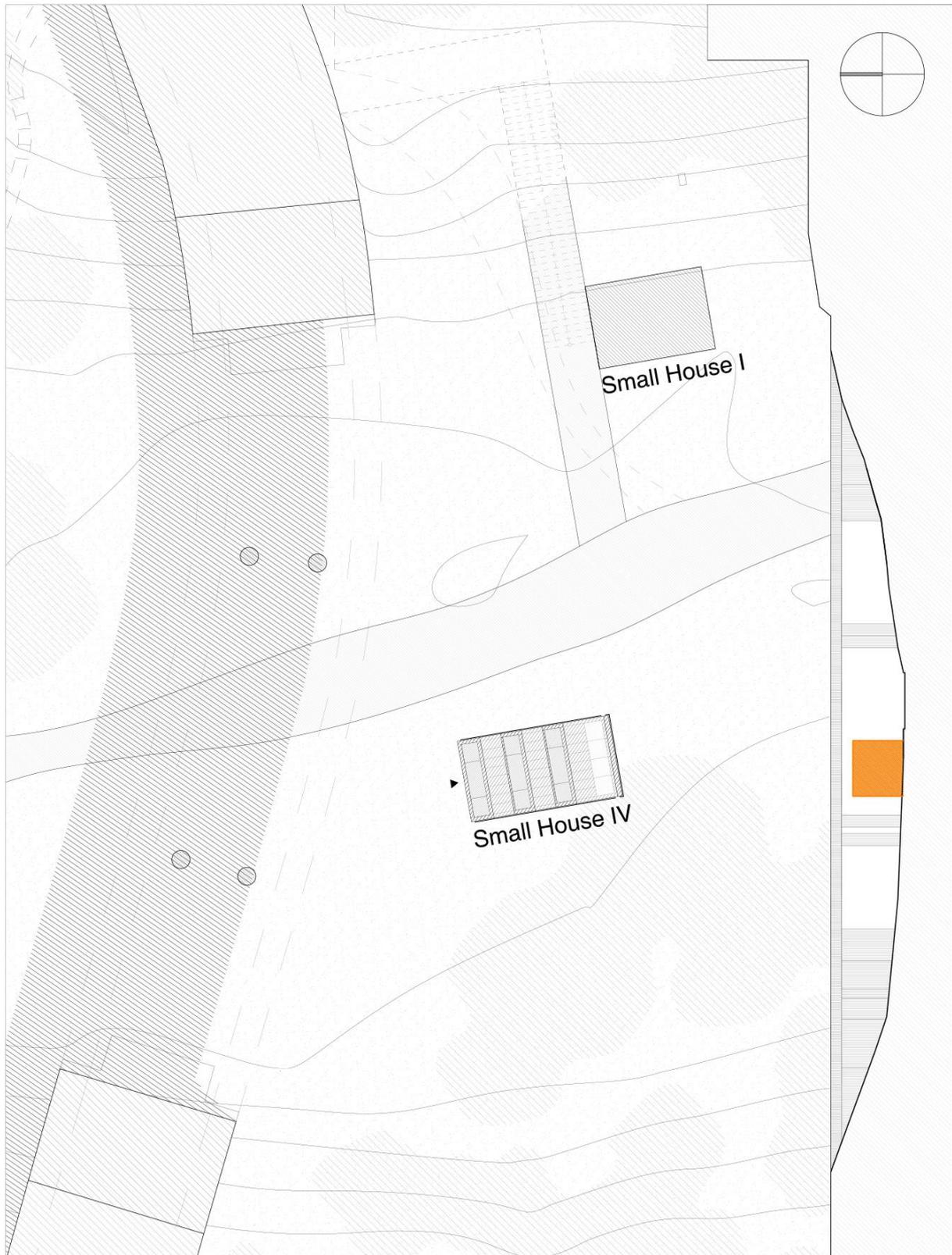


Abbildung 2: Lageplan M 1:333

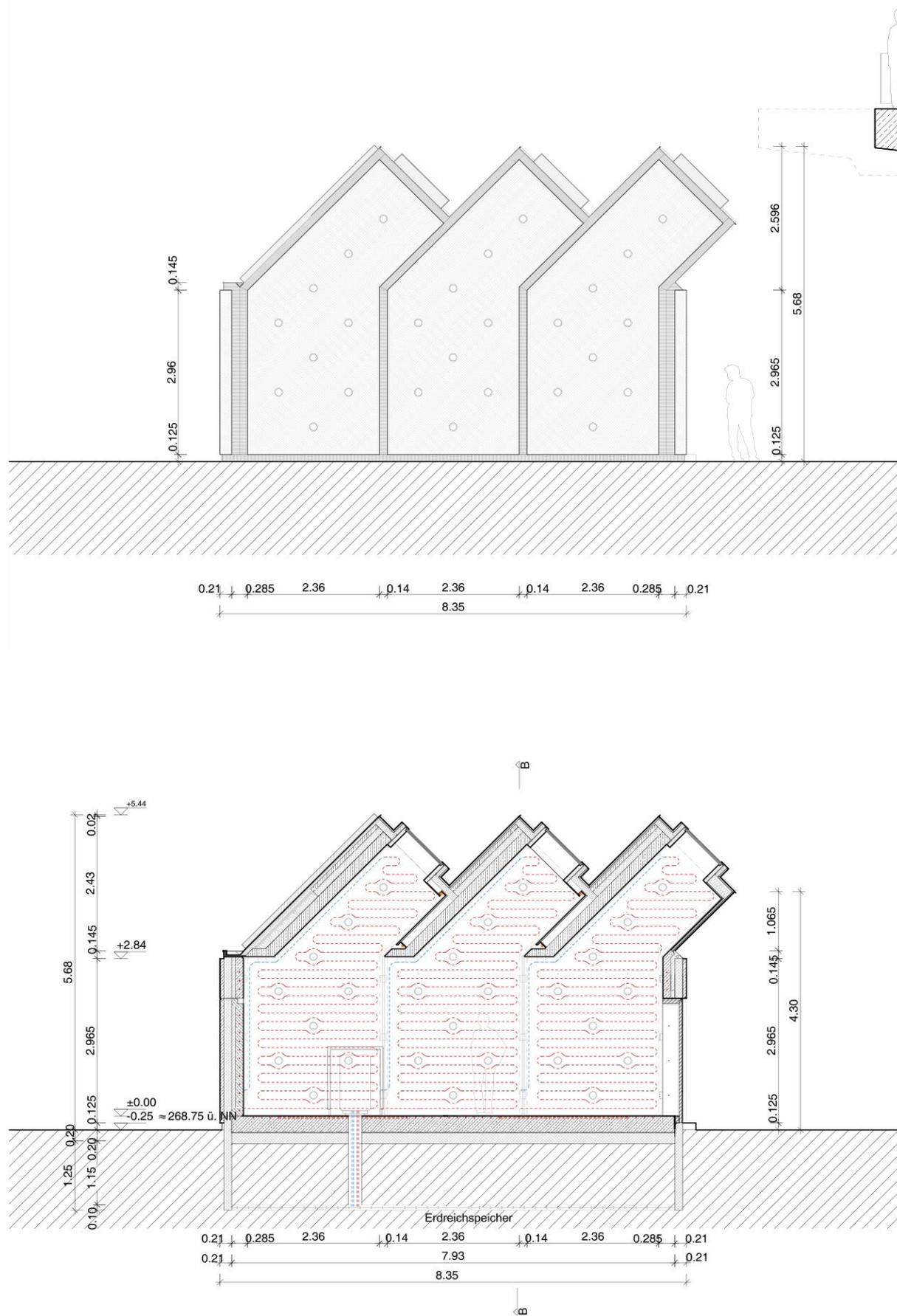


Abbildung 3: Ostansicht mit Längsschnitt M 1:100

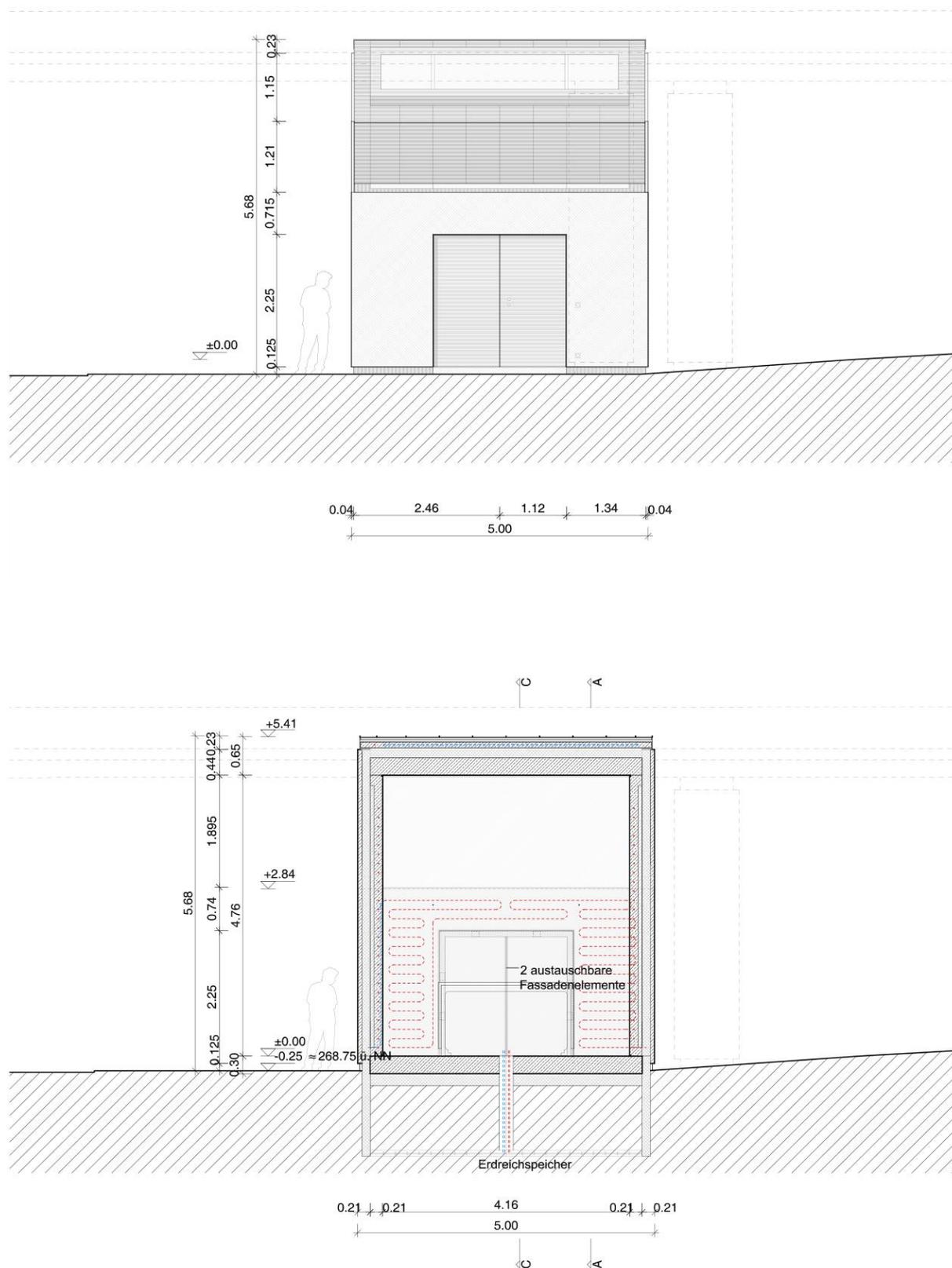


Abbildung 4: Nordansicht mit Querschnitt M 1:100

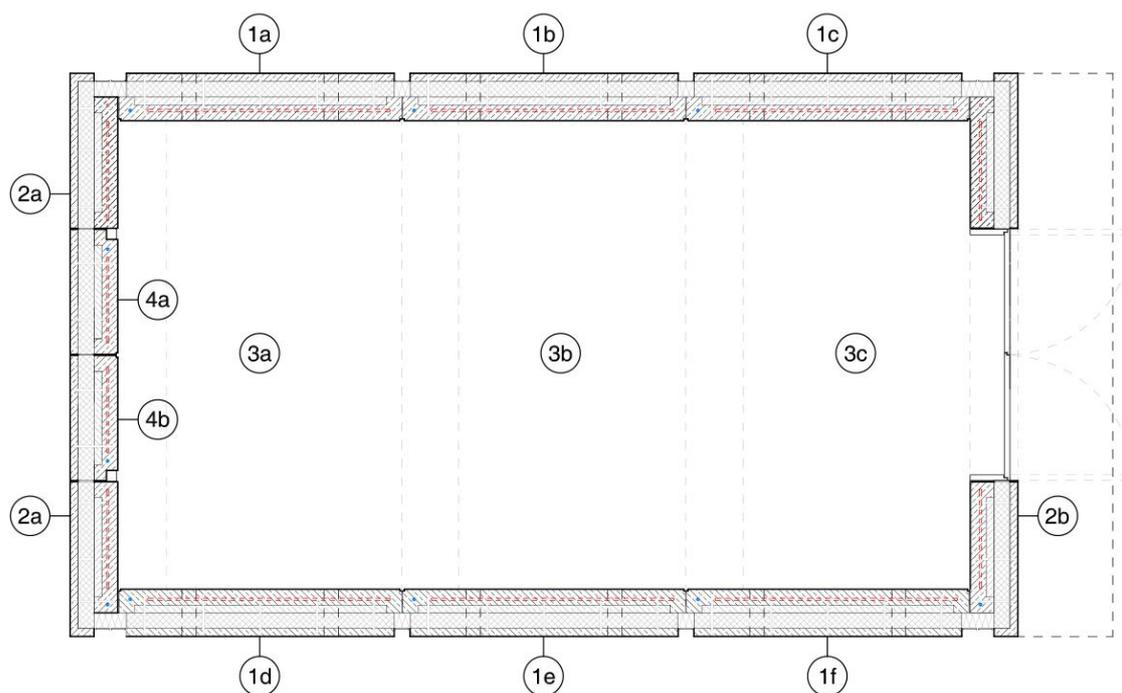


Abbildung 5: Grundriss mit Übersicht der Fertigteile M 1:66

Im Sinne einer größtmöglichen Vereinfachung und Rationalität des Herstellungsprozesses wird die Anzahl unterschiedlicher Fertigteile so weit wie möglich reduziert. Alle Seitenwände sind abgesehen von der unumgänglichen Spiegelung baugleich. Die Elemente 1a-c und 1d-f sind jeweils identisch. Die Stirnwände 2a und 2b sind weitestgehend baugleich, die Dachelemente 3a-c wiederum völlig identisch.

Ermöglicht wird diese Vereinfachung und Reduktion der Bauteile durch das Fügungsprinzip, das auf den folgenden Seiten detailliert dargestellt wird.

Durch die versetzte Anordnung von Trag- und Deckschale werden aus den in der Fertigteilbauweise unumgänglichen Fugen akzentuierte Zwischenräume, denen nicht nur in gestalterischer, sondern auch in konstruktiver und funktionaler Hinsicht eine Schlüsselfunktion zukommt.

Während der Montage sind die zur Verbindung der Fertigteile erforderlichen Spannschlösser über diese Zwischenräume von außen zugänglich. Sämtliche Versorgungsleitungen - von den Vor- und Rückläufen der Bauteilaktivierung bis zur Elektroinstallation - können anschließend hier verzogen werden. Schließlich werden die Zwischenräume ausgedämmt und mit leicht revisionierbaren metallischen Blenden versehen. Diese verbinden sich schließlich mit der Dachhaut und stellen so deren Entwässerung sicher.

### 3.1. Konstruktionsdetails

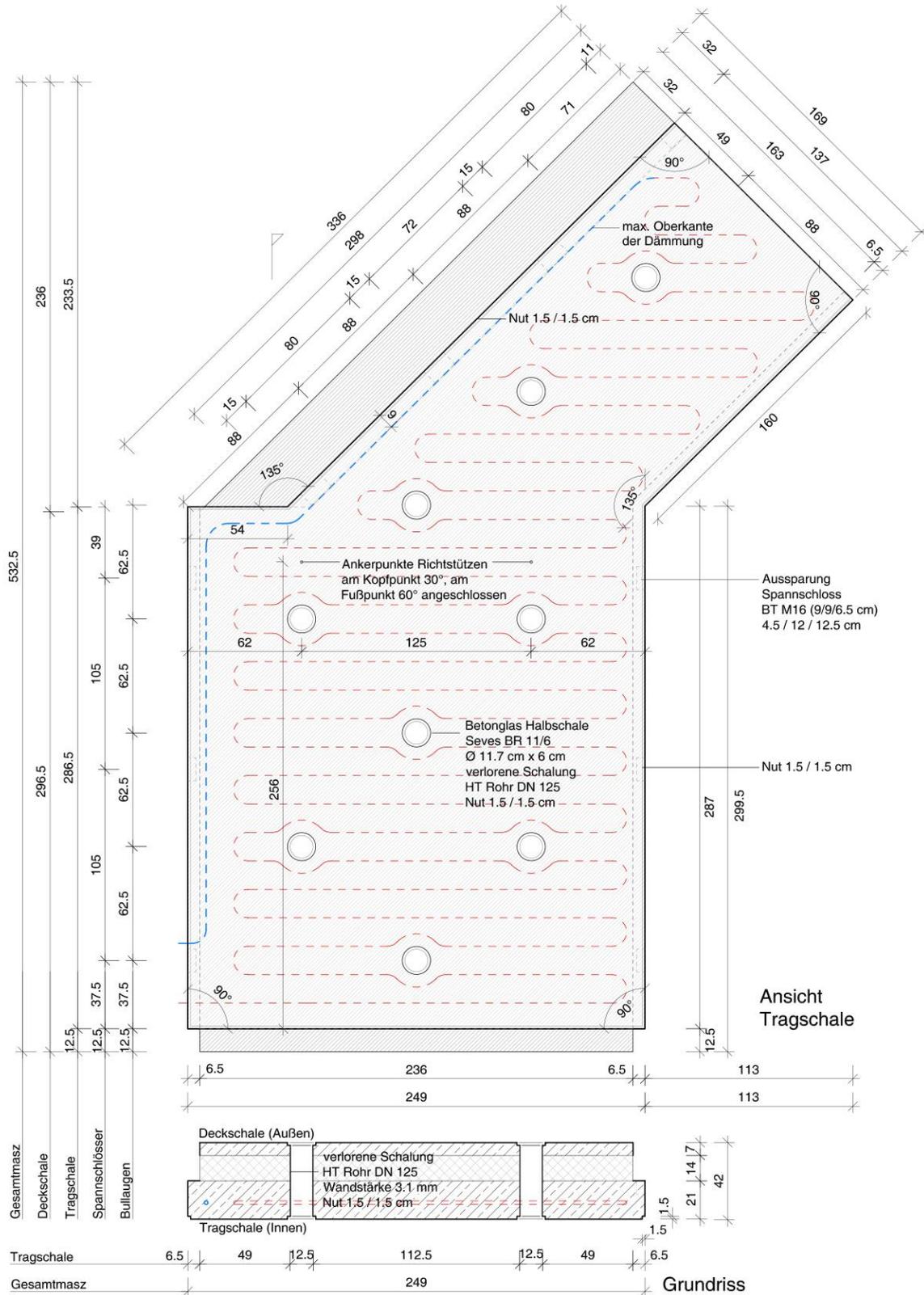


Abbildung 6: Innenansicht Fertigteil 1 mit Horizontalschnitt M 1:33



Abbildung 7: Ecklösung in Detailansicht und Horizontalschnitt

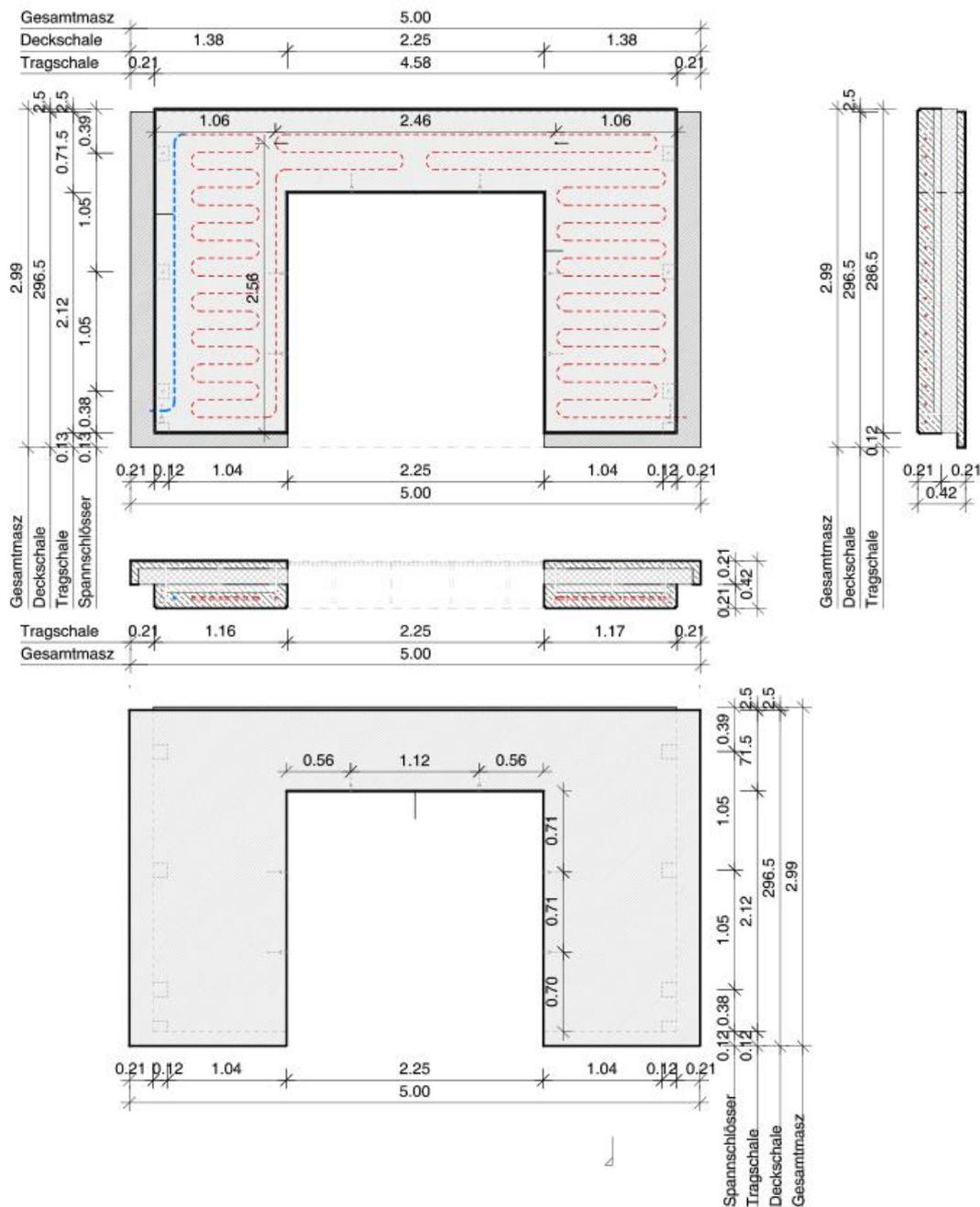


Abbildung 8: Schalplan zu Fertigteil 2 a mit austauschbaren Elementen M 1:100

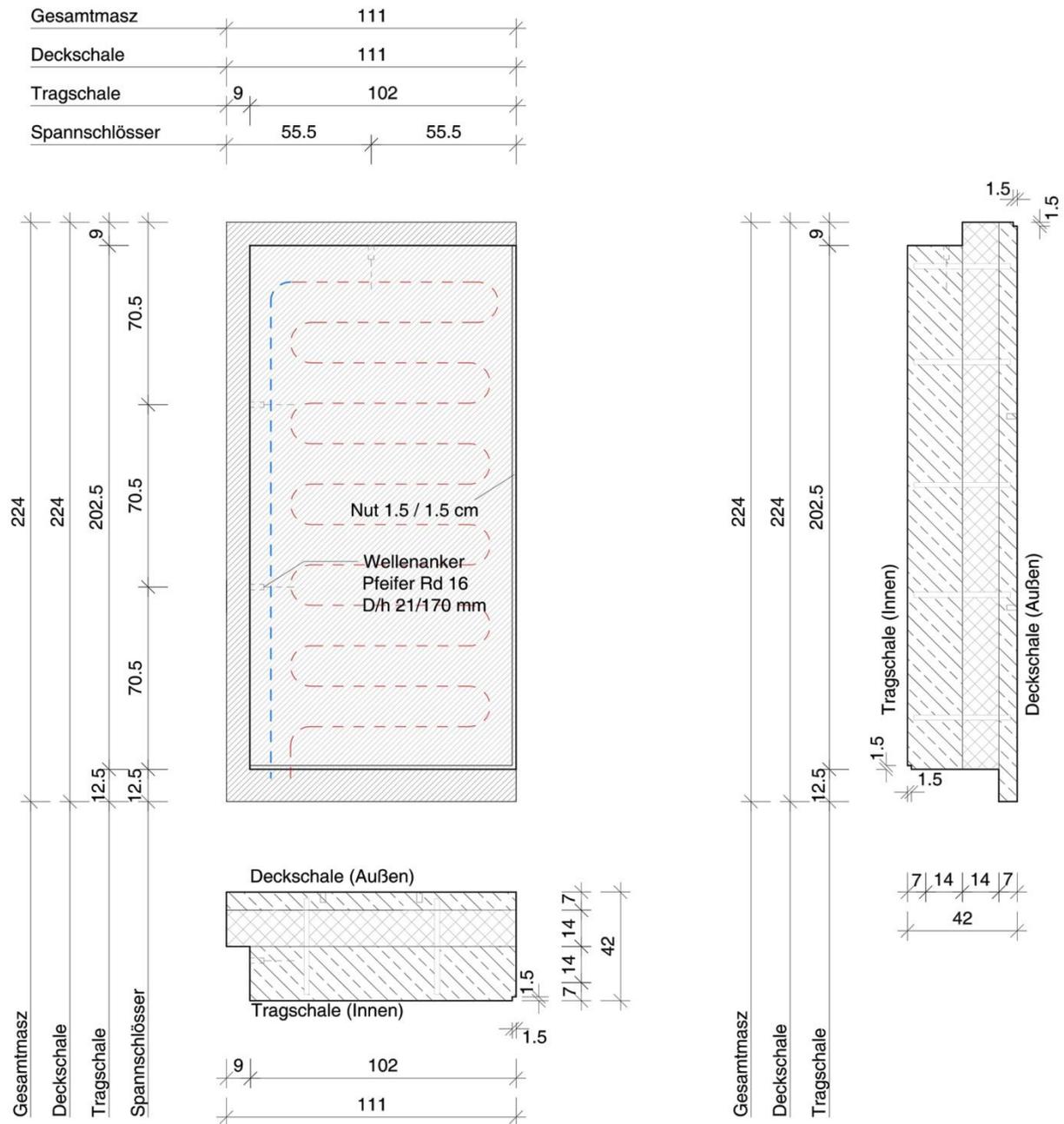


Abbildung 9: Schalplan eines austauschbaren, thermisch aktivierten Bauteils M 1:33

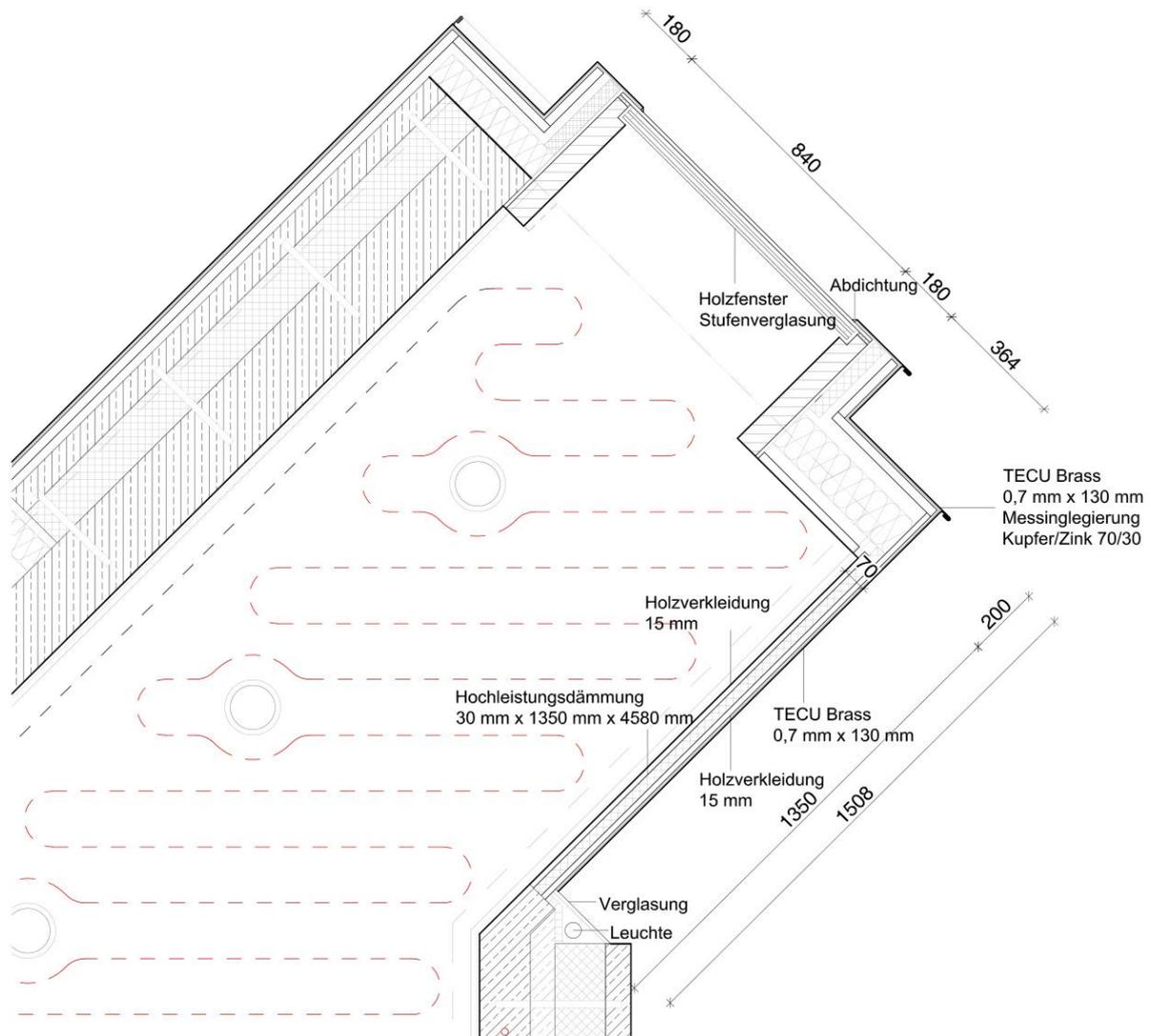


Abbildung 10: Gestaltprägende Elemente - Detaillierung von Oberlichtern und Dachhaut M1:20

## 4. Konstruktionsdetails

Zur Konkretisierung und Überprüfung des im vorigen Abschnitt erläuterten Fügungsprinzips wurde ein in sehr kompakter Form möglichst viele Fügungspunkte darstellendes Modell im Maßstab 1:1 hergestellt. Der Fertigteilstoß in der Fläche, über Eck und die Auflagersituation der Tragschale am Rand der Bodenplatte werden so dargestellt und untersucht.



Abbildung 11: Mock-Up Außenansicht



Abbildung 12: Mock-Up Innenansicht



Abbildung 13: Wachstum - große Kompaktheit und differenzierte Raumbildung

## 5. Statische Bemessung

Der Großdemonstrator Smallhouse IV untersucht die Einsatzmöglichkeiten von multifunktionalen Betonfertigteilen. Für den Bau wird eine prüffähige Statik erstellt. Das Gebäude wird dabei bis auf die Bodenplatte (Ortbetonbauweise) komplett aus Fertigteilelementen in Sandwichbauweise [4] zusammengesetzt. Die Verbindungen der einzelnen Elemente sowie die Aussteifung des Gesamtsystems werden unter anderem durch die Anordnung von Spannschlössern gewährleistet. Im Folgenden werden auszugweise die Bemessungen der Spannschlösser und der Verbindungsmittel der Sandwichelemente dargestellt.

### 5.1. Bemessung der Spannschlösser

Zur Bestimmung der aufzunehmenden Kräfte der Spannschlösser, wird ein 3D-FEM-Modell des Großdemonstrators mit der Software RFEM5 aufgestellt.

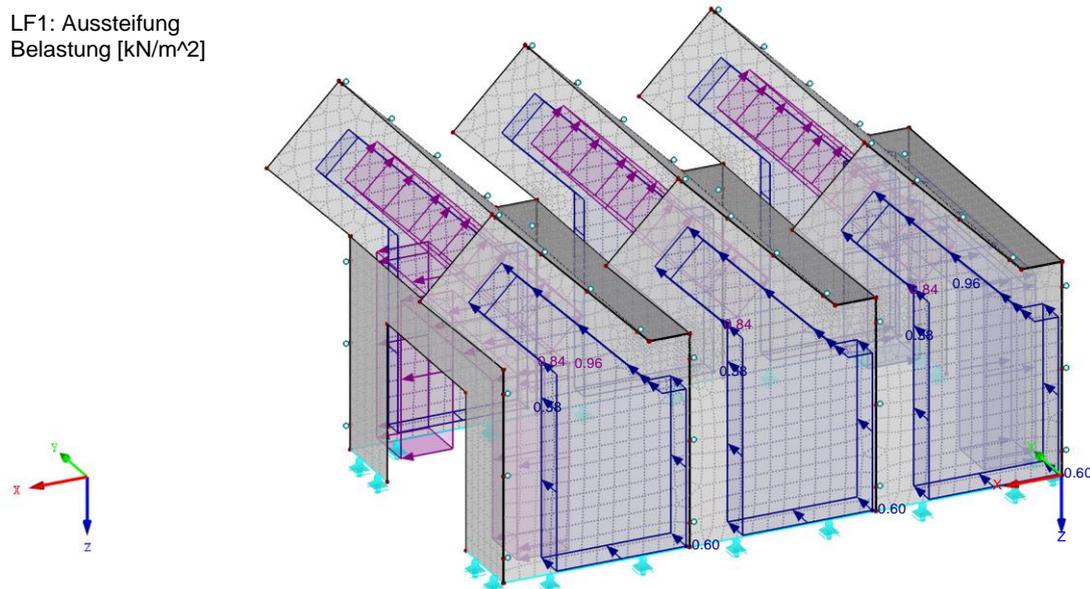


Abbildung 14: 3D-FEM-Modell mit aufgetragenen Belastungen

#### 5.1.1. Aussteifung der Betonfertigteile des Großdemonstrators

Wand- und Deckenscheiben werden auf zwei Weisen beansprucht: vertikale Lasten (Eigen- und Verkehrslasten) und horizontale Lasten (Wind- und Aussteifungslasten). Die vertikalen Lasten werden über die Wandscheiben in die Bodenplatte eingeleitet. Die horizontalen Lasten müssen von dem Gesamttragwerk aufgenommen werden. Die hieraus resultierenden Schubkräfte in den Bauteilfugen müssen von den Verbindungsmitteln aufgenommen werden. Bei den Verbindungsmitteln des Großdemonstrators handelt es sich um das BT-Spannschloss<sup>®</sup>. Hiermit wird eine dauerhafte Verbindung der Betonfertigteile für Belastung in Zug- und Quer- richtung sichergestellt. Montiert werden die Spannschlösser in Aussparungen mittels Schraubverbindungen in den Bauteilen. Nach der Montage werden die Aussparungen vermörtelt.



