

Solarwärmesystem für die Beheizung von Industriehallen mit Massivabsorber und Saisonwärmespeicher

Leitfaden für die Systemauslegung

TEILPROJEKT A: Messtechnische Analyse und Optimierung von Komponenten und System
durch Betriebsanalyse und Modellierung

FKZ: 03ET1158A

Hochschule München, Lothstr. 34, 80335 München

TEILPROJEKT B: Betriebsoptimierung und Bau einer Pilotanlage

FKZ: 03ET1158B

Laumer Bautechnik GmbH, Bahnhofstraße 8, 84323 Massing

AUTOREN: Dipl.-Ing. (FH) Benedikt Tanzer, M.Eng., Hochschule München

Prof. Dr. rer. nat. Christian Schweigler, Hochschule München

Dipl.-Ing. Heinz Eberherr, Laumer Bautechnik GmbH

Dipl.-Ing. Richard Laumer, Laumer Bautechnik GmbH

15.12.2017

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

I Abbildungsverzeichnis.....	3
II Tabellenverzeichnis	5
1 EINLEITUNG	6
2 SYSTEMKONZEPT UND KOMPONENTEN.....	8
2.1 Fassadenintegrierter Massivabsorber.....	8
2.1.1 Vorsatzschalen allgemein	10
2.1.2 Konstruktive Umsetzung	11
2.1.3 Ausführungszeichnungen / Produktion	14
2.1.4 Produktionstechnische Vorteile der ausgeführten Massivabsorbervariante:	16
2.1.5 Kostenentwicklung.....	16
2.1.6 Ausblick:	17
2.2 Langzeitwärmespeicher: Vergleich und Einordnung	18
2.2.1 Bauformen.....	18
2.2.2 Speichermaterial.....	19
2.2.3 Wahl des Speicherkonzepts	20
2.2.4 Ausführung des Langzeitwärmespeichers aus bautechnischer Sicht	20
2.2.4.1 Größe des Speichers:	20
2.2.4.2 Konstruktion des Speichers:	21
2.2.4.3 Statische Anforderungen:.....	21
2.2.4.4 Dämmung des Speichers:	21
2.2.4.5 Speichermaterial.....	22
2.2.4.6 Feuchtigkeit:	23
2.2.4.7 Wirtschaftlichkeit.....	23
2.2.4.8 Schichtenwasser.....	24
2.2.5 Hinweise für die Gebäudeplanung.....	26
3 FUNKTION UND AUSLEGUNG DES MASSIVABSORBER-HEIZSYSTEMS.....	28
3.1 Systembeschreibung	28
3.1.1 Gebäude.....	28
3.1.2 Massivabsorber	29
3.1.3 Wärmeerzeuger	30
3.1.4 Wärmeverteilung.....	31
3.1.5 Wärmespeicher	32
3.1.6 Betrieb der Massivabsorber-Fassaden	32
3.2 Hydraulisches System und Betriebskonzept.....	33
3.2.1 Systemverschaltung.....	33
3.2.2 Betriebsweise, Regelung	34
3.3 Anlagenfunktion und Energiebilanz	37
3.4 Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen	41
3.4.1 Grundlage des Verfahrens.....	41
3.4.2 Polynomfunktionen zur Ermittlung von Speichergröße, Energieeinsatz und Systemkosten.....	43
3.4.2.1 Polynomfunktion zur Ermittlung der Speichergröße	43
3.4.2.2 Polynomfunktion für Energieeinsatz und Kosten	44
3.4.2.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein anderes Kostenszenario	45

3.5 Systemoptimierung.....	46
3.6 Anwendung des Dimensionierungsverfahrens	48
3.7 Systemvergleich	56
4 ANHANG	63
A. Kostenanalyse nach Annuitätenmethode.....	63
B. Beispielgebäude: U-Werte.....	66
C. Basis zur Kostenkalkulation der Systemkomponenten.....	67
D. Polynomkoeffizienten zur Dimensionierung des Gesamtsystems	69

I Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prinzipdarstellung des Heizsystems mit Massivabsorber, Wärmespeicher, Wärmepumpe und Flächenheizung.....	8
Abb. 2: Einbausituation des fassadenintegrierten Massivabsorbers.....	9
Abb. 3: ComBar (Fotoquelle: Schöck Bauteile GmbH).....	11
Abb. 4: mit Epoxidharz getränktes Textilgewebe.....	11
Abb. 5: Musterwandplatte mit ComBar Bewehrungsstäben der Firma Schöck.....	12
Abb. 6: Nordansicht Pilotanlage / Ausführung mit dünner Vorsatztechnologie.....	12
Abb. 7: Vorsatzschale Massivabsorber.....	13
Abb. 8: Ausführungszeichnung Regelplatte Massivabsorber (Abmessungen).....	14
Abb. 9: Ausführungszeichnung Regelplatte Massivabsorber (thermische Aktivierung).....	15
Abb. 10: Herstellen des Absorberregisters (links), eingelegte Rohrregister vor der Betonage (rechts).	15
Abb. 11: Betonieren der Vorsatzschale (links), Messfühler im Absorber (rechts).....	16
Abb. 12: Schemagrundriss (oben), Schemaschnitt (unten) der ausgeführten Pilotanlage mit Langzeitwärmespeicher.	25
Abb. 13: Aufbau des Wärmespeichers: 20 cm starke umlaufende Perimeterdämmung, Verlegung von Temperatursensoren (a); Verfüllvorgang mit Elektroofenschlacke (Elominit) (b); Verbundrohre in doppelter Lage in einer Sandschicht (c); Wärmedämmung an der Speicheroberfläche, perforierte Kunststoffrohre zur nachträglichen Befeuchtung der Speicherfüllung (d).	26
Abb. 14: Beispielgebäude; dunkler Bereich symbolisiert die Fläche in der eine thermisch aktivierte Massivabsorberfassade vollständig oder teilweise eingesetzt werden kann.....	29
Abb. 15: Vorlauftemperatur der Bodenheizung des Beispielgebäudes für 20 °C Raumtemperatur.....	30
Abb. 16: Skizze des Beispielgebäudes mit Darstellung der Position der Anlagenkomponenten; oben: Seitenansicht; unten: Draufsicht.....	31
Abb. 17: Funktionsschema.....	34
Abb. 18: Wöchentliche Energieumsätze und Wärmepumpeneffizienz.....	37
Abb. 19: Monatliche Energieumsätze und Wärmepumpeneffizienz.....	38
Abb. 20: Wöchentliche Massivabsorbererträge und deren Zuordnung.....	38
Abb. 21: Monatliche Massivabsorbererträge und deren Zuordnung.....	39
Abb. 22: Wärmespeichertemperaturverlauf.....	39
Abb. 23: Monatliche Wärmespeicherenergiebilanz.....	40
Abb. 24: Jährliche Energieumsätze; Jahresarbeitszahl Wärmepumpe JAZ sowie Jahresarbeitszahl System JAZ_{sys} und Heizzahl ξ	40
Abb. 25: Abhängigkeit des spezifischen Speichervolumens (mit Speichermaterial Elektroofenschlacke, EOS) vom spezifischen Wärmebedarf des Gebäudes für optimiertes Verhältnis von ξ zu $k_{sys,a}$	42

Abb. 26: Abhängigkeit von $\xi / k_{\text{Sys},a}$ und JAZ vom grundflächenbezogenen Wärmebedarf der Beispielgebäudevarianten. Grundlage für die jeweilige Schätzfunktion.....	45
Abb. 27: Ablaufdiagramm der Systemoptimierung	47
Abb. 28: Systemauslegung: Speichervolumen für 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m ² a (unten).....	50
Abb. 29: Systemauslegung: Wirtschaftlichkeitskriterium $\xi/k_{\text{Sys},a}$ für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m ² a (unten).	51
Abb. 30: Systemauslegung: Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe) für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m ² a (unten).	52
Abb. 31: Systemauslegung: Jahresarbeitszahl (System) für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m ² a (unten).	53
Abb. 32: Systemauslegung: Heizzahl (primärenergiebezogen) für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m ² a (unten).	54
Abb. 33: Systemauslegung: Wärmegestehungskosten für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m ² a (unten).	55
Abb. 34: links oben: Investitionskosten; rechts oben: Jahresbedarf an elektrischer Energie; links unten: jährliche Annuität auf Grundlage der Kalkulationsdaten von Anhang A; rechts unten: Wärmepreis.	59
Abb. 35: Singuläre Sensitivitätsanalyse in zweifacher Ausführung für das optimierte Massivabsorberheizsystem (SV2a) sowie das Wärmepumpenheizsystem mit Erdsonde bei minimalen und maximalem Kostenansatz; links: Grunddaten nach Anhang A; rechts: frei gewählte Grunddaten	60
Abb. 36: Abhängigkeit des Wärmepreises vom Kalkulationszinssatz für verschiedene Betrachtungszeiträume. Dargestellt sind das optimierte Massivabsorbersystem (SV2a) sowie die Erdsondensysteme mit minimalem und maximalem Kostenansatz. Strompreisbasis: 17 Ct. kWh ⁻¹ , Preissteigerungsrate (Kapital, Betrieb): 2 %; (Bedarf): 3 %	61
Abb. 37: CO ₂ -äquivalente Emission des optimierten Massivabsorbersystems im Vergleich zum Erdsondenheizsystem.....	62