Abbildung 15: Spannschlossverbindungen [5]

Die Tragschalen der Seitenwände (Position 1) untereinander und mit den Tragschalen der Frontwände (Position 2) mittels drei Spannschlössern verbunden. Die Tragschalen der Dachelemente (Position 3) werden seitlich mit jeweils vier Spannschlössern an den Seitenwänden befestigt. Dazu werden die Tragschalen der Frontwände jeweils stirnseitig mit einem Spannschloss verbunden. Somit werden insgesamt 52 Spannschlösser zur Verbindung aller Bauteile benötigt. Abbildung 16 zeigt in der Ansicht die Verbindungen der Betonfertigteile.

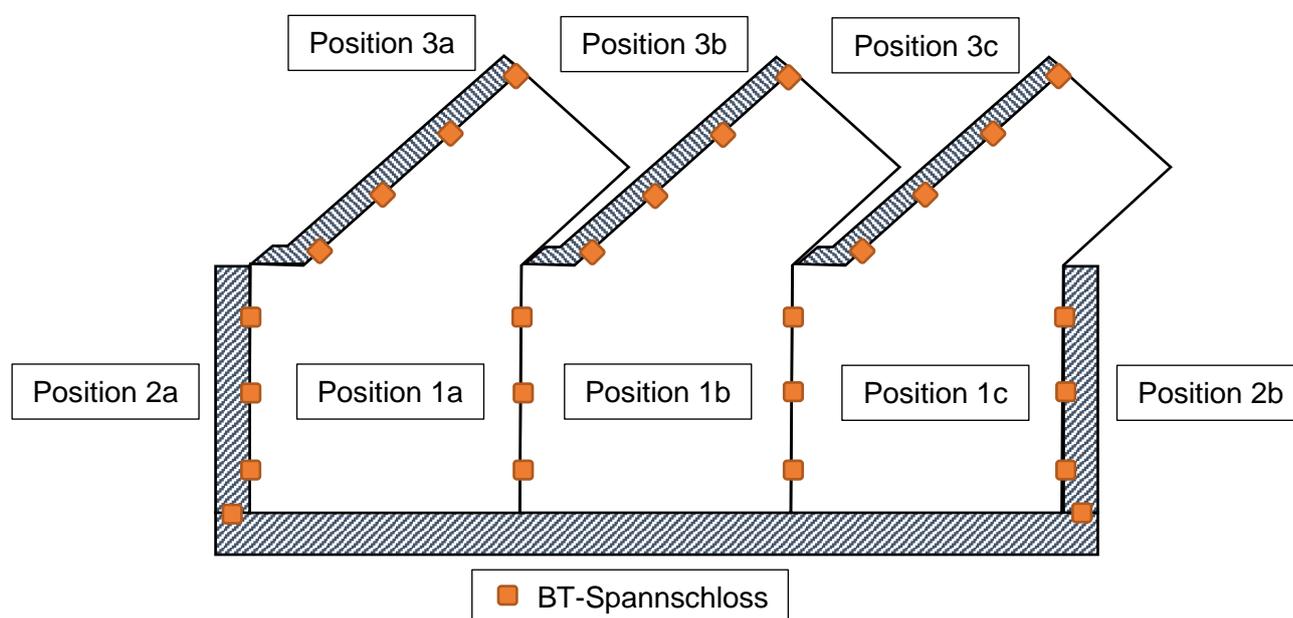


Abbildung 16: Übersicht der Verbindungen

Aus den aufgetragenen Belastungen aus Abbildung 14 und den gewählten Verbindungspunkten aus Abbildung 16 ergeben sich die Schnittgrößen für die Spannschlösser. Bei der FEM-Simulation werden die Bauteilfugen so modelliert, dass diese lediglich Druckkräfte aufnehmen können. Die Normalkräfte der Verbindungsmittel sind in Abbildung 17, die Querkräfte in y-Richtung in Abbildung 18 und die Querkräfte in z-Richtung Abbildung 19 dargestellt. Hierbei handelt es sich um Bemessungswerte.

LF1: Aussteifung  
Stäbe Schnittgrößen N

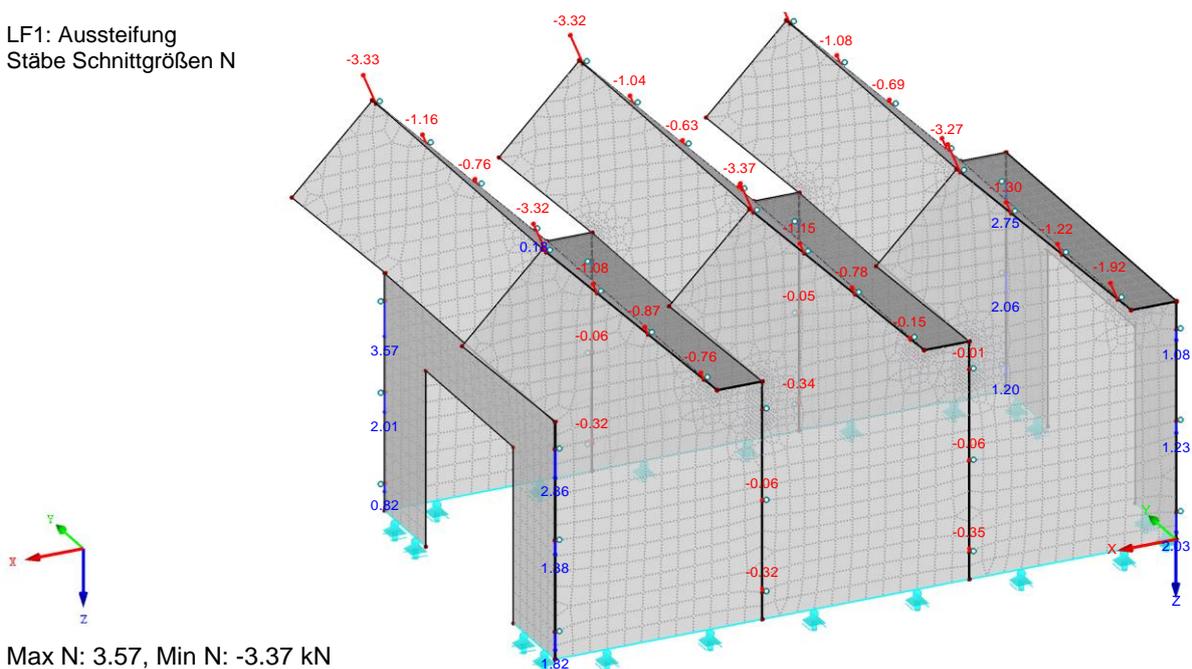


Abbildung 17: Aufzunehmende Normalkräfte N der Spannschlösser

LF1: Aussteifung  
Stäbe Schnittgrößen V-y

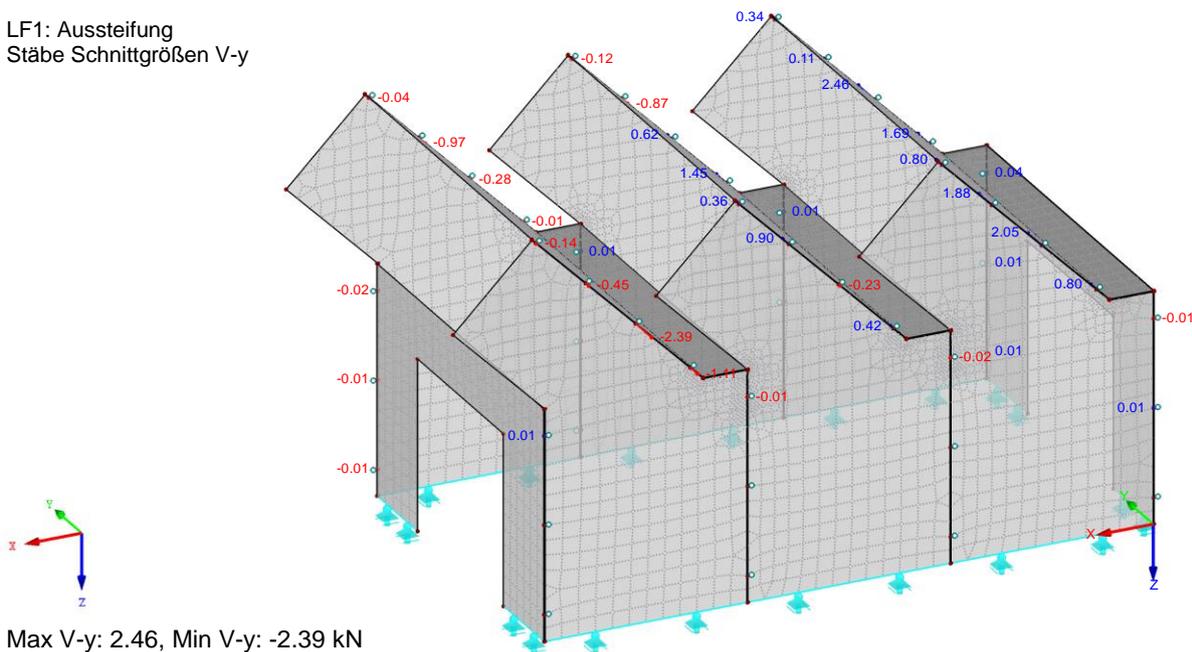
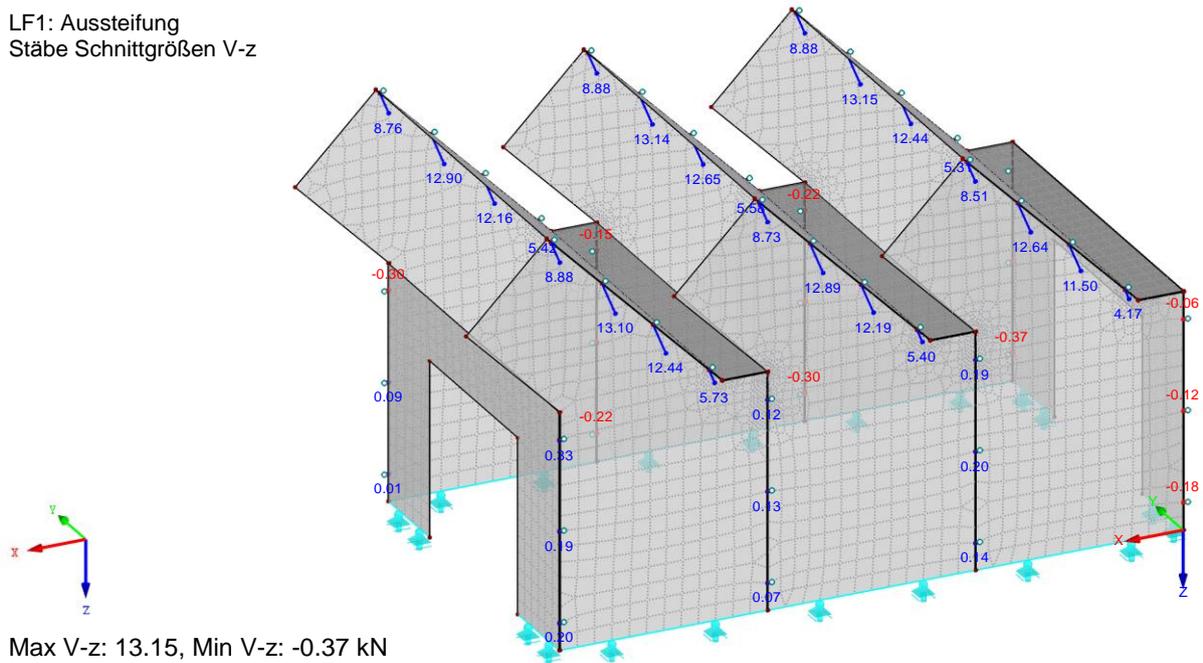


Abbildung 18: Aufzunehmende Querkräfte V<sub>y</sub> der Spannschlösser

LF1: Aussteifung  
 Stäbe Schnittgrößen V-z



Max V-z: 13.15, Min V-z: -0.37 kN

Abbildung 19: Aufzunehmende Querkräfte  $V_z$  der Spanschlösser

Die Bemessung der Spanschlösser erfolgt über einen Interaktionsnachweis mit:

$$\frac{N_d}{N_{R,d}} + \frac{V_d}{V_{R,d}} \leq 1,0$$

Mit:

$N_d$ : Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft

$N_{R,d}$ : Bemessungswert für die Zugtragfähigkeit

$V_d$ : Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

$V_{R,d}$ : Bemessungswert für die Querkrafttragfähigkeit

Hieraus ergibt sich zur Verbindung der Fertigteile das BT-Spannschloss M16 mit  $N_{R,d} = 43,5$  kN und  $Q_{R,d} = 26,2$  kN [6].

## 5.2. Bemessung der Verbindungsmittel der Sandwichelemente

Ein Sandwichelement besteht aus einer Tragschale, einer Wärmedämmung und einer Vorsatzschale. Die Tragschale dient zum Abtrag vertikaler Lasten und zur Aussteifung des Gebäudes und die Vorsatzschale zum Wetterschutz. Die Verbindung dieser beiden Schalen erfolgt über diskrete Verbindungsmittel, vgl. Abbildung 20 [7].

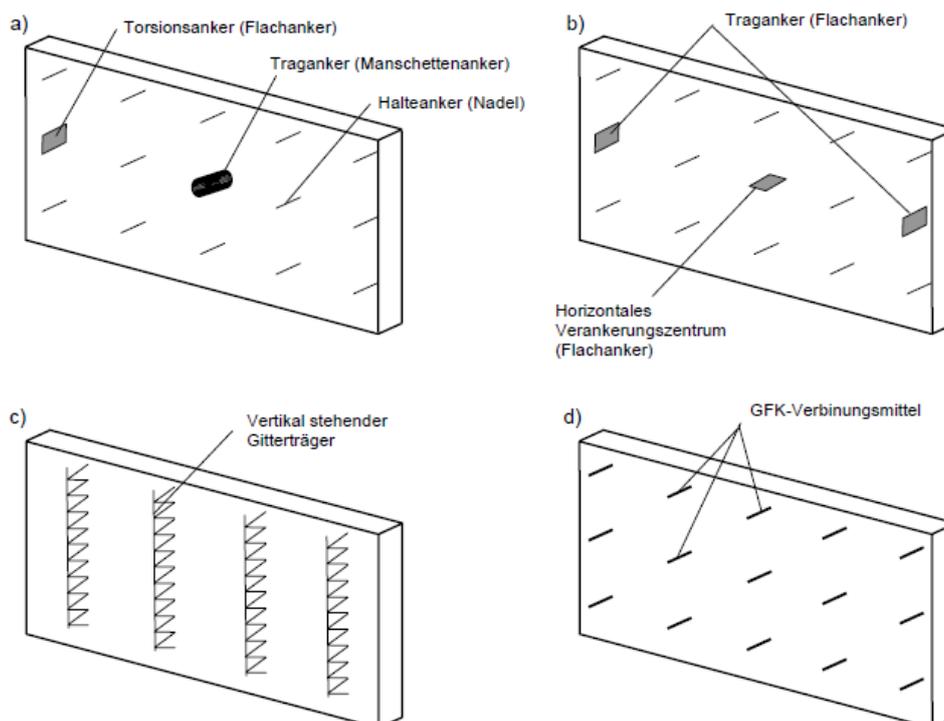


Abbildung 20: Mögliche Verbindungselemente von Sandwichelementen, a) Starrer Traganker im Flächenschwerpunkt, b) Biegeeweiche Flachanker außerhalb des Flächenschwerpunktes, c) Gitterträger, d) Stabförmige GFK-Verbindungsmittel [7]

Um Wärmebrücken infolge der Verbindungsmittel zwischen Tragschale und Vorsatzschale zu vermindern, wird das Produkt Schöck® Thermoanker aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) verwendet, vgl. Abschnitt 6.5. Diese Verbindungsmittel dürfen laut Zulassung [8] nur auf Zug beansprucht werden. Daher sind bei freihängenden Fassaden neben horizontalen Verbindungsmittel auch diagonale Verbindungsmittel notwendig, um die Eigenlast der Vorsatzschale aufzunehmen.

Der Nachweis für die horizontalen Verbindungsmittel erfolgt mittels der Bemessungssoftware „Schöck-Bemessung Schöck Thermoanker“. Das Raster der horizontalen Verbindungsmittel wurde auf 60 x 60 cm festgelegt. Die Anzahl der diagonalen Verbindungsmittel wird wie folgt bestimmt:

- Eigenlast der Vorsatzschale:
  - $G_{d,1} = G_{k,1} \cdot \gamma_G = 1,35 \cdot 19,25 \text{ kN} = 25,99 \text{ kN}$
- Einwirkung Last auf die diagonalen Verbindungsmittel (45°):
  - $G_{d,1,45} = \frac{G_{d,1}}{\sin 45^\circ} = \frac{25,99 \text{ kN}}{\sin 45^\circ} = 36,75 \text{ kN}$
- Bemessungswert des Widerstandes der diagonalen Verbindungsmittel [9]:
  - $N_{Rd} = 7,88 \text{ kN}$
- Anzahl an erforderlichen diagonalen Verbindungsmitteln:
  - $n_{erf,Pos1} = \frac{G_{d,1,45}}{N_{Rd}} = \frac{36,75 \text{ kN}}{7,88 \text{ kN}} = 4,66 \rightarrow \text{gew. 6 Stück}$

Unter Einbehaltung der Mindestabstände  $s_{1,min}$ ,  $s_{2,min}$ ,  $s_{min}$ ,  $c_{1,min}$  und  $c_{2,min}$  ergibt sich folgendes Rastermuster der Verbindungsmittel:

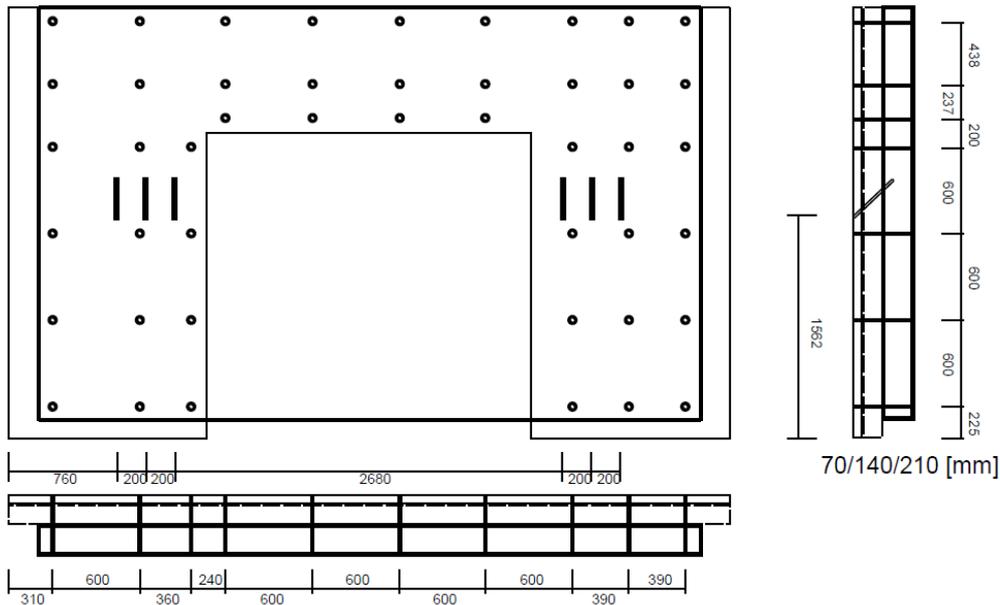


Abbildung 21: Raster der Verbindungsmittel für Position 2

Da der Schöck Thermoanker nur für Wandscheiben und nicht für Deckenscheiben zugelassen ist, kann die Bemessung der Deckenelemente nicht mittels der Software durchgeführt werden. Zur Untersuchung des Tragverhaltens der in Position 3 verwendeten Deckenelemente werden mehrere Versuchsreihen von Sandwichelementen hinsichtlich des Verhaltens unter einer Biegebeanspruchung als auch unter einer „reinen“ Schubbeanspruchung durchgeführt.

### 5.3. Experimentelle Untersuchungen

Zur Beurteilung der Herstellbarkeit und zur Untersuchung des Tragverhaltens werden neben den Verbundmitteln unterschiedliche Dämmstoffe verwendet sowie die einzelnen Schichthöhen variiert. Als Verbundmittel kommt der Schöck Thermoanker zum Einsatz. Die Anordnung und die Abstände dieser Anker untereinander werden ebenfalls variiert. Als Dämmstoffe werden extrudiertes Polystyrol (XPS) sowie expandiertes Polystyrol (EPS) eingesetzt.

Der Einsatz von GFK-Verbindungsmitteln in den Prüfkörpern führte zu einer Gesamtsteifigkeit und ermittelten Tragfähigkeiten bzw. zugehörigen Verformungen, die hinsichtlich ihres späteren Einsatzzwecks absolut ausreichend sind. Weiterhin kann nachgewiesen werden, dass die Auswahl des Materials für die Dämmstoffschicht einen maßgeblichen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten der Sandwichelemente hat. Der Einsatz von XPS-Dämmstoff führt dazu, dass die Steifigkeit der Elemente vergrößert wird und die maximale Tragfähigkeit höher ausfällt. Dies lässt sich in diesem Fall einfach durch die deutlich höhere Scherfestigkeit bzw. den deutlich höheren Schubmodul, aber auch die vergleichsweise hohe Druckfestigkeit des XPS-Dämmstoffes im Gegensatz zum EPS-Dämmstoff begründen.

Die Variation der Querschnittshöhe wirkt sich ebenfalls auf das Tragverhalten von kerngedämmten Mehrschichtbauteilen aus. Die ausgewählten Vergleiche der Versuchskörper zeigten dabei, dass sich eine Vergrößerung der Dämmstoffschichtdicke positiv auf die Tragfähigkeit des Elementes auswirkt. Dies ergibt sich vor allem aus der Vergrößerung des Abstandes der Betonschichten und der daraus resultierenden Vergrößerung der Biegesteifigkeit des Sandwichelementes. Je steifer die Schub- und Zugverbindung der einzelnen Schichten untereinander ist, desto größer werden die Verbundtragfähigkeit und damit die maximale Biegetragfähigkeit der Bauteile.

Im Allgemeinen werden die Versuchskörper zur Ermittlung des Biegetragverhaltens mithilfe sogenannter Vier-Punkt-Biegeversuche untersucht. Hierzu wird die Zylinderkraft mit einer Lasteinleitungsstruktur, die aus Lastverteilungsplatten, Stahlrollen, Traverse Kraftmessdose, Kalotte sowie Zylinderverlängerung besteht, in Längsrichtung zentrisch auf den Versuchskörper aufgebracht (Abbildung 22).

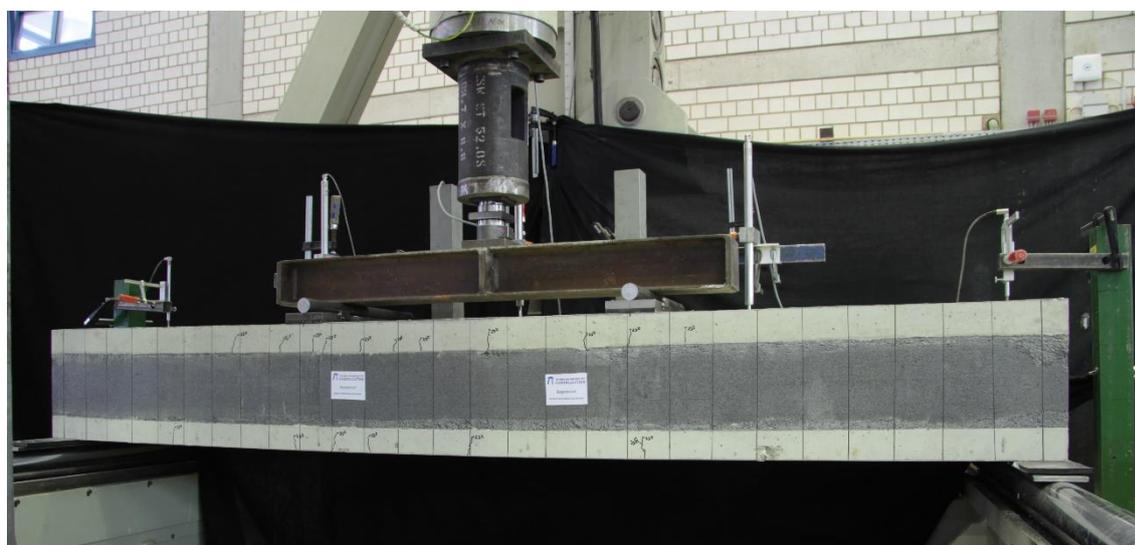


Abbildung 22: Versuchsaufbau der Vier-Punkt-Biegeversuche

Auszugsweise sind in Abbildung 25 die Kraft-Verformungskurven von Vier-Punkt-Biegeversuchen dargestellt. Die gezeigten Versuchskurven stammen von Versuchskörpern, in denen unterschiedliche Dämmstoffe verwendet und verschiedene Anordnungen von stiftförmigen Verbundmitteln getestet werden (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Es fällt auf, dass ein deutlicher Unterschied zwischen den maximal aufnehmbaren Lasten besteht. Die maximale Zylinderkraft für die Versuchskörper, in denen extrudiertes Polystyrol als Kernschicht verwendet wird, werden deutlich höhere Werte erreicht als in den Versuchskörpern mit expandiertem Polystyrol als Kernschicht. Für die Versuchskörper mit dem steiferen extrudierten Polystyrol als Kernschicht können dabei Lasten zwischen 78 kN und 85 kN aufgenommen werden, während im Vergleich dazu bei den Versuchskörpern mit expandiertem Polystyrol bei gleicher An-

ordnung der Verbundmittel Lasten zwischen 45 kN und 57 kN aufgenommen werden. Außerdem sind die Unterschiede in der Durchbiegung aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der Verbundmittel auffällig. In den Versuchskörpern, in denen mehr Verbundmittel eingebaut sind (Variante A, kleiner werdende Ankerabstände hin zum Auflager), werden größere Durchbiegungen gemessen im Vergleich zu den Versuchskörpern mit weniger Verbundmitteln (Variante B, gleichmäßiges Ankerraster).

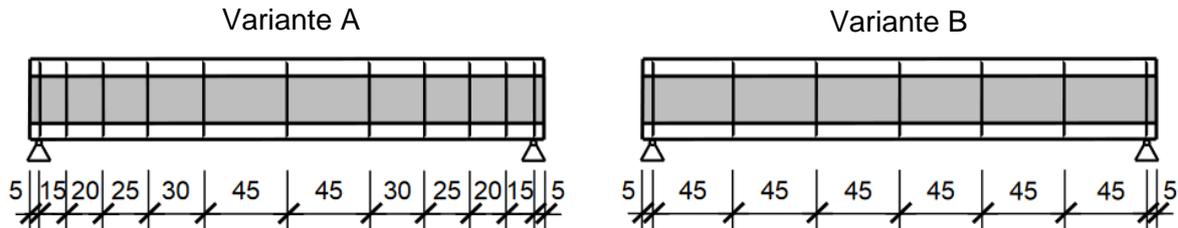


Abbildung 23: Unterschiedliche Varianten für die Verteilung der Verbundmittel in Längsrichtung der Versuchskörper [10]

Während die Last bei den Versuchskörpern mit XPS durch die zusätzliche Anordnung von stiftförmigen Verbundmitteln im Bereich der Auflager (Variante A) nicht gesteigert werden kann, führten die zusätzlichen Anker bei den Versuchskörpern mit EPS zu einer um ca. 16 % höheren Zylinderkraft im Vergleich zu den Versuchskörpern mit gleichmäßig verteilten Ankern (Variante B).

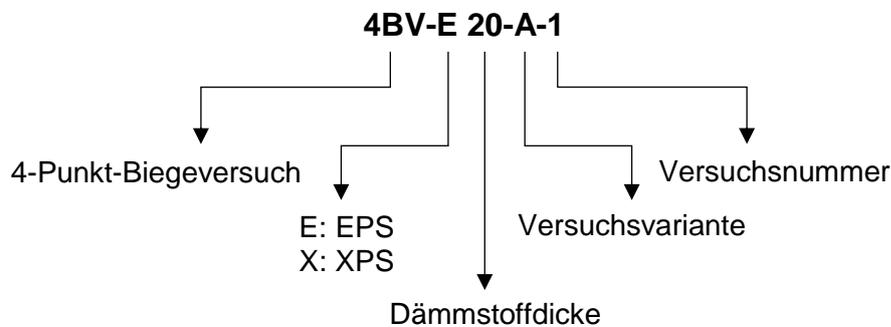


Abbildung 24: Aufschlüsselung der Versuchsbezeichnung

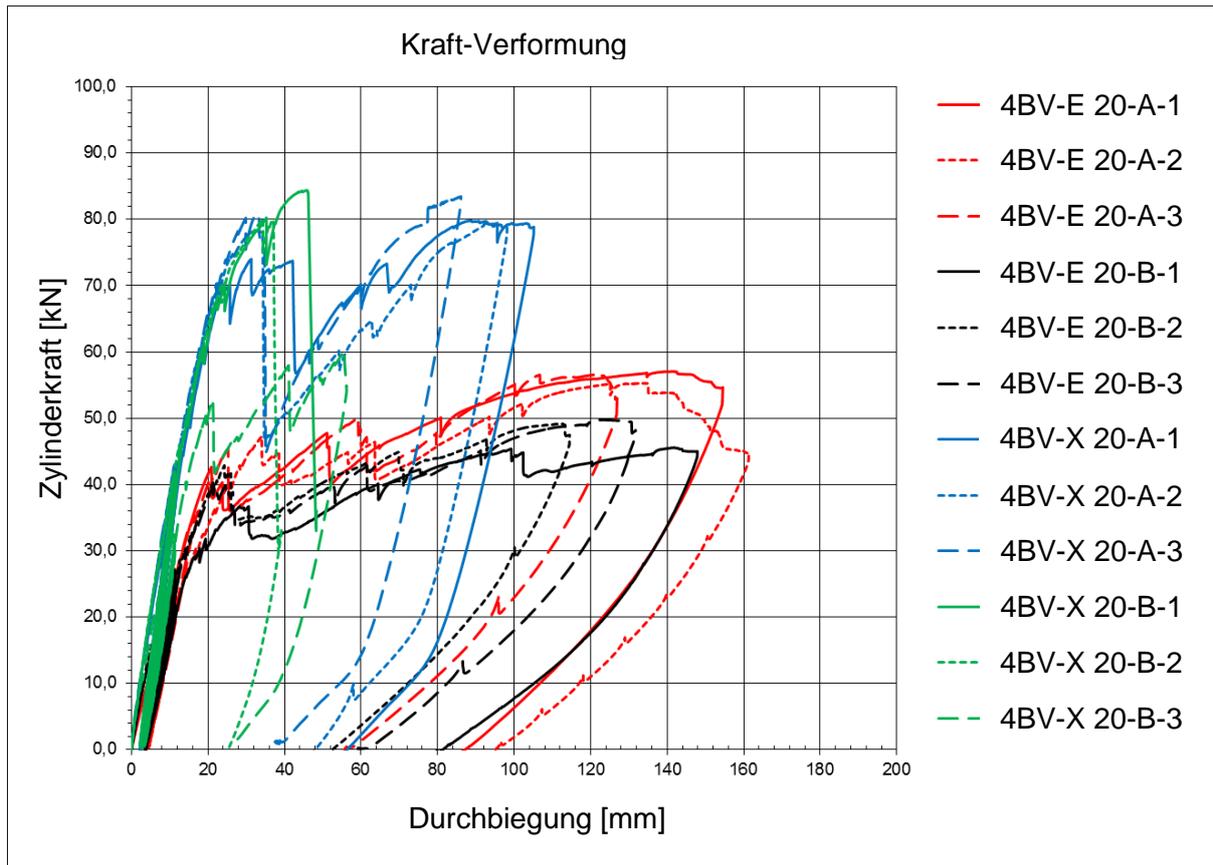


Abbildung 25: Vergleich der Kraft-Verformungs-Kurven ausgewählter Versuchskörper

Anhand der Ergebnisse können Bauteilwiderstände als Grundlage für die statische Bemessung ermittelt werden und der Aufbau der Dachelemente bestimmt werden. Hieraus ergeben sich folgende Querschnittsaufbauten bzw. Querschnittshöhen für die einzelnen Schichten der Dachelemente:



Abbildung 26: Schichtaufbau der Dachelemente

## 6. Gebäudeenergiekonzept

In klassischen Gebäudeenergiekonzepten stellt der Pufferspeicher die zentrale Komponente der Wärmespeicherung dar. Zu einer effektiven Heizungsunterstützung durch Solarkollektoren sind große Pufferspeichervolumen notwendig, da es einen Ausgleich zwischen Bedarf und Bereitstellung benötigt. In der nachfolgenden Abbildung sind die Heizlast und das solare Darangebot eines Einfamilienhauses aufgetragen. Diese zeigt die zeitliche Diskrepanz zwischen solarem Angebot und Heizwärmebedarf.

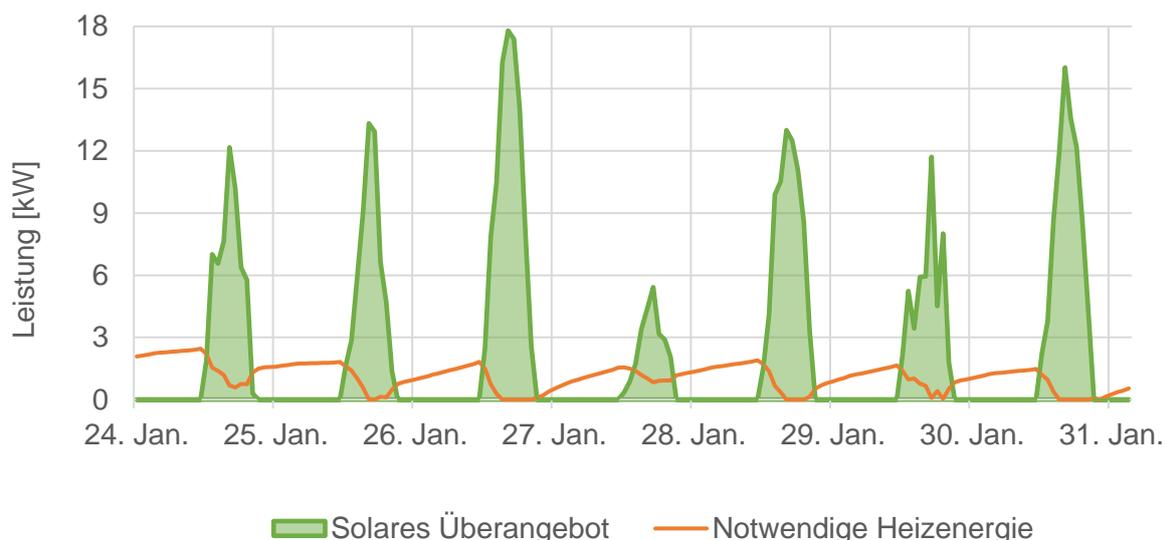


Abbildung 27: Gegenüberstellung solares Angebot und notwendige Heizenergie [11]

Diese Diskrepanz kann durch die zeitliche Verschiebung der solaren Erträge mittels Speicherung ausgeglichen werden. In anderen Gebäudeenergiekonzepten, sowie in aktuellen Solarraktivhäusern, geschieht die zeitliche Verschiebung mittels großer Pufferspeicher. Das Prinzip dahinter liegt darin, mit einem minimalen primärenergetischen Bezug die gesamte Wärmebereitstellung zu gewährleisten.

Auch das Gebäudeenergiekonzept des Smallhouse IV verfolgt den Ansatz des minimalen primärenergetischen Bezugs durch die effiziente Nutzung solarer Wärme. Im Gegensatz zu einer zentralen Wärmespeicherung in Pufferspeichern wird das Potential der Gebäudestruktur zur Wärmespeicherung nutzbar gemacht. Zur Wärmespeicherung werden neben einem minimalen Pufferspeicher auch die Gebäudestruktur und das bebaute Erdreich herangezogen. Durch das Kombinieren eines Pufferspeichers mit weiteren Wärmesenken soll der solare Ertrag des Kollektors effizienter genutzt werden, um den solaren Deckungsgrades des Gebäudes zu steigern. Das Smallhouse IV hat die Zielgröße eines solaren Deckungsgrades von mindestens 50% durch die Wärmespeicherung in der Gebäudestruktur.

Wie oben beschrieben, sollen die multifunktionalen Bauteile als Kurzzeitspeicher zum Ausgleich der täglichen Diskrepanz zwischen solarem Angebot und notwendigem Heizwärmebedarf dienen. Der Erdreichspeicher soll hingegen als Langzeitspeicher zum saisonalen Ausgleich zwischen Sommer und Winter genutzt werden. Die vom Sommer gespeicherte Wärme

wird durch eine Sole/Wasser-Wärmepumpe bei Bedarf im Winter wieder nutzbar gemacht. Durch diese Kombination aus Kurz- und Langzeitspeicher und einem Pufferspeicher soll die anfallende solare Wärme effizient genutzt werden.

Der Großdemonstrator Smallhouse IV besteht aus drei verschiedenen Bauteilen: der Bodenplatte, den Außenwänden sowie den Deckenelementen. Jedes dieser Bauteile ist als multifunktionales Bauteil mit unterschiedlichen thermischen Funktionen ausgelegt. Die kerntemperierten Außenwände des Großdemonstrators sollen neben ihrer wärmedämmenden Eigenschaften auch zur Wärmespeicherung und zur Temperierung des Innenraumes genutzt werden. Hierfür werden die Bauteile kerntempertiert, um Wärme aus dem Kollektor zeitverzögert an den Innenraum abzugeben. Die Aufgaben der oberflächennah aktivierten Bodenplatte sind primär die Wärmedämmung und Temperierung des Innenraumes mit geringer Zeitverzögerung. Während die Bauteile primär die Grundlast des Gebäudes decken sollen, sorgt die Aktivierung in der Bodenplatte für die Deckung der Residuallast. Die Deckenelemente werden ebenfalls wie die Außenwände in Sandwichbauweise hergestellt und sind innerhalb der Vorsatzschale thermisch aktiviert. Hierdurch fungieren die Deckenelemente neben ihrer wärmedämmenden Funktion als Massivabsorber zur Wärmebereitstellung.

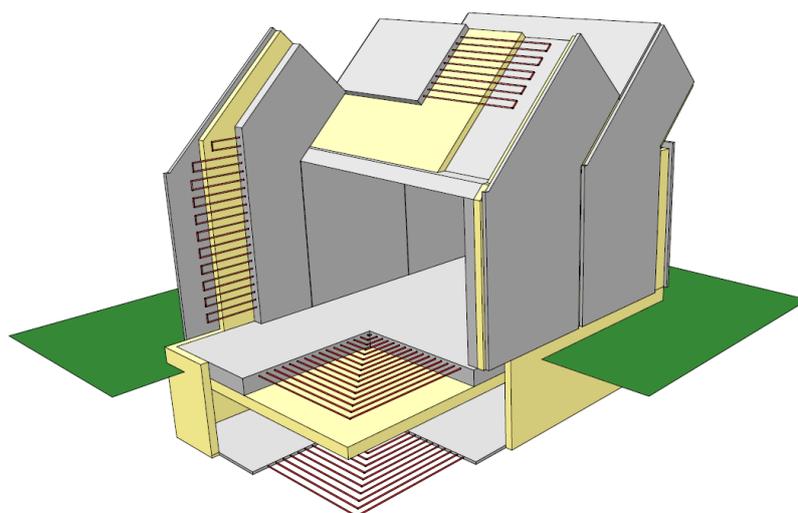


Abbildung 28: Visualisierung des Großdemonstrators mit Schnittflächen in den multifunktionalen Bauteilen

Die nachfolgende Abbildung 29 gibt einen schematischen Überblick über die Komponenten und deren Verschaltung untereinander. Hierbei wird deutlich, dass die Solarthermie in drei Speichern einspeisen kann. Ebenso hat die Wärmepumpe zwei mögliche Wärmequellen, den Erdreichspeicher und den Massivabsorber. Die Heizlast kann sowohl mittels der aktiven Bodenplatte, als auch der Multifunktionalen Bauteile gedeckt werden. In Abschnitt 8.2 wird die Verschaltung und in Kapitel 9 die Regelung und Steuerung der einzelnen Komponenten genauer dargestellt.

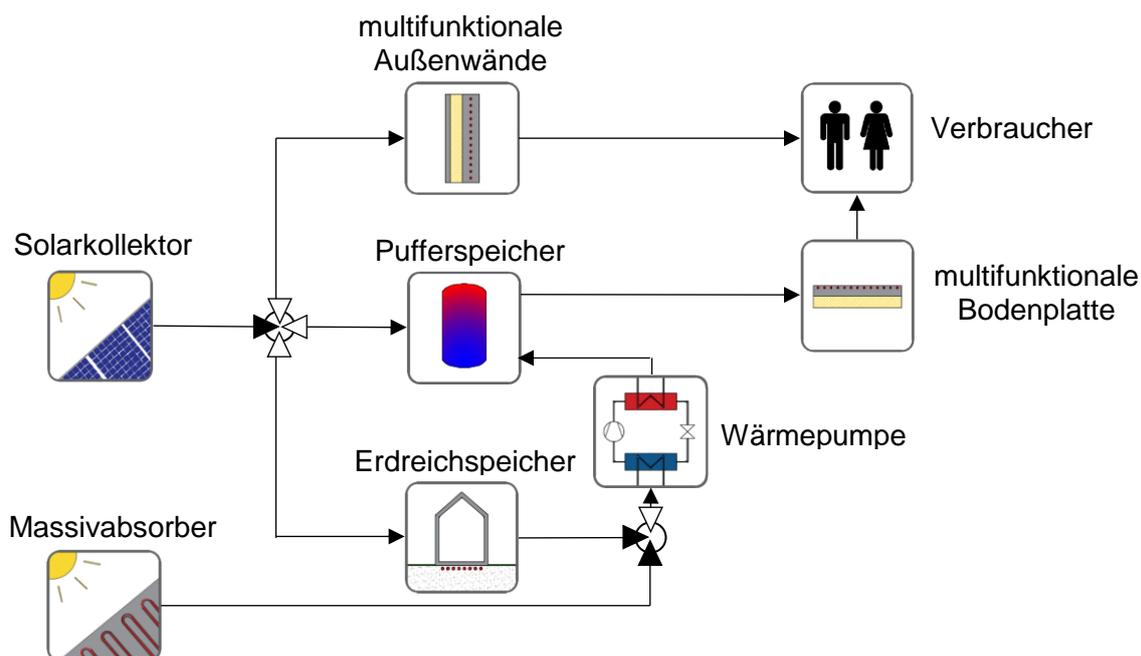


Abbildung 29: Energiekonzept Smallhouse IV

### 6.1. Multifunktionale Betonfertigteile

Multifunktionale Betonfertigteile sind thermisch aktivierte Sandwichelemente, welche zur Wärmespeicherung, zur Klimatisierung des Innenraumes und zur Verminderung der Wärmeverluste über die Außenbauteile dienen. Die Bauteile werden über wasserführende Rohre kern-temperiert, wodurch es möglich ist, den Innenraum aktiv zu kühlen und zu heizen. Durch die im Kern integrierte Wärmedämmung der Sandwichelemente sind die Wärmeverluste nach außen minimal und die über die wasserführenden Rohre eingebrachte Wärme wird zeitverzögert an den Innenraum abgegeben (Speichereffekt).

Die Herstellung erfolgt in Fertigteilwerken, wodurch die Konstruktion sowie das Temperiersystem in einem Element vorgefertigt werden. So können die Bauteile im Fertigteilwerk nicht nur statisch präzise für das jeweilige Projekt hergestellt werden, sondern auch unter thermischen Gesichtspunkten. Neben den thermischen Vorteilen werden die multifunktionalen Betonfertigteile in Sandwichbauweise hergestellt, um die Nachhaltigkeit von Gebäuden zu steigern [12]. Bei jedem Bauteil kann das Speichervermögen, die Reaktionszeit (thermische Trägheit) sowie die Wärme- und Kälteleistung individuell angepasst werden. Im Folgenden werden die drei thermisch relevanten Funktionen der Multifunktionalen Bauteile genauer erläutert:

- **Wärmespeicherung**

Die Fähigkeit eines Bauteils Wärme zu speichern ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Speicherkapazität und der Dichte des Speichermediums. Die Kombination aus diesen drei Parametern sowie des großen Speichervolumens der auf Beton basierenden Bauteile führt zu einem hohen Wärmespeichervermögen.

- **Klimatisierung**

Thermisch aktivierte Bauteile zählen zu den Flächenheizelementen. Durch die große thermische Übertragungsfläche der Gebäudestruktur zum Innenraum, ist es möglich, mit geringen Oberflächenleistungen große Energiemengen in den Raum einzubringen oder dem Raum zu entziehen.

$$Q = q \cdot A$$

Mit:

$Q$ : Wärme

$q$ : Wärmestromdichte

$A$ : Fläche.

Massive Bauteile tragen zur passiven Klimatisierung des Innenraumes bei. Durch die thermische Aktivierung der Gebäudetragestruktur kann der Innenraum zudem aktiv klimatisiert werden. Thermisch aktive Bauteile beeinflussen somit das Raumklima sowohl passiv als auch aktiv.

- **Wärmedämmung**

Die Höhe der Transmissionswärmeverluste der Außenbauteile sind neben der Umgebungstemperatur vom U-Wert abhängig. Bei mehrschichtigen Bauteilen sorgt die im Kern integrierte Dämmung für einen hohen Wärmewiderstand. Neben der Wärmedämmung beeinflussen die Verbindungsmittel von Trag- und Vorsatzschale, sowie die konstruktive Ausbildung der Wärmebrücken die Wärmeverluste der Gebäudehülle.

Wie bereits beschrieben wird durch die thermische Trägheit der Speichereffekt von multifunktionalen Bauteile erzielt. Die Trägheit führt zu einer zeitverzögerten Temperierung des Innenraumes. Die an den Innenraum abgegebene oder diesem entzogene Wärme führt zu einer Änderung der Oberflächentemperatur und der Oberflächenleistung. Somit führen die Grenzen der Behaglichkeit, die allgemein die Funktion Temperierung des Innenraumes limitieren, ebenfalls zu einer Begrenzung der Funktion Wärmespeicherung.

## 6.2. Grenzen der Behaglichkeit

Das wärmephysiologische Empfinden des Menschen wird nicht nur von der Raumlufttemperatur, sondern auch von weiteren Parametern beeinflusst. Wie „wohl“ sich ein Mensch innerhalb eines Gebäudes fühlt ist ein subjektiver Eindruck und wird als Behaglichkeit bezeichnet. Das Einhalten der Behaglichkeitsgrenzen ist bei jedem Energiekonzept zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen. Die Behaglichkeit wird maßgeblich von der Raumlufttemperatur, der Temperatur der Umgebungsflächen des Innenraums, den vertikalen Temperaturunterschieden, der Luftbewegung und der Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Durch den Einsatz von multifunktionalen

Bauteilen wird neben dem Aspekt Raumlufttemperatur speziell der Punkt Temperatur der Umgebungsflächen beeinflusst. Daher ist beim Betreiben von Gebäuden mit Multifunktionalen Bauteilen die Oberflächentemperatur zu begrenzen. Die Luftbewegung ist gegenüber konventionellen klimatisierten Räumen geringer, was zu einer Steigerung der Behaglichkeit führt [13]. Im Gegensatz zu Pufferspeichern stehen multifunktionale Bauteile in direktem thermischem Kontakt mit dem Innenraum und somit mit dem Nutzer. Dies führt dazu, dass die Funktionen Wärmespeicherung und Temperierung miteinander verbunden sind [14]. Somit wird gleichzeitig Wärme gespeichert und der Innenraum temperiert. Hierdurch werden allerdings auch die Speichertemperaturen durch die Grenzen der Behaglichkeit des Innenraumes begrenzt. Somit unterliegt das maximale Speichervermögen der Gebäudestruktur dem Empfinden des Nutzers.

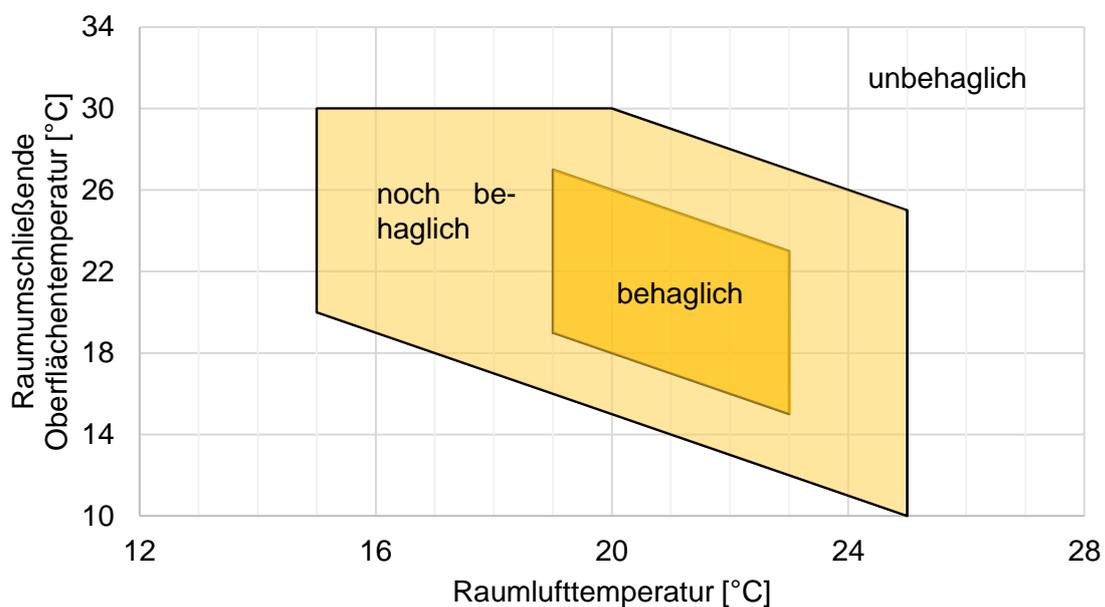


Abbildung 30: Behaglichkeitsdiagramme für die Oberflächentemperaturen, nach: Raumklima und Behaglichkeit [15]

Wie in Abbildung 30 dargestellt ergibt sich für die Gebäudestruktur eine maximale innenseitige Oberflächentemperatur von ca. 25 - 30°C, um als „noch behaglich“ zu gelten. Diese Temperatur bezieht sich auf die gesamte raumumschließende Fläche.

Neben den genannten Faktoren bildet die Außenlufttemperatur einen weiteren Einflussfaktor auf die Behaglichkeit des Innenraumes. In Abbildung 31 ist der Grenzbereich der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur dargestellt.

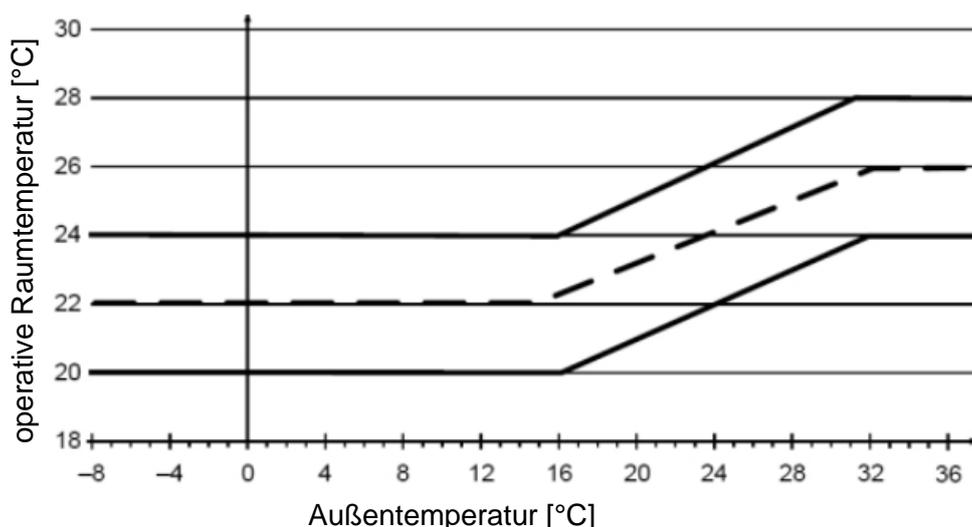


Abbildung 31: Komfortraumtemperatur mit dem zugelassenen Toleranzbereich nach DIN EN 15251 [16]

Nach Abbildung 31 beträgt die maximale operative Raumtemperatur in der Heizperiode 24°C. Die operative Raumtemperatur  $T_{op}$  ist dabei das Mittel aus Raumlufttemperatur  $T_{Luft}$  und der Oberflächentemperatur der raumumschließenden Fläche  $T_{Oberfläche}$ :

$$T_{op} = \frac{T_{Luft} + T_{Oberfläche}}{2}$$

Hiermit ergibt sich bei einer Innenraumtemperatur von 20°C eine maximale Oberflächentemperatur der raumumschließenden Fläche von 28°C. Diese Temperatur wird als Grenze für die Oberflächentemperatur der multifunktionalen Bauteile angenommen.

### 6.3. Definition der stationären Kenngrößen

Das thermische Verhalten aktiver Bauteile wird maßgebend von der Schichtdicke, der Schichtanzahl, der Lage der thermischen Aktivierung und der verwendeten Materialien bestimmt. Zur Charakterisierung und Bewertung der drei genannten thermischen Funktionen (Wärmespeicherung, Klimatisierung und Wärmedämmung) werden fünf stationäre Kenngrößen bestimmt: das maximale Wärmespeichervermögen  $Q_{Sp}$ , der effektive Nutzungsgrad  $\eta_{eff}$ , der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert), die Entladeleistung  $q_{ent}$  sowie die Entladedauer  $t_{ent}$  [17].

Diese Kenngrößen dienen dazu, multifunktionale Bauteile mittels einheitlichen Parametern stationär zu qualifizieren. Eine Aussage über die Effizienz oder die Dynamik im Gebäude sind hiermit nicht möglich. Hierzu ist eine instationäre Gebäudesimulation notwendig.

Im nachfolgenden werden die fünf Kenngrößen mittels vereinfachter Gleichungen definiert:

• **Wärmewiderstand**

Der Wärmewiderstand R gibt an, welche Temperaturdifferenz beim Aufbringen eines Wärmestroms entsteht. Der Kehrwert des Wärmewiderstands bildet den Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) eines Körpers.

$$R = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j}$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$

Mit:

- R = Wärmedurchlasswiderstand
- d = Schichtdicke
- $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit
- $R_{si}$  = Wärmeübergangswiderstand innen
- $R_{se}$  = Wärmeübergangswiderstand außen

Zur Bestimmung weitere Kenngrößen ist es zudem notwendig den Wärmewiderstand von der thermischen Aktivierung zwischen den Rohren  $R_x$  [18], nach innen  $R_i$  und nach außen  $R_a$  zu bestimmen.

$$R_x = \frac{d_x \cdot \ln\left(\frac{d_x}{\pi \cdot \delta}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_B}$$

Mit:

- $d_x$  = Rohrabstand
- $\delta$  = Rohrdurchmesser
- $\lambda_B$  = Wärmeleitfähigkeit des Materials zwischen den Rohren

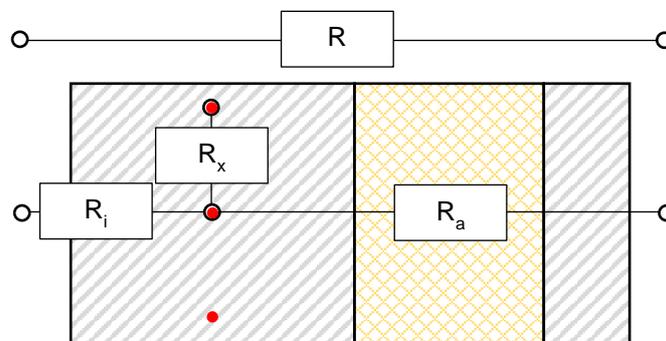


Abbildung 32: Thermisches Ersatzschaltbild Multifunktionales Bauteil (Eigene Darstellung)

- **Entladeleistung**

Die Entladeleistung  $q_{ent}$  beschreibt, wie schnell ein Speicher eine bestimmte Wärmemenge über die Entladedauer an die Umgebung abgeben kann. Für eine einheitliche Bewertung entspricht die Entladeleistung der Nennwärmeleistung des Bauteils bei einer Kerntemperatur  $T_K$  von 30°C.

$$q_{ent} = \frac{\Delta T}{R_i + R_x}$$

$$\Delta T = T_K - T_i$$

Mit:

$T_i$ : Lufttemperatur Innenraum

$T_k$  Kerntemperatur

- **Maximales Wärmespeichervermögen**

Das maximale Wärmespeichervermögen  $Q_{sp}$  ist die Wärmemenge, welche ein Körper unter Einhaltung der Randbedingungen aufnehmen kann. Für Außenbauteile wird hierzu nur die Masse innerhalb der thermischen Hülle herangezogen. Mit der folgenden Gleichung ist es möglich die gespeicherte Wärme zu bestimmen, indem die Temperaturspannung durch die Erwärmung eines Bauteils integriert wird (vgl. Abbildung 33). Diese Gleichung gilt nur, wenn sich der Phasenzustand des Körpers nicht verändert.

$$Q_{sp} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \int \Delta T dx$$

Mit:

$Q_{sp}$ : Wärmespeichervermögen

$\rho$ : Dichte

$V$ : Volumen

$c_p$ : spezifische Wärmekapazität

$\Delta T$ : Temperaturänderung

Vereinfachend kann für die Temperaturdifferenz des Wärmespeichervermögens von multifunktionalen Bauteilen die minimale Kerntemperatur  $T_{k,min}$  und maximale Kerntemperatur  $T_{k,max}$  herangezogen werden. Das Unterschreiten der minimalen Kerntemperatur führt zu höheren Wärmeverlusten des Gebäudes und somit zu einem Abkühlen dieses. Eine Überschreitung der maximalen Kerntemperatur eine Unbehaglichkeit im Innenraum zur Folge hat. Das vereinfachte Wärmespeichervermögen errechnet sich so wie folgt:

$$Q_{sp} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = T_{k,max} - T_{k,min}$$

$$T_{k,max} = \frac{(T_{Oi,max} - T_i) \cdot (R_i + R_x)}{R_{Si}} + T_i$$

$$T_{k,min} = \frac{(T_a - T_i) \cdot R_i}{R} + T_i$$

Mit:

$T_{Oi,max}$ : maximale Oberflächentemperatur (hier: 28°C)

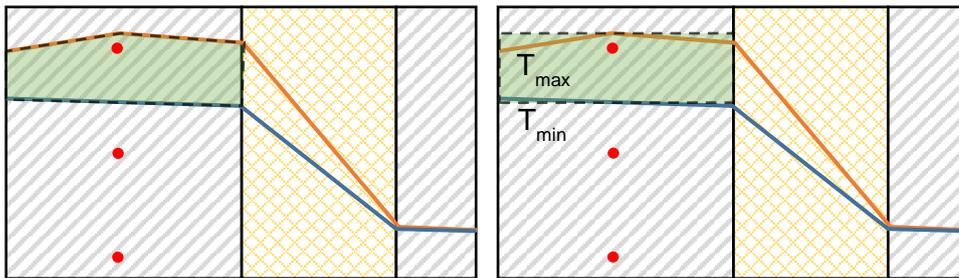


Abbildung 33: Temperaturspreizung zwischen minimaler und maximaler Bauteiltemperatur, links Fläche der genauen und rechts der vereinfachten Temperaturspreizung

- **Effektiver Nutzungsgrad**

Der effektive Nutzungsgrad  $\eta$  beschreibt welcher Anteil der aktiv eingebrachten Wärme für den Innenraum nutzbar ist und stellt somit die thermische Effizienz multifunktionaler Bauteile dar.

$$\eta = 1 - \frac{R_i}{R}$$

- **Entladedauer**

Der Speicherzyklus eines Speichers umfasst die Summe aus Be- und Entladedauer. Die Entladedauer gibt an, wie lange das Bauteil nach dem Ende der Erwärmung noch Wärme passiv an die Umgebung abgibt. Der Entladevorgang stellt ein asymptotisches Verhalten dar und nähert sich einem stationären Zustand an. Dieser Vorgang kann mit der Blockkapazität beschrieben werden [19]. Hierbei kann mittels der Zeitkonstanten  $\tau$  der jeweilige Ladezustand im Verhältnis zum maximalen Ladezustand angegeben werden.

$$t_{ref} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V}{\alpha \cdot A}$$

$$t_{ent} = \tau \cdot t_{ref}$$

Die angegebene Gleichung zur Ermittlung der Referenzentladedauer  $t_{ref}$  gilt unter der Annahme einer konstanten Umgebungstemperatur:  $T_\infty = konstant$ . Um diese Gleichung auf die Randbedingungen einer Wand anzupassen gilt folgende Annahme:  $T_\infty = konstant = T_{k,min}$ , es wird nur die massive Bauteilschicht innerhalb der thermischen

Hülle herangezogen, hierbei ergibt sich  $\alpha$  aus den beiden thermischen Widerständen nach innen  $R_i$  und außen  $R_a$ .

Hieraus folgt folgende Gleichung für die Referenz-Entladedauer einer Wand mit der Fläche von  $1 \text{ m}^2$  näherungsweise:

$$t_{ref} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot V}{\left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i}\right)}$$

$$t_{ent} = \tau \cdot t_{ref}$$

Tabelle 1 zeigt den prozentualen Ladezustand eines Systems in Abhängigkeit der Zeitkonstanten  $\tau$ .

Tabelle 1: Zeitkonstante  $\tau$

Zeitkonstante $\tau$		
Zeitkonstante	Beladezustand	Entladezustand
1 $\tau$	63,2%	36,8%
2 $\tau$	86,5%	13,5%
3 $\tau$	95,0%	5,0%
4 $\tau$	98,2%	1,8%
5 $\tau$	99,3%	0,7%

#### 6.4. Ermittlung der stationären Kenngrößen

Wie beschrieben sind die thermischen Funktionen Wärmespeicherung, Klimatisierung und Wärmedämmung abhängig von den Schichtdicke, der Schichtanzahl, der Lage der thermischen Aktivierung und der verwendeten Materialien. Die Wände des Großdemonstrators sind dreischichtige Sandwichelemente bestehend aus Außenschale, Wärmedämmung und Tragschale. Die innenliegende Tragschale wird in der Mitte des Betons thermisch aktiviert.

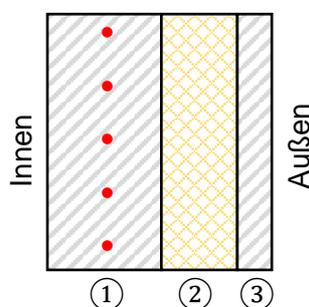


Abbildung 34: Schichtaufbau der Multifunktionalen Bauteile im Smallhouse IV (Außenwand)

In der nachfolgenden Tabelle sind die Randbedingungen für die stationäre Ermittlung der Kenngrößen und die Materialeigenschaften aufgelistet:

Tabelle 2: Randbedingungen für die stationäre Ermittlung der Kenngrößen

<b>Randbedingungen</b>	
Material Schicht ①	21 cm Beton
Material Schicht ②	14 cm EPS
Material Schicht ③	7 cm Beton
Betondeckung über Rohre	10,5 cm
Rohrabstand	15,0 cm
Rohr	Uponor Comfort Pipe 20x2 mm
Temperatur Innen <sup>1</sup>	20 °C
Temperatur Außen <sup>1</sup>	-5 °C
Wärmeübergangswiderstand Innen <sup>2</sup>	0,13 m <sup>2</sup> *K/W
Wärmeübergangswiderstand Außen <sup>2</sup>	0,04 m <sup>2</sup> *K/W
Maximale Oberflächentemperatur	28 °C

<sup>1</sup> Nach DIN 4108-2 [20]

<sup>2</sup> Nach DIN EN ISO 6946-04 [21]

Tabelle 3: Materialeigenschaften für die stationäre Ermittlung der Kenngrößen

<b>Materialeigenschaften</b>			
Material	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Spez. Wärmekapazität
Beton	2,10 W/m*K	2200 kg/m <sup>3</sup>	1,00 kJ/kg*K
EPS	0,03 W/m*K	30 kg/m <sup>3</sup>	1,25 kJ/kg*K

Hieraus ergeben sich für die Außenwände des Großdemonstrators folgende Kenngrößen zur Charakterisierung:

Tabelle 4: Kenngrößen der Außenwände des Großdemonstrators

<b>Kenngrößen der Außenwand</b>	
Wärmewiderstand R	4,94 m <sup>2</sup> *K/W
Wärmewiderstand nach innen R <sub>i</sub>	0,18 m <sup>2</sup> *K/W
Wärmewiderstand nach außen R <sub>a</sub>	4,76 m <sup>2</sup> *K/W
Wärmewiderstand zwischen den Rohren R <sub>x</sub>	0,01 m <sup>2</sup> *K/W
U-Wert	0,201 W/m <sup>2</sup> *K
Minimale Kerntemperatur T <sub>k,min</sub>	19,09 °C
Maximale Kerntemperatur T <sub>k,max</sub>	31,69 °C
Maximales Wärmespeichervermögen	1,62 kWh/m <sup>2</sup>
Effektiver Nutzungsgrad $\eta$	0,96
Entladeleistung q <sub>ent</sub>	52,63 W/m <sup>2</sup>
Entladezeit t <sub>ent,2τ</sub>	44,52 h

Auf Grundlage des maximalen Wärmespeichervermögens wird im Folgenden die erste Dimensionierung der multifunktionalen Bauteile durchgeführt. Für die Dimensionierung wird im folgenden Kapitel ein stationäres Gebäudemodell zugrunde gelegt.

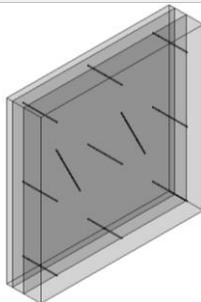
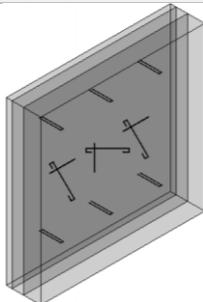
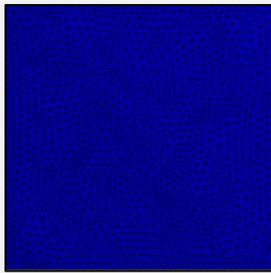
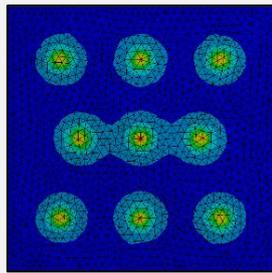
### **6.5. Wärmebrücken infolge Verbindungsmittel**

Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, sind zur Verbindung der Trag- und Vorsatzschale Verbindungsmittel notwendig. Durch das Einbringen der Verbindungsmittel, welche die Dämmschicht durchdringen, entstehen zwangsläufig Wärmebrücken. Neben den unterschiedlichen Arten an Fabrikaten unterscheiden sich die Verbindungsmittel auch durch die Materialien. Das am meisten verwendete Material bildet hierfür Edelstahl. Edelstahl weist mit ca.  $15 \text{ W/m}^2\text{K}$  eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf. Alternativ hierzu bieten sich Verbindungsmittel aus GFK an. Diese weisen eine Wärmeleitfähigkeit von ca.  $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf.

Um den thermischen Einfluss der Verbindungsmittel auf eine Wand zu untersuchen, wird mittels der Software Ansys Workbench eine thermisch-stationäre Simulation des Wärmestroms vorgenommen. Untersucht wird hierbei der Wärmebrückeneffekt von dämmstoffdurchdringenden Verbindungsmitteln aus Edelstahl und GFK in Sandwichelementen. Die untersuchte Wand ist  $2,00 \times 2,00 \text{ m}$  groß und besitzt den in Abschnitt 0 verwendeten Querschnitt der Außenwand. Die Ergebnisse der Simulation zeigen einen Unterschied zwischen den beiden untersuchten Verbindungsmitteln. Die Verbindungsmittel aus GFK haben nur einen minimalen Einfluss auf das thermische Verhalten des Sandwichelements. Dahingegen stellen sich die Verbindungsmittel aus Edelstahl als punktförmige Wärmebrücke dar. Nach DIN EN ISO 6946 [21] müssen bauteildurchdringende, mechanische Verbindungsmittel die den gemittelten U-Wert um mehr als 3% verändern, bei der U-Wert-Berechnung für Bauteile berücksichtigt werden. Neben der Erhöhung der Transmissionswärmeverluste führen die Wärmebrücken von Tragschale zur Vorsatzschale zu einer Reduzierung des Nutzungsgrades (vgl. Abschnitt 6.3). Hierdurch sinkt die nutzbare Wärme, die in die multifunktionalen Bauteile eingebracht wird. Somit sollte grundsätzlich bei multifunktionalen Bauteilen ein Verbindungsmittel gewählt werden, welches die Wärmeleitung durch die Dämmschicht vermeidet. Daher wird für den Großdemonstrator Smallhouse IV das GFK-Verbindungsmittel gewählt.

Alle Randbedingungen und Ergebnisse dieser Simulation sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Thermisch-stationäre Simulation des Wärmebrückeneffekts der Verbindungsmittel

Thermisch-stationäre Simulation			
	Verbindungsmittel 1	Verbindungsmittel 2	
Randbedingungen	Innentemperatur	20 °C	
	Außentemperatur	-5°C	
	Wärmeübergangswiderstand Innen <sup>2</sup>	0,13 m <sup>2</sup> *K/W	
	Wärmeübergangswiderstand Außen <sup>2</sup>	0,04 m <sup>2</sup> *K/W	
	Software	Ansys Workbench	
	Methode	Explizit: Thermisch-Stationär	
Materialeigenschaften	Hersteller	Schöck Thermoanker	Halben Sandwichplatten Anker
	Fabrikat	9 x TA-H-L280 2 x TA-D-380	6 x SP-SPA-N-05-260-A4 3 x SP-SPA-1-07-260-A4
	Abbildung des Fabrikates		
	Material	GFK	Edelstahl
	Wärmeleitfähigkeit	0,7 W/m*K	15 W/m*K
	Durchmesser	TA-H: 12 mm TA-D: 12 mm	SP-SPA-N: 5 mm SP-SPA-1: 7 mm
Modellierung			
Simulation	Grafische Darstellung des Wärmestroms der Außenoberfläche		
	Mittlerer Wärmestrom	20,17 W	20,84 W
	Mittlere Wärmestromdichte	5,04 W/m <sup>2</sup>	5,21 W/m <sup>2</sup>
	Mittelter U-Wert	0,202 W/m*K	0,208 W/m*K
	Änderung des gemittelten U-Werts	+ 0,25%	+ 3,45 %

## 7. Stationäres Berechnung

Mit Hilfe einer stationären Berechnung, unter Vernachlässigung zeitlich variabler Einflussfaktoren, kann die technische Gebäudeausrüstung ausgelegt werden. Daher wird im Folgenden die stationäre Berechnung und die Auslegung des Wärmeerzeugers vorgestellt, sowie eine erste Abschätzung des Heizbedarfs vorgenommen.