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kostenüberblick unterschiedlicher Massivabsorber	17
Tabelle 2: Kollektorparameter des Massivabsorbers gemäß DIN EN ISO 9806:2014-06.....	30
Tabelle 3: Auslegungszustand der Wärmepumpe für das Beispielgebäude.....	31
Tabelle 4: Betriebskriterienmatrix.....	36
Tabelle 5: Systemkosten [€] und elektrischer Aufwand [kWh a ⁻¹] im Vergleich für optimiertes Beispielgebäude und konventionelles Erdsondensystem	57
Tabelle 6: Annuitätswerte [€ a ⁻¹] im Vergleich für optimiertes Beispielgebäude und konventionelles Erdsondensystem	58
Tabelle 7: Angesezte Werte für die rechnerische Nutzungsdauer, den Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung; wenn nicht anders angegeben Werte nach VDI 2067 Blatt 1:2012-09	63
Tabelle 8: U-Werte des Beispielgebäudes	66
Tabelle 9: Datenpunktliste	67
Tabelle 10: Betriebsrelevante Anlagenbestandteile; Preisansatz durch Richard Kaufmann GmbH	67
Tabelle 11: Nahtloses Stahlrohr nach DIN EN 10220:2003-03 mit Preisansatz ohne Rohrmontage	68
Tabelle 12: Polynomkoeffizienten zur Speicherdimensionierung, siehe Gl. (3.1).....	69
Tabelle 13: Polynomkoeffizienten zur Abschätzung von $\xi / k_{\text{sys},a}$, siehe Gl. (3.7).....	69
Tabelle 14: Polynomkoeffizienten zur Abschätzung von JAZ , siehe Gl. (3.7)	70

1 Einleitung

Dieser Leitfaden fasst die für die praktische Anwendung relevanten Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Solarwärmesystem für die Beheizung von Industriehallen mit Massivabsorber und Saisonwärmespeicher“ zusammen, das im Zeitraum 1.1.2013 bis 31.12.2016 von der Laumer Bautechnik GmbH und der Hochschule München, Fakultät 05, Bereich Versorgungs- und Gebäudetechnik, durchgeführt wurde. Das Vorhaben gliederte sich in die Teilprojekte „Messtechnische Analyse und Optimierung von Komponenten und System durch Betriebsanalyse und Modellierung“ (FKZ: 03ET1158A), durchgeführt durch die Hochschule München und „Betrieboptimierung und Bau einer Pilotanlage“ (FKZ: 03ET1158B), durchgeführt durch die Laumer Bautechnik GmbH.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Optimierung eines gebäude-integrierten Solarwärme-Heizsystems. Die Gebäudehülle besteht aus hoch-wärmedämmten Fertigbetonbauteilen. Dadurch werden zum einen die Wärmeverluste während der Heizperiode reduziert und im Sommer wird eine Überhitzung des Innenraums unterbunden. Die Außenhaut der Industriehalle dient als Solarkollektor. Dazu werden die Fertigbetonfassadenelemente als Massivabsorber für Solarwärme ausgeführt. Die Beheizung der Halle erfolgt über eine Fußboden-Flächenheizung. Dies ist ausreichend, sofern die Halle über einen entsprechend hohen Dämmstandard verfügt. Für die zeitliche Verschiebung des sommerlichen Solarwärmeertrags in die Heizperiode wird ein Saisonwärmespeicher eingesetzt. Dazu wird der Untergrund unter dem Baukörper über eine Tiefe von etwa zwei Metern durch einen Wärmetauscher thermisch aktiviert. Die Speicherwärmeverluste an das umgebende Erdreich werden durch eine entsprechende Wärmedämmung reduziert. Durch das niedrige Temperaturniveau der Flächenheizung ist eine effiziente Nutzung des Wärmespeichers möglich. Der Wärmeentzug aus dem Saisonspeicher erfolgt bei ausreichend hohen Speichertemperaturen direkt und nach entsprechender Speicherauskuhlung mittels Wärmepumpe.

Die Forschungsarbeit konzentrierte sich auf die Konzeption von Massivabsorber und Langzeitwärmespeicher, auf die Festlegung der Systemverschaltung und optimale Abstimmung aller Systemkomponenten sowie auf die Optimierung der Betriebsstrategie. Im Projekt wurde eine gerade fertiggestellte Pilotinstallation einer Gewerbehalle mit 4.500 m² Grundfläche im Betrieb analysiert. Nach einer Weiterentwicklung des Konzepts und optimierter Auslegung der einzelnen Komponenten wurde die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Systems an einer zweiten Pilotinstallation mit einer Grundfläche von 1600 m² untersucht.

Dieser Leitfaden beschreibt über das Systemkonzept hinaus zum einen die Konzeption der Massivabsorber-Bauelemente in Beton-Sandwichbauweise und zum anderen ein Verfahren zur

überschlägigen Dimensionierung der Systemkomponenten. Details zu Auslegung und den thermischen Eigenschaften der Massivabsorber und des Langzeitwärmespeichers können dem Abschlussbericht des Vorhabens entnommen werden.¹

¹ Tanzer, B., Schweigler, C., Eberherr, H., Laumer, R.: Solarwärmesystem für die Beheizung von Industriehallen mit Massivabsorber und Saisonwärmespeicher. Abschlussbericht (FKZ: 03ET1158A und 03ET1158B), DOI: 10.2314/GBV:898474809

2 Systemkonzept und Komponenten

Das Heizsystem umfasst vier Kernkomponenten, siehe Abb. 1: den Massivabsorber, der kurzwelliges Licht absorbiert, im langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung steht und konvektiv Wärme aus der Umgebungsluft aufnimmt oder an sie abgibt. Die gewonnene Wärme kann auf drei Hauptwegen dem System zugeführt werden. Wenn keine Heizanforderung vorliegt, kann der Wärmespeicher geladen werden. Im Heizfall dient der Massivabsorber als Wärmequelle für eine Wärmepumpe, da das erreichte Temperaturniveau unter normalen Betriebsbedingungen nicht für eine direkte Wärmezufuhr an die Flächenheizung im Gebäude genügt. Reicht die Wärmeabgabe des Massivabsorbers nicht aus, wird die im Sommer eingespeicherte Wärme aus dem Speicher entnommen und direkt oder über die Wärmepumpe dem Gebäude zugeführt.

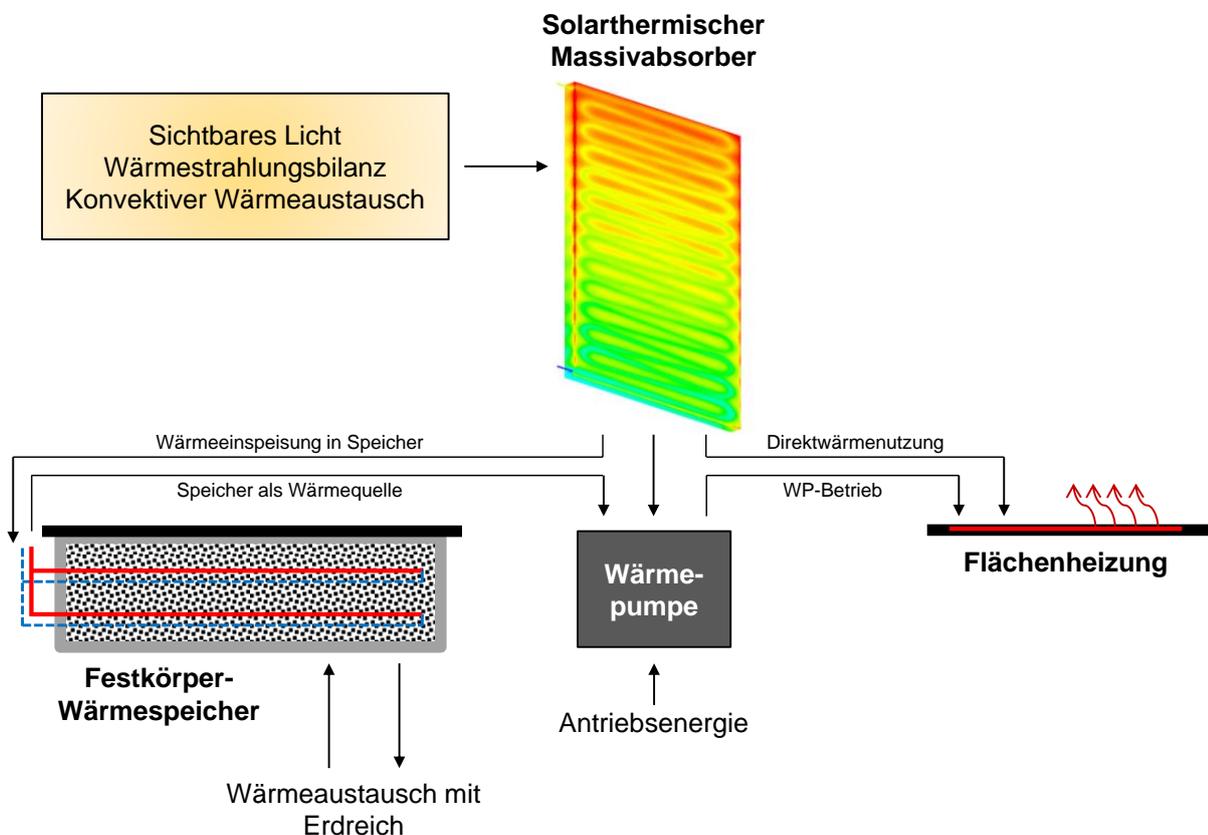


Abb. 1: Prinzipdarstellung des Heizsystems mit Massivabsorber, Wärmespeicher, Wärmepumpe und Flächenheizung.