### 7.1. Aufbau Gebäudehülle und thermische Randbedingungen

Aus den erarbeiteten Konstruktionsplänen aus Kapitel 1 wird die Geometrie in ein Google SketchUp Modell übertragen, um in der Simulationssoftware Trnsys eine 3D-Gebäudesimulation durchführen zu können. Die abgeleitete Gebäudegeometrie, die Schichtaufbauten und deren Ausrichtung sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

Tabelle 6: Schichtaufbau der Außenwände

<b>Außenwand</b>					
Schicht	Schichtdicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	spez. Wärmekapazität	U-Wert
	[m]	[W/m*K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg*K]	[W/m <sup>2</sup> *K]
Beton	0,21	2,10	2200	1,00	0,201
Dämmung	0,14	0,03	30	1,25	
Beton	0,07	2,10	2200	1,00	

Tabelle 7: Schichtaufbau des Daches

<b>Dach</b>					
Schicht	Schichtdicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	spez. Wärmekapazität	U-Wert
	[m]	[W/m*K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg*K]	[W/m <sup>2</sup> *K]
Beton	0,21	2,10	2200	1,00	0,236
Dämmung	0,12	0,03	30	1,25	
Beton	0,07	2,10	2200	1,00	

Tabelle 8: Schichtaufbau der Bodenplatte

<b>Bodenplatte</b>					
Schicht	Schichtdicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	spez. Wärmekapazität	U-Wert
	[m]	[W/m*K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg*K]	[W/m <sup>2</sup> *K]
Beton	0,20	2,10	2200	1,00	0,147
Dämmung	0,20	0,03	30	1,25	

Tabelle 9: Fenstereigenschaften

<b>Fenster</b>			
<b>U-Wert Glas</b>	<b>U-Wert Rahmen</b>	<b>Rahmenanteil</b>	<b>g-Wert Glas</b>
[W/m <sup>2</sup> *K]	[W/m <sup>2</sup> *K]	[%]	[%]
1,40	2,30	20,0	62,2

Tabelle 10: Türeigenschaften

<b>Türe</b>			
<b>U-Wert Glas</b>	<b>U-Wert Rahme</b>	<b>Rahmenanteil</b>	<b>g-Wert Glas</b>
[W/m <sup>2</sup> *K]	[W/m <sup>2</sup> *K]	[%]	[%]
1,40	1,40	85,0	62,2

Tabelle 11: Bauteilausrichtung

<b>Bauteilflächen</b>			
<b>Orientierung</b>	<b>Bauteil</b>	<b>Fläche</b>	<b>Neigung</b>
		[m <sup>2</sup> ]	[°]
Norden	Außenwand	15,00	90
	Fenster	10,41	45
	Türe	4,59	90
Süden	Außenwand	19,59	90
	Dach	36,41	45
Westen	Außenwand	38,97	90
Osten	Außenwand	38,97	90
Horizontal	Bodenplatte	41,70	0

Tabelle 12: Thermische Randbedingungen

<b>Randbedingungen</b>	
Luftwechselrate <sup>1</sup>	0,4 h <sup>-1</sup>
Soll-Raumlufttemperatur <sup>2</sup>	20°C
Wetterdaten	Meteonorm: Stuttgart
Wärmeübergangswiderstand innen <sup>3</sup>	Wand /Dach: 0,13 m <sup>2</sup> *K/W, Boden: 0,1 m <sup>2</sup> *K/W
Wärmeübergangswiderstand außen <sup>3</sup>	Wand/Dach/Boden: 0,04 m <sup>2</sup> *K/W
Absorptionskoeffizient $\alpha$	0,5
Abstrahlungskoeffizient $h_r$	0,9
Mittlere Differenz zwischen Umgebungs- und Himmelstemperatur <sup>4</sup>	10 K

<sup>1</sup> Nach DIN 4108-2 [20]

<sup>2</sup> Nach DIN EN 12831 [22]

<sup>3</sup> Nach DIN EN ISO 6946-04 [21]

<sup>4</sup> Nach DIN 4108-6 [23]

## 7.2. Berechnung des Heizbedarfs und der Norm-Heizlast

Aus den oben dargestellten Aufbauten und Randbedingungen wird in Anlehnung an DIN V 4108-6 der Heizbedarf berechnet [23]. Hierbei wird das Monatsbilanzverfahren abgewandelt und auf einen Zeitschritt von 10 Minuten angewandt. Zudem wird der Wiederaufheizfaktor in Anlehnung an DIN EN 12831 ermittelt [22]. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die Gewinne und Verluste je Fläche, sowie die Lüftungswärmeverluste. Wärmebrücken werden, auch auf Grund des Wiederaufheizfaktors, nicht berücksichtigt.

Tabelle 13: Transmissionswärmeverluste

<b>Transmissionswärmeverluste</b>					
<b>Bauteile</b>	<b>Fläche</b>	<b>U-Wert</b>	<b>Temperatur-Korrekturfaktor</b>	<b>Transmissionswärmeverlustkoeffizient</b>	<b>Jährliche Transmissionswärmeverlust</b>
	[m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> *K]	[-]	[W/K]	[kWh/a]
Außenwände	110,27	0,205	1,0	22,61	2.245,25
Boden	41,70	0,147	0,6	3,68	365,44
Decke	55,30	0,236	1,0	13,05	1.295,91
Türrahmen	3,90	1,389	1,0	5,42	538,22
Glas	9,17	1,400	1,0	12,84	1.275,06
Fenster-rahmen	2,12	2,300	1,0	4,88	484,60
<b>Summe</b>	<b>222,46</b>	-	-	<b>62,46</b>	<b>6.202,49</b>

Tabelle 14: Lüftungswärmeverluste

<b>Lüftungswärmeverluste</b>					
<b>Raumvolumen</b>	<b>Luftwechselrate</b>	<b>Dichte Luft</b>	<b>spez. Wärmekapazität Luft</b>	<b>Lüftungswärmeverlust</b>	<b>Jährliche Lüftungswärmeverluste</b>
[m <sup>3</sup> ]	[1/h]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Wh/kg.K]	[W/K]	[kWh/a]
195	0,4	1,2	0,28	26,21	2.602,74

Somit ergibt sich ein Gebäudeverlustkoeffizient  $H_{\text{Geb}}$  von 88,67 W/K. Dieser hohe Wert ist dem hohen A/V-Verhältnis geschuldet.

Den Verlusten stehen die solaren Gewinne gegenüber, weitere interne Gewinne werden nicht berücksichtigt. Diese bestehen aus Gewinnen über transparente und opake Bauteile, vgl. Tabelle 15.

Tabelle 15: Solare Gewinne (eigene Darstellung)

<b>Solare Gewinne</b>				
<b>Transparente Flächen</b>	<b>Opake Flächen</b>	<b>g-Wert</b>	<b>Produkt der Abminderungsfaktoren</b>	<b>Jährliche, nutzbare solare Gewinne</b>
[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[kWh/a]
9,17	213,29	0,622	1	1.550,77

Somit ergibt sich für die Jahresbilanz mit dem abgewandelten Monatsbilanzverfahren und dem gewählten Bilanzzeitschritt von 10 Minuten folgender jährlicher Heizbedarf:

$$6.202 \text{ kWh/a} + 2.603 \text{ kWh/a} - 1.551 \text{ kWh/a} = \mathbf{7.254 \text{ kWh/a}}$$

Die Normheizlast stellt die maximal benötigte Last bei Norm-Auslegungstemperatur zur Beheizung des Gebäudes dar. Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an DIN 12831 [22]. Die maximale Heizlast berücksichtigt keine inneren oder solaren Gewinne, aber einen Wiederaufheizeffizienzfaktor. Dieser garantiert eine Reserve die das Wiederaufheizen des ausgekühlten Gebäudes bei der gewählten Norm-Auslegungstemperatur sicherstellt. Der Wiederaufheizeffizienzfaktor  $f_{RH}$  ist nach [22] bei  $10 \text{ W/m}^2$ . Somit ergibt sich eine Zusatzheizleistung  $\Phi_{RH}$  von  $417 \text{ W}$ . Für das Smallhouse IV ergibt sich eine Netto-Heizlast von  $2,84 \text{ kW}$  und eine Normheizlast  $3,25 \text{ kW}$ .

## **8. Auslegung und Verschaltung der Komponenten**

Der oben berechnete Heizbedarf kann mit mehreren Komponenten gedeckt werden. Diese werden im Folgenden für das Smallhouse IV dimensioniert. Abschließend wird die gewählte Verschaltung der Anlagentechnik dargestellt.

### **8.1. Auslegung der Komponenten**

In diesem Abschnitt findet eine Auslegung der maßgebenden Komponenten des Energiekonzeptes statt. Diese Auslegung befasst sich ausschließlich mit der Thematik der Heizwärme. Brauchwasser wird im Großdemonstrator nicht betrachtet oder bewertet. Folgend wird die Auslegung der Komponenten für zwei Tage vorgesehen. So kann bei einem Tag mit fast keinem Ertrag der Bedarf trotzdem aus den Erträgen des Vortages gedeckt werden.

Die aus der Auslegung entstandene Komponentendimensionierung wird anschließend mit Ergebnissen einer instationären Simulation verglichen.

#### **8.1.1. Auslegung des Solarkollektors**

Die Auslegung von Solarkollektoren zur Heizungsunterstützung erfolgt meist auf Grundlage von überschläglichen Abschätzungen und/oder Erfahrungswerten. Hier stehen üblicherweise je Hersteller Monogramme zur Verfügung, welche eine Dimensionierung an Hand von wenigen Kennwerten, wie z.B. Anzahl der Bewohner und Heizlast, erlauben. Da aktuell Module mit standardisierten Maßen marktüblich sind, ist aus Sicht des Marktes eine genauere Berechnung der Kollektorfläche nicht notwendig bzw. zielführend.

Die Größe, also die nominale Leistung der Solarkollektoren zur Heizungsunterstützung basiert auf den Dimensionierungen zur Trinkwarmwasserbereitung mittels Solarthermie. Im BDH Informationsblatt 27-2 [24] wird ein Faktor von 1,8 bis 2,5 angegeben. Hiermit wird ein Deckungsgrad von rd. 60% angestrebt. Es ergibt sich folglich ein Zusammenhang zwischen dem Wärmebedarf für Trinkwarmwasser sowie der Kollektorfläche und nicht direkt mit dem Heizwärmebedarf, obwohl dieser gedeckt werden soll.

Zur Einordnung der Dimensionierung wird an dieser Stelle ein Gebäude mit 3 Personen zugrunde gelegt. Hieraus ergibt sich, z.B. nach [25] oder [24], eine Kollektorfläche von 3 bis 4,5 m<sup>2</sup>. Unter Verwendung eines Aufschlagsfaktors zur Heizungsunterstützung wird bei einer guten Ausrichtung des Kollektors, also eine Dachneigung von 45° und einer Ausrichtung nach Süden, die Anlage mit 5,4 m<sup>2</sup> dimensioniert und bei ungünstigen Gegebenheiten mit 11,5 m<sup>2</sup>. Zur Einordnung: Das Sonnenhaus Institut gibt eine Kollektorfläche von 30 bis 60 m<sup>2</sup> für ein Einfamilienhaus an [2].

Zur Dimensionierung der Solarthermieanlage im Smallhouse IV wird folgendes Verfahren angewandt:

- 1) Ermittlung des Bedarfs für zwei aufeinanderfolgende Tage auf Grundlage des abgewandelten Monatsbilanzverfahrens aus Abschnitt 7.2.
- 2) Ermittlung des Angebots pro  $\text{m}^2$  Solarthermie für zwei aufeinanderfolgende Tage auf Grundlage von standortbezogenen Wetterdaten
- 3) Ermittlung der benötigten Kollektorgröße je Tag zur Deckung des Bedarfs
- 4) Auswertung der Kollektorgrößen in  $2,5 \text{ m}^2$ -Schritten (Histogramm)
- 5) Bildung einer geordneten Tagesbedarfskurve
- 6) Ableiten eines Diagramms zur Ermittlung der benötigten Kollektorfläche zum Erreichen eines solaren Deckungsgrad von 50%, vgl. Abbildung 35

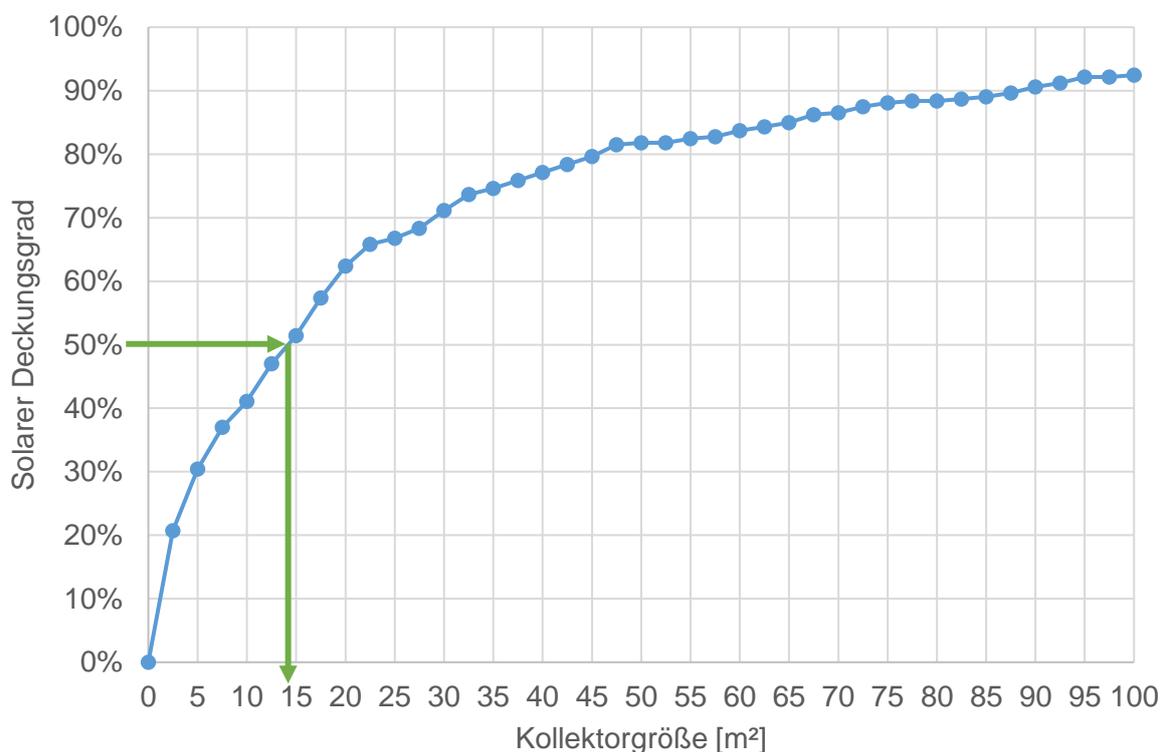


Abbildung 35: Deckungsgrad-Kollektor-Diagramm (Eigene Darstellung)

Somit ergibt sich für das Smallhouse IV eine Kollektorgröße von  $15 \text{ m}^2$ , um das tägliche Angebot bei einem angestrebten Deckungsgrad von 50% bereitzustellen. Dem dargestellten Diagramm liegt ein Wirkungsgrad zwischen Strahlung und Wärmeübertragung von 65% zugrunde.

### 8.1.2. Auslegung des Speichers

Die Auslegung des Speichers bei Solarthermieanlagen erfolgt meist mittels Faustregeln. Um das solare Angebot innerhalb eines Tages oder auch darüber hinaus speichern und nutzen zu können, wird ein Speicher benötigt. Nach der gleichen Methodik wie für den Kollektor wird der Speicher dimensioniert. Der Dimensionierung vom Wärmespeicher einer Solarthermieanlage

kommt eine besondere Bedeutung zu. Nach [24] müssen Speicher für solare Wärme so konstruiert und dimensioniert werden, dass diese mehrere Tage Wärme speichern können, um einen hohen solaren Deckungsgrad möglich zu machen. Für die Berechnung der zu speichernden Wärmemenge wird eine benötigte Speicherdauer von 2 Tagen angenommen. Abbildung 36 zeigt, dass eine Wärmemenge von 60 kWh gespeichert werden muss.

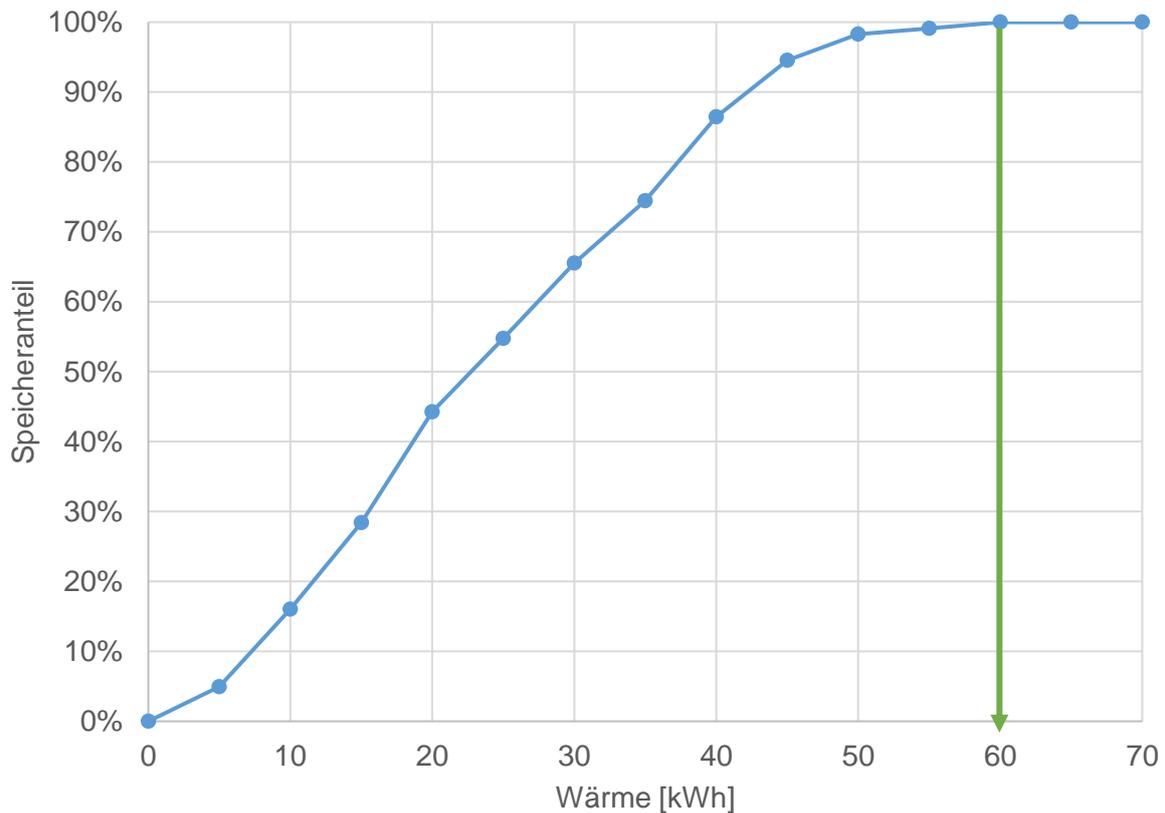


Abbildung 36: Speicheranteil in Abhängigkeit der zu speichernden Wärmemenge (Eigene Darstellung)

Mittels der zu speichernden Wärmemenge kann ein Speichervolumen abgeschätzt werden. Hierzu wird die Gleichung aus Abschnitt 6.3 verwendet:

$$Q_{sp} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Der in diesem Projekt verfolgte niederexergetische Ansatz erfordert, einen geringen Temperaturhub. Daher wird für diese Abschätzung ein Temperaturhub von 10K gewählt. Hieraus ergibt sich, um eine Wärmemenge von 60 kWh mit einer Temperaturspreizung von 10 K zu speichern, ein Wasservolumen von 5,0 m<sup>3</sup> oder ein Betonvolumen von 9,9 m<sup>3</sup>.

Die multifunktionalen Wandelemente des Großdemonstrators besteht aus ca. 16,8 m<sup>3</sup> Beton. Dies Volumen stellt somit einen ausreichend großen Speicher da, um die zu speichernde Wärmemenge aufnehmen zu können. Die Heizwärme kann somit theoretisch vollumfänglich von der Gebäudestruktur aufgenommen werden.

### 8.1.3. Auslegung des Wärmeübertragers

Aktuell stellen Radiatoren den Großteil der Wärmeübertrager dar. Fußbodenheizungen sind vor allem im Neubau weit verbreitet. Diese ergänzen, auf Grund der geringen benötigten Vorlauftemperatur, den niederexergetischen Ansatz. Für das Smallhouse IV wurde daher eine oberflächennahe Aktivierung der Bodenplatte gewählt. Die notwendige Vorlauftemperatur wird nach DIN EN 1264-2 wie folgt ausgelegt [26].

$$q = B \cdot a_B \cdot a_T^{m_T} \cdot a_u^{m_u} \cdot a_D^{m_D} \cdot \Delta\vartheta_H$$

Mit:

$B$ : Systemabhängige Koeffizienten zur Berechnung der Kennlinien

$a_B$ : Fußbodenbelagsfaktor

$a_T$ : Teilungsfaktor

$a_u$ : Überdeckungsfaktor

$a_D$ : Faktor für den Rohrdurchmesser

$m_T$ : Teilungsfaktorexponent

$m_u$ : Deckungsfaktorexponent

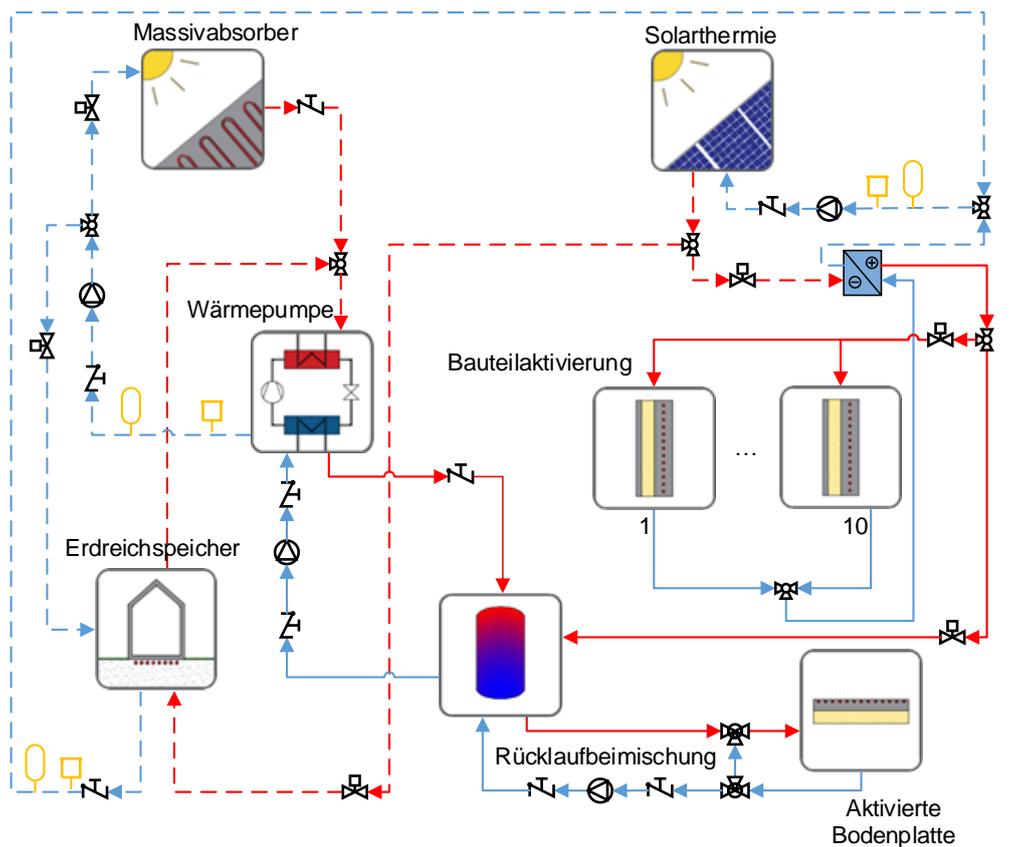
$m_D$ : Exponent für den Faktor des Rohrdurchmessers

$\Delta\vartheta_H$ : Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Raum

Bei einer Teilung von 15 cm und einer Heizlast von 3,25 kW, nach Abschnitt 7.2, ergibt sich ein  $\Delta\vartheta_H$  von 12 K. Bei einer Temperaturspreizung von 5 K zwischen Vor- und Rücklauf errechnet sich somit eine Vorlauftemperatur von 34,5°C. Im Folgenden wird daher eine Vorlauftemperatur von 35°C für die Fußbodenheizung gewählt. Die spezifische Heizleistung der aktivierten Bodenplatte entspricht somit ca. 80 W/m<sup>2</sup>.

## 8.2. Hydraulische Schaltung

Das vorgestellte Gebäudekonzept zeichnet sich durch gleich mehrere Neuerungen aus. Diese umfassen sowohl die Wärmeerzeugung, Speicherung und Verteilung. Bei der Bereitstellung von Wärme kann das Heizsystem auf mehrere Wärmequellen zugreifen. Der primäre Wärmeträger ist die solare Strahlung, welche mittels Solarthermie und einem Massivabsorber nutzbar gemacht werden kann. Zur Speicherung stehen die Bauteilaktivierungen der Außenwände sowie das Erdreich zur Verfügung. Ein Pufferspeicher dient in diesem Konzept lediglich als hydraulische Weiche. Eine oberflächennahe Aktivierung der Bodenplatte kann Wärme über eine Wärmepumpe aus dem Erdreich beziehen und so die Spitzenlast decken, vgl. Abbildung 37.



**Legende**

- |  |                                   |  |                              |
|--|-----------------------------------|--|------------------------------|
|  | Steuerventil (Normalbetrieb)      |  | Lufttopf                     |
|  | Mischventil (regelbar)            |  | Druckausgleichsgefäß         |
|  | Absperrventil (Austausch Bauteil) |  | Primärkreis (Sole), kalt     |
|  | Umwälzpumpe                       |  | Sekundarkreis (Wasser), warm |
|  | T-Stück                           |  |                              |

Abbildung 37: Hydraulischer Schaltplan

Aus der Verschaltung der einzelnen Komponenten lassen sich folgende Betriebsmodi ableiten, vgl. Tabelle 16.

Tabelle 16: Betriebsmodi

<b>Betriebsmodi</b>			
<b>Modus</b>	<b>Änderung</b>	<b>Abbildung</b>	<b>Beschreibung</b>
0	Keine		Es wird keine Wärme übertragen.
1	Speichern		Über die Solarthermieanlage wird Wärme bereitgestellt und im Erdreich gespeichert.
2	Speichern/ Temperieren		Über die Solarthermieanlage wird Wärme bereitgestellt und in die thermisch aktivierten Bauteile eingespeist.
3	Speichern		Über die Solarthermieanlage wird Wärme bereitgestellt und in den Pufferspeicher eingespeist.
4	Speichern		Über die Wärmepumpe wird Wärme aus dem Massivabsorber bereitgestellt und in den Pufferspeicher eingespeist.
5	Speichern		Über die Wärmepumpe wird Wärme aus dem Erdreich bereitgestellt und in den Pufferspeicher eingespeist.
6	Temperieren		Eingespeicherte Wärme wird aus dem Pufferspeicher in die aktive Bodenplatte eingespeist.

Jedes thermisch aktivierte Bauteil im Smallhouse verfügt über ein eigenes elektrisches, steuerbares Stellventil. Somit ist es möglich jedes einzelne Bauteil, egal ob Außenwand, Bodenplatte oder Massivabsorber separat anzusteuern. Die untersuchten Steuerungen bzw. Regelungen werden in Kapitel 9 detailliert dargestellt.

Sole-Wasser- und den Wasser-Kreisläufen werden über einen Wärmetauscher hydraulisch getrennt. Der Zusatz von Sole verhindert ein Einfrieren und somit potenzielles Platzen der Leitung. Daher werden im Smallhouse IV die außenliegenden Kreisläufe, also der Erdreichspeicher- und der Kollektorkreislauf, mit Sole befüllt.

## 9. Regelung, Steuerung und Optimierung

Die Einhaltung der Behaglichkeit nach DIN 7730 [27] sowie die Versorgung mit Trinkwarmwasser stellt die primäre Aufgabe der Heizungsanlage dar. Dafür müssen die Leistungen der einzelnen Komponenten an den Bedarf angepasst werden. Hierzu kommen in der Heizungs-technik primär Ventile zum Einsatz, wodurch der Volumenströme reguliert werden können.

### 9.1. Unterscheidung Steuerung – Regelung

Grundsätzlich kann zwischen Regelung und Steuerung unterschieden werden. Beiden gemein ist, dass diese anhand von Eingangsgrößen ein System mittels Stellgrößen beeinflussen. Im Folgenden werden beide dargestellt.

#### 9.1.1. Definition Steuerung

DIN 19226 definiert Steuerung folgendermaßen:

*"Das Steuern, die Steuerung, ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen  $[w]$  andere Größen als Ausgangsgrößen  $[x]$  auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeit beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken."* [28]

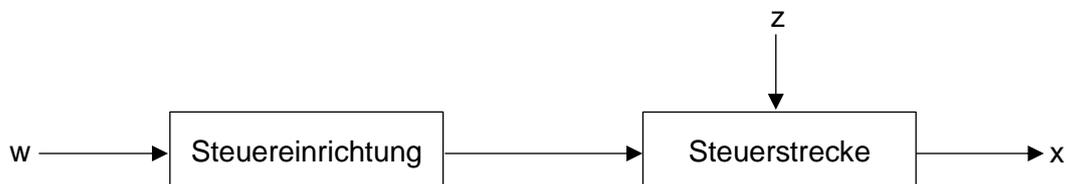


Abbildung 38: Schematische Darstellung Steuerung [29]

Zudem sind in Abbildung 38 die Steuereinrichtung, die Steuergröße sowie die Steuerstrecke abgebildet. Die Steuereinrichtung bildet die Gesetzmäßigkeit der Regelung ab, beim Beispiel Heizungssteuerung also die Einhaltung definierter Solltemperaturen. Die Steuereinrichtung verarbeitet die eingehende Eingangsgröße  $w$  und gibt die Steuergröße  $y$  zurück. Diese entspricht in Heizsystemen der Soll-Stellung der Ventile, allgemein Stellglied, bzw. einer Soll-Vorlauftemperatur. Die Steuerstrecke entspricht in diesem Beispiel der tatsächlichen Stellung des Ventils, welche dann in einem Massenstrom, der Steuergröße  $x$ , resultiert.  $Z$  stellt die Störgröße dar, welche einen zusätzlichen Einfluss auf die Steuerstrecke hat. Bei Heizungs-systemen könnte dies z.B. einer von der Annahme abweichende tatsächliche Stellung des Ventils sein.

### 9.1.2. Definition Regelung

Im Gegensatz zur Steuerung wird die Regelung nach DIN 19226 wie folgt definiert:

*„Das Regeln oder Regelung ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die Regelgröße, fortlaufend erfasst, mit einer zweiten Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne der Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich daraus ergebende Wirkungsablauf findet im so genannten Regelkreis statt.“ [28]*

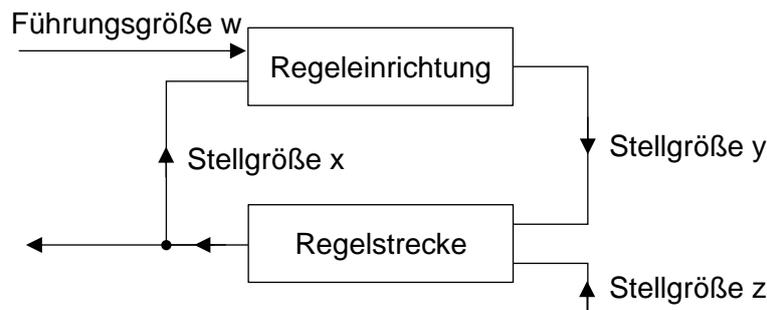


Abbildung 39: Schematische Darstellung Regelung [29]

Analog zur Steuerung ist in der Regelung ebenfalls eine Regeleinrichtung, Regelstrecke und Regelgröße definiert. Der Bereich innerhalb dessen die Stellgröße gewählt werden kann wird als Stellbereich bezeichnet. Die Führungsgröße kann sowohl einen festen Wert haben, z.B. 20°C Raumlufttemperatur als auch einen variablen Wert, bspw. nachts 18°C und tagsüber 20°C. Im ersten Fall wird die Führungsgröße als Sollwert bezeichnet. Im Gegensatz zur Steuerung existiert bei der Regelung also ein geschlossener Kreis aus Regelstrecke, Regelgröße, Regeleinrichtung und Stellgröße, vgl. Abbildung 41. Kann die zu regelnde Größe nicht direkt gemessen werden, wie z.B. die operative Temperatur, kann diese über indirekte Messung erfasst werden, hier Oberflächentemperatur und Raumlufttemperatur. In diesem Fall wird die eigentlich zu regelnde Größe, die operative Temperatur, als Aufgabengröße und die tatsächlich regelbare Raumlufttemperatur als Regelgröße bezeichnet. Hierfür müssen Aufgaben- und Regelgröße in einem funktionalen Zusammenhang stehen.

Analog zur Steuerung besteht die Regeleinrichtung aus einem Vergleichs- und einem Regelglied. Während ersteres die Abweichung ermittelt, bestimmt Zweiteres die auszugebende Reglerausgangsgröße.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es sich bei einer Steuerung um einen offenen Kreis handelt, bei welchem die zu beeinflussende Größe nur indirekt gemessen wird. Im Gegensatz hierzu wird bei der Regelung die zu beeinflussende Größe direkt gemessen. Beiden gemeinsam ist das Angleichen einer zu beeinflussenden Größe an einen vorgegebenen, festen oder zeitlich veränderbaren Wert.

## 9.2. Stand der Technik

### 9.2.1. Aufbau Heizungssystem

Heizungssysteme können nach unterschiedlichen Aspekten gruppiert werden. Am geläufigsten ist die Einteilung an Hand der genutzten Energieträger, wie bspw. fossile oder Erneuerbaren Energien, oder noch detaillierter wie Heizöl oder solarer Strahlung. Heizungssysteme können in 4 bzw. 5 Teile mit gleicher Funktion eingeteilt werden:

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

Im Heizungssystem werden primär die Wärmeerzeugung und die Wärmeübertragung gesteuert bzw. geregelt. Die Regelung und Steuerung der anderen Teile ergibt sich aus den ersten beiden.

#### 1) Steuerung des Wärmeerzeugers

Durch das Zuführen von Brennstoffen bzw. Strom wird die abgegebene thermische Leistung des Wärmeerzeugers beeinflusst. Wird kein Brennstoff zugeführt, wird auch keine Wärme abgegeben. Je nach Brennstoff kann die zugeführte Leistung variiert werden, z.B. bei Erdgas, oder ist konstant, bspw. Festbrennstoffe wie Holz.

#### 2) Steuerung / Regelung des Wärmeübertragers

Durch das Zuführen von Heizwasser mit einer definierten Temperatur kann Wärme über die Wärmeübertrager an den Raum abgegeben werden. Ergibt sich diese Vorlauftemperatur aus der Raumlufttemperatur, wie in Wohnungen, ist dies eine Regelung. Bei Einfamilienhäusern wird i.d.R. eine Steuerung auf Grundlage der Außentemperatur angewandt.

### 9.2.2. Steuerung des Wärmeerzeugers

Der Wärmeerzeuger wird i.d.R. mittels der Pufferspeichertemperatur oder bei Systemen ohne Speicher mittels der Vorlauftemperatur und einer Hysterese gesteuert. Dies bedeutet, dass die Regelgröße, z. B. die Temperatur im Speicher oder die Vorlauftemperatur im Heizsystem, kontinuierlich gemessen wird. Fällt diese unter einen definierten Wert wird der Wärmeerzeuger eingeschaltet, es wird eine Stellgröße übertragen. Übersteigt die Regelgröße, also bspw. die gemessene Temperatur im Speicher, die Führungsgröße, wird erneut die Stellgröße geändert und der Wärmeerzeuger abgeschaltet. Um ein häufiges Starten des Wärmeerzeugers zu verhindern wird die Führungsgröße zur Abschaltung höher gewählt als die zum Einschalten des Wärmeerzeugers. Die Differenz zwischen dem gewählten einschalt- bzw. Abschaltwert wird als Hysterese bezeichnet.



#### 9.2.4. Regelung und Steuerung von Bauteilaktivierungen

Die Steuerung von Bauteilaktivierung (BTA) erfolgt auf Grund des trägen thermischen Verhaltens prädiktiv und somit primär zur Deckung der Grundlasten. Als Führungsgröße wird hier neben der Raumlufttemperatur auch die Tageszeit miteinbezogen. Zur Deckung von thermischen Spitzenlasten, die nicht durch Bauteilaktivierungen gedeckt werden können, werden oftmals konvektive Temperiersysteme genutzt.

### 9.3. Steuerungskonzepte im Großdemonstrator

Im Großdemonstrator werden mehrere Steuerungen und Regelungen getestet. Diese können ebenfalls in die beiden Bereiche Erzeugung und Übertragung unterteilt werden. Die Steuerung bzw. Regelung der thermisch aktivierten Bauteile, welche Wärme sowohl speichern als auch übertragen, erfolgt als Wärmeübertrager.

#### 9.3.1. Steuerung und Regelung der Wärmeerzeuger

Als Wärmeerzeuger kommen im Großdemonstrator sowohl eine Solarthermieanlage als auch eine Wärmepumpe zum Einsatz. Während die Solarthermieanlage über die Temperatur geregelt wird, wird die Wärmepumpe an Hand der Speichertemperatur geregelt. Es findet jeweils eine Reduktion der Temperatur durch Wärmeabgabe an die Bauteile bzw. den Pufferspeicher statt.

Durch die Steuerung und Regelung der Wärmeerzeuger und -verbraucher ergeben sich die in Abschnitt 8.2 genannten Betriebsmodi.

Die **Solarthermieanlage** kann ihre Wärme sowohl an den Erdreichspeicher (Modus 1), die thermisch aktivierten Bauteile (Modus 2) oder den Pufferspeicher (Modus 3) abgeben. Es kann also zwischen Speichern mit unterschiedlichen Charakteristika unterschieden werden. Eine Priorisierung der Wärmesenken erfolgt in Abschnitt 9.4.

Als Quelle kann bei der **Wärmepumpe** zwischen dem Massivabsorber (Modus 4) und dem Erdreichspeicher (Modus 5) gewählt werden. Hier wird zur Steigerung des COP stets die wärmere der beiden Quellen gewählt. Zur Reduktion der Betriebskosten wird die Wärmepumpe lediglich zur Deckung des verbleibenden Heizwärmebedarfs nach Berücksichtigung der Erträge aus der Solarthermieanlage genutzt.

#### 9.3.2. Steuerung und Regelung der Wärmeübertrager

Die thermisch aktivierten Bauteile werden primär über die Solarthermieanlage gesteuert und decken so die Grundlast des Gebäudes. Die verbleibende thermische Last wird durch die oberflächennah aktivierte Bodenplatte gedeckt (Modus 6). Die Steuerung der Wärmeübertra-

ger berücksichtigt neben dem Angebot aus der Solarthermie ebenfalls die Grenzen der Behaglichkeit an Hand der Raumluft- sowie Oberflächentemperatur. Hierfür werden die in Tabelle 17 dargestellten maximalen Temperaturen angenommen.

Tabelle 17: Maximale Temperaturen für thermisch aktivierte Bauteile [27] (eigene Darstellung)

<b>Grenztemperaturen der Raumluft</b>			
	<b>Bodenplatte</b>	<b>Außenwände</b>	<b>Raumluft</b>
Sommer	28°C	28°C	24°C
Winter			22°C

Zudem gilt zu beachten, dass ein Speicher oder Bauteil nur beladen werden kann, wenn die Vorlauftemperatur höher als die Speicher- bzw. Bauteiltemperatur ist. Ist der Temperaturgradient umgekehrt findet eine Entladung bzw. Abkühlung des Bauteils statt.

### 9.3.3. Steuerung der Solarthermieanlage

Wie oben beschrieben kann die Wärme aus der Solarthermieanlage sowohl an die thermisch aktivierten Bauteile, den Pufferspeicher oder das Erdreich abgegeben werden. Diese zeichnen sich wie in Kapitel 0 beschrieben durch unterschiedliche Charakteristika aus.

Tabelle 18: Charakteristika der Speicher und der aktiven Bodenplatte (eigene Darstellung)

<b>Charakterisierung der Speicher und aktiven Bodenplatte</b>							
<b>Speicher</b>	<b>Aufnahmeleistung</b>	<b>Aufnahmebereitschaft</b>	<b>Speicherkapazität</b>	<b>Max. Vorlauftemperatur</b>	<b>Verluste</b>	<b>Heizleistung/Gewinne</b>	<b>Speicherdauer</b>
<b>Thermische Bauteilaktivierung</b>	Gering	Häufig	Gering	Mittel	Gering	Mittel	Kurz
<b>Pufferspeicher</b>	Hoch	Fast immer	Mittel	Hoch	Mittel	Keine	Mittel
<b>Erdreichspeicher</b>	Hoch	Immer	Sehr hoch	Hoch	Hoch	Keine	Lang
<b>Aktive Bodenplatte</b>	Mittel	Selten	Sehr gering	Niedrig	Gering	Hoch	Sehr kurz

Auf Grundlage dieser Charakteristika und dem aktuellen Heizwärmbedarf kann eine Priorisierung bzw. Steuerung der drei unterschiedlichen Wärmesenken – Pufferspeicher, Bauteilaktivierung und Erdreichspeicher – erfolgen. Im Folgenden werden, wenn dies die oben beschriebenen Behaglichkeitskriterien zulassen, primär die thermischen Bauteilaktivierungen beladen. Hieraus resultieren ganzjährig geringe Wärmeverluste für das Gesamtsystem an die Außenluft.

Sollten die Bauteilaktivierungen nicht beladen werden können, wird der Pufferspeicher beladen. Dieser erlaubt eine Speicherung mit geringen Verlusten und über lange Zeiträume. Für eine Speicherung von größeren Wärmemengen im Pufferspeicher sind höhere Temperaturen oder Speichervolumina notwendig.

Der Erdreichspeicher wird auf Grund der hohen Verluste mit der niedrigsten Priorität gewählt, zeichnet sich aber durch eine sehr hohe Verfügbarkeit und eine sehr große Speicherkapazität aus und ist damit für sommerliche Wärme prädestiniert.

#### 9.4. Steuerungsalgorithmus

Grundsätzlich führt das Problem, eine optimale Energieversorgung für das Gebäude zu finden, auf die Fragestellung, wie ein zeitlich variierender Heizbedarf (*Demand*) durch verschiedene Energiequellen (*Supplies*) gedeckt werden kann. Sei  $\mathbf{T} = \{1, \dots, T\}$  eine Diskretisierung des betrachteten Zeitraums und für  $t \in \mathbf{T}$  jeweils:

- $d_t \geq 0$ : Heizwärmebedarf,
- $s_t \geq 0$ : verfügbare solare Energie,
- $w_t \geq 0$ : Leistung der Wärmepumpe (gespeist aus Erdreich bzw. Massivabsorber),
- $p_t \geq 0$ : verfügbare Energie im Pufferspeicher.

Die zum Zeitpunkt  $t$  verfügbare Energiemenge ist  $E_t := s_t + p_t$ . Als Entscheidungsvariablen ergeben sich:

- $f_t(s, x) \geq 0$ : Energie, die zum Zeitpunkt  $t$  von der Solaranlage an  $x \in N(r) := \{\text{Bauteile, Pufferspeicher, Erdreich}\}$  geliefert wird; es gilt hier  $\sum_{x \in N(r)} f_t(r, x) \leq s_t$ , d.h., in jedem Zeitschritt ist die verteilte Energie maximal so groß wie die zur Verfügung stehende Energie,
- $f_t(p, AB) \geq 0$ : Energie, die zum Zeitpunkt  $t$  vom Pufferspeicher in die Fussbodenheizung geliefert wird,
- $f_t(w, p) \geq 0$ : Energie, die zum Zeitpunkt  $t$  von der Wärmepumpe in den Pufferspeicher abgegeben wird,
- $f_t(ERD, w) \geq 0, f_t(MASSIV, w) \geq 0$ : Energieströme vom Erdreich bzw. Massivabsorber zur Wärmepumpe zum Zeitpunkt  $t$ .

Für die Energieströme und –mengen ergeben sich als Nebenbedingungen Erhaltungsgleichungen. Für den Pufferspeicher gilt  $p_{t+1} = p_t - f_t(p, AB) + f_t(s, p) + f_t(w, p)$ , d.h. die Energiemenge zum Zeitpunkt  $t + 1$  ergibt sich aus der vorhandenen Energie zum Zeitpunkt  $t$  minus der Energieentnahme in Richtung aktive Bodenplatte AB plus der Energiezufuhr  $f_t(s, p)$  durch die Solarthermieanlage und der Energiezufuhr  $f_t(w, p)$  durch die Wärmepumpe. Diese Erhaltungsgleichung vernachlässigt im ersten Schritt die Verluste im Pufferspeicher vom Zeitschritt  $t$  zum Zeitpunkt  $t + 1$ . Diese lassen sich in erster Näherung durch einen linearen

Verlustfaktor  $0 < \alpha_p \leq 1$  beschreiben, so dass sich folgende Gleichung ergibt:  $p_{t+1} = (1 - \alpha_p) \cdot p_t - f_t(p, AB) + f_t(s, p) + f_t(w, p)$ .

Analog erhält man die Erhaltungsgleichungen für die vorhandene Energie im Erdreichspeicher. Die thermische Leistung der Wärmepumpe  $w_t$  ergibt sich durch die Entnahme aus Erdreich bzw. Massivabsorber und der aufgenommenen elektrischen Leistung. Dabei entstehen für den Betrieb der Wärmepumpe Kosten, die linear durch  $w_t$  beschrieben werden können, also  $c_t w_t$  für einen Kostenfaktor  $c_t$ .

Ziel der Steuerung ist eine möglichst kostengünstige Deckung des Heizwärmebedarfs durch die verfügbaren *Supplies* (also Solarthermie, Pufferspeicher). Insbesondere ist das Ziel, die Energiezufuhr  $f_t(w, p)$  durch die Wärmepumpe über den Betrachtungszeitraum zu minimieren, während gleichzeitig die Raumlufttemperatur im Rahmen der oben beschriebenen Behaglichkeit liegt.

Wie bereits erwähnt, vernachlässigt das einfachste Modell für eine optimierte Steuerung, Verluste in den einzelnen Speichern und nicht-steuerbare Einträge wie bspw. solare Gewinne oder anwesende Personen. Hiermit kann gezeigt werden, dass in diesem Fall eine sogenannte „Greedy-Steuerung“ eine optimale Versorgung liefert: In jedem Zeitschritt wird so viel wie möglich/nötig von der zur Verfügung stehenden solaren Energie  $s_t$  für die Deckung des Bedarfs genutzt. Diese steht (unter Vernachlässigung der Betriebskosten für die Umwälzpumpen) im Gegensatz zur Wärmepumpe kostenfrei zur Verfügung. Die überschüssige Energie wird dann in die Speicher (Pufferspeicher, Erdreichspeicher) geleitet. Die Bezeichnung „Greedy-artig“ motiviert sich aus der Tatsache, dass in jedem Schritt eine „lokal“ beste Entscheidung getroffen wird. Es sollte hier betont werden, dass derartige Ansätze zum Lösen von Optimierungsproblemen zwar meistens naheliegend sind, aber im Allgemeinen keine (global) optimalen Ergebnisse liefern. Die Optimalität im vorliegenden Fall liegt an der Struktur der Ressourcen und dem vereinfachten Modell.

Werden die Verluste in den Speichern berücksichtigt, so kann man beweisen, dass die Greedy-Lösung optimal bleibt. Prinzipiell liegt dies daran, dass die Verluste durch die kostenlose solare Energie gedeckt werden. Somit ist es vorteilhaft, einen eventuell vorliegenden Heizbedarf direkt über solare Erträge zu decken sowie überschüssige Energie bestmöglich in den noch nicht ausgelasteten Speicher mit geringstem Verlust (also größtmöglichen Faktor  $1 - \alpha_p$ ) zu leiten. Dies impliziert eine Priorisierung der unterschiedlichen Speicher. Der Regelungsalgorithmus, der im Rahmen von Smallhouse IV entwickelt wurde, beachtet diese mathematisch optimale Reihenfolge und leitet die verfügbare Energie situationsspezifisch entweder direkt in die Bauteile oder speichert sie in einem der Speicher zwischen, um zu späteren Zeitpunkten einen Einsatz der Wärmepumpe zu vermeiden.

#### 9.4.1. Erweiterungen der Modelle

Das oben beschriebene Optimierungsmodell für die Steuerung im Smallhouse IV liefert eine Online-Steuerung, d.h. eine Steuerung, die keine Informationen über zukünftige Daten und Prognosen verwendet. Prinzipiell ist das Optimierungsmodell dahingehend erweiterbar, dass für die Steuerung zum Zeitpunkt  $t$  bereits (unsichere bzw. stochastische) Informationen über die solare Leistung zu Zeitpunkten  $t' > t$  vorliegen. Diese Daten könnten über Statistiken zu Strahlungsgewinnen aus Referenzjahren bzw. aus aktuellen Wetterprognosen zur Verfügung gestellt werden. Damit wären dann prinzipiell Steuerungsstrategien denkbar, welche ein Zuschalten der Wärmepumpe im Heizfall zur Zeit  $t$  hinauszögert, da ggf. mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Zeit  $t + 1$  genügend solare Energie zur Verfügung steht. Eine kurzzeitige Unterschreitung der gewünschten Wohlfühltemperatur kann durch einen entsprechenden Strafterm, bestehend aus Kosten und Behaglichkeit, modelliert werden.

Im Rahmen des Projekts wurden erste Machbarkeitsstudien durchgeführt, welche die Realisierbarkeit eines solchen Ansatzes zum Gegenstand hatten. Um die optimale Strategie zum Einsatz der Energie automatisiert berechnen zu können, wurde eine Modellierung des Entscheidungsraums und der technisch bedingten Nebenbedingungen als sogenannten Gemischt-ganzzahliges Lineares Programm (MILP) verfolgt. Ein MILP ist ein Optimierungsproblem der Form:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i x_i + \sum_{j=1}^k d_j y_j$$

$$Ax + By \leq b$$

$$x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^k$$

Hierbei sind die  $x_i$  ganzzahlige und die  $y_j$  kontinuierliche Entscheidungsvariablen. Der Hauptvorteil dieses Ansatzes ist, dass zur Lösung von MILPs ein breites Spektrum von effizienten Lösungstechniken zur Verfügung steht. Die Fokussierung auf lineare Zielfunktionen und lineare Nebenbedingung erscheint zunächst sehr einschränkend für die Modellierung. Allerdings lassen sich alle stetigen Funktionen beliebig gut durch stückweise lineare Funktionen nähern. Da mit Hilfe von MILPs auch solche stückweise linearen Funktionen durch geeignete Interaktion von kontinuierlichen und ganzzahligen Variablen abgebildet werden können (vgl. auch SOS2-Bedingungen weiter unten), ergibt sich hier ein mehr als ausreichender Spielraum für eine realitätsnahe Modellierung. Insbesondere kann für die im Projekt auftretenden Probleme eine optimale Lösung des formulierten MILP mit Hilfe eines kommerziellen Solvers bestimmt werden, der auf das Lösen von Optimierungsproblemen dieses Typs ausgelegt ist.

Die Hauptherausforderung dieses Ansatzes liegt in der Modellierung der physikalischen Eigenschaften der Bauteile, um die physikalischen Eigenschaften der Bauteile zu modellieren,

um deren Reaktion auf potentielle Entscheidungen prognostizieren zu können – wie beispielsweise die zu erwartende Temperaturänderung im Pufferspeicher, sofern die Entscheidung getroffen wird, eine vorhandene solare Leistung zum Speicher zu führen. Der gewählte Ansatz verlangt es jedoch, diese hochgradig nichtlinearen Zusammenhänge als Menge von linearen Bedingungen zu formulieren. Hierzu wurde untersucht, inwiefern sich sogenannte SOS2-Bedingungen (*Special Ordered Sets* Bedingungen Typ 2), die eine solche Modellierung von nichtlinearen Zusammenhängen als lineare Bedingungen erlauben, auf höhere Dimensionen verallgemeinern lassen.

Ferner wurden einzelne Komponenten des Systems, etwa der Pufferspeicher, verfeinert modelliert. Im einfachen Ansatz (siehe oben) wird der Pufferspeicher über eine einfache Gesamtenergie  $p_t$  abgebildet. In der Realität ist der Pufferspeicher jedoch als Schichtenspeicher ausgebildet, wobei in den einzelnen Schichten unterschiedliche Temperaturniveaus vorliegen. Hierzu wurde eine Diskretisierung des Speichers in diskrete Schichten vorgenommen und die Temperatur jeder einzelnen Schicht durch eine separate kontinuierliche Variable modelliert. Wird beispielsweise zu einem Zeitschritt die Entscheidung getroffen, solare Erträge in den Pufferspeicher zu leiten, so wird intern eine Rotation der Speicherschichten durchgeführt, die den Wärmefluss simuliert. Ferner wird eine Vermischung von angrenzenden Schichten berechnet, um die thermodynamischen Zusammenhänge zu modellieren, die bei vorliegender Wärmeübertragung wirken.

Diese ersten Vorüberlegungen zeigten deutlich, dass die Machbarkeit eines solchen Ansatzes primär durch die Berechnungsdauer gehindert wird. Durch die feingranulare Modellierung des Pufferspeichers und anderer Komponenten sowie durch die Formulierung der nichtlinearen Zusammenhänge als SOS2-Bedingungen entsteht ein signifikanter Rechenaufwand, der die Umsetzung dieses Ansatzes unter Echtzeitbedingungen derzeit verhindert. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um Vereinfachungen der technischen Zusammenhänge zu finden und die Berechnungskomplexität zu reduzieren. Die Erforschung von Techniken zur schnellen Lösung von großen und komplexen MILPs ist ein aktuelles Forschungsthema der diskreten mathematischen Optimierung.

Der aktuelle Ansatz zur Steuerung fällt unter die Gruppe der nichtlinearen Modellprädiktiven Regelung (*Nonlinear Model Predictive Control*, NMPC), bei der ein (einfaches) zeitdiskretes dynamisches Modell des zu regelnden Prozesses verwendet wird, um das zukünftige Verhalten des Prozesses in Abhängigkeit von den Eingangssignalen vorauszusagen. Auf Basis dieser Voraussage wird die Steuerung berechnet. Während das Modellverhalten bis zu einem bestimmten Zeithorizont (im konkreten Fall des Smallhouse zum Zeitpunkt  $t + 1$ ) vorausgesagt wird, wird danach die Optimierung wiederholt. Dabei wird die Optimierung im nächsten Zeitschritt mit dem dann aktuellen Zustand durchgeführt, wobei der aktuelle Zustand durch die genauere numerische Simulation der technischen Elemente in Trnsys geliefert wird.

## 9.5. Implementierung des Steuerungsalgorithmus

Basierend auf den mathematischen Vorüberlegungen, die im vorangegangenen Abschnitt diskutiert werden, findet eine Implementierung des Steuerungsalgorithmus in der Programmiersprache Python statt. Die Programmausführung wird während des vollständigen Betriebs aufrechterhalten und in regelmäßigen Zeitschritten rekaliert (vgl. NMPC). In jedem dieser Zeitschritte werden Informationen über den Zustand des Systems übermittelt, wie beispielsweise die derzeitige Strahlungsintensität oder die Temperaturen im Pufferspeicher. Der Algorithmus nutzt diese Daten, um anhand der beschriebenen Strategie Volumenströme zu bestimmen und den Fluss der Wärme zu regeln.

Um während der Entwicklung möglichst flexibel eine Vielzahl an unterschiedlichen Steuerungsstrategien evaluieren zu können, ist es zunächst notwendig, das Steuerungswerkzeug in die Simulationssoftware Trnsys einzubinden. Im Rahmen des Forschungsprojektes Smallhouse IV wird hierzu ein Trnsys-Modul entwickelt, mit dessen Hilfe ein beliebiger Python-Code ausgeführt werden kann. Dieses Modul, welches in der Programmiersprache C++ geschrieben und als DLL-Datei in Trnsys eingebunden wird, dient als Vermittler zwischen der Simulationssoftware und dem selbst geschriebenen Python-Programm. Bei der Initialisierung des Moduls wird eine spezifizierte Python-Datei eingelesen und in einem Python-Interpreter ausgeführt. Der Hauptbestandteil des Moduls ist eine Routine, die in regelmäßigen Zeitschritten von Trnsys aufgerufen wird und Ergebnisse an die Software zurückliefert. Dabei werden die übergebenen Parameter in Python-Variablen konvertiert und an das eingelesene Python-Programm zur weiteren Verarbeitung übermittelt. Nach Abschluss der Berechnungen werden die Python-Werte wiederum ausgelesen und an Trnsys übergeben.

Durch die Entwicklung dieses maßgeschneiderten Python-Tools ist es möglich, verschiedenste komplexe Steuerungsstrategien schnell umzusetzen und komplette Jahresverläufe binnen Minuten zu simulieren. Darüber hinaus ergeben sich für das Modul auch zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten. Während der Einsatzzweck im Fall des Großdemonstrators die Entwicklung einer Steuerungsstrategie ist, lässt sich beispielsweise auch das Verhalten beliebig komplexer Bauteile in Python programmieren. Als weiterer Vorteil für die Wahl von Python als Programmiersprache lassen sich die zahlreichen Bibliotheken aufführen, die für Python bereitstehen und die Entwicklung beliebiger Komponenten vereinfachen.

## 9.6. Optimierung von Parametern in der Steuerung

In der praktischen Realisierung der optimierten Steuerung finden sich zahlreiche Parameter, etwa zur Vermeidung von zu schnellen Schaltzyklen für die Komponenten und in Bezug auf Behaglichkeitsgrenzen. So wird etwa die Wärmezufuhr nicht direkt mit dem Erreichen der Wohlfühltemperatur  $T_1$  eingestellt, sondern erst mit Erreichen von  $\alpha T_1 + \beta$ , wobei  $\alpha$  und  $\beta$  konfigurierbare Parameter sind. Für die Theorie der optimalen Steuerung im vereinfachten Modell

gilt somit  $\alpha = \beta = 0$ , da insbesondere hier keine Energieaufwendungen für den Betrieb der Volumenströme berücksichtigt werden. Analoge Parameter verwendet die Steuerung für andere Kenngrößen wie untere Temperaturen etc. Um den Einfluss der Parameter auf die Steuerung zu evaluieren, wird die gesamte parameterbehaftete Simulation in ein übergeordnetes Optimierungsmodell integriert. Dieses ist dann von der Form:

$$\min f(\alpha_1, \dots, \alpha_p, \beta_1, \dots, \beta_q)$$

$$l_i \leq a_i \leq u_i, i = 1, \dots, p$$

$$l_j \leq \beta_j \leq u_j, j = 1, \dots, q$$

Hierbei sind die  $l_i, l_j, u_i, u_j$  untere bzw. obere Schranken für die Parameter und  $f(\alpha_1, \dots, \alpha_p, \beta_1, \dots, \beta_q)$  bezeichnet die aufgewendete Energiemenge bei Wahl der entsprechenden Parameter. Die Funktion  $f$  ist nicht über eine explizite Formel bekannt, sondern steht über die Simulation durch Trnsys zur Verfügung. Für die Optimierung von  $f$  wird ein Modul entwickelt, das mit Hilfe eines in der Bibliothek *scipy* für Python implementierten SQP-Verfahrens, ein robustes Verfahren der nichtlinearen Optimierung, arbeitet. Dieses Modul stellt eine Schnittstelle zu Trnsys zur Verfügung. Zur Auswertung von  $f$  werden die aktuellen Parameterwerte in den Konfigurationsdateien von Trnsys abgelegt, Trnsys im *Silent-Mode* ohne die Oberfläche aufgerufen und dann das Ergebnis von Trnsys aus der Log-Datei extrahiert. Da keine explizite Formel für  $f$  zur Verfügung steht, werden die Gradienten numerisch durch finite Differenzen genähert.

Mit dem oben vorgestellten Ansatz lassen sich für die verwendeten Komponenten in ihrem Verbund optimale Parameter zielgerichtet finden. Für die Steuerung werden neben weiteren folgende Abgleiche mit Parametern genutzt:

Versorgung der BTA mittels Solarthermie (einschalten):

- $T_{ST\_Rueck\_Faktor} * Austrittstemperatur\ BTA + T_{ST\_Rueck\_Delta} \leq$   
Eintrittstemperatur BTA
- $Raumlufttemperatur \leq T_{Luft\_Soll} + dT_{BTA}$
- $T_{ST\_Rueck} \geq T_{ST\_Rueck\_min}$
- $T_{ST\_Rueck} \leq T_{ST\_Rueck\_max}$

Versorgung der BTA mittels Solarthermie (ausschalten):

- $T_{ST\_Rueck\_aus\_Faktor} * Austrittstemperatur\ BTA \geq$   
Eintrittstemperatur BTA

Beheizung des Raumes mittels Fußbodenheizung zur Sicherstellung der Soll-Raumlufttemperatur ( $T_{Luft\_soll}$ ):

- $T_{Luft\_Soll\_Faktor} * Raumlufttemperatur + T_{Luft\_Soll\_Delta} \leq$   
 $T_{Luft\_Soll}$

Die Optimierung dieser Parameter mit den angenommenen Randbedingungen liefert die in Tabelle 19 dargestellten Werte für die Hysterese der Regelung und Steuerung (vgl. 9.2.2).

Tabelle 19: Mittels Optimierung ermittelte Parameter der Steuerung

	Kürzel	Beschreibung	Optimierter Hysterese
<b>Gebäude</b>	dT_BTA_Winter	Zulässige Überhitzung der Raumluft im Winter/ Sommer	1,96
	dT_BTA_Sommer		1,25
<b>Bauteil-aktivierung und Solarthermie</b>	T_ST_Rueck_Faktor	Verhältnis zw. Ein- und Austrittstemperatur der BTA	1,00
	T_ST_Rueck_Delta		1,12
	T_ST_Rueck_min	Min/max Vorlauf-temperatur der BTA (fix)	20,00
	T_ST_Rueck_max		95,00
	T_ST_Rueck_aus_Faktor	Verhältnis zw. Rücklauf und Vorlauf BTA	1,03
<b>Wärmepumpe</b>	T_Luft_Soll_Faktor	Zulässige Übertretung der Raumlufttemperatur	1,08
	T_Luft_Soll_Delta		-1,05

Wie in Tabelle 19 dargestellt können die einzelnen Komponenten der TGA - mit Hilfe von Ventilen - gesteuert werden. Diese Steuerung erfolgt, wie oben beschrieben, durch den Abgleich von Temperaturen, z.B. der Temperatur am Ausgang des Kollektors und der Rücklauftemperatur der aktivierten Bauteile. Um ein häufiges Ein- und Ausschalten zu verhindern, wird die Austrittstemperatur mit einem Faktor multipliziert und um eine Konstante erhöht. Somit wird die Abschalttemperatur – je nach Werte - leicht nach oben oder unten verschoben. Ein häufiges Ein- bzw. Ausschalten hat zwei negative Effekte. Zum einen Erhöht dies den Materialverschleiß und führt somit zu höheren Instandhaltungskosten, zum anderen benötigen v.a. Wärmepumpen beim Start eine höhere Energiemenge, den sog. Anlaufstrom. Dieser führt wiederum zu höheren Betriebskosten.

Die Werte Tabelle 19 lassen sich wie folgt interpretieren:

- Im Winter kann auf Grund der höheren Transmissions-Wärmeverluste bei höheren Raumlufttemperaturen in die Bauteilaktivierung eingespeist werden. Diese darf maximal 1,25 bzw. 2 K über der Soll-Raumlufttemperatur liegen. Diese zulässigen Überhitzungen entsprechen im Winter in etwa dem Zulässigen Toleranzband für die Raumlufttemperatur zur Einhaltung der Behaglichkeit.
- Die Nutzung der BTA kann gesteigert werden, indem die zulässige Eintrittstemperatur mindestens 1,1 K über der Ausgangstemperatur liegt. Es wird also so lange Wärme eingebracht, bis die Temperatur von Vor- und Rücklauf fast identisch sind.
- Die Beladung der aktivierten Bauteile sollte erst beendet werden, wenn die Temperatur um rd. 3% über der Eingangstemperatur liegt.
- Um den Betrieb der Wärmepumpe zu minimieren und gleichzeitig die Behaglichkeit einzuhalten, muss die Wärmepumpe - bei leerem Speicher und keinem solaren Ertrag – erst bei einer Absenkung der Raumlufttemperatur von 1 K eingeschaltet werden.

## 10. Messkonzept

Zur Steuerung und Regelung der Anlagentechnik ist ein Messkonzept, welches alle notwendigen Regelgrößen misst, zwingend erforderlich. Welche Regelgrößen zu messen sind wird von der Steuerung vorgegeben. Hierfür müssen die für die Steuerung erforderlichen Eingangsparameter von der Messtechnik erfasst werden. Neben der Steuerung und Regelung des Großdemonstrators Smallhouse IV muss das Messkonzept auch alle weiteren Größen messen und dokumentieren, die für ein Langzeit-Monitoring notwendig sind. Ziel des Langzeit-Monitorings ist es, den thermischen Zustand des Gebäudes zu jedem Zeitpunkt zu erfassen. Hierdurch kann das Zusammenwirken der Anlagentechnik sowie der Bauteile über einen längeren Zeitraum messtechnisch erfasst und dokumentieren werden. Anhand dieser Messwerte kann das instationäre Gebäudemodell validiert und das thermische Verhalten der Komponenten im laufenden Betrieb unter realen Randbedingungen erfasst werden. Das Messkonzept ist in Tabelle 20 dargestellt und gliedert sich in den Teil Steuerung und Regelung und in ein Langzeit-Monitoring.

Tabelle 20: Messkonzept

Messgröße	Sensor	Messstelle	Anzahl
<b>Messkonzept zur Steuerung und Regelung</b>			
Temperatur	Temperatursensor	Bauteile (Kern)	8
		Bauteil (Oberfläche)	8
		Erdreichspeicher	1
		Pufferspeicher	1
		Innenraum	1
<b>Messkonzept des Langzeit-Monitorings</b>			
Temperatur	Temperatursensor	Bauteile	87
		Erdreichspeicher	28
		Vor-/Rücklauf	26
		Pufferspeicher	3
Strahlungstemperatur	Globe-Thermometer	Innenraum	1
Luftdruck/geschwindigkeit	Thermoanemometer	Innenraum	1
Volumenstrom	Durchflussmesser	Vorlauf von Bauteile/Wärmepumpe/Kollektor	13
Direkte/diffuse Strahlung	Sternpyranometer	Außen	2
Strom	Zangenstrommesser	Umwälzpumpen	1
		Wärmepumpe	1
		Hausanschluss	1
Luftfeuchtigkeit/-druck/ -geschwindigkeit/-temperatur	Multisensor-Messsystem	Außen	1
Luftfeuchte/-druck/-temperatur	Digitaler Fühler	Innenraum	1

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Messstellen der Temperatursensoren in den Bauteilen und dem Erdspeicher dargestellt:

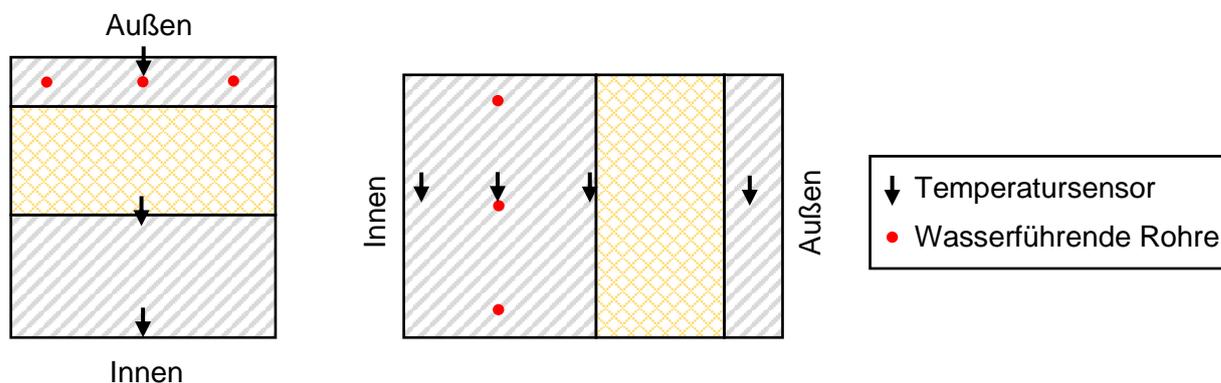


Abbildung 41: Messstelle der Temperatursensoren in den Bauteilen, links Dachelement und rechts Außenwand

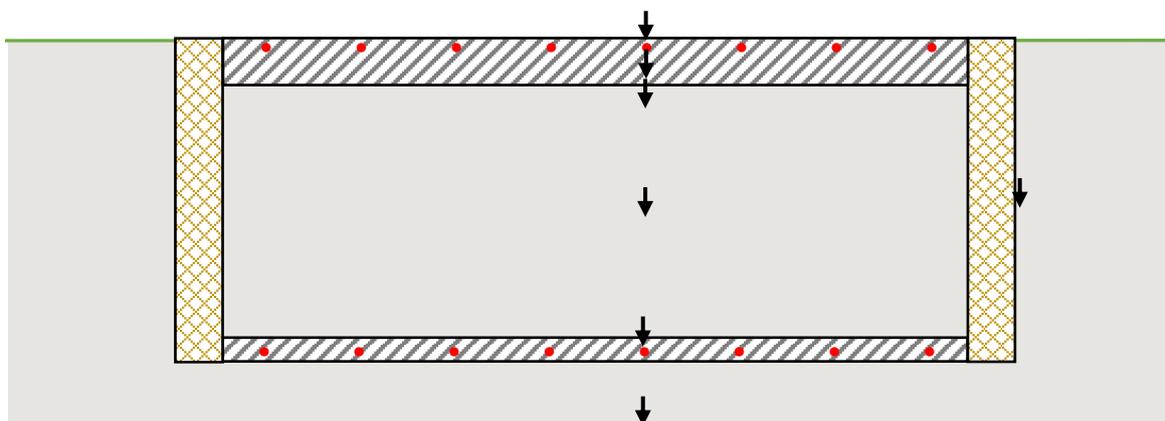


Abbildung 42: Messstelle der Temperatursensoren des Erdspeichers (Ansicht)

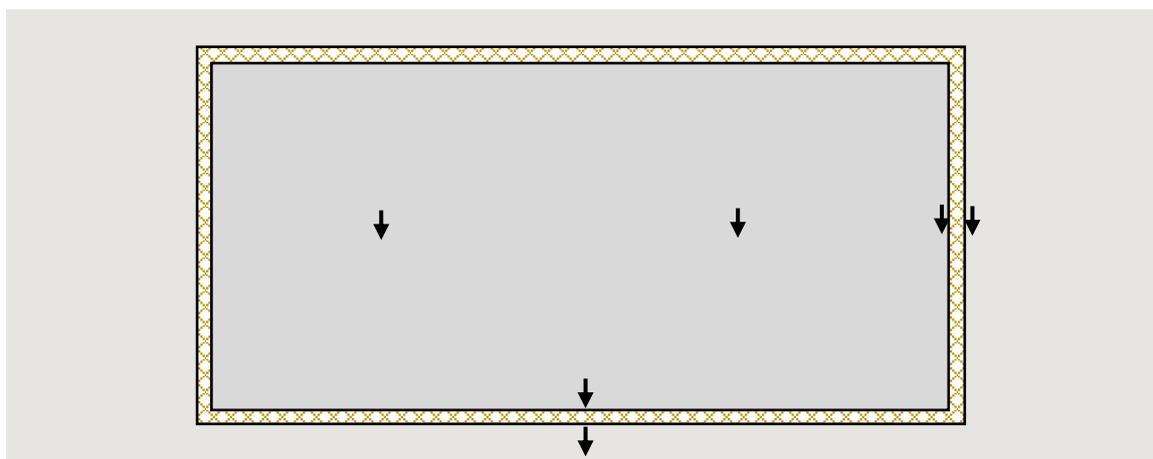


Abbildung 43: Messstelle der Temperatursensoren des Erdspeichers (Grundriss)

## 11. Instationäres Gebäudeenergiemodell

Das in den vorherigen Kapiteln entwickelte Gebäudeenergiekonzept kann nur an Hand einer instationären Simulation fundiert bewertet werden. Nur anhand einer instationären Simulation ist es möglich die Interaktion zwischen Bauteilen, Anlagentechnik und Umgebung mittels Modellen darzustellen. Hierzu wird in Trnsys eine thermische Simulation aufgebaut, die eine instationäre Simulation unter variablen Randbedingungen erlaubt. Durch eine Parameterstudie der Pufferspeicher- und der Kollektorgröße kann deren Einfluss auf das thermische Verhalten des Gebäudes untersucht und quantifiziert werden. Somit können zum einen Wirkzusammenhänge und Sensitivitäten aufgezeigt werden.