2.1 Fassadenintegrierter Massivabsorber

Als Wärmequelle werden fassadenintegrierte Massivabsorber verwendet. Ausgeführt als armierte Betonplatte können sie einwirkenden Belastungen standhalten. Bei der Herstellung können gängige Techniken aus der Betonfertigteilproduktion adaptiert werden und erlauben so eine einfache und kostengünstige Herstellung. Durch den Verzicht auf eine Rahmenkonstruktion wird die

Fassadenintegration begünstigt. Wie ein Massivabsorber als Teil einer Fertigteilfeassade in sog. Sandwichbauweise eingebaut wird, veranschaulicht Abb. 2. Die Tragschale bildet die statische Hülle des Gebäudes. Die Wärmedämmung wird in dem Maß, wie es sich aus der aktuellen Energieeinsparverordnung für Außenbauteile ergibt, zwischen der Tragschale und der nicht-tragenden Vorsatzschale angebracht. Tragschale und Vorsatzschale werden durch eine Bewehrung stabilisiert. Die Vorsatzschale wird durch eine Rohrschlangeeinlage thermisch aktiviert und fungiert sodann als Massivabsorber.

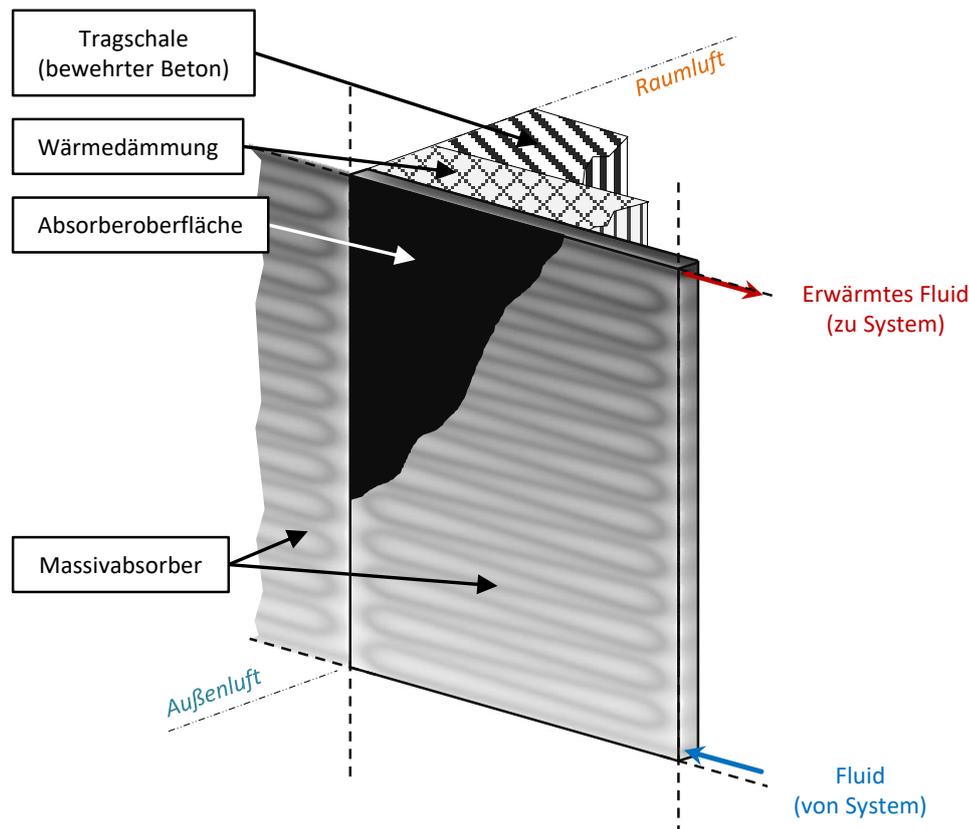


Abb. 2: Einbausituation des fassadenintegrierten Massivabsorbers

Alternativ zur Stahlbewehrung rücken textile Bewehrungen immer weiter in den Vordergrund. Derzeit gibt es hierfür jedoch noch keine allgemeine Zulassung für den Einsatz in Vorsatzschalenelementen.

Der größte Unterschied eines Massivabsorbers zu einem konventionellen Solarkollektor ist die thermische Masse. Sie ergibt sich zum einen aus der Bauteildicke, der Dichte des Betons und seiner spezifischen Wärmekapazität. Bevor die aufgenommene Wärme das Fluid erreicht, muss zunächst der Betonkörper erwärmt werden, was im Vergleich zu konventionellen Kollektoren zu einer deutlichen Zeitverzögerung führt. Hierdurch kann, auch wenn keine Sonnenenergie mehr den Kollektorbetrieb stützt, Wärme aus dem Massivabsorber entnommen werden. Auch metallische Kollektoren speichern Wärme im Absorber, jedoch im Vergleich zu Massivabsorbern verschwindend gering.

Während beim konventionellen Solarkollektor die aufgenommene Wärme nahezu direkt an den Wärmeträger weitergeleitet, bleibt die im Massivabsorber absorbierte Energie länger im Bauteil vorrätig. Da der Wärmetransport nicht einseitig nur von der Absorberoberfläche zum Rohr hin verläuft, sondern auch vom Inneren des Betonkörpers zur Außenluft, kann aufgenommene, aber nicht genutzte Wärme, wieder an die Umgebung abfließen. Vor allem, wenn es zum Betriebsstillstand kommt, kann zuvor aufgenommene Wärme wieder ungenutzt verloren gehen. Dieses Beispiel legt nahe, dass eine Reduzierung der Absorberdicke anzustreben ist.

2.1.1 Vorsatzschalen allgemein

Betonsandwichelemente sind komplett im Werk hergestellte Wandplatten, die aus einer Tragschicht, einer Vorsatzschicht und einer werkseitig eingebauten Wärmedämmung bestehen. Die Vorsatzschicht ist nichttragend und wird mittels nichtrostender Verbindungsmittel (z.B. Edelstahl oder Glasfaser) mit der Tragschicht verbunden. Sie übernimmt in erster Linie gestalterische Funktionen.

Bei der Planung von Betonsandwichelementen ist die Größe der Vorsatzschicht gewissenhaft zu planen bzw. zu begrenzen, um Rissbildungen infolge von ungewollten Zwangseinwirkungen (beispielsweise in Folge von Temperaturdifferenzen) zu vermeiden. Übliche Werte für maximale Längen von Vorsatzschichten liegen bei 6,0 m bis 7,0 m. Die Mindestdicke für die Vorsatzschichten ergibt sich nach DIN EN 1992-1-1:2011-01 aus den Betondeckungen in Abhängigkeit der Expositionsklassen zu 70 mm. Aufgrund konstruktiver Randbedingungen (z.B. mehrlagige Bewehrung im Bereich von Aussparungen) werden Vorsatzschichten häufig mit Dicken größer gleich 80 mm ausgeführt.

Die Dicke der Tragschichten sollte aus konstruktiven und statischen Gründen mindestens 140 mm betragen. Die Dicke der Wärmedämmung beträgt heutzutage üblicherweise 60 bis 240 mm und ist nach den Vorgaben der aktuellen Energieeinsparverordnung festzulegen.

Für den Beton der Vorsatzschicht gelten die Normen DIN EN 206:2017-01 sowie DIN 1045-2:2008-08. Die Betonfestigkeitsklassen liegen im Bereich C30/37 bis C50/60. In der Regel wird Normalbeton verwendet.

Der innenliegende Betonstahl entspricht der Reihe DIN 488-1:2009-08 bis DIN 488-6:2010-01 sowie DIN EN 10080:2005-08.

Die Vorsatzschichten von Betonsandwichelementen sind während Ihrer Nutzungsdauer

- ständigen Einwirkungen, insbesondere aus dem Eigengewicht der Vorsatzschicht,
- veränderlichen Einwirkungen, insbesondere aus Winddruck und -sog,

- Einwirkungen aus Zwang, insbesondere aus Temperatur und Schwinden sowie
- Transport- und Montagezuständen

unterworfen. Diese Einwirkungen sind bei der Planung der Betonsandwichelemente zu berücksichtigen. Die Bemessung der Vorsatz- bzw. Tragschicht erfolgt nach DIN EN 1992-1-1:2011-01. Die Verbindungsmittel für die Befestigung der Vorsatzschicht an der Tragschicht sind in bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt.

Hinweise zum Sichtbeton bzw. zur Gestaltung von Betonoberflächen enthalten die FDB-Merkblätter Nr. 1 und 8.

2.1.2 Konstruktive Umsetzung

Alternativ zur konventionellen Stahlbewehrung etablieren sich textile Bewehrungsformen.