### 11.1. Systembildung

Das thermische Gebäudemodell wird in Trnsys 17 mittels mehreren Komponenten, welche in Tabelle 21 kurz dargestellt werden, implementiert. Hiermit wird die hydraulische Schaltung aus Abschnitt 8.2 in ein Gebäudemodell überführt. Eine genaue Beschreibung der verwendeten Berechnungsmodelle, auch Types genannt, findet sich in den jeweiligen Handbüchern [30]. Die Eigenschaften für das Gebäudemodell (Type 56) werden in Kapitel 7 dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung von multifunktionalen Bauteilen, daher wird auf die Modellierung des Erdreichspeichers verzichtet. Somit entfällt für die Simulation der in Abschnitt 8.2 dargestellt Modus 1. Der Primärkreislauf der abgebildeten Wärmepumpe greift auf die natürliche Erdreichtemperatur als Wärmequelltemperatur zurück. Im System ist kein Heizstab berücksichtigt.

Tabelle 21: Verwendete Simulationsmodelle

<b>Verwendete Simulationsmodelle</b>		
<b>Komponente</b>	<b>Trnsys -Type</b>	<b>Eingabewerte</b>
Wetter	15	Meteronorm Stuttgart
Gebäude	56	Nach Kapitel 7
Bauteilaktivierung		
Erdreichtemperatur	77	-
Solarkollektor	832	Ausrichtung nach Süd, Neigung um 45°, Röhrenkollektor
Wärmepumpe	401	Wärmepumpenkennlinien nach Herstellerangaben für ait SWCV 62 [30]
Pufferspeicher	340	In Anlehnung an IEA TASK 32 [11]
Steuerung / Regelung	202	Eigenentwickelte Phytton-Schnittstelle in Anlehnung an Type 155 (MatLab)

Die oben beschriebenen Types stellen die wichtigsten im Modell verwendeten Types dar. Somit kann das in Kapitel 7 vorgestellte Gebäude als dynamische Simulation abgebildet werden.

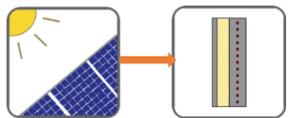
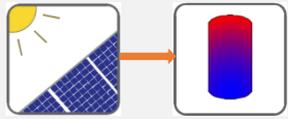
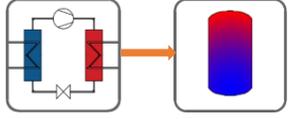
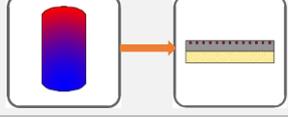
## 11.2. Kenngrößen

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse werden energetische und ökologische Kennwerte sowie Kennwerte zur Behaglichkeit erhoben. Diese Kennwerte stellen das zeitlich ausgelöste Verhalten des Gebäudes als einzelnen Wert dar und erlauben somit eine Bewertung des Gesamtsystems.

### 11.2.1. Energetische Kenngrößen

Zur energetischen Bewertung des Gesamtsystems werden Energiemengen aus Energieströme bilanziert und gegenübergestellt. Diese bilden die Kennwerte zur Gebäudebewertung und sind in Tabelle 22 dargestellt. Diese bestehen aus den thermischen Energiemengen  $Q$  und den elektrischen Energiemengen  $W$ .

Tabelle 22: Energiemengen zur Bilanzierung

Energiemengen zur Gebäudebewertung			
Modus	Wärmefluss	Energiestrom	Kenngrößen
2		Solarthermie → Multifunktionale Bauteile	$Q_{St,MB}$
3		Solarthermie → Pufferspeicher	$Q_{St,Ps}$
4,5		Wärmepumpe → Pufferspeicher	$Q_{Wp,Ps}$ $W_{Wp}$
6		Pufferspeicher → Aktivierte Bodenplatte	$Q_{Ps,AB}$

Nach [11] wird auf Grundlage der thermischen Leistungen die benötigte elektrische Leistung berechnet.

### 11.2.2. Ökologische Kenngrößen

Aus den bilanzierten Energiemengen können Kenngrößen zur ökologischen Bewertung abgeleitet werden.

Für Systeme mit Wärmepumpen stellt die **Jahresarbeitszahl JAZ** eine der wichtigsten Kenngrößen dar. Diese beschreiben das Verhältnis zwischen abgegebener Wärme  $Q_{Wp}$  und aufgenommener elektrischer Arbeit  $W_{Wp}$ . Somit stellt die JAZ auch den Anteil an Erneuerbarer Energien an der Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe dar. Die Leistungskennzahlen

der Wärmepumpe (COP) geben analog die Effizienz in einem Zeitschritt bzw. zu einem Zeitpunkt an.

$$JAZ = \int_{t=0}^{8760h} COP dt = \frac{Q_{WP}}{W_{WP}}$$

Der **solare Deckungsgrad**  $f_{sol}$  gibt das Verhältnis zwischen solarthermisch erzeugter Wärme  $Q_{St}$  und bereitgestellter Wärme aus Solarthermie und Wärmepumpe  $Q_{WP}$  an. Da die thermischen Verluste  $\Sigma Q_{Verluste}$  (Summe der Wärmeverluste aus dem Pufferspeicher und den thermischen aktiven Bauteilen) für das System nicht nutzbar sind, werden diese abgezogen.

$$f_{sol} = \frac{Q_{St} - \Sigma Q_{Verluste}}{Q_{St} + Q_{WP} - \Sigma Q_{Verluste}}$$

Der **Nutzungsgrad des Kollektors**  $\eta_{sol}$  gibt das Verhältnis zwischen der solarthermisch erzeugter Wärme  $Q_{St}$  und der auf die Kollektorfläche  $A_{St}$  fallenden solaren Strahlung  $G_{sol}$  an. Hierbei sind Verluste wie z.B. infolge des optischen Wirkungsgrades und Systemeffizienz berücksichtigt.

$$\eta_{sol} = \frac{Q_{St}}{G_{sol} \cdot A_{St}}$$

Der **Primärenergiebedarf**  $Q_P$  umfasst neben der Energie des Energieträgers den energetischen Aufwand für dessen Bereitstellung. Hierbei werden alle Verluste infolge der Prozesskette berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt nach der aktuellen EnEV [30] mit einem Primärenergiefaktor  $f_p$  für Strom von 1,8 und für Umweltwärme von 0. Hier ergibt sich die Strommenge  $W_{el}$  aus der Summe aller elektrischen Arbeiten. Die Umweltenergie setzt sich aus genutzter solarer und dem Erdreich entzogener Wärme zusammen.

$$Q_P = f_{p,el} \cdot W_{el} + f_{p,Umwelt} \cdot Q_{Umwelt}$$

### 11.2.3. Behaglichkeit

Durch den Temperaturgradient zwischen multifunktionalem Bauteil und Raumluft, findet ein selbstregulierender Wärmeaustausch statt, vgl. Abschnitt 6.2. Dies ist besonders bei der Überlagerung mehrerer Wärmequellen, wie bspw. bei zusätzlicher solarer Einstrahlung, bedeutsam. Zur Bewertung der Behaglichkeit werden Unterkühlung und Überhitzung des Innenraumes nach [27] und [11] bestimmt. Beides wird mit Hilfe der benötigten Energiemenge zur Wiederherstellung der Behaglichkeit bewertet. Eine Überhitzung des Innenraumes, in Anlehnung an [20], wird durch die **Energiemenge**  $Q_{über}$  und eine Unterkühlung, in Anlehnung an [11], durch  $Q_{unter}$  quantifiziert.

$$Q_{über} = \int_{t=0}^{8760h} V_{Luft} \cdot \rho_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (T_{Luft} - 26,0) dt \quad \forall T_{ist} > 26,0^{\circ}C$$

$$Q_{über} = \int_{t=0}^{8760h} V_{Luft} \cdot \rho_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (19,5 - T_{Luft}) dt \quad \forall T_{ist} > 19,5^{\circ}C$$

### 11.3. Ergebnisse - Variation Anlagentechnik

Um den Einfluss der Dimensionierung von Pufferspeicher und Solarthermie auf das thermische Verhalten bzw. die Kennwerte zu untersuchen wird eine Parameterstudie durchgeführt. Somit können die Einflüsse der untersuchten Parameter sowie Wirkzusammenhänge dargestellt werden und Dimensionierungen bewertet werden.

Die Wärmemenge die von der **Solarthermie** an die **multifunktionalen Bauteile**  $Q_{St,MB}$  übertragen wird sollte möglichst groß sein. Somit kann die Speicherfunktion der Bauteile größtmöglich genutzt werden.

Abbildung 44 zeigt deutlich, dass diese Wärme fast ausschließlich von der Größe der Solarthermie abhängt. Die Größe des Pufferspeichers hat keinen Einfluss.

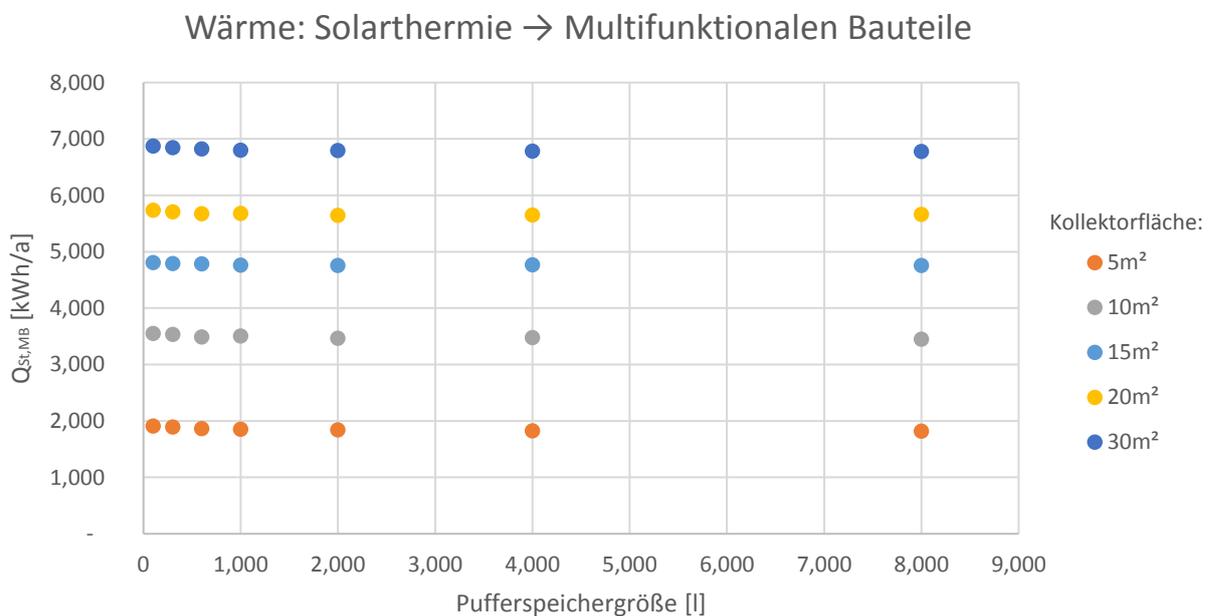


Abbildung 44: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf die zwischen Solarthermie und Multifunktionalen Bauteilen übertragene Wärme (eigene Darstellung)

Die Wärmemenge die von der **Solarthermie** an den **Pufferspeicher**  $Q_{St,Ps}$  übertragen wird kann zu einem späteren Zeitpunkt zur Beheizung des Gebäudes genutzt werden. Diese sollte ebenfalls möglichst groß sein, um die Laufzeit der Wärmepumpe zu reduzieren. Abbildung 45 zeigt, dass diese Wärme sowohl von der Größe der Solarthermie als auch der Größe des Pufferspeichers abhängt. Mit steigendem Speichervolumen steigt ebenfalls der Einfluss der Kollektorfläche.

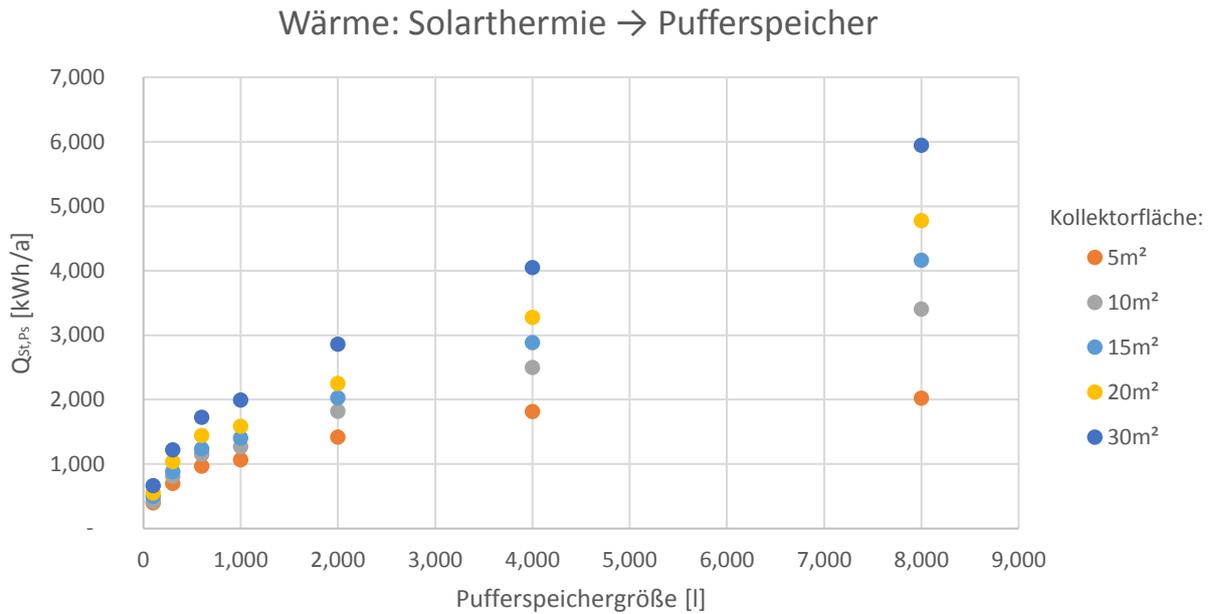


Abbildung 45: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf die zwischen Solarthermie und Pufferspeicher übertragene Wärme (eigene Darstellung)

Die Wärmemenge die von der **Wärmepumpe** an den **Pufferspeicher**  $Q_{Wp,Ps}$  übertragen wird, stellt wie oben beschrieben, die Basis einer ökonomischen und ökologischen Betrachtung dar. Daher sollte diese bzw. die hierfür aufgenommene Strommenge reduziert werden. Abbildung 46 zeigt, dass die Größe der Solarthermie sich annähernd antiproportional zur aufgenommenen Wärmemenge verhält. Für alle Solarthermieanlagen zeigt sich ein Minimum, welches sich bei größeren Pufferspeichergrößen ausbildet.

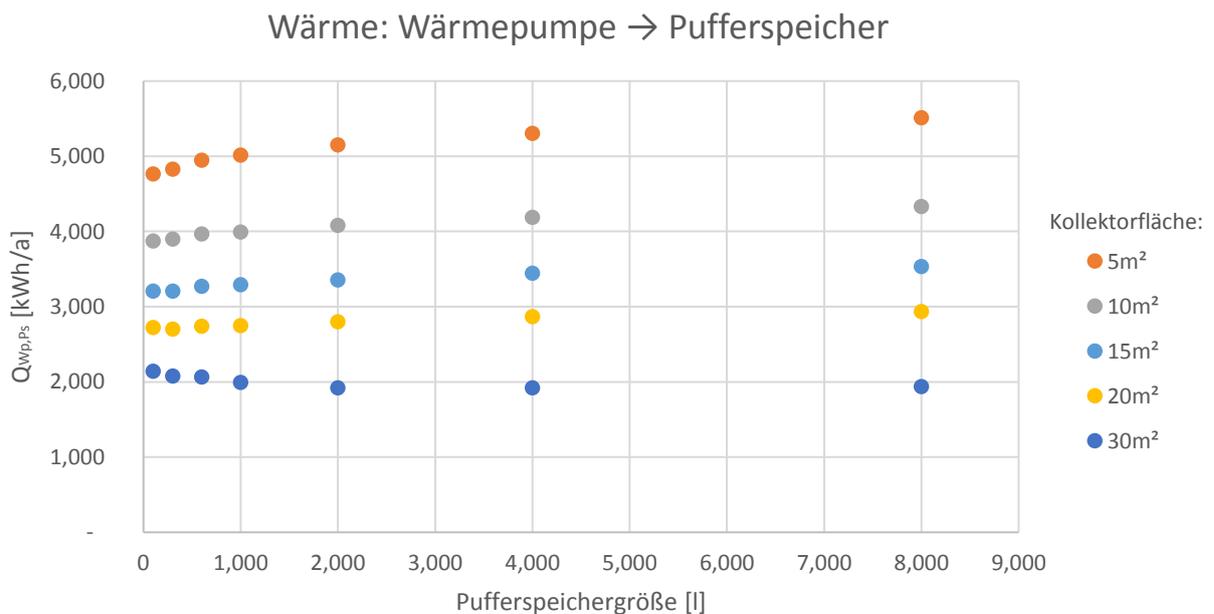


Abbildung 46: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf die abgegebene Wärme der Wärmepumpe (eigene Darstellung)

Mit Hilfe der Wärme die vom **Pufferspeicher** an die **Aktivierte Bodenplatte**  $Q_{PS,AB}$  übertragen wird, wird die Behaglichkeit sichergestellt. Diese wird zum Teil aus der Wärmepumpe bereitgestellt und sollte minimiert werden. Abbildung 47 zeigt, dass die von der aktivierten Bodenplatte aufgenommenen Wärme sich annähernd proportional zur Größe der Solarthermie verhält. Die Größe des Pufferspeichers hat keinen relevanten Einfluss.

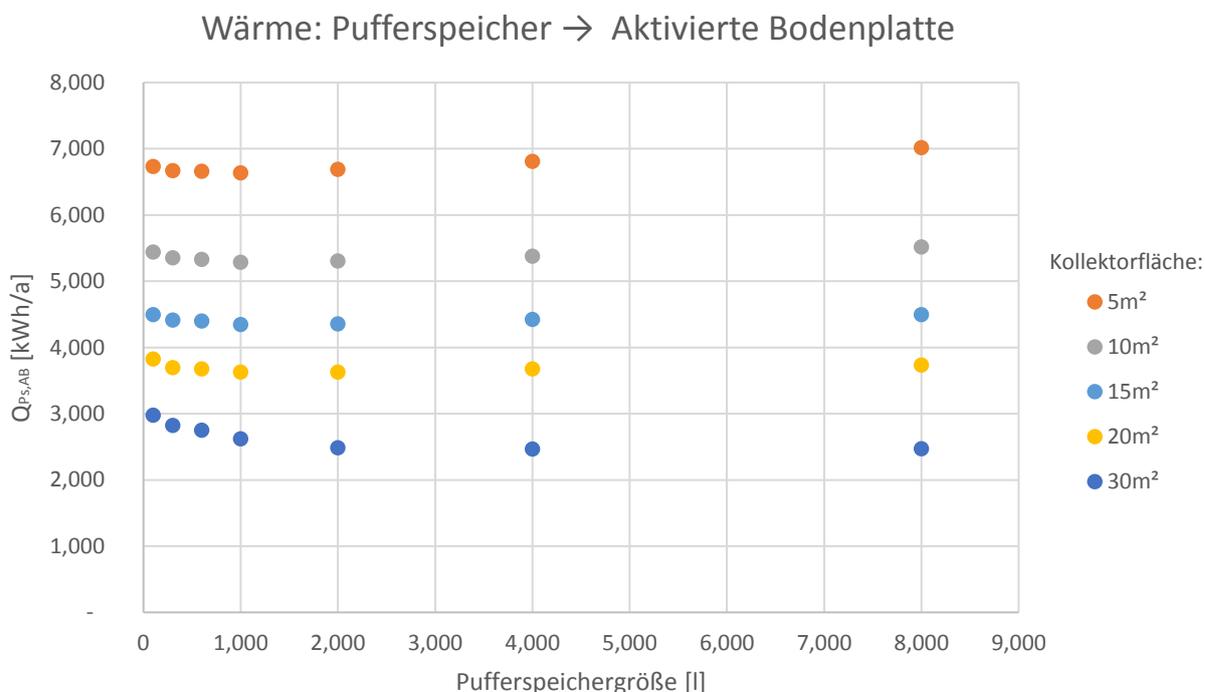


Abbildung 47: Einfluss der Pufferspeichergöße und der Größe der Solarthermie auf die von der aktivierten Bodenplatte aufgenommene Wärme (eigene Darstellung)

Die **Elektrische Arbeit der Wärmepumpe**  $W_{WP}$  stellt die Basis für fast alle folgenden ökologischen und ökonomischen Betrachtungen dar. Der **Primärenergiebedarf**  $Q_P$  ist mit einem festen Faktor, 1,8 vgl. Absatz 11.2.2, an die aufgenommene elektrische Arbeit gebunden. Somit verhalten sich beide Kennwerte identisch, deshalb wird nur die elektrische Arbeit abgebildet. Abbildung 48 zeigt einen annähernd asymptotischen Verlauf in Bezug auf die Speichergröße. Die Größe der Solarthermie verhält sich annähernd antiproportional zu beiden Kenngrößen.

### Arbeit: Kompressor Wärmepumpe

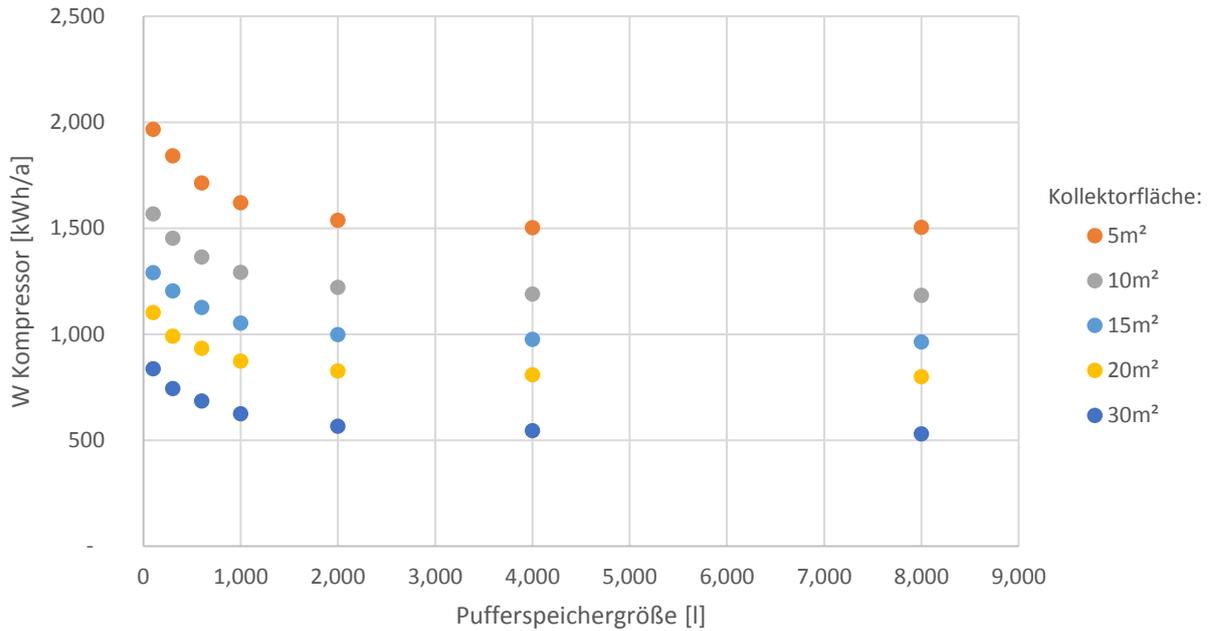


Abbildung 48: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf die aufgenommene elektrische Arbeit der Wärmepumpe (eigene Darstellung)

Die **Verluste des Pufferspeichers**  $Q_{Ps,Verluste}$  stellen eine Reduktion der Effizienz des gesamten Systems dar, daher sollten diese minimiert werden. Diese Verluste treten in jedem Zeitschritt auf und sind unabhängig vom Betriebsmodus. Abbildung 49 zeigt, dass die Verluste sowohl von der Speichergröße, als auch der der Größe der Solarthermie abhängen.

### Wärme: Verluste Pufferspeicher

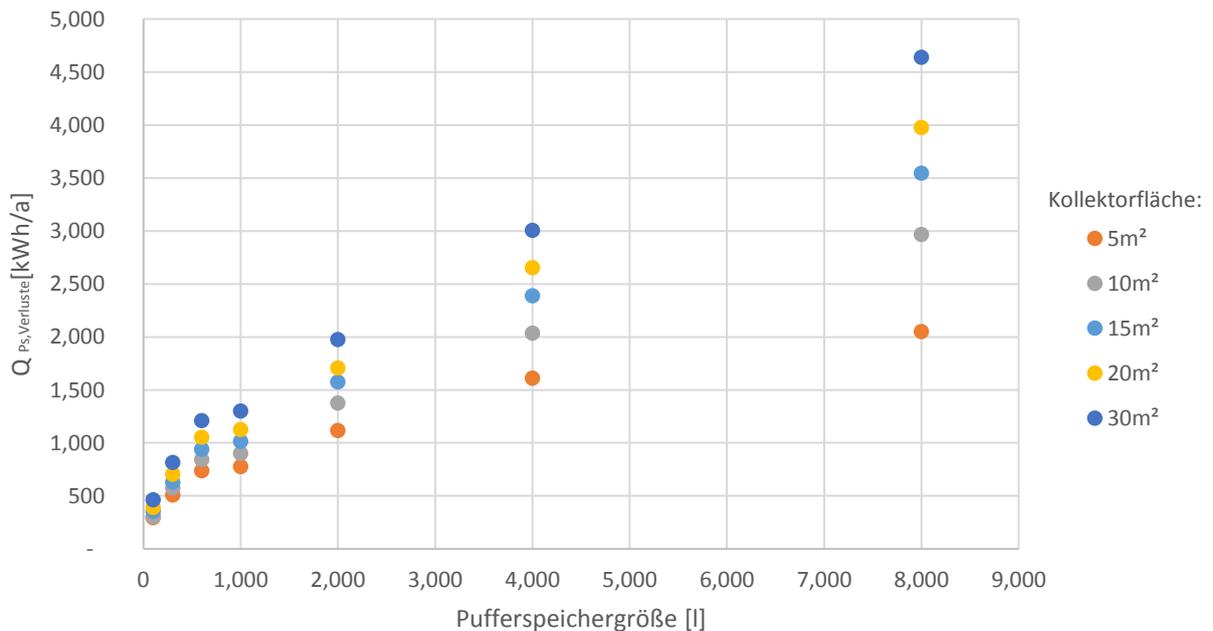


Abbildung 49: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf die Verluste des Pufferspeichers (eigene Darstellung)

Die **Jahresarbeitszahl (JAZ)** stellt neben der zum nachheizen benötigten Wärme  $Q_{Ps,AB}$  den zweiten Einflussfaktor auf den Strombezug der Wärmepumpe und somit der jährlichen Kosten dar. Eine hohe JAZ kann sowohl in niedrigen Pufferspeichertemperaturen als auch in hohen Umgebungstemperaturen (Quelltemperatur) liegen und sollte möglichst groß sein. Abbildung 50 zeigt ein deutlich asymptotisches Verhalten der JAZ in Bezug auf die Speichergröße. Der Einfluss der Größe der Solarthermie zeigt sich vor allem bei kleinen Speichern und ist für Speicher über 2.000 l vernachlässigbar.

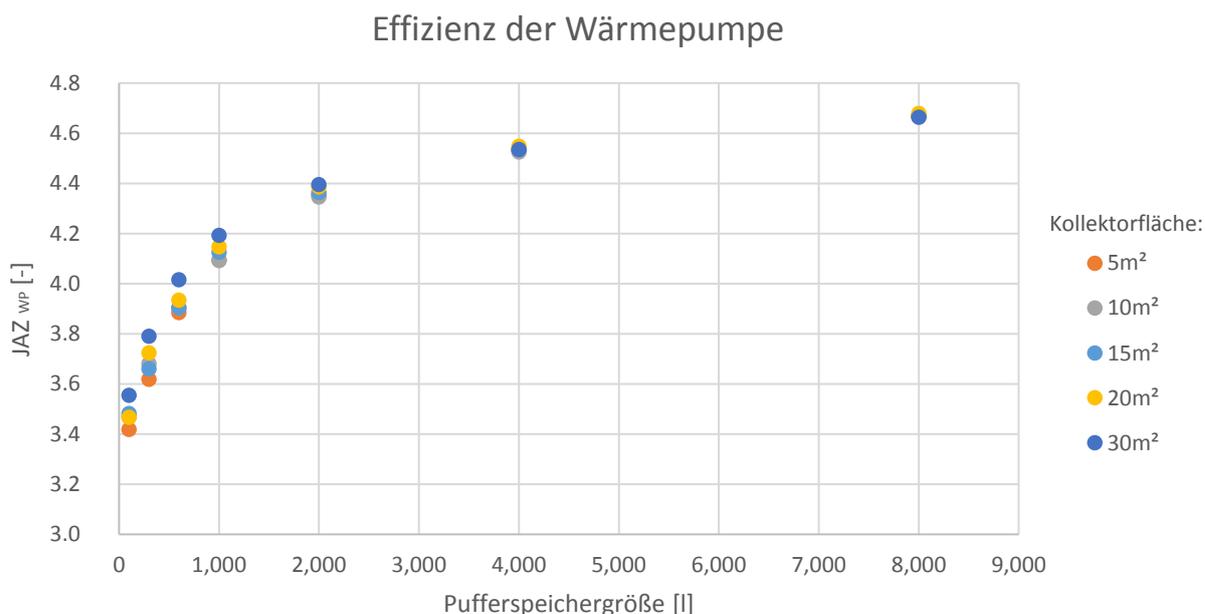


Abbildung 50: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf die Effizienz der Wärmepumpe (eigene Darstellung)

Der **solare Deckungsgrad  $f_{sol}$**  stellt neben der zum Nachheizen benötigten Arbeit  $W_{WP}$  den wichtigsten Kennwert dar. Abbildung 51 zeigt ein annähernd asymptotisches Verhalten des solaren Deckungsgrades mit steigender Speichergröße. Mit sinkender Größe der Solarthermie sinkt auch das asymptotische Verhalten und es bildet sich ein Maximum heraus. Der solare Deckungsgrad verhält sich annähernd proportional zur Größe der Solarthermie.

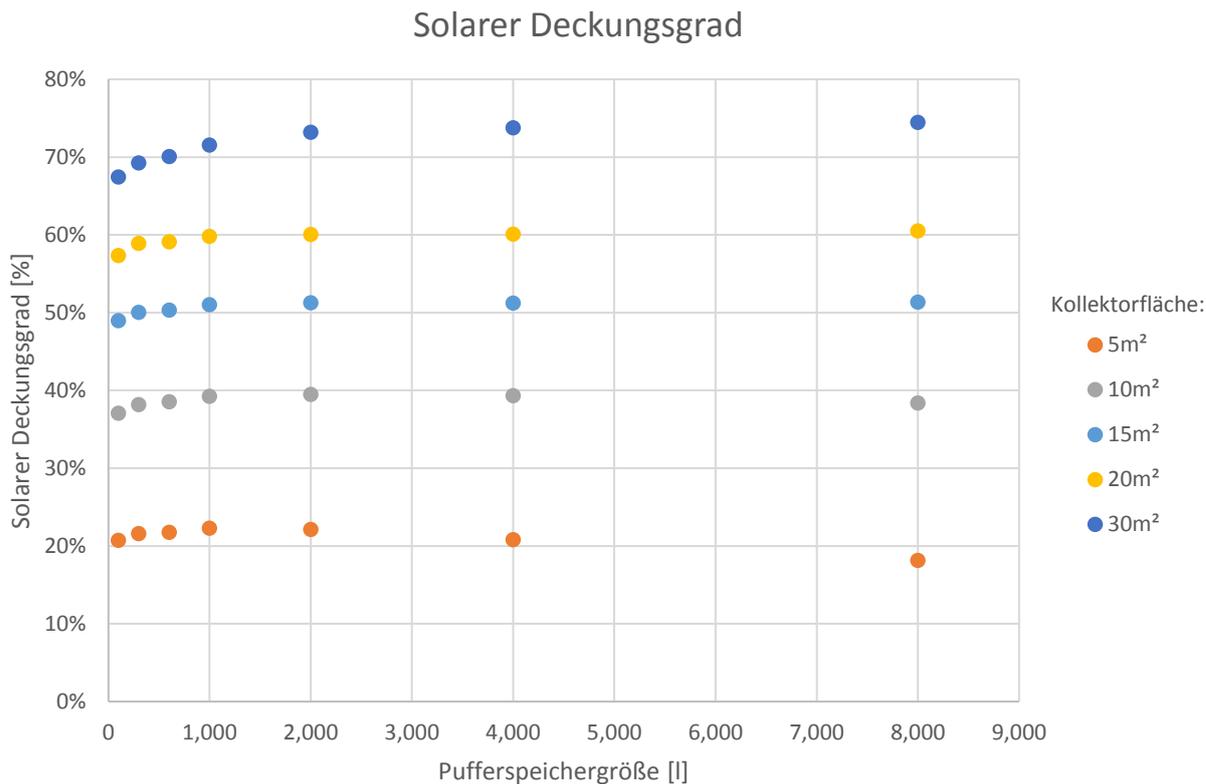


Abbildung 51: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf den solaren Deckungsgrad (eigene Darstellung)

Der **Nutzungsgrad der Solarthermie**  $\eta_{St}$  ist ein Indikator für die Güte der Dimensionierung der Solarthermie bei gegebener Heizlast und Pufferspeichergröße. Ein geringer Nutzungsgrad weist auf eine Unterdimensionierung der Solarthermie oder des Pufferspeichers hin. Abbildung 52 zeigt, dass bezogen auf die Speichergröße bei allen Größen der Solarthermie ein asymptotisches Verhalten auftritt. Bezogen auf die Speichergröße zeigt der solare Deckungsgrad ein annähernd antiproportionales Verhalten.

Werden die Verluste des Speichers vernachlässigt, ist der solare Nutzungsgrad lediglich von der Größe der Solarthermie abhängig. Hierbei ist zu beachten, dass für den solaren Nutzungsgrad das ganze Jahr, also auch der Sommer, bilanziert wird.

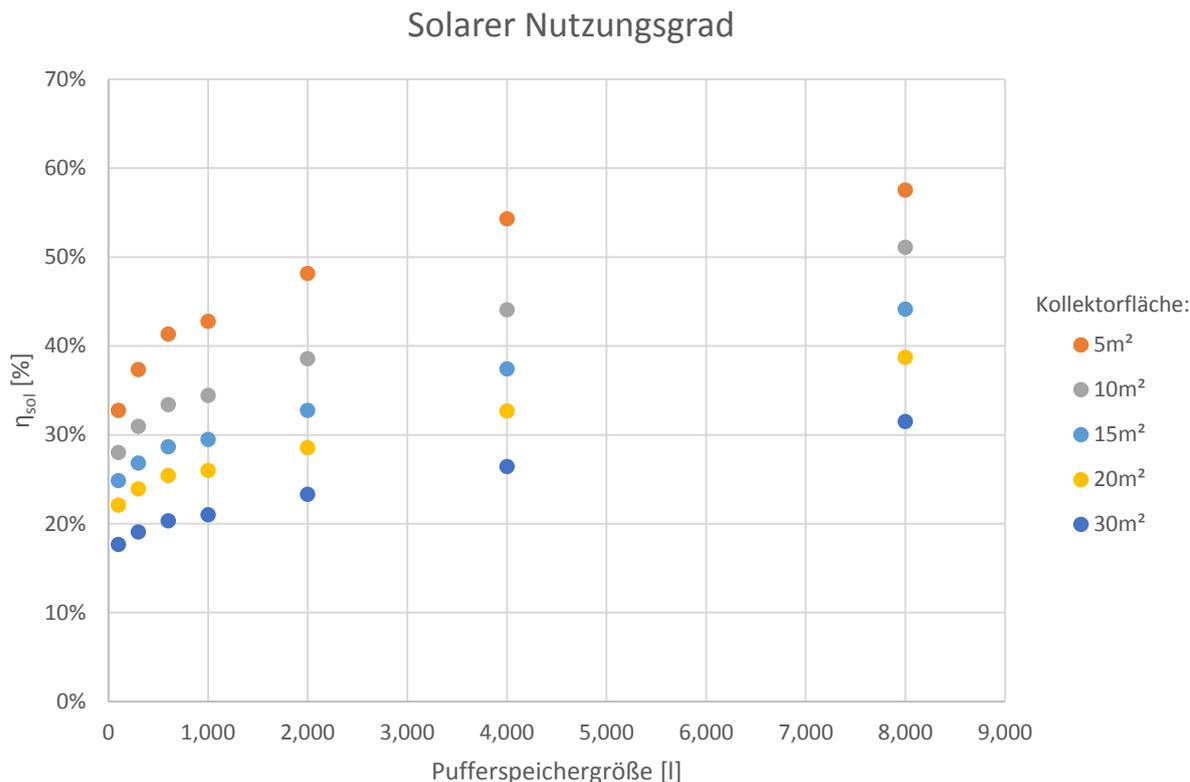


Abbildung 52: Einfluss der Pufferspeichergröße und der Größe der Solarthermie auf den Nutzungsgrad der Solarthermie, inkl. der Speicherverluste (eigene Darstellung)

Bei Betrachtung der Behaglichkeit zeigt sich, dass keine Unterkühlungen oder Überhitzungen auftreten. Die **Energiemenge zur Wiederherstellung der Behaglichkeit aufgrund von Überhitzung  $Q_{\text{über}}$**  und **Energiemenge zur Wiederherstellung der Behaglichkeit aufgrund von Unterkühlung  $Q_{\text{unter}}$**  betragen also für alle untersuchten Varianten 0 kWh/a.

#### 11.4. Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass es durch den Einsatz von multifunktionalen Bauteilen und der Anlagentechnik zu keiner Überhitzung oder Unterkühlung des Großdemonstrators kommt. Somit kann die Behaglichkeit zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden. Auch durch den Einsatz von großen Kollektorflächen ist die Steuerung in der Lage Überhitzungen zu vermeiden.

Abbildung 44 und Abbildung 47 zeigen, dass der Wärmeeintrag in die multifunktionalen Bauteile und die aktive Bodenplatte nahezu unabhängig von der Pufferspeichergröße ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Bauteile in dem gewählten System ein ausreichend großes Speichervermögen bereitstellen. Gleichzeitig steigt der Eintrag der Solarthermie in den Pufferspeicher und dessen Verluste, vgl. Abbildung 49, mit zunehmender Pufferspeichergröße. Hieraus folgt, dass der zusätzliche Eintrag des Kollektors in den Pufferspeicher hauptsächlich dessen Verluste deckt, vgl. Abbildung 45. Darin liegt auch die Steigerung des solaren Nutzungsgrades des Kollektors begründet. Die Kollektorgröße zeigt einen deutlich größeren Ein-

fluss auf die Wärmebereitstellung der Wärmepumpe als die Pufferspeichergröße (siehe Abbildung 46), mit zunehmender Kollektorgröße sinkt die Wärmebereitstellung aus der Wärmepumpe. Bezogen auf eine Kollektorgröße bildet der Wärmebezug aus der Wärmepumpe, genauso wie die bezogene elektrische Arbeit, ein Minimum aus. Bei steigender Kollektorgröße bildet sich das Minimum bei größeren Pufferspeichergrößen. Die aufgenommene elektrische Arbeit des Kompressors weist für alle Kollektorgrößen ein asymptotisches Verhalten ab einer Speichergröße von 1.000 l auf. Wird die elektrische Arbeit, bzw. die hieraus resultierenden Kosten, als Zielgröße einer Optimierung herangezogen kann die Dimensionierung des Speichers für den Großdemonstrator auf maximal 1.000 l festgesetzt werden.

Neben dieser ökonomisch geprägten Betrachtung kann auch, wie in Abschnitt 11.2 beschrieben, eine ökologische erfolgen. Hierzu kann der solare Deckungsgrad herangezogen werden. Hierbei zeigt sich bezogen auf die Pufferspeichergröße und die Größe der Solarthermie ein ähnliches Verhalten wie bei der elektrischen Arbeit. Hier hat ebenfalls die Größe der Solarthermie einen größeren Einfluss als die Pufferspeichergröße. Aufgrund der vernachlässigbaren zusätzlichen Gewinne sollte dieser auch aus ökologischer Sicht auf 1 m<sup>3</sup> begrenzt werden. Bei einer angenommenen Speichergröße von 1.000 l und einer Kollektorgröße von 15 m<sup>2</sup> liegt der solare Deckungsgrad bei ca. 50% wie bei der stationären Vordimensionierung, vgl. Abschnitt 8.1.

Bei der JAZ der Wärmepumpe zeigt sich, dass die Pufferspeichergröße einen größeren Einfluss als die Kollektorgröße hat. Der Einfluss der Kollektorfläche auf die JAZ sinkt mit steigender Kollektorgröße und ist ab ca. 4.000 l vernachlässigbar. Durch das Vergrößern des Pufferspeichers bei gleichbleibendem Wärmeeintrag sinkt die Speichertemperatur, was zu einem effizienteren Betrieb der Wärmepumpe führt.

### **11.5. Vergleich von Gebäudeenergiekonzepten**

Im Folgenden wird das Gebäudeenergiekonzept des Großdemonstrators (Konzept 1 genannt) mit einem Konzept bestehende aus einem Pufferspeicher und einer Fußbodenheizung (Konzept 2 genannt) verglichen. Die Randbedingungen wie z.B. Wetter, Geometrie und TGA sind dabei gleich und entsprechen der obigen Beschreibung.

Im Konzept 1 stehen der Solarthermie die multifunktionalen Außenwände und ein kleiner Pufferspeicher zur Verfügung. In Konzept 2 steht als Wärmesenke lediglich ein großer Pufferspeicher zur Verfügung.

Im Folgenden werden zwei Szenarien untersucht. In Szenario 1 soll die äquivalente Pufferspeichergröße der multifunktionalen Außenwände des Großdemonstrators ermittelt werden. Hiermit soll gezeigt werden, welche Pufferspeichergröße in Konzept 2 notwendig wäre, um dieselbe Effizienz wie in Konzept 1 aufzuweisen. Das Kriterium der Effizienz ist hierbei der Strombedarf der Wärmepumpe, welcher die Betriebskosten des Systems widerspiegelt.

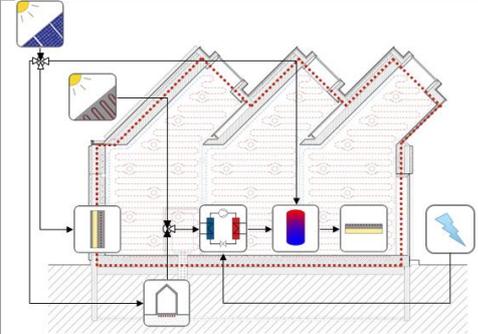
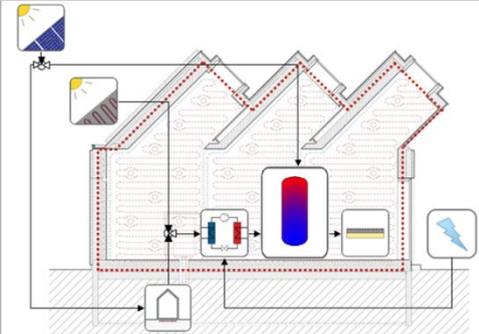
In Szenario 2 soll die Auswirkung eines großen Pufferspeichers auf das Gebäudeenergiekonzept des Smallhouse IV untersucht werden. Die tägliche Wärmespeicherung der Bauteilaktivierung wird hierbei um eine saisonale Wärmespeicherung mittels Pufferspeicher erweitert. Hierfür wird die Pufferspeichergröße von Konzept 1 von 100 l auf 2.000 l erhöht.

### 11.5.1. Szenario 1: Äquivalente Pufferspeichergröße

Tabelle 23 zeigt die Anlagentechnik von Konzept 1 und 2 im Szenario 1. Die Konzepte unterscheiden sich maßgebend durch die Art und Größe der Wärmespeicherung.

In Konzept 1 steht hierfür die Bauteilaktivierung der Außenwände sowie ein kleiner Pufferspeicher und in Konzept 2 lediglich ein großer Pufferspeicher zur Verfügung.

Tabelle 23: Beschreibung der beiden Gebäudeenergiesysteme von Szenario 1

Beschreibung der beiden Gebäudeenergiesysteme von Szenario 1		
Komponente	Konzept 1	Konzept 2
	Vakuurröhrenkollektor 15 m <sup>2</sup> (Brutto) Richtung Süden	
	Sole/Wasser-Wärmepumpe Wärmeleistung: 3 kW	
	Erdreichspeicher	
	Außenwände	
	<b>kerntempertiert</b> 80 m <sup>2</sup> (ges. Wandfläche) 21 cm aktiver Beton Tiefe der Rohre: 10 cm U = 0,201 W/m <sup>2</sup> *K	<b>ohne thermische Aktivierung</b> 80 m <sup>2</sup> (ges. Wandfläche) 21 cm Beton - U = 0,201 W/m <sup>2</sup> *K
	Bodenplatte	
	Oberflächennah aktiviert 36 m <sup>2</sup> (ges. Bodenfläche) 20 cm aktiver Beton Tiefe der Rohre: 4 cm U = 0,147 W/m <sup>2</sup> *K	Fußbodenheizung 36 m <sup>2</sup> (ges. Bodenfläche) 9 cm aktiver Beton Tiefe der Rohre: 4 cm U = 0,147 W/m <sup>2</sup> *K
	Pufferspeicher	
	100 l	2.000 l
		

Die Ergebnisse in Abbildung 53 zeigen, dass das Konzept 2 ein Pufferspeichervolumen von 2.000 l benötigt, um den gleichen Strombedarf wie Konzept 1 zu erzielen.

Abbildung 53 zeigt die bilanzierten Energiemengen der beiden Konzepte.

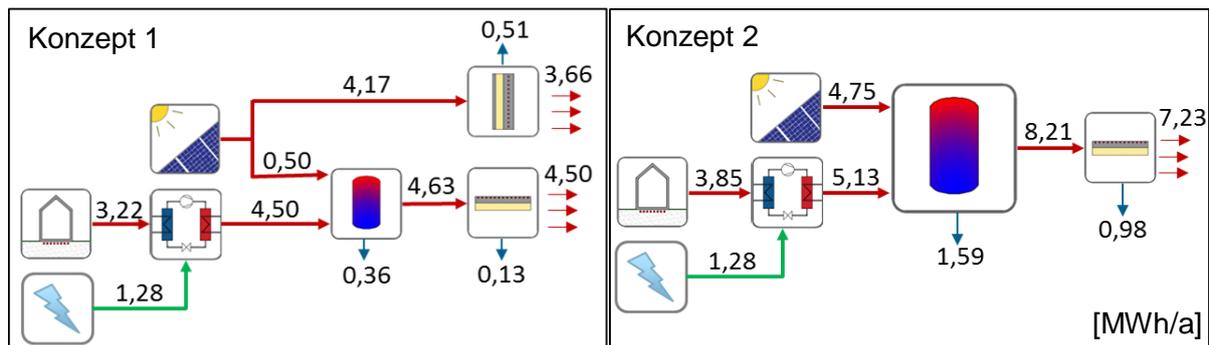


Abbildung 53: Bilanzierte Energiemengen von Konzept 1 (Kollektor: 15 m<sup>2</sup>, Pufferspeicher: 100 l) und Konzept 2 (Kollektor: 15 m<sup>2</sup>, Pufferspeicher: 2.000 l)

Beide Konzepte weisen in diesem Szenario einen jährlichen Stromverbrauch von 1,28 MWh/a auf. Die Wärmebereitstellung durch die Solarthermie ist in beiden Konzepten in etwa gleich. Im Gegensatz zu einem Pufferspeicher werden die aktiven Außenwände nur in der Heizperiode zur Speicherung herangezogen, da diese nur zur täglichen Wärmespeicherung geeignet sind. Der minimale Pufferspeicher von 100 l übernimmt hierbei keine Speicherfunktion und dient lediglich als hydraulische Weiche. Konzept 1 hat somit kein Speicherpotential für die sommerliche Wärme. Der 2.000 l Pufferspeicher in Konzept 2 wird ganzjährig zur Wärmespeicherung herangezogen. Hieraus resultieren allerdings viermal so hohe Pufferspeicherverluste im Vergleich zu Konzept 1, die für das simulierte System nicht nutzbar sind. Tabelle 24 zeigt die Wärmemenge beider Konzepte aufgeteilt in Heiz- und Kühlperiode. Hieraus wird ersichtlich, dass Konzept 1 durch die aktiven Bauteile mehr solare Wärme in der Heizperiode umsetzen kann als Konzept 2. Dieses Defizit muss von der Wärmepumpe in Konzept 2 ausgeglichen werden, was zu einer erhöhten Wärmebereitstellung der Wärmepumpe führt. Eine zeitlich aufgelöste Analyse der Speichervorgänge findet in Abschnitt 11.6 statt. Die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe in beiden Systemen gleich. Hieraus folgt, dass die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe in Konzept 2 höher ist als in Konzept 1 (JAZ Konzept 1: 3,5, JAZ Konzept 2: 4,0). Diese ist dem kleinen Pufferspeicher geschuldet, da hier die Wärmepumpe Wärme bedarfsgerecht zur Verfügung stellen muss. Bei einer genauen Analyse der Betriebszeiten und der Taktraten der Wärmepumpen zeigt sich, dass zwar die Laufzeiten der Wärmepumpe in beiden Konzepten annähernd gleich sind, aber die Wärmepumpe aus Konzept 1 eine fast dreimal höhere Taktrate aufweist. Da beim Einschalten der Wärmepumpe zuerst das Wärmepumpenaggregat aufgeheizt sowie die Druckdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator aufgebaut werden muss, führt dies beim Einschalten der Wärmepumpe zu einer anfänglichen Leistungsminderung. Diese Anlaufeffekte werden durch den verwendeten Wärmepumpen-Type 401 mitberücksichtigt [31].

Tabelle 24: Wärmefluss von der Solarthermieanlage in die Wärmespeicher von Konzept 1 und 2 aufgeteilt nach Heiz- und Kühlperiode

Wärmefluss	Konzept	Zeitraum	Energiemenge
Solarthermieanlage in Bauteile	1	Heizperiode	4,17 MWh/a
		Kühlperiode	0,00 MWh/a
Solarthermieanlage in Pufferspeicher	1	Heizperiode	0,26 MWh/a
		Kühlperiode	0,24 MWh/a
Solarthermieanlage in Pufferspeicher	2	Heizperiode	3,62 MWh/a
		Kühlperiode	1,13 MWh/a

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die kerntemperierten Außenwände des Großdemonstrators, in Bezug auf die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe, in etwa einem Pufferspeicher von 2.000 l entsprechen. Das Wärmespeicherpotential von Konzept 1 beschränkt sich hierbei nur auf die Heizperiode durch den täglichen Ausgleich. Daher ist es als sinnvoll zu erachten dieses Konzept um einen saisonalen Speicher zu erweitern um das ganzjährige Speicherpotential zu steigern.

#### 11.5.2. Szenario 2: Einfluss der saisonalen Speicherung

Tabelle 25 zeigt die Anlagentechnik von Konzept 1 und 2 im Szenario 2. Konzept 2 ist hierbei dasselbe wie im Szenario 1. Die Konzepte unterscheiden sich nur durch die zusätzliche Bauteilaktivierung in Konzept 1.

Tabelle 25: Beschreibung der beiden Gebäudeenergiesysteme von Szenario 2

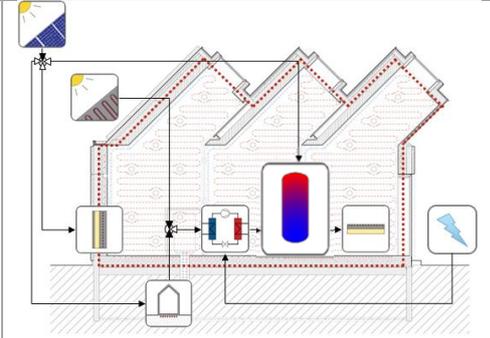
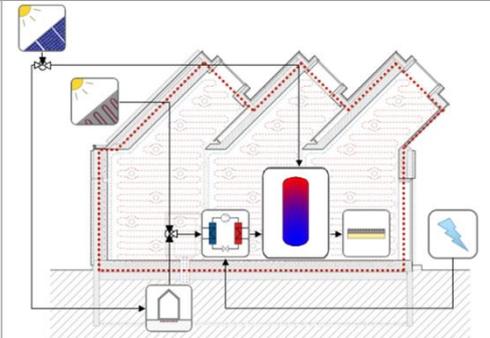
Beschreibung der beiden Gebäudeenergiesysteme von Szenario 2		
Komponente	Konzept 1	Konzept 2
	Vakuurröhrenkollektor 15 m <sup>2</sup> (Brutto), Richtung Süden	
	Sole/Wasser-Wärmepumpe Wärmeleistung: 3 kW	
	Erdreichspeicher	
	Außenwände	
	kerntemperiert 80 m <sup>2</sup> (ges. Wandfläche) 21 cm aktiver Beton Tiefe der Rohre: 10 cm U = 0,201 W/m <sup>2</sup> *K	ohne thermische Aktivierung 80 m <sup>2</sup> (ges. Wandfläche) 21 cm Beton - U = 0,201 W/m <sup>2</sup> *K
	Bodenplatte	
	Oberflächennah aktiviert 36 m <sup>2</sup> (ges. Bodenfläche) 20 cm aktiver Beton Tiefe der Rohre: 4 cm U = 0,147 W/m <sup>2</sup> *K	Fußbodenheizung 36 m <sup>2</sup> (ges. Bodenfläche) 9 cm aktiver Beton Tiefe der Rohre: 4 cm U = 0,147 W/m <sup>2</sup> *K
	Pufferspeicher <b>2.000 l</b>	
		

Abbildung 54 zeigt die Bilanzierung der Energiemengen von Konzept 1 mit einem 2.000 l Pufferspeicher.

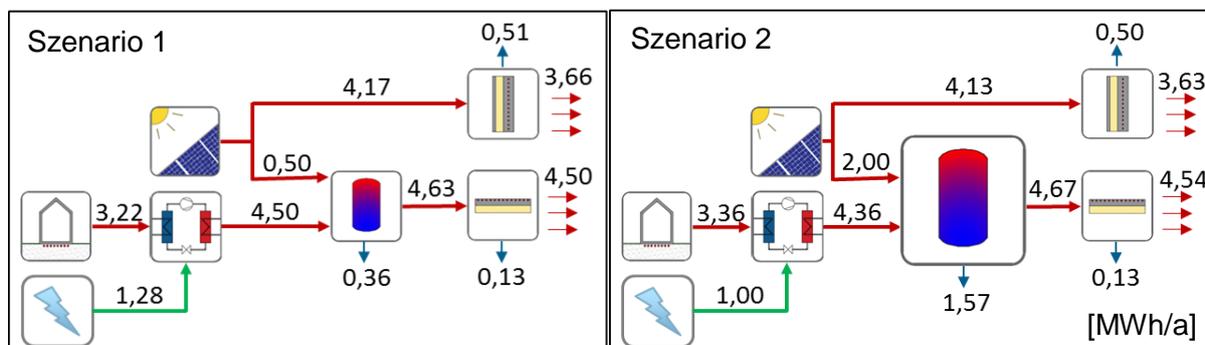


Abbildung 54: Bilanzierte Energiemengen von Konzept 1 aus Szenario 1 (Kollektor: 15 m<sup>2</sup>, Pufferspeicher: 100 l) und Konzept 1 aus Szenario 2 (Kollektor: 15 m<sup>2</sup>, Pufferspeicher: 2.000 l)

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz eines großen Pufferspeichers zur saisonalen Wärmespeicherung der elektrische Bezug der Wärmepumpe um rund 20% reduziert wird, vgl. Abbildung 54. Die thermische Bereitstellung der Wärmepumpe verändert sich hingegen kaum. Die Solarthermie bringt in den 2.000 l Pufferspeicher viermal so viel Wärme ein wie in den 100 l Pufferspeicher. Gleichzeitig steigen aber auch die thermischen Verluste auf ca. das Vierfache an. Tabelle 26 zeigt die bilanzierten Wärmemengen in Szenario 2 von der Solarthermie in den Pufferspeicher, aufgeteilt in Heiz- und Kühlperiode.

Tabelle 26: Wärmefluss von der Solarthermie in die Wärmespeicher von Konzept 1 und 2 aufgeteilt nach Heiz- und Kühlperiode

Wärmefluss	Zeitraum	Energiemenge	Verluste
Solarthermie in Pufferspeicher	Heizperiode	0,93 MWh/a	75%
	Kühlperiode	1,07 MWh/a	81%

Hieraus wird deutlich, dass der 2.000 l Pufferspeicher keinen Beitrag zu einer saisonalen Wärmespeicherung leistet. Die Wärme aus der Solarthermie in den Pufferspeicher kann kaum genutzt werden und führt daher lediglich zu erhöhten Wärmeverlusten des Pufferspeichers. Die Reduzierung der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe ist somit lediglich auf die Reduzierung des Taktbetriebs der Wärmepumpe und nicht auf ein erhöhtes Speicherpotential zurückzuführen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Bauteilaktivierung der Außenwände des Smallhouse IV in Verbindung mit einem kleinen Pufferspeicher zum gleichen Strombedarf führt wie ein Pufferspeicher mit 2.000 l. Die Bauteilaktivierung führen bei gleicher Pufferspeichergöße zu einer Reduzierung des Strombedarfs um 20%. Diese Reduzierung ist auf einen reduzierten Taktbetrieb der Wärmepumpe zurückzuführen. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist es sinnvoller, die Taktrate durch eine geeignete Steuerungsstrategie zu reduzieren, anstatt die Pufferspeichergöße zu erhöhen.

### 11.6. Zeitliche Auflösung der Speicherverhalten

Die in den obigen Abschnitten dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf ein gesamtes Jahr. An Hand dieser Betrachtung lassen sich zum einen Tendenzen ablesen und zum anderen Empfehlungen für Dimensionierungen ableiten. Im Folgenden werden die Kennwerte aus Konzept 1 und 2 aus Szenario 1 (vgl. Abbildung 53) zeitlich aufgelöst, sodass Tagesganglinien entstehen. Um aus diesen Verläufen verallgemeinerbare Aussagen treffen und Mechanismen beschreiben zu können, werden diese gemittelt. Hierzu wird der mittlere Kennwert für jede Stunde des Tages eines Monats ermittelt.

In Abbildung 55 ist der über den März gemittelte Tagesgang von Wärmeerzeugung und -abgabe der beiden Konzepte dargestellt. Die Flächen gelb und grau stellen den Wärmeeintrag aus den aktivierten Wandbauteilen und der Bodenplatte dar, was auf Grund der Regelung in Summe der Heizlast entspricht. Die in orange bzw. blau dargestellten Linien zeigen die Wärmeerzeugungen von Solarthermie und Wärmepumpe. Hieraus lassen sich mehrere Aussagen ableiten.

- In Variante 1 kann mehr Wärme aus Solarthermie gewonnen werden, was bei gleichem Wärmebedarf, zu einer entsprechenden Reduzierung der Wärmebereitstellung aus der Wärmepumpe führt.
- Analog zur Reduktion der solarthermischen Erzeugung wird ebenfalls der Anteil des Wärmebedarfs, welcher mittels der Bodenplatte gedeckt wird, deutlich reduziert.
- Die Deckung des Heizwärmebedarfs im März durch die aktivierten Bauteile erfolgt, über den ganzen Tag, obwohl diese nur durch die Solarthermie, also zwischen 8 und 18 Uhr Wärme bereitstellen kann. Dies stellt somit einer Wärmespeicherung von über 24h dar.
- Die in den aktivierten Bauteilen eingespeicherte Wärme entspricht der nicht-schraffierten Fläche unter der Solarthermie (orange). Die horizontal schraffierte Fläche entspricht der Wärme welche direkt genutzt wird. Die Ausspeicherung der solaren Wärme ist vertikal schraffiert. Die Flächen für Ein- und Ausspeicherung sind gleich groß, was bedeutet das die Wärme die aufgenommen wird binnen 24h wieder abgegeben wird; somit eine Tag-Nacht-Speicherung.

Somit zeigt sich, dass im hier betrachteten Fall mehr Wärme aus Solarthermie verfügbar ist, als in Konzept 2 genutzt werden kann. Die vermehrte Aufnahmebereitschaft von solarer Wärme in Konzept 1 ist dem niederexergetischem Speicherverhalten geschuldet. Durch das geringere Temperaturniveau in den thermisch aktiven Wandbauteilen können hier schon niedrige Temperaturen aus der Solarthermieanlage eingebracht werden. Dies zeigt auch die solare Beladezeit der beiden Konzepte. Konzept 1 nimmt im März solare Wärme von ca. 8 bis 18 Uhr auf und Konzept 2 von ca. 9 bis 17 Uhr. Hieraus ergibt sich durch die Wärmespeicherung in den Wandbauteilen ein höherer solarer Deckungsgrad als die Wärmespeicherung im Pufferspeicher (Konzept 1: 53% und Konzept 2: 44%).

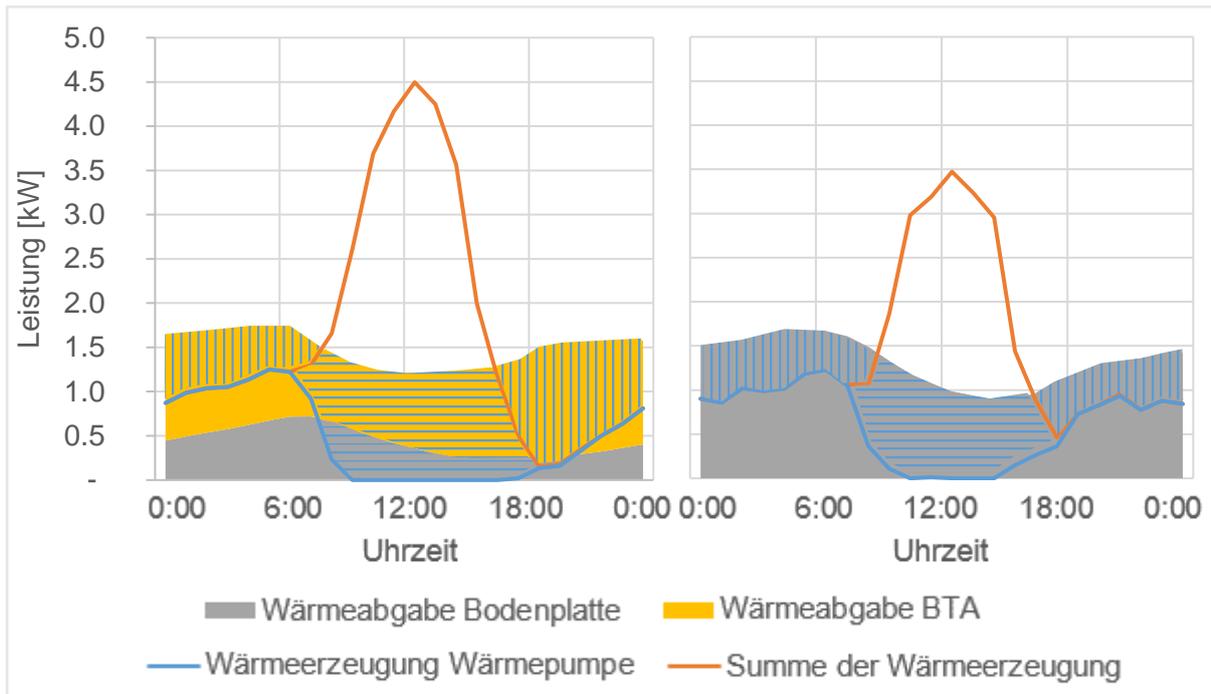


Abbildung 55: Gemittelter Tagesverlauf der Wärmeabgabe und -erzeugung im März. Links Konzept 1 & rechts Konzept 2.

Aus den Verläufen aus Abbildung 55 können die Be- und Entladekurven der Speicher (Pufferspeicher und aktivierte Bauteile) abgeleitet werden. In Abbildung 56 ist hierzu die netto Be- bzw. Entladung dargestellt, also die stundenweise Bilanz aus Be- und Entladen; daher stellt ein positiver Wert in Summe eine Beladung und ein negativer Wert eine Entladung dar. Zur Darstellung des thermischen Verhaltens der Speicher am Anfang, in der Mitte und am Ende der Heizperiode zu bewerten, werden repräsentativ die Monate November, Januar und März herangezogen. Bei der Gegenüberstellung dieser Profile für die Konzepte 1 und 2 kann das thermische Verhalten beschrieben werden:

- Der Pufferspeicher aus Konzept 2 kann Aufgrund des geringen Angebotes im November und Januar kaum solare Wärme speichern; er dient primär als hydraulische Weiche für die Wärmepumpe und wird kaum zur Wärmespeicherung herangezogen. Dieses Verhalten von Konzept 2, zeigt sich in Abbildung 56 (rechts), durch den geringen Wärmumsatz des Pufferspeichers. Im Vergleich mit Konzept 1 wird deutlich, dass dies an geringeren Aufnahmebereitschaft von solarer Wärme liegt.
- Durch die hohe Aufnahmebereitschaft solarer Wärme in Konzept 1 kann mittels der Wärmespeicherung in den Wandbauteilen in allen 3 Monaten (November, Januar und März) ein Tag-Nacht-Ausgleich zwischen Wärmeerzeugung und -bedarf stattfinden. Die Wärmespeicherung in den aktivierten Bauteilen in Kombination mit Solarthermie zeigt somit ein günstigeres Speicherverhalten für den Ausgleich der Tag-Nacht-Diskrepanz als die Wärmespeicherung im Pufferspeicher.

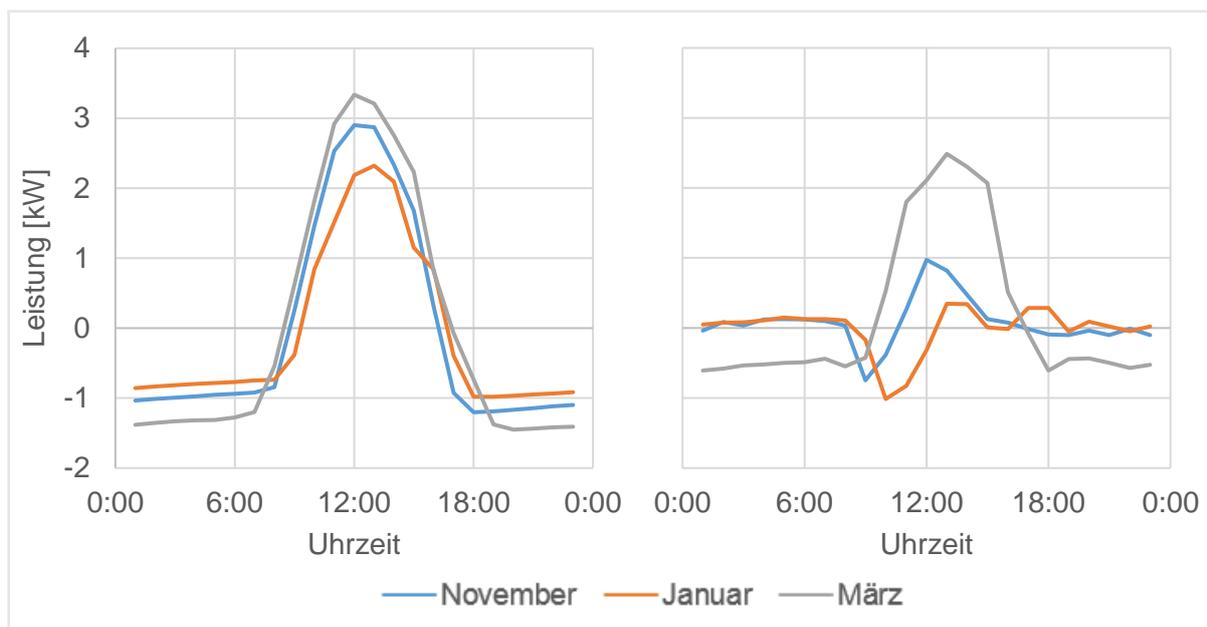


Abbildung 56: Gegenüberstellung des Be- und Entladeprofils des Wärmespeichers eines. Links Konzept 1 und rechts Konzept 2.