Die derzeit zielführendste Verbindung einer dünnen Vorsatzschale mit der massiven Tragschale einer Betonsandwichwand stellt das Befestigungssystem ComBar (Abb. 3) der Firma Schöck dar. Hierzu werden in den nassen Beton der dünnen, 4 cm starken Vorsatzschale Glasfaserstäbe eingebracht, die dann die tragende Verbindung zur Tragschale herstellen. Diese korrosionsfreie Verbindung wird bei reduzierten Betondeckungen im Vergleich zur herkömmlichen Vorsatzschalenstärke von 7 cm notwendig. Gleiches gilt für die Art der Bewehrung der Vorsatzschale. Auch hier ist es notwendig korrosionsfreie Glasfasergewebe einzusetzen, die eine reduzierte Betondeckung zulassen (Standardbetondeckung bei korrodierender Bewehrung min. 3 cm). Die Betondeckung des Glasfasergewebes wird lediglich durch die produktionstechnischen Abläufe bestimmt und könnte bei etwa 1 cm liegen, wozu noch weitere Untersuchungen notwendig sind.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Musterwandplatten mit einem Epoxidharz getränktem Glasfasergewebe hergestellt, um eine gebrauchstaugliche Bewehrung des Massivabsorbers herzustellen. Diese Bewehrung hat hinsichtlich der Welligkeit bzw. der Stabilität wesentliche Vorteile in der Fertigung gegenüber weniger formstabilen Bewehrungssystemen



Abb. 3: ComBar (Fotoquelle: Schöck Bauteile GmbH)

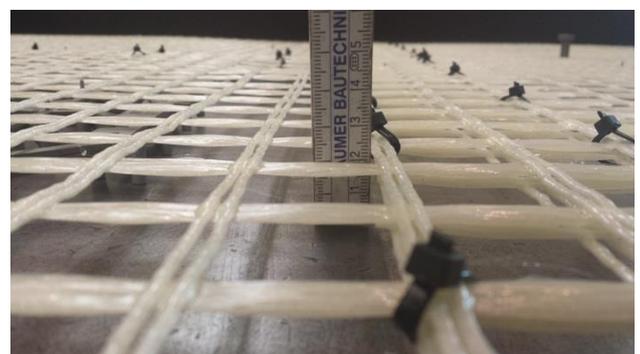


Abb. 4: mit Epoxidharz getränktes Textilgewebe



Abb. 5: Musterwandplatte mit ComBar Bewehrungsstäben der Firma Schöck

In Versuchen konnte das Einbringen der Glasfaserstäbe in Verbindung mit der Wärmedämmung bereits wesentlich wirtschaftlicher und praxistauglicher umgesetzt werden. Auszugsversuche zur Bestimmung der Zugfestigkeit der Verbindung an den Musterwandplatten durch die Firma Schöck GmbH haben gezeigt, dass das

Durchschrauben der Glasfaserstäbe durch die Dämmung gleich gute Werte hinsichtlich der Befestigung der Vorsatzschale erzielt wie die Einbauempfehlungen der Firma Schöck Bauteile GmbH. Diese Vorgehensweise lässt eine wirtschaftliche und praxisgerechte Umsetzung der dünnen Vorsatzschalentechnologie im Fertigteilwerk zu. Diese dünne Vorsatztechnologie wurde innerhalb des Forschungsvorhabens an der Nordseite der Pilotanlage (Abb.7) – unabhängig von der thermischen Aktivierung als Massivabsorber – ausgeführt. Durch diese Ausführung können wesentliche Erkenntnisse bezüglich der Umsetzung und des Verhaltens der dünnen Vorsatzschalen (Wölbung, Rissbildung usw.) in den nächsten Jahren gewonnen werden. Die gewonnenen Langzeitergebnisse können in Zukunft konstruktiven Einfluss auf die Ausführung dünner großformatiger Betonsandwichplatten liefern, die auch wichtige Impulse hinsichtlich der Fertigung dünner Massivabsorberelemente geben können.



Abb. 6: Nordansicht Pilotanlage / Ausführung mit dünner Vorsatztechnologie

Derzeit zeigen sich noch folgende Schwierigkeiten bei der Umsetzung großformatiger Sandwichwandplatten mit dünnen Vorsatzschalen:

- Abzeichnen der Textilbewehrung auf der Betonoberfläche, Beeinträchtigung der Oberflächenqualität.

Lösung: Der Einsatz einer möglichst formstabilen Carbon- bzw. Textilbewehrung mit optimierten Abstandshaltern kann hier größtenteils Abhilfe schaffen. Bislang wurden von Herstellerseite aber noch keine passenden Abstandshalter entwickelt. Was sich aber in naher Zukunft sicherlich ändern wird. Die bestehenden Abstandshalter müssen bislang in Handarbeit angepasst werden.

- Genehmigungstechnische Umsetzung der Befestigung (derzeit keine allgemeingültige Zulassung des Befestigungssystems) und somit Probleme bei der späteren Vermarktung des Systems.

Lösung: Zulassungen im Einzelfall bzw. Nachweis mittels Prüfstatiker. Nachweis der Eignung des Befestigungssystems im Zug einer gutachterlichen Stellungnahme bzw. eines Prüfzeugnisses.

- Wirtschaftliche Umsetzung des Systems ist aufgrund von hohen Anschaffungskosten der Textilbewehrung erschwert.

Lösung: Mit den abgenommenen Bewehrungsmengen bzw. mit der Akzeptanz der Textilbewehrung werden die Anschaffungskosten für die Bewehrungstechnik sinken und somit wird das System hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit zukünftig attraktiver werden.

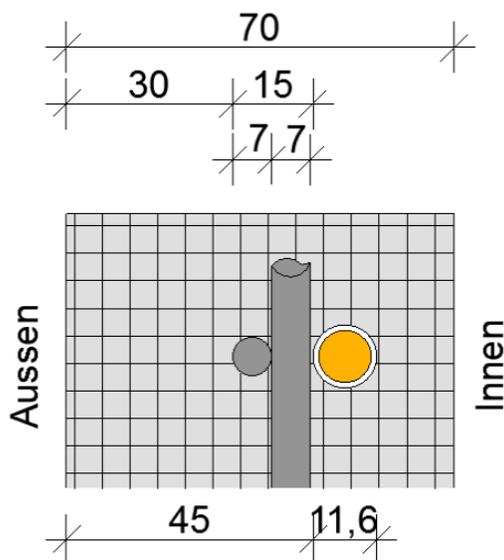


Abb. 7: Vorsatzschale Massivabsorber

Nach detaillierter Untersuchung und Auswertung der wirtschaftlichen und energetischen Vor- und Nachteile der bislang untersuchten Massivabsorbervarianten wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens die in Abb. 7 dargestellte Massivabsorbervariante als die zielführendste bzw. wirtschaftlichste Bauweise umgesetzt.

In dieser Massivabsorbervariante werden Verbundrohre mit einem Durchmesser von 11,6 mm verwendet. Die gewählte Ausführung lässt für den Betrieb und die Umsetzung ein günstiges Verhältnis von Wirtschaftlichkeit und energetischen Nutzen erwarten.

Der gewählte Rohrtyp hat sich im Bereich der Flächenheizung bewährt. Ein großer Vorteil liegt in der Möglichkeit, die Rohre ohne anfällige Verbindungsstöße auf der Stahlbewehrung verlegen zu können.

Aufgrund des geringen Durchmessers können die Absorberleitungen relativ engmaschig verlegt werden. Der Hersteller (Firma Mayer Heiztechnik) gibt bei einer Biegung mit einem Biegewerkzeug einen Biegeradius von min 35 mm vor, was bedeutet, dass die Leitung mit einem Achsabstand von ca. 70 mm verlegt werden können.

Die Verwendung des Verbundrohrs stellt einen Kompromiss zu dem noch engmaschigeren Kapillarrohrsystem dar. Der Vorteil des Verbundrohrsystems im Vergleich zum Kapillarrohrsystem liegt vor allem in der flexiblen produktionstechnischen Bearbeitung und in der geringeren Störungsanfälligkeit (z.B. mechanische Verschlüsse).

2.1.3 Ausführungszeichnungen / Produktion

Bei der Gestaltung der Fassadenplatten der Pilotanlage wurde versucht, möglichst gleiche Abmessungen und Größen zu definieren. In der Abb. 8 wird eine typische Regelplatte dargestellt. Die Plattenabmessungen betragen ca. 7,50 m x 3,50 m. Diese Betonfertigteileplatte wurde in drei Massivabsorber unterteilt. So wird jede Fertigteileplatte mit drei Zu- und drei Abgängen leitungs-technisch angeschlossen. Durch die Dreiteilung der Platten und die sich daraus ergebenden Leitungslängen der Absorber werden die Druckverluste begrenzt. Die Rohrleitungslänge eines Absorberfeldes beträgt nur ein Drittel im Vergleich zur Gesamtplatte. Der Volumenstrom reduziert sich folglich auf ein Drittel. Die Temperaturpreizung zwischen Vor- und Rücklauf beträgt im Auslegungsfall 5 K.

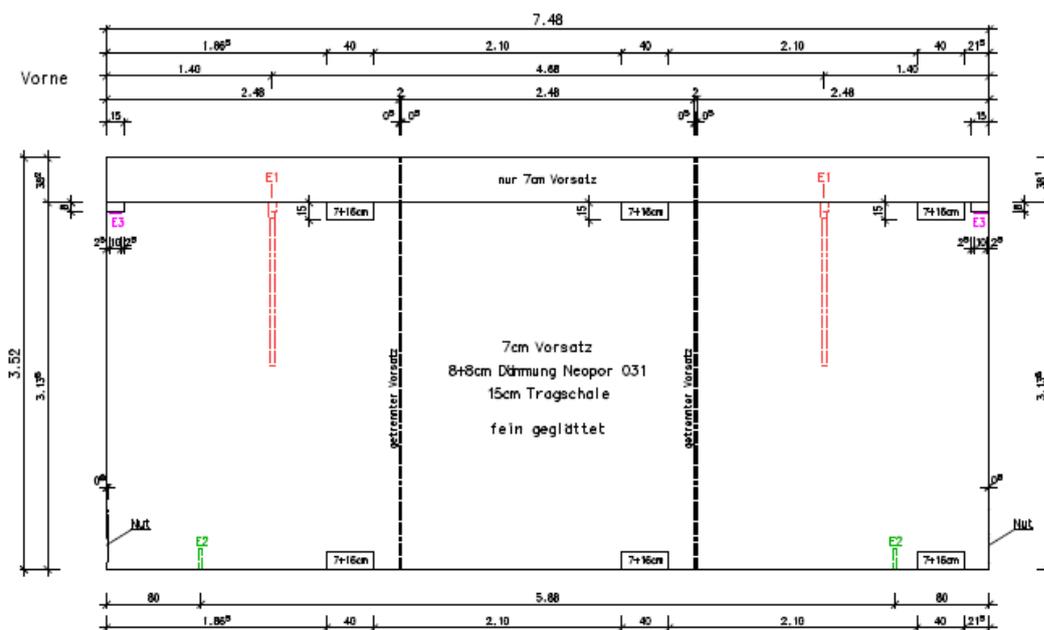


Abb. 8: Ausführungszeichnung Regelplatte Massivabsorber (Abmessungen)

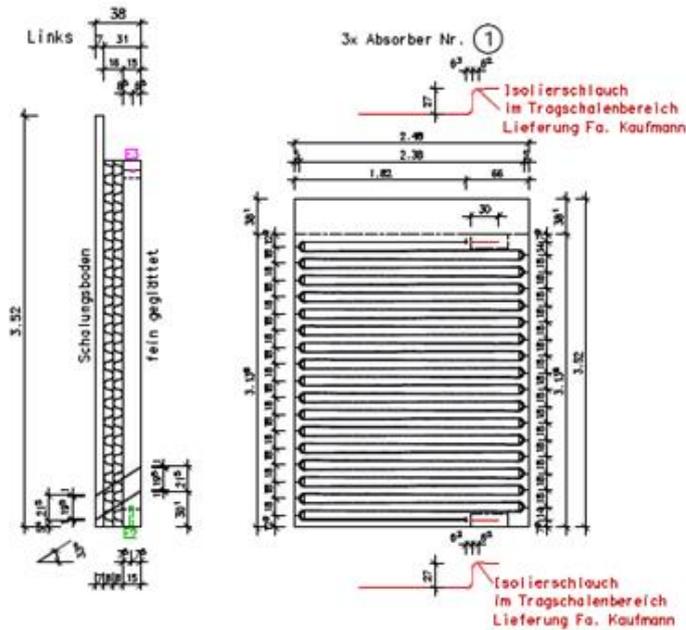


Abb. 9: Ausführungszeichnung Regelplatte Massivabsorber (thermische Aktivierung)

Die Leitungslängen der einzelnen Absorber liegen in etwa zwischen 75 m und max. 100 m. Die Rohrregister wurden aus wirtschaftlichen Gründen im Werk mit Hilfe eines Biegetisches angefertigt und direkt auf die Mattenbewehrung des Vorsatzes aufgebunden. Um keine Verbindungen (Schwachstellen, zusätzlicher Aufwand) innerhalb des Betons erstellen zu müssen, wurden nur ganze Rohrlängen verbaut. Einige Arbeitsschritte zur Massivabsorberherstellung sind in den Abb. 10 und 11 dargestellt.

Da die Dreiteilung des Betonvorsatzes auch fertigteiltechnisch einen Mehraufwand bedeutet, wurden einige Platten ohne die bauliche Trennung ausgeführt. Dies ermöglicht es, im Langzeitversuch (3-5 Jahre) das Verhalten der Platten hinsichtlich Rissbildung bzw. Zwängungen und Wölbnungen beurteilen zu können.



Abb. 10: Herstellen des Absorberregisters (links), eingelegte Rohrregister vor der Betonage (rechts).



Abb. 11: Betonieren der Vorsatzschale (links), Messfühler im Absorber (rechts).

2.1.4 Produktionstechnische Vorteile der ausgeführten Massivabsorbervariante:

Die gewählte Variante mit 7 cm Vorsatzschalenstärke lässt eine konventionelle Befestigung mit Stahlnadeln bzw. Verbundankern des Vorsatzes mit der Tragschale zu. Das heißt, dadurch lassen sich in der Fertigung und auch im Einkauf Kosten einsparen, wodurch die Wirtschaftlichkeit gesteigert wird.

Die genehmigungstechnischen Probleme hinsichtlich Zulassung, Statik, Prüfung usw. können mit dieser Ausführung umgangen werden. In der täglichen Arbeit bedeutet dies, dass die Arbeit im Vorfeld reduziert und die technische Bearbeitung im Ingenieurbüro vereinfacht werden kann.

Bei der Ausführung handelt es sich um ein erprobtes System, welches z. B. die bautechnischen Details oder die Erfahrung hinsichtlich des Verhaltens bei thermischer Beanspruchung anbelangt. Die Erfahrungen von dünnchaligen Wandplatten müssen in diesem Zusammenhang über einen längeren Zeitraum noch gesammelt werden, wozu die Ausführung der Versuchsfassaden mit einer Stärke der Vorsatzschale von 3 cm – ohne thermische Aktivierung als Massivabsorber, wesentlich beitragen soll.

Die Vorfertigung der Absorberregister und Herstellung der Massivabsorber im Werk spart logistischen Aufwand, schafft Flexibilität bei Änderungen, wie z.B. Aussparungen, und führt zu einer bauzeitoptimierten Ausführung und zu wirtschaftlichen Gesamtergebnissen.

2.1.5 Kostenentwicklung

Tabelle 1 zeigt die aktuell (Stand 2016) gültigen Kosten für die Herstellung verschiedener Massivabsorbervarianten.

Tabelle 1: Kostenüberblick unterschiedlicher Massivabsorber

Ausführung	Stärke Massivabsorbervorsatzschale	7 cm	7 cm	7 cm	3 cm	3 cm
	Art der Bewehrung	Stahl	Stahl	Stahl	Edelstahl	Textil
	verwendeter Beton	normal	normal	normal	SVB	SVB
	Rohrtechnologie	Verbund	Verbund	Kapillar	Verbund	Kapillar
	Durchmesser Absorberrohr	16 mm	11,6 mm	4,5 mm	11,6 mm	4,5 mm
	Abstand der Absorberrohre (circa)	20 cm	10 cm	2 cm	10 cm	2 cm
Kostenansatz	Rohrtechnologie für fertiges Register inkl. Einbau	18 €/m ²	28 €/m ²	38 €/m ²	28 €/m ²	38 €/m ²
	Kosten für den Beton der Vorsatzschale	2 €/m ²	2 €/m ²	2 €/m ²	4 €/m ²	4 €/m ²
	Bewehrung inkl. Einbau Lagerung und Verarbeitung	4 €/m ²	4 €/m ²	4 €/m ²	30 €/m ²	20 €/m ²
	Einbau und Produktion	3 €/m ²	4 €/m ²	6 €/m ²	6 €/m ²	5 €/m ²
	Technischer Aufwand für Bearbeitung Absorberwände	4 €/m ²	4 €/m ²	8 €/m ²	8 €/m ²	8 €/m ²
	Sonstige Mehrkosten (z. B. Logistik, Abstimmung, Lagerung)	0 €/m ²	0 €/m ²	3 €/m ²	4 €/m ²	4 €/m ²
Gesamtkosten	Herstellungskosten für 1 m² Absorbervorsatzschale	31 €/m²	42 €/m²	61 €/m²	80 €/m²	79 €/m²

Aus der dargestellten Kostensituation leitet sich ab, dass derzeit eine Ausführung des Absorbers mit einer dünnen Vorsatztechnologie vor allem an den Kosten für die textile Bewehrung scheitert. Die Mehrkosten von teilweise mehr als 100% für diese Technologie stehen lediglich einer energetischen Verbesserung von maximal ca. 15% gegenüber. Die energetischen Nachteile dickerer Vorsatzschalen können bei Bedarf mit entsprechend größerem Fassadenanteil der Massivabsorber kompensiert werden.

2.1.6 Ausblick:

Zum derzeitigen Zeitpunkt lässt sich aus den aufgezeigten Gründen die gewählte Variante des Absorbers sehr schlüssig nachvollziehen.

Sollte sich mittelfristig im Bereich der textilen Bewehrung (Verarbeitung, Genehmigung usw.) eine positive wirtschaftliche Entwicklung ergeben, kann eine Abwägung der Vor- und Nachteile der untersuchten Varianten noch einmal vorgenommen werden.

Es ist mittelfristig davon auszugehen, dass sich auch wirtschaftlich vertretbar textilbewehrte Massivabsorber mit minimal 4 cm Vorsatzstärke herstellen lassen, die die Effektivität der Absorber um bis zu 15% steigern.

2.2 Langzeitwärmespeicher: Vergleich und Einordnung

Große Wärmespeicher im Sinne der Langzeitspeicherung sind individuell gefertigte Konstruktionen, die mit der Speicherung sommerlicher Wärme eine höhere Jahresarbeitszahl und konstantere Leistung einer Wärmepumpe während der Heizperiode ermöglichen. Diese Effekte vergrößern sich mit höheren Speichertemperaturen und einer größeren Speicherkapazität. Sie unterscheiden sich in Bauform, Speichermedium, Anwendung und der Art der Ein- und Auskopplung von Wärme.

2.2.1 Bauformen

Bekannte und bereits verwendete Typen von Großspeichern sind Kies-Wasser-, Aquifer-, Heißwasser- und Erdsondenspeicher, wobei auch Kombinationen davon möglich sind. Kleinere Wärmespeicher in Heizsystemen fassen üblicherweise wenige m^3 und werden für den kurzzeitigen Zeitversatz zwischen Wärmezufuhr und -entnahme eingesetzt. Eine allgemeine Kategorisierung unterscheidet die gängigen Wärmespeichermaterialien wie Wasser und Erdreich oder kombinierte Lösungen. Flüssigkeitsgefüllte Speicher werden als Konvektivspeicher bezeichnet. Werden trockene Materialien eingesetzt, die Wärme vornehmlich über Konduktion austauschen, so handelt es sich um Diffusivspeicher und kombinierte Formen werden als Mischspeicher bezeichnet.

Heißwasserspeicher werden als Tank ausgeführt, bei dem die Wärmedämmung an Decke und Seite Vorrang hat. Dies lässt sich auf die internen Konvektionsströme im Speicherwasser zurückführen, durch die das heiße Wasser durch Thermik aufsteigt. Die Speicherhülle ist aus diffusionsdichten Werkstoffen zu fertigen, was sich negativ auf die Kosten auswirkt. Von Vorteil hingegen ist die örtliche Unabhängigkeit.

Kies-Wasser-Speicher nutzen Erdreichmaterial, wie Kies mit unterschiedlichem Wasseranteil zur Speicherung. Der Wärmeaustausch kann direkt über den Austausch des Wassers oder über integrierte Rohrschlangen erfolgen. Die Speicher werden wie der Heißwasserspeicher ebenfalls mindestens an der Oberfläche und an den Seiten wärmedämmend. Werden sie im Erdreich versenkt gebaut, ist eine seitliche Abstützung nicht notwendig. Die Speichergröße muss aufgrund der geringeren spezifischen Wärmekapazität allerdings größer sein als beim reinen Wasserspeicher.

Für den Erdsonden- und Aquiferspeicher ist Kenntnis des Untergrunds zwingend erforderlich. Für den Erdsondenspeicher bedarf es bestimmter geologischer Voraussetzungen, damit die Speicherung erfolgreich umgesetzt werden kann. Da eine seitliche und am Boden befindliche Wärmedämmung nicht möglich ist, werden diese Speicher nur an der Oberfläche isoliert. Ein Vorteil ist die zusätzliche Erweiterungsmöglichkeit des Speichers durch Einbindung weiterer Erdsonden in das System.

Der Aquiferspeicher funktioniert vergleichbar mit dem Kies-Wasser-Speicher, bei dem der Wärmeaustausch direkt durch Ein- und Ausspeisen des Wassers geschieht. Zwischen zwei wasserundurchlässigen Schichten befindet sich das eigentliche, poröse Speichermaterial, wie z.B. Sand. Über Saug- und Schluckbrunnen wird der Wassertausch vollzogen. Voraussetzung ist, dass das dort vorhandene Grundwasser keine oder nur eine geringe Strömung aufweist.

Anhand verschiedener, realisierter Saisonwärmespeicher konnte in früheren Forschungsvorhaben gezeigt werden, dass für kleinere Speichervolumina (ca. 1000 m³) der Kies-Wasser-Speicher die niedrigsten Kosten aufweist. Insgesamt sind jedoch Erdsonden- und Aquiferspeicher am günstigsten, sind allerdings am stärksten von den örtlichen Gegebenheiten abhängig.

2.2.2 Speichermaterial

Ein Problem bei Speichern, die – im Gegensatz zu Latentwärmespeichern - ausschließlich sensible Wärme bereitstellen, sind die stets vorhandenen Wärmeverluste und für die direkte Heizwärmebereitstellung erfordern sie in der Regel eine Wärmepumpe. Das Material sollte eine hohe spezifische Wärmekapazität aufweisen, stabil für andauerndes Be- und Entladen sowie kostengünstig sein. Darüber hinaus ist die Temperaturleitfähigkeit ein wichtiges Kriterium bei der Wahl des Speichermaterials.

Grundsätzlich steigen mit der Speichergröße auch die absoluten Wärmeverluste, wohingegen die spezifischen Wärmeverluste sinken und ebenso die spezifischen Baukosten. Im Maßstab großer, saisonaler Wärmespeicherung sind die zu lösenden technischen Herausforderungen am geringsten, wenn ein niedriges Temperaturniveau gewählt wird, aber oberhalb von 0 °C. Ab 30 °C wirken sich die Wärmeverluste deutlich negativ aus, was auf die höheren Temperaturgradienten an den Umschließungsflächen zurückgeführt werden kann. Feuchtes Erdreich ist besser als trockenes Erdreich für die Wärmespeicherung geeignet. Darüber hinaus ist reines Wasser als Speichermaterial bzgl. der spezifischen Wärmekapazität am besten geeignet. Bei einer feuchten Schüttung dringt das zusätzliche Wasser in die Hohlräume zwischen den Körnern ein und erhöht dadurch die volumetrische Wärmekapazität des Speichermaterials.

Weitere Speichermedien für die thermisch sensible Nutzung können auch Gesteine, Metalle, Beton, Sand, Ziegel bzw. andere Baustoffe sein.

2.2.3 Wahl des Speicherkonzepts

Die hier gestellten Anforderungen zielen auf ein Speicherkonzept, das unabhängig von den geologischen Einflüssen aufgebaut werden kann. Erdsonden- und Aquiferspeicher sind daher auszuschließen. Zum einen ist für die Errichtung eine Genehmigung erforderlich und zum anderen erfordern sie eine aufwendige technische Ausführung. Der Aquifer als Wärmespeicher ist nicht wärmetechnisch zu isolieren. Darum muss das Oberfläche-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis) klein sein und das Volumen größer als 100000 m³ sein.

Das zweite Kriterium ist eine hohe Integrationsfähigkeit in das zu versorgende Gebäude oder in die nähere Umgebung. Als Option für die Gebäudeintegration besteht für große Wärmespeicher nur die Möglichkeit sie unterhalb des Gebäudes zu platzieren. Baufläche bleibt somit frei für andere Maßnahmen, was sich besonders in dichtbesiedelten Gebieten mit hohen Grundstückspreisen als Vorteil darstellt. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch den unterirdischen Speicherbau der solare Deckungsgrad höher ist als bei wärmedämmten oberirdischen Speichern, da die Wärmeverluste ans Erdreich geringer sind. Für einen Heißwasserspeicher würde dies bedeuten, dass er entweder in aufwendiger Konstruktion als Druckspeicher auszuführen wäre, oder drucklos aber in beiden Fällen mit der notwendigen statischen Tragfähigkeit für das Gebäude. Dieser Aufwand verschwindet, wenn stattdessen das vorhandene Erdreich oder eine als Ersatz eingebrachte Schüttung verwendet werden kann. Die Lastaufnahmefähigkeit wird nicht beeinträchtigt und der Wärmeaustausch ist über eingebettete Rohrschlangen möglich.

Zur Steigerung der Wärmekapazität und zur Verbesserung des Wärmetransports sollte das Erdreich möglichst feucht gehalten werden. Mit Unterschreiten der Frostgrenze könnte auch die mit dem Phasenwechsel des enthaltenen Wassers verbundene latente Wärme genutzt werden. Wird jedoch von einem festen Einbau des Speichers im angrenzenden Erdreich ausgegangen, so kann sich die Volumenvergrößerung beim Erstarren nur in Richtung des Gebäudes ausbreiten mit der Gefahr der Auslösung von Bauschäden. Um diese Wirkung auszuschließen, wird ein Absenken der Temperatur auf Werte unter 0 °C nicht zugelassen.

2.2.4 Ausführung des Langzeitwärmespeichers aus bautechnischer Sicht

2.2.4.1 Größe des Speichers:

Die Größe des Speichers muss auf die Größe der in der Fassade möglichen Massivabsorberflächen und auf die zur Verfügung stehende Fläche im Bereich der Halle (Grundfläche) abgestimmt werden. Oft wird die zur verfügbare stehende Gebäudegrundfläche durch Einbauten (z.B. Gruben), statische Vorgaben (Randabstände zu tragenden Bauteilen) oder Aufstellflächen für schwere

Maschinen mit hochbelasteten Fundamenten eingeschränkt. Diese Rahmenbedingung müssen im Vorfeld geklärt und mit in die Überlegungen einbezogen werden.

2.2.4.2 Konstruktion des Speichers:

Die Umfassungswände des Speichers werden im Hinblick auf die Praxistauglichkeit aus unge-dämmten Betonfertigteilwänden erstellt. Dies gewährleistet ein einfaches und wärmebrückenfreies Aufbringen der innenliegenden Dämmung. Außerdem kann eine bauablauf-optimierte Erstellung des Speichers vorgenommen werden. Aufgrund des vorhandenen Schichtenwassers am Bauort musste der Speicher als wasserdichte Konstruktion ausgeführt werden, wodurch auch eine Bodenplatte aus Beton notwendig wurde. Im Rahmen von Folgeprojekten kann bei homogenem Untergrund ohne drückender Wasserschicht auf eine massive Bodenplatte verzichtet werden. Bei dieser vereinfachten Bauweise würde die Bodendämmung doppellagig auf ein fein abgezogenes Splittbett verlegt werden. Die Oberseite des Speichers wird vollflächig, analog zu den angrenzenden Bodenplattenflächen ohne Speicher, mit einer durchlaufenden druckfesten Dämmung versehen.

2.2.4.3 Statische Anforderungen:

Aufgrund der Lage des Speichers unterhalb der Bodenplatte des Gebäudes ergeben sich hinsichtlich der Statik Anforderungen an die Verdichtung des Untergrundes. Durch Setzungen des Untergrundes kann es in der Bodenplatte zu Rissbildung kommen. Der Untergrund sollte daher mit mindestens 250 kN/m² belastet werden können.

Bei statisch hohen Lasten (Pressen, Schwerlastregale usw.) die auf der Bodenplatte aufgestellt werden sollen, ist ggf. auch auf höhere Bodenpressungen zu achten. Zusätzlich kann eine stärkere Bodenplatte bzw. eine Verstärkung der Bodenplatte in Teilbereichen notwendig werden.

An die Belastung der Umfassungswände des Wärmespeichers werden im fertigen Zustand keine statischen Anforderungen gestellt, da durch den beidseitigen Erddruck die Bauteile als statisch unbelastet angesehen werden können. Lediglich beim Einbau bzw. beim Hinterfüllen der Baugrube kann es hier zu Schwierigkeiten kommen. Deshalb sollte das Hinterfüllmaterial parallel zum Einfüllen des Speichermaterials lagenweise eingebracht werden. Da ein einseitiger Erddruck im Einbauzustand die Konstruktion (z.B. Einspannung in die Bodenplatte) der Speicheraußenwände ggf. erheblich verteuern würde.

2.2.4.4 Dämmung des Speichers:

In Bezug auf die Dämmung des Speichers hat die Erfahrung der bislang ausgeführten zwei Objekte gezeigt, dass hier auf eine möglichst wärmebrückenfreie Konstruktion und eine optimierte Dämmung der Hüllflächen großer Wert gelegt werden muss.

Bei der Dämmung des Speichers mit Glasschaumschotter (bei der Erstellung einer ersten Demonstrationsanlage) hat sich gezeigt, dass sich bautechnisch ein optimierter U-Wert der Hüllenflächen bzw. eine wärmebrückenfreie Konstruktion aufgrund der Gründungssituation (Fundamentvorsprünge, senkrechter Einbau des Glasschaumschotter) nur schwer umsetzen lässt.

Beim Neubau der folgenden Pilotanlage wurde auf die Beton-Wandplatten und die Innenseite der Bodenfläche eine zweilagige Perimeterdämmung (2x10 cm) mit Stufenfalz aufgebracht. Somit konnte eine Konstruktion mit einem U-Wert der Gesamtkonstruktion von ca. 0,15 W/m²K ausgeführt werden.

Aufgrund der Ausführung der Umfassungsflächen des Speichers aus hochwertigem Beton (Dampfsperre) und der damit verbundenen diffusionshemmenden Konstruktion kann ein Durchfeuchten des wasserabweisenden Dämmstoffes durch das angrenzende Erdreich auf lange Sicht hin ausgeschlossen werden. Die Lage des Speichers unterhalb des Gebäudes trägt ebenfalls zu dieser Annahme bei. Ein erhöhter Feuchtigkeitseintrag durch Umwelteinflüsse wie z.B. durch Regen oder Staunässe kann aufgrund der Lage nicht erfolgen.

Aus bautechnischer bzw. wirtschaftlicher Sicht kommen derzeit zwei Arten der Wärmedämmung in Frage. Die weit verbreitete Perimeterdämmung (Styrodur - XPS, Hersteller z.B. Firma Bachtl)) stellt hier die klassische Art der Dämmung dar. Sie ist druckfest und für den Einsatz im Erdreich konzipiert. Die Wasseraufnahme dieser Dämmung begrenzt sich auf ein Minimum.

Im Vorgängerprojekt (Demonstrationsanlage) wurde der Speicher mit einer Dämmung aus Glasschaum gedämmt. Die Nachteile dieser Variante stellen der Einbau (erschwerter Bauablauf), die notwendige Bauteilstärke zum Erreichen niedriger U-Werten und die vergleichsweise hohen Kosten dar.

Weitere Arten der Wärmedämmung die für den Einsatz im Erdreich eingesetzt werden können, z.B. FOAMGLAS, scheiden aus wirtschaftlichen Gründen aus.

2.2.4.5 Speichermaterial

In Zusammenarbeit mit der Max Aicher Umwelt GmbH wurde ein gebrochenes Speichermaterial (EloMinit) aus Stahlschlacke als Speichermaterial verwendet. Dieses Material verspricht eine Verbesserung der Speicherkapazität im Vergleich zu Kies von ca. 20-25%. Es wird so möglich, bei wirtschaftlich gleich bleibenden Investitionskosten, eine wesentliche Verbesserung der Speicherfähigkeit im Vergleich zur bestehenden Anlage zu erreichen. Produktdaten finden sich unter www.max-aicher-umwelt.de.

Eine optimierte Zusammensetzung der Sieblinie des Speichermaterials trägt zur effizienten Einbringung des Materials in den Saisonspeicher bei. Beim Einbau des Materials auf die Einhaltung eines vorgegebenen minimalen Feuchtegehalts des Materials zu achten:

Zusammengefasst sind bei der Füllung des Speichers folgende Rahmenbedingung einzuhalten:

- Eine größtmögliche Verdichtung des Materials wird durch Weglassen der mittleren Kornfraktion, also bei einer Körnung von 0...4 mm sowie 12..32 mm, erreicht
- Beim Einbau sollte das Material nicht zu trocken sein, d.h. eine Einbaufeuchte von ca. 8% vor dem Verdichten ist optimal, siehe Proctorkurve. Eine Befeuchtung des Materials ist deshalb beim Einbau notwendig.
- Durch diese Maßnahmen kann in der Praxis eine tatsächliche Einbaudichte von bis zu 2,5 g/cm³ erreicht werden.

2.2.4.6 Feuchtigkeit:

Um im Laufe Betriebs eine Austrocknung des Speichermaterials zu verhindern wurde im Zuge des Speicherbaus unterhalb der Dämmung an der Speicheroberseite ein offenes Drainagerohr verlegt, über das bei Bedarf manuell Feuchtigkeit in den Speicher eingebracht werden kann, sodass der Wärmeübergang vom Rohr zum Speichermedium verbessert wird. Geschieht der Wärmeübergang in einem zu trockenen Medium (Sand), führt dies schnell zu hohen Übergangswiderständen und somit zu einem unwirtschaftlicheren Betrieb der Anlage. Bis zur Fertigstellung dieses Berichts lief die Pilotanlage ca. ein Jahr. Eine Nachfeuchtung war nicht erforderlich.

Hinsichtlich der Anfangsfeuchte des Speichermaterials ist zu beachten, dass es aufgrund der notwendigen Verdichtung mit mind. 8% Materialfeuchte eingebracht wird. Dies kann durch eine Bewässerung während des Einbaus sichergestellt werden. In den Speicher wurde ein von außen zugänglicher Pumpensumpf eingebracht, der es bei Bedarf ermöglicht, Restwasser aus dem Speicherboden zu entnehmen.

Eine Durchfeuchtung des Speichers aus der angrenzenden Erdfeuchte wird durch die diffusionsdichten Umfassungswände bzw. durch die Bodenplatte verhindert. Eine dampfdichte Feuchtigkeitssperre im Bereich der Bodenfläche verhindert das Eindringen von Feuchtigkeit für den Fall, dass der Speicher ohne Bodenplatte ausgeführt werden kann.

2.2.4.7 Wirtschaftlichkeit

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Speichers spielen die Rahmenbedingungen bzw. das Umfeld in dem der Speicher errichtet werden soll, aber auch die Größe des Speichers eine wesent-

liche Rolle. Als Richtwert können für die Baukosten eines Speichers mit ca. 1000 m³ Speichervolumen bei normalen Grundstückverhältnissen (kein Grundwasser, Kies) ca. 120 €/m³ Speichervolumen angesetzt werden.

2.2.4.8 Schichtenwasser

Beim Bau des Saisonspeichers für die im Forschungsvorhaben ausgeführte Pilotanlage musste die Tatsache berücksichtigt werden, dass sich etwa in 3 m Tiefe, unterhalb des fertigen Fußbodens Schichtenwasser mit einer Mächtigkeit von ca. 20 cm befindet. Um den Einfluss des Schichtenwassers hinsichtlich der Energieverluste des Speichers ausschließen zu können, wurde der Bereich um den Speicher bis in tieferliegende wasserundurchlässige Schichten mit Spundwänden vom angrenzenden Untergrund getrennt. Dadurch konnte verhindert werden, dass der Speicher durch unterhalb der Bodenplatte vorbeiströmendes Schichtenwasser ausgekühlt wird. Zusätzlich wurden die Umfassungsflächen (Wände und Boden) als wasserdichte Wanne (Rissebeschränkung und Abdichtung) ausgebildet, was das Einbringen einer massiven Bodenplatte als bauliche Absperrung notwendig machte.

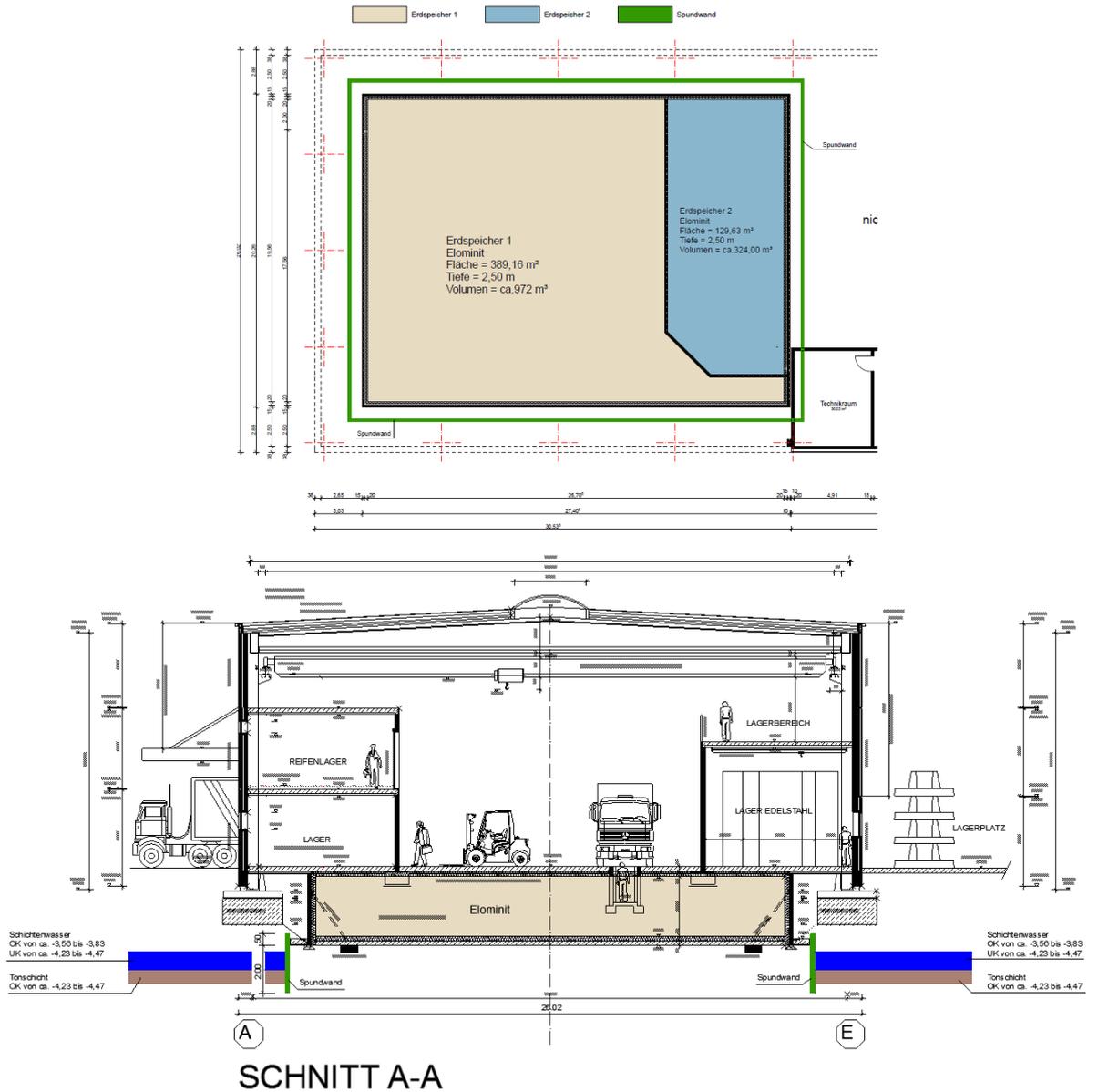


Abb. 12: Schemagrundriss (oben), Schemaschnitt (unten) der ausgeführten Pilotanlage mit Langzeitwärmespeicher.



Abb. 13: Aufbau des Wärmespeichers: 20 cm starke umlaufende Perimeterdämmung, Verlegung von Temperatursensoren (a); Verfüllvorgang mit Elektroofenschlacke (Elominit) (b); Verbundrohre in doppelter Lage in einer Sandschicht (c); Wärmedämmung an der Speicheroberfläche, perforierte Kunststoffrohre zur nachträglichen Befeuchtung der Speicherfüllung (d).

2.2.5 Hinweise für die Gebäudeplanung

Um die Massivabsorbertechnologie in Verbindung mit dem Saisonspeicher als energetisches Konzept planerisch umsetzen zu können, sollten bereits in der Vorentwurfsphase der Gebäudeplanung einige Überlegungen angestellt werden. Folgende Punkte sind hierbei zu beachten:

- Ausrichtung des Gebäudes

Das Gebäude sollte auf dem Grundstück so situiert werden, dass eine auf die Massivabsorbertechnologie abgestimmte Ausrichtung möglich ist. Große zusammenhängende Flächen mit Süd- bzw. Westausrichtung begünstigen die spätere Energieversorgung.

- Anordnung der Fensterflächen

Zusammenhängende Fensterbänder bzw. stehende Fenster sind einer Einzelbefensterung vorzuziehen. Durch das Zusammenfassen der Fenster ergeben sich zusammenhängende großformatige Flächen für das Anordnen der Massivabsorber.

Die natürliche Belichtung der Hallenflächen sollte vorzugsweise über Dachkuppeln bzw. Lichtbänder im Dachbereich erfolgen.

- Dachüberstände:

Auf Vordächer oder Dachüberstände sollte möglichst verzichtet werden, um eine Verschattung der Massivabsorberflächen auszuschließen.

- Gliederung der Fassade:

Eine kleinteilige Gliederung der Fassadenfläche durch Fugen bzw. Trennfugen hilft, die notwendige Unterteilung der Wandplatten gestalterisch in das Gesamtkonzept mit einzubinden.

3 Funktion und Auslegung des Massivabsorber-Heizsystems

Zur Ermittlung des energetisch und wirtschaftlich günstigsten Konzepts für das Massivabsorber-Heizsystem wurden mehrere Systemvarianten untersucht. Vorgeschaltet wurde die Strategie für die Belegung der Fassaden mit Massivabsorberflächen für die Gewinnung von Wärme zur direkten oder mittelbaren Gebäudebeheizung und für die Speicherladung diskutiert. Im Ergebnis zeigte sich für die Südfassade die bei Weitem beste Wirkung des Massivabsorbers mit annähernd doppeltem spezifischem Wärmeertrag im Vergleich zur West- oder Ostfassade, weswegen für die weitere Konzeption des Massivabsorber-Heizsystems vorzugsweise die Nutzung der Südfassade festgelegt wurde. Die Hauptuntersuchung konzentrierte sich auf unterschiedliche Speicherkonfigurationen. Ausgehend von einem Langzeitwärmespeicher auf der Quellenseite der Wärmepumpe wurde in einer Variante der Quellspeicher geteilt, um ein effizienteres Nachladen des Speichers während der Heizperiode zu ermöglichen. Derselben Zielsetzung folgend wurde in einer weiteren Variante der Wärmespeicher auf der Sekundärseite der Wärmepumpe platziert und abschließend je ein Wärmespeicher auf der Primär- und Sekundärseite der Wärmepumpe vorgesehen. Dabei zeigte sich das Konzept mit einem Wärmespeicher als Quelle der Wärmepumpe am wirtschaftlichsten. Die weitere Darstellung befasst sich mit dieser Systemkonfiguration.

Als Kennzahlen für die Bewertung des Heizsystems wurden die Wärmegestehungskosten und die primärenergiebezogene Systemeffizienz (Heizzahl) verwendet. Das Verhältnis von Heizzahl zu Wärmepreis diente zur Bestimmung der wirtschaftlichsten Auslegung.

Nach Ermittlung der zu bevorzugenden Systemvariante wurde für die Dimensionierung eine umfangreiche Parametervariation durchgeführt, um mittels kombinierter multivariater Regression die Speichergröße in Abhängigkeit des Wärmebedarfs und der Fassadenbelegung abschätzen zu können. Eine entsprechende Regression wurde ebenfalls für die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und das als Effizienzkriterium verwendete Verhältnis von Heizzahl zu Wärmepreis durchgeführt. Das Dimensionierungsverfahren wurde am Beispielgebäude überprüft und erreicht eine Genauigkeit von über 95 %.

3.1 Systembeschreibung

3.1.1 Gebäude

Die Bewertung des Systemkonzepts erfolgte anhand eines Beispielgebäudes unter Verwendung eines detaillierten Systemmodells unter Verwendung der Simulationssoftware TRNSYS.

Das Gebäude stellt eine Industrie- oder Gewerbehalle dar, ist nicht unterkellert und besitzt die Abmessungen 25 x 50 x 10 m (Breite x Länge x Höhe), siehe Abb. 14. Der ganze Hallenraum wird

als eine Zone betrachtet ohne Abtrennung einzelner Räume. Die große Fassadenseite ist nach Süden orientiert. Als Standort wurde München gewählt. Das Gebäude ist mit einem Wärmeschutz gemäß der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV 2016, §4 Abs. 2) versehen.

Die Standardfassade besteht aus einer stahlarmierten Tragschale (16 cm), zugehöriger Wärmedämmung (14 cm mit $\lambda_{iso} = 0,031 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) und einer Vorsatzschale (7 cm), ebenfalls aus Beton.

Die Benutzung des Gebäudes wird einheitlich vorab festgelegt. Zwischen 7:00 und 18:00 Uhr wirkt die Infiltration mit $0,2 \text{ h}^{-1}$. Außerhalb dieser Betriebszeit findet angesichts der dichten Ausführung der Gebäudehülle kein Luftwechsel statt. Der Heizbetrieb ist in der Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende April aktiviert.

Die dynamische Gebäudesimulation liefert folgendes Ergebnis:

- Raumsolltemperatur: $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Normaußentemperatur für München: $-16 \text{ }^\circ\text{C}$
- Wärmebedarf: 84033 kWh a^{-1} ; $67,2 \text{ kWh m}^{-2} \text{ a}^{-1}$
- Heizlast im Auslegungsfall ($20 \text{ }^\circ\text{C}$): $58,3 \text{ kW}$; $46,6 \text{ W m}^{-2}$
- Heizlast ($21 \text{ }^\circ\text{C}$): $60,2 \text{ kW}$; $48,2 \text{ W m}^{-2}$
- Vollbenutzung: 1441 h a^{-1}