## 12. Realisierung

Die Realisierung des Großdemonstrators erfolgt in drei Schritten. Der erste Schritt sieht die Herstellung des Erdspeichers und der Bodenplatte auf dem Campus der TU Kaiserslautern vor. Die Bodenplatte wird hierbei in Ortbeton hergestellt. Im zweiten Schritt wird die gesamte Gebäudestruktur als Betonfertigteile hergestellt. Hierzu zählen die Außenwände und die Dachelemente. Im letzten Schritt werden die Betonfertigteile auf der Bodenplatte montiert.

### 12.1. Standortbewertung

Die Realisierung des Großdemonstrators Smallhouse IV findet auf dem Campus der Technischen Universität Kaiserslautern statt. Dieses Gelände wird als Smallhouse Village bezeichnet und bildet den nördlichen Abschluss des Campusgeländes. Dieser Bereich ist durch die Vegetation seitlich stark bewachsen, was zu einer Verschattung der Baufläche führt. Da das Konzept des Großdemonstrators Smallhouse IV auf einer effektiven Nutzung der solaren Strahlung basiert wurde vor Baubeginn eine solare Ertragsprognose für das Smallhouse Village erstellt. Grundlage der Prognose bilden LiDAR-Befliegungsdaten des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation [32]. Bei einem Flug aufgenommene Scanning werden pro Quadratmeter mindestens 4 Punkte ermittelt, was eine Lagegenauigkeit von ca. 30 cm aufweist. Aus diesen Daten werden Bodenpunkte und Objektpunkte (Gebäude, Vegetation u.a.) gemeinsam zu digitalen Oberflächenmodellen interpoliert.

Durch das Verwenden der Bodendaten ergibt sich ein digitales Geländemodell (DGM). Die verwendeten Daten basieren auf dem Laserscanning des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformationen. Die Einstrahlung wird in einem Geoinformationssystem (ArcGIS) als Summe der Globalstrahlung in kWh/m<sup>2</sup> für beliebige Zeitintervalle (pro Jahr/Monat/Tag) auf ein digitales Oberflächenmodell (siehe Abbildung 57) und ein digitales Geländemodell (siehe Abbildung 58) simuliert. Die Differenz aus dem Einstrahlungspotential (DGM ohne Objektdaten) und der tatsächlichen Einstrahlung (DOM mit einberechneten Objektdaten) bildet die Verschattung ab (siehe Abbildung 59).

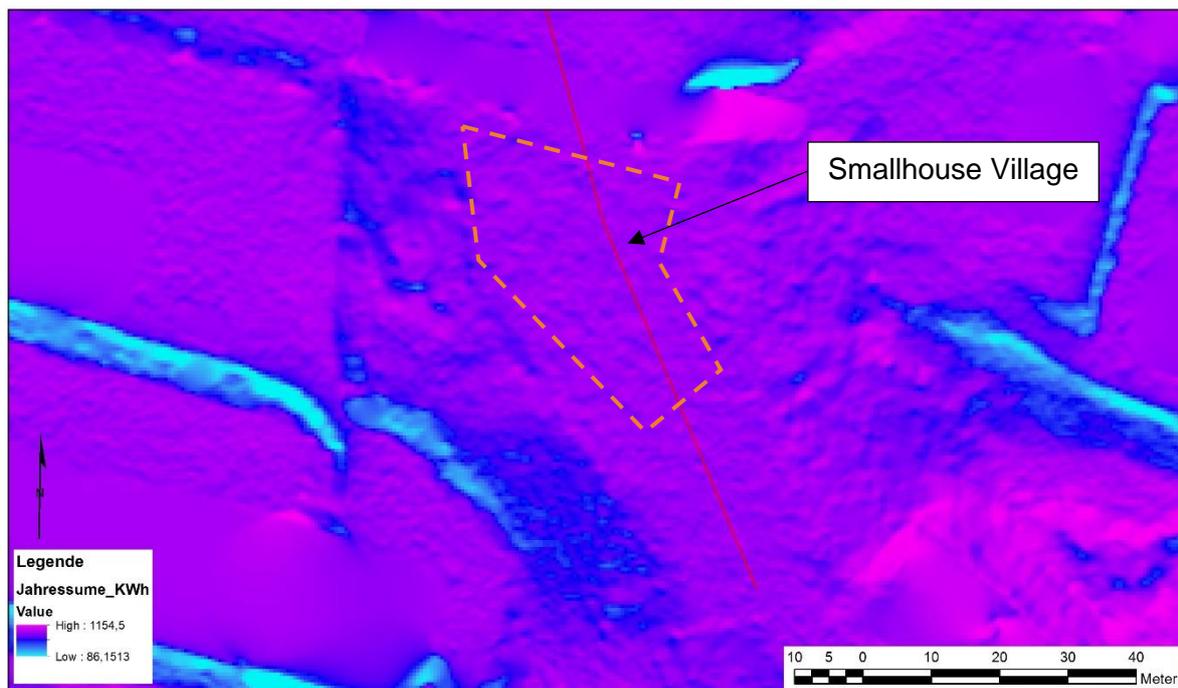


Abbildung 57: Einfluss der Geländegeometrie auf den solaren Ertrag

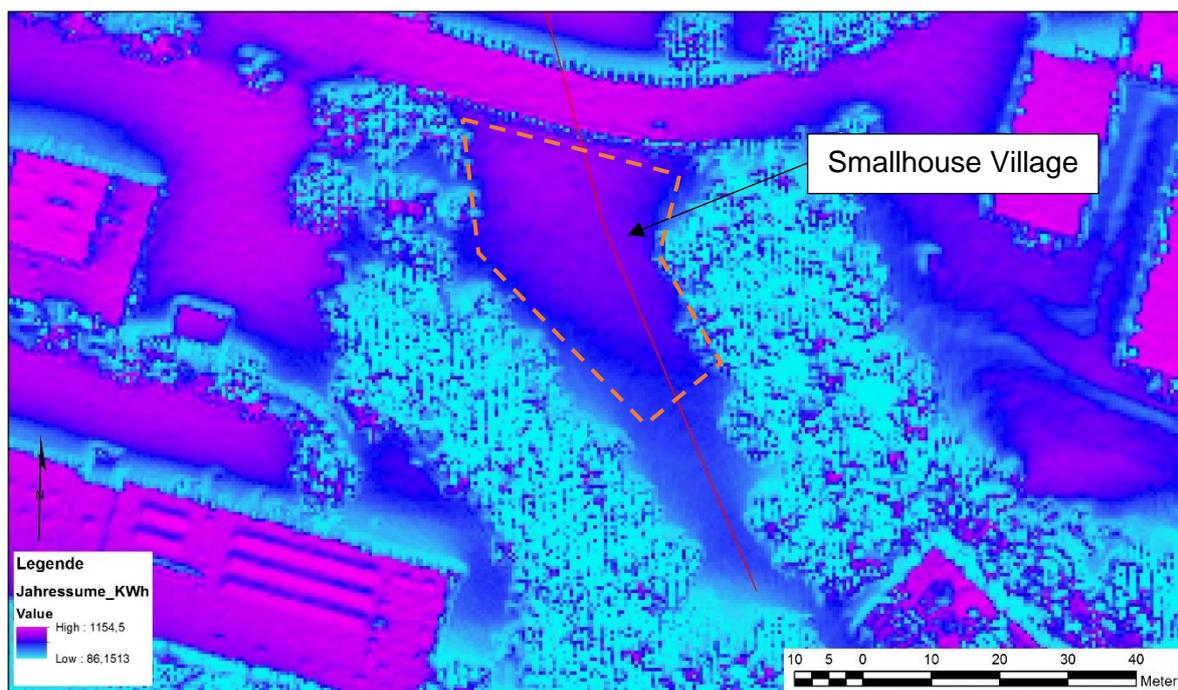


Abbildung 58: Einfluss der Vegetation auf den solaren Ertrag

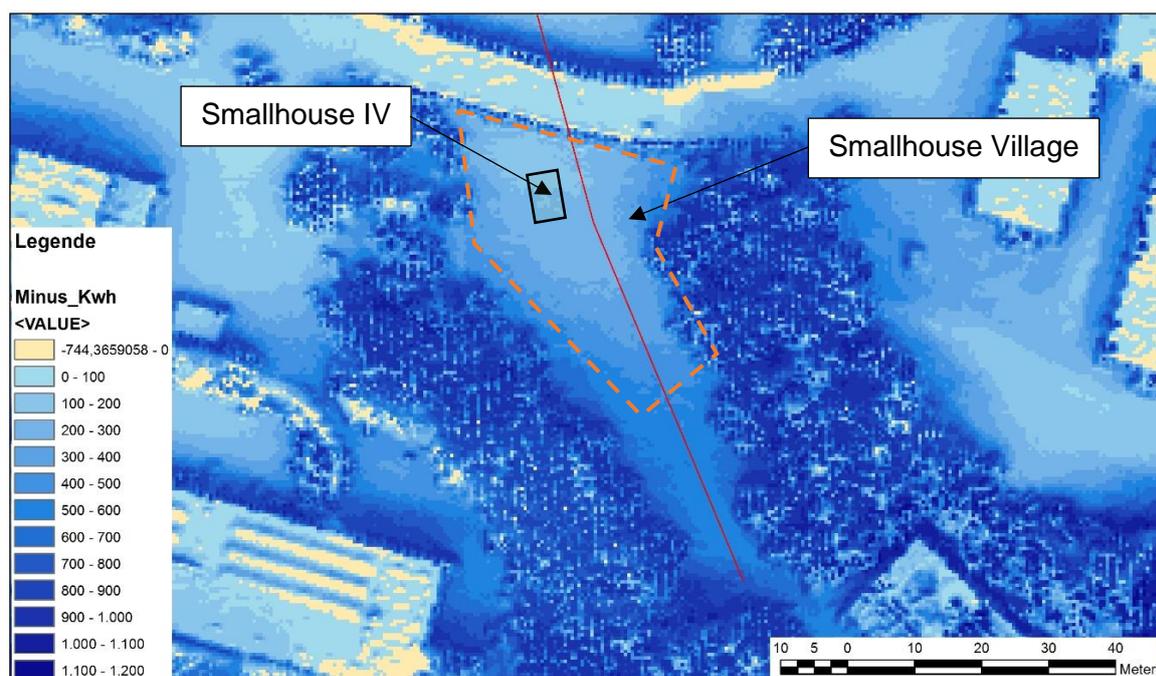


Abbildung 59: Einstrahlungsdifferenz aus Geländegeometrie und Vegetation

Es zeigt sich, dass das Gelände den solaren Ertrag kaum beeinflusst. Im Gegensatz hierzu reduziert die Vegetation den solaren Ertrag um 100 bis 200 kWh/a, also um ca. 10%. Nach der Ertragsprognose wurde für das Smallhouse IV der Bauplatz mit dem höchsten solaren Ertrag im Smallhouse Village festgelegt (siehe Abbildung 59).

## 12.2. Herstellung des Erdreichspeichers

Die Bauarbeiten am Großdemonstrator begannen im November 2016 ①. Der erste Arbeitsschritt bestand in der Herstellung des Erdreichspeichers. Hierfür wird eine Baugrube mit der Grundfläche des Großdemonstrators und einer Tiefe von 1,4 m unter Oberkante Fußboden ausgehoben. Am Grund der Baugrube wird ein Planum hergestellt. Hierauf werden vier Kreisläufe aus 20 mm PE-Xa-Rohre eingebracht ②. Der Rohrabstand untereinander beträgt 15 cm. Jeweils zwei Kreisläufe dienen zur thermischen Beladung durch den Kollektor und zum Entladen durch die Wärmepumpe. Hierdurch kann der Erdreichspeicher parallel be- und entladen werden. Die Vor- und Rücklaufrohre werden durch ein KG-Rohr ins Gebäude geführt. Nach Fertigstellung der Rohrregister werden die Kreisläufe flächig mit 10 cm Beton verfüllt ③. Durch diese Wärmetauscherplatte soll ein hoher Wärmeübertrag zwischen den Rohren und dem Erdreich sichergestellt werden. Um die seitlichen Wärmeverluste ans umliegende Erdreich zu minimieren, wird der Erdreichspeicher vertikal mit 14 cm XPS gedämmt ④. Anschließend wird die Baugrube wieder mit dem Aushub verfüllt. Dieses Material dient dem Erdreichspeicher später als Speichermedium ⑤. Den Abschluss der Arbeiten am Erdreichspeicher bildet das Aufbringen der horizontalen Wärmedämmung zwischen Erdreichspeicher und Bodenplatte. Um eine Überhitzung des Innenraums durch den Erdreichspeicher in der Kühlperiode zu verhindern, werden 20 cm XPS aufgebracht ⑥.



Abbildung 60: ① Spatenstich Smallhouse IV, ② Thermische Aktivierung des Erdreichspeichers, ③ Betonage der Wärmetauscherplatte des Erdreichspeichers, ④ Vertikale Dämmung des Erdreichspeichers, ⑤ Verfüllen des Erdreichspeichers, ⑥ Horizontale Dämmung

### 12.3. Herstellung der Bodenplatte

Auf die Oberfläche des Erdreichspeichers wird im ersten Schritt eine Schicht aus Filtermaterial und anschließend eine 200 mm starke Dämmung aufgebracht. Die Dämmung führt zu einer thermischen Entkopplung zwischen Erdreichspeicher und Gebäude. Nach Abschluss der Dämmarbeiten wird eine Schalung erstellt, um die 300 mm starke Bodenplatte betonieren zu können ①. Die Steuerung und Regelung aller hydraulischen Kreisläufe findet später zentral im Smallhouse IV statt. Daher werden Verbindungsrohre von der Technikzentrale an die Außenkante der Bodenplatte geführt, um später die Multifunktionalen Bauteile mit der Technikzentrale zu verbinden. Zur thermischen Aktivierung der Bodenplatte, werden 20 mm PE-Xa-

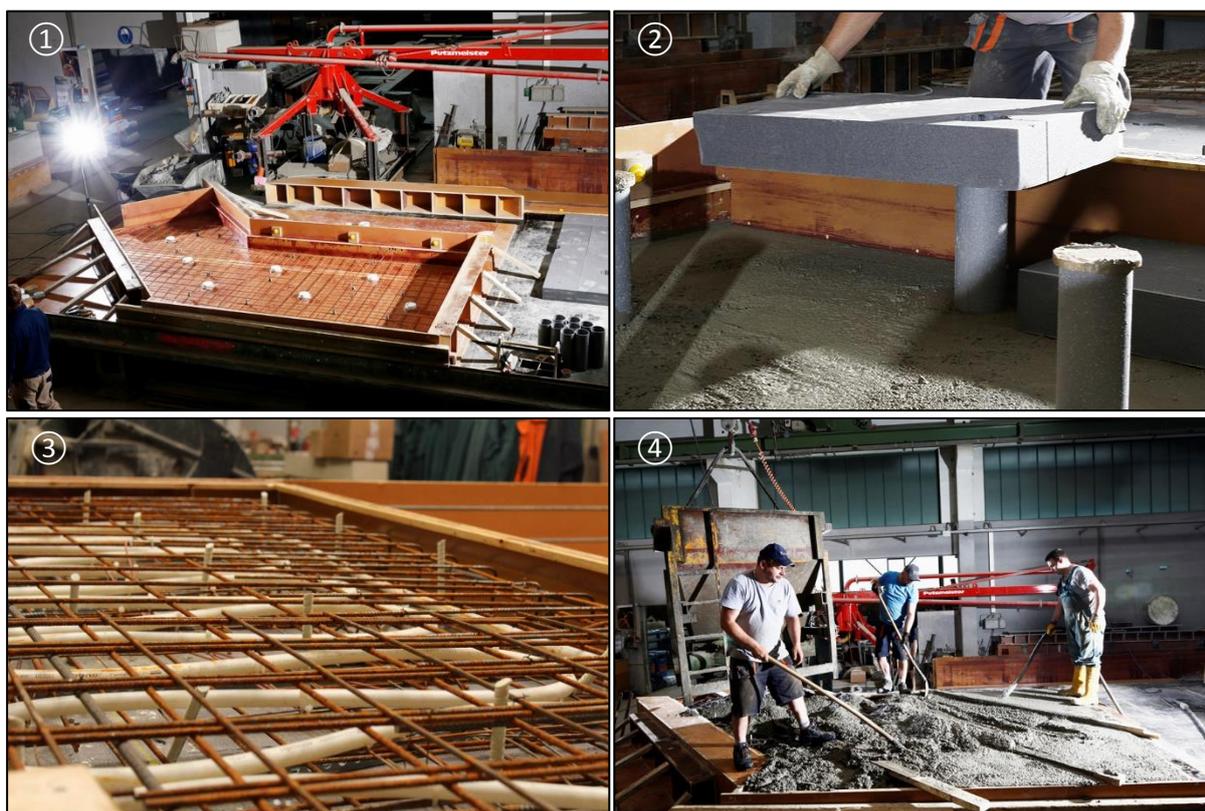
Rohre der Firma Uponor in einem Abstand von 15 cm auf der obersten Bewehrung der Bodenplatte verlegt ②. Als letzter Arbeitsschritt an der Bodenplatte wird die Schalung mit Beton verfüllt. Hierzu werden für die 30 cm starke Bodenplatte etwa 13 m<sup>3</sup> Beton verwendet ③/④. Nach dem Glätten der Bodenplatte ⑤ wird diese mit Ankerhülsen versehen, um später die Bauteile an der Bodenplatte befestigen und abstützen zu können.



Abbildung 61: ① Schalung und Bewehrung der Bodenplatten, ② Thermische Aktivierung der Bodenplatte, ③/④ Betonage der Bodenplatte, ⑤ Abziehen der Bodenplatte

## 12.4. Herstellung der multifunktionalen Betonfertigteile

Parallel zu den Arbeiten im Smallhouse Village werden die multifunktionalen Bauteile (Wände und Deckenelemente) im Fertigteilwerk hergestellt. Die Betonfertigteile werden in Sandwichbauweise gefertigt. Die Wände sowie die Decken bestehen aus einem dreischichtigen Querschnitt und verfügen über integrierte Rohrregister. Durch die Herstellung der multifunktionalen Bauteile in Sandwichbauweise ist ein hohes Maß an Genauigkeit möglich, was vor allem für Anschlusspunkte wie Verbindungsmittel ⑧ und Rohranschlüsse von besonderer Bedeutung ist. Die Herstellung der Bauteile für den Großdemonstrator erfolgte mittels einer Negativfertigung. Hierzu wird zuerst die Vorsatzschale betoniert ①. Anschließend wird die Dämmung ② und die Verbindungsmittel durch die Dämmung in die Vorsatzschale eingebracht ③. Schließlich wird die Tragschale betoniert ④. Die Rohrregister bestehen aus 20 x 2,0 mm PE-Xa-Rohre und weisen einen Verlegeabstand von 15 cm auf ③. Die Rohrregister werden auf Stahlmatten geknüpft. Nach dem glätten der Oberfläche ⑤ können die Bauteile nach der Aushärtung eingelagert werden ⑥/⑦.



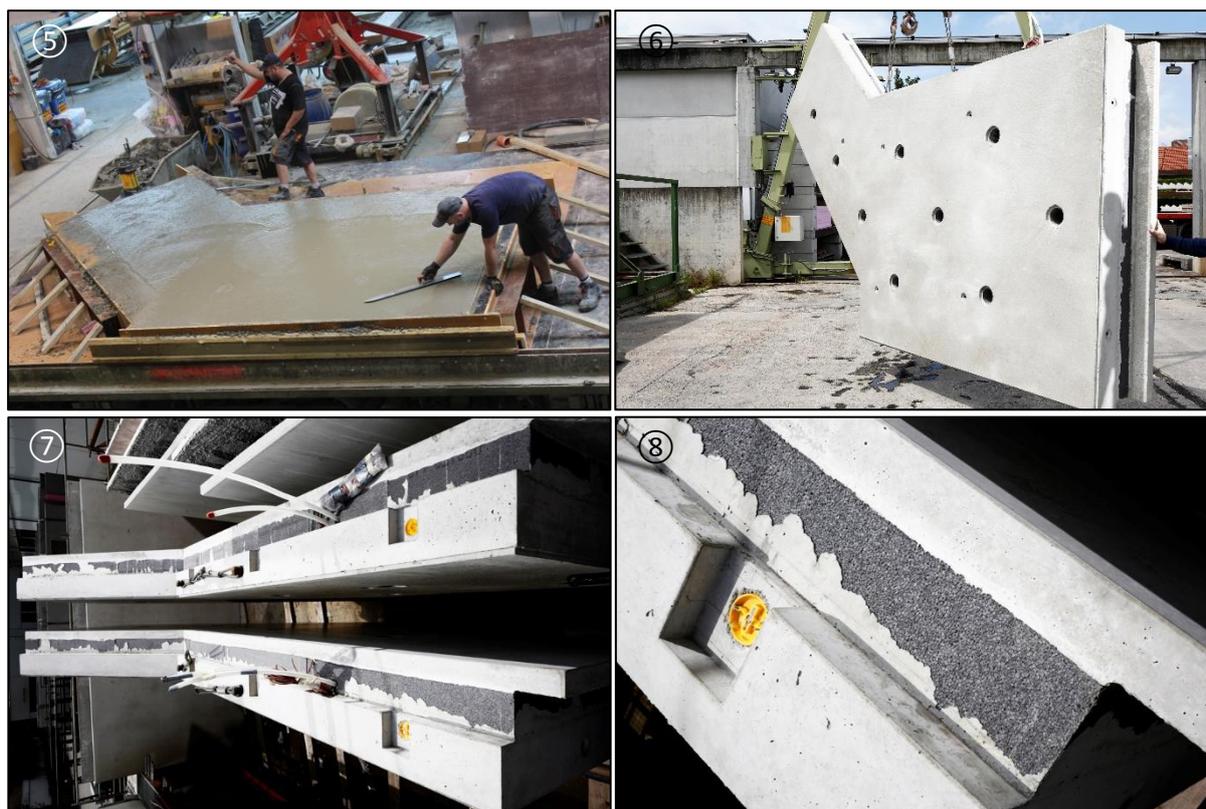


Abbildung 62: ① Schalungsaufbau, ② Einbringen der Wärmedämmung, ③ Bewehrungskorb mit integriertem Rohregister und Verbindungsmitteln, ④ Betonieren der Tragschale, ⑤ Glätten der Oberfläche, ⑥ Fertiges Multifunktionales Bauteil, ⑦ Lagerung der Bauteile, ⑧ Bauteilquerschnitt mit Aussparung für die Verbindungsmittel

## 12.5. Montage

Die Montage des Großdemonstrators bildet die Zusammenführung von Betonfertigteilen und Bodenplatte. Hierfür werden die im Fertigteilwerk hergestellten Sandwichelemente per Innenlader an die Baustelle angeliefert. Die Abmessungen der Bauteile sind dabei so gewählt, dass kein Schwertransport notwendig ist. Zur Auflagerung der Außenwände wird mittels Zementmörtel eine Mörtelfuge zwischen Bodenplatte und Außenwände hergestellt. Die beiden Stirnwände werden mittels Spannschlössern der Firma B.T. innovation mit der Bodenplatte verbunden ①. Die sechs Seitenwände werden hingegen mit Schubdollen verankert. Die Verbindung der Außenwände und der Deckenelemente untereinander findet ausschließlich mit Spannschlössern statt ②-⑦. Zur Abdichtung der entstehenden Bauteilfugen wird das Abdichtungsband RubberElast® der Firma B.T. innovation verwendet.





Abbildung 63: ① Stellen der ersten Außenwand, ② Heben der zweiten Außenwand, ③ Verbindung zwischen erster und zweiter Außenwand, ④ Aufbringen des Dachelements, ⑤ Verbinden den der Dachelemente mit den Außenwänden, ⑥ Stellen und Verbinden von Außenwänden, ⑦ Blick vom Innenraum durch die Fensteröffnungen, ⑧/⑨/⑩ Innenansicht, ⑪ Endzustand der Montagearbeiten

## 12.6. Einbau der austauschbaren Wände

Zur Untersuchung weiterer Wandelemente im bestehenden Gebäudeenergiekonzept wird die südliche Außenwand so konstruiert, dass Wandbauteile nachträglich ausgetauscht werden können. Wie die restlichen Wände werden auch diese mittels Spannschlösser mit dem Gebäude verbunden. Im Gegensatz zu den anderen Spannschlössern bestehen diese aus Edelstahl, um hier auf die Ausmörtelung verzichten zu können. Hiermit kann ein schneller und reibungsloser Austausch gewährleistet werden. Abbildung 64 zeigt das Einsetzen der ersten beiden austauschbaren Wandelemente in den Großdemonstrator.



Abbildung 64: ① Einsetzen austauschbare Wand links, ② Einsetzen austauschbare Wand rechts, ③ Außenansicht Großdemonstrator mit Blick auf austauschbare Wandelemente

### 13. Fazit

Der Kern des Forschungsprojektes ist die Untersuchung von multifunktionalen Betonfertigteilen. Durch diese thermisch aktiven, vorgefertigten Sandwichelemente entsteht eine nachhaltige Gebäudestruktur, die neben ihren statischen Aufgaben auch über die thermischen Funktionen Wärmedämmung, Wärmespeicherung und Temperierung verfügt. Zur Untersuchung der Wirksamkeit dieser Bauteile entstand im Rahmen dieses Forschungsprojektes der Großdemonstrator „Smallhouse IV“ auf dem Campus der TU Kaiserslautern. Alle Bauteile dieses Großdemonstrators sind thermisch aktiv. Dies ermöglicht, auch über dieses Forschungsprojekt hinaus, die Wechselwirkungen zwischen Anlagentechnik und Bauteilen unter realen Bedingungen untersucht werden.

Die Voruntersuchen und Simulationen zeigen, dass der grundlegende Gedanke des Konzepts, Wärme v.a. aus Erneuerbaren Energien in Bauteilen nutzbar zu speichern, möglich ist. Somit kann entweder der Pufferspeicher minimiert oder, bei gleicher Pufferspeichergröße, der solare Deckungsgrad erhöht werden.

So konnte in den Simulationen gezeigt werden, dass durch die Nutzung der Bauteile als Wärmespeicher selbst mit minimalen Pufferspeichergrößen, welche lediglich zum hydraulischen Ausgleichen dienen, ein solarer Deckungsgrad von ca. 50% erreicht wird. Hierbei ist neben der Art und Beschaffenheit der multifunktionalen Bauteile das Regelungs- und Steuerungskonzept entscheidend. Durch den Einsatz einer ungeeigneten Steuerung kann die Gebäudemasse nicht vollständig genutzt werden oder zu Unbehaglichkeiten im Innenraum führen.

Durch die Vorfertigung der Rohrregister konnten die entwickelten Betonsandwichelemente im Fertigteilwerk reibungslos in den Taktbetrieb mit aufgenommen werden. Während der Montage erfolgten parallel die Verbindung der Bauteile und der Zusammenführung der Rohrregister mit der Technikzentrale. Der so entstandene Großdemonstrator Smallhouse IV dient als Anschauungsobjekt und soll in Zukunft zeigen, wie die Gebäudemasse zur effektiven Nutzung von solarer Wärme beitragen kann.

## 14. Ausblick

Während des Planungsprozesses wurde ein vollumfängliches Monitoring-Konzept ausgearbeitet, bei der Planung berücksichtigt und implementiert. So wurden während der Herstellung der Bauteile in diesen Sensoren integriert. Mittels der verwendeten Messtechnik, werden unter anderem Temperaturen, Volumenströme, Wärmeströme, Wetterdaten und thermischer Komfort gemessen. Hierdurch können unter realen Bedingungen die Wechselwirkungen zwischen Bauteil, TGA und Wetter auf die Behaglichkeit in einem Langzeit-Monitoring aufgenommen werden. Das Smallhouse IV ist dabei so konzipiert, dass einzelne Komponenten wie Bauteile und Anlagentechnik ausgetauscht und erweitert werden können. In weiteren Untersuchungen können unterschiedlichste Themenfelder wie

- Weiterentwicklung der multifunktionalen Bauteile
- Fertigungsverfahren der Bauteile
- Nutzung innovativer Materialien, wie z.B. schaltbare Wärmedämmungen oder Phasenwechselmaterialien
- Steigerung des solaren Deckungsgrades
- Netzdienlichkeit durch elektrischer Wärmepumpe

untersucht werden. Im Fokus steht hierbei immer die Umsetzbarkeit und Übertragbarkeit auf Neubau und auch den Gebäudebestand.

## 15. Vorgegangene Forschungsprojekte

Die folgenden Tabellen zeigen einen Überblick, über die vorgegangenen Forschungsprojekte mit konstruktivem (Tabelle 27) und thermischem Schwerpunkt (Tabelle 28).

Die konstruktiven Forschungsthemen konzentrieren sich im Kern auf die Erforschung und Entwicklung von Sandwichelementen und deren Verbindungsmittel. Der thermische Forschungsschwerpunkt befasst sich mit der Erforschung von aktiven Bauteilen. Neben der Wärmebereitstellung und -speicherung, werden zudem innovative Materialien und hierfür notwendige Gebäudeenergiekonzepten untersucht.

Tabelle 27: Vorrangegangene Forschungsprojekte mit konstruktivem Schwerpunkt

<b>Konstruktiver Forschungsschwerpunkt</b>	
<b>Förderkennzeichen</b>	<b>Projekttitle</b>
01DN15005	Ressourceneffiziente Sandwichelemente für den Wohnungsbau in Brasilien
SF - 10.08.18.7-11.9/ II 3-F20-10-1-077	Sandwichaußenwände mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff
ZIM-KF3080601HF2/ KF2600609HF2	Entwicklung einer filigranen, energetischen Sandwich-Fassadenplatte aus (U)HPC-Beton unter Berücksichtigung einer neuartigen Verankerungstechnik
ZIM KF2600621KI4	Entwicklung eines Wandsystems auf Basis der Elementbauweise mit besonders schlanker Konstruktion und wärmebrückenfreier Dämmung
KF2600621KI4	Entwicklung eines Wandsystems auf Basis der Elementbauweise mit besonders schlanker Konstruktion und wärmebrückenfreier Dämmung
KF2600608HF2	Entwicklung von Bemessungsgrundlagen für GFK-bewehrte Sandwichelemente

Tabelle 28: Vorrangegangene Forschungsprojekte mit thermischem Schwerpunkt

<b>Thermischer Forschungsschwerpunkt</b>	
<b>Förderkennzeichen</b>	<b>Projekttitle</b>
KF2600606	Multieffektive Gebäudehülle für nachhaltigen Passivbau+
SWD-10.08.18.7- 13.18/II3-F20-11-1-067	Thermisch aktivierte Sandwichschwimmkörper für das Bauen auf dem Wasser
153-3-4513	Untersuchung zur Effizienz kybernetischer Sanierungskonzepte für 1950er-Jahre Siedlungs-Wohnbauten
0325730A	EE-Integration durch stromgeführte Wärmepumpen, Nutzung der Bestandsgebäude als Energiespeicher, Einsatz zusätzlicher thermischer Speicher und Anwendung zeitvariabler Tarife
03ET1399E	Großflächige, multifunktionale Bauelemente mit thermisch aktiven Bewehrungsstrukturen - Entwicklung hocheffizienter, regelbarer Vakuumisolationen

## 16. Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), „Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland,“ 2014.
- [2] Sonnenhaus-Institut e.V., [Online]. Available: <http://www.sonnenhaus-institut.de/>.
- [3] B. Glück, „Forschungsbericht. Thermische Bauteilaktivierung,“ 1999.
- [4] Deutsches Institut für Normung, „DIN EN 1992-1/NA: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau,“ Beuth, 2011.
- [5] BT innovation, „<http://www.bt-innovation.de/bt-spansschloss/>,“ BT innovation. [Online]. [Zugriff am 2017].
- [6] B.T. innovation GmbH, „Zulassung Z-14.4-599: BT-Spansschloss M12/M16/M20,“ 2015.
- [7] P. D.-I. M. Pahn, Beitrag zur Ermittlung von Schnitt- und Verformungsgrößen bei mehrschichtigen Stahlbetontafeln mit Verbindungsmitteln aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Kaiserslautern, 2011.
- [8] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemein Bauaufsichtliche Zulassung Z-21.8-1894: Schöck Thermoanker, 2016.
- [9] Schöck Bauteile GmbH, „Zulassung Z-21.8-1894: Schöck Thermoanker,“ 2016.
- [10] T. Weiler, „Zum Tragverhalten von Stahlbetonsandwichelementen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln,“ 2018.
- [11] H. Richard und M. Haller, Task 32 - The Reference Heating System, the Template Solar System, 2007.
- [12] Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V., „FDB-Merkblatt Nr. 10 - zum nachhaltigen Bauen mit Betonfertigteilen,“ 2014.
- [13] H. Humpal, Thermische Bauteilaktivierung, 2010.
- [14] Pfafferott, Doreen und Königsdorf, Bauteilaktivierung, 2015.
- [15] K. Sedbauer, A. Holm, H. Künzel, P. Leistner und K. Breuer, Raumklima und Innovation - Eine Auflage der Bauphysik, 2006.
- [16] Deutsches Institut für Normung, „DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik,“ Beuth, 2012.
- [17] C. Caspari und M. Pahn, „CESBP/BAUSIM 2016: Fertigteile zur multifunktionalen thermischen Nutzung,“ 2016.
- [18] M. Koschenz und B. Lehmann, Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, Dübendorf, 2000.
- [19] W. Polifke und J. Kopitz, Wärmeübertragung - Grundlagen, analytisch und numerische Methoden, 2009.
- [20] Deutsches Institut für Normung, „DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Mindestanforderungen an den Wärmeschutz,“ Beuth, 2013.
- [21] Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO 6946-04: Bauteile, Beuth, 2007.
- [22] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 12831-08: Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Beuth, 2003.
- [23] Deutsches Institut für Normung, „DIN 4108-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs,“ Beuth, 2003.
- [24] BDH, „Informationsblatt Nr. 27-2: Solare Heizungsunterstützung - Praxistipps zu Planung und Installation,“ 2011.
- [25] R. Coradini, T. Leukefeld und H.-J. Wagner, Solarthermie - Technik, Potential, Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz für solarthermische Systeme in Einfamilienhäusern, 2014.

- [26] Deutsches Institut für Normung, „DIN EN 1264-2: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden,“ Beuth, 2013.
- [27] Deutsches Institut für Normung, „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,“ Beuth, 2005.
- [28] Deutsches Institut für Normung, „DIN 19226: Regelungstechnik und Steuerungstechnik; Begriffe und Benennungen,“ Beuth, 1968.
- [29] Berling, Heinrich, Thrun und Vogt, Kaspers/Küfner: Messen - Steuerun - Regeln, SpringerVieweg, 2009.
- [30] Thermal Energy System Specialists, LLC, „TRNSYS 17 Documentation,“ 2013.
- [31] ait-deutschland GmbH, „Technische Daten: Sole/Wasser Inverter SWCV 62H(K)3M,“ 2017.
- [32] „EnEV 2016: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden,“ 2016.
- [33] M. Wetter und T. Afjei, „TRNSYS TYPE 401 - Kompressionswärmepumpe inklusiv Frost- und Taktverluste,“ 1996.
- [34] Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen, „Airborne Laserscannings RLP,“ 2016.
- [35] Deutsches Institut Für Normung, „DIN EN 1991-1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten,“ Beuth, 2010.

: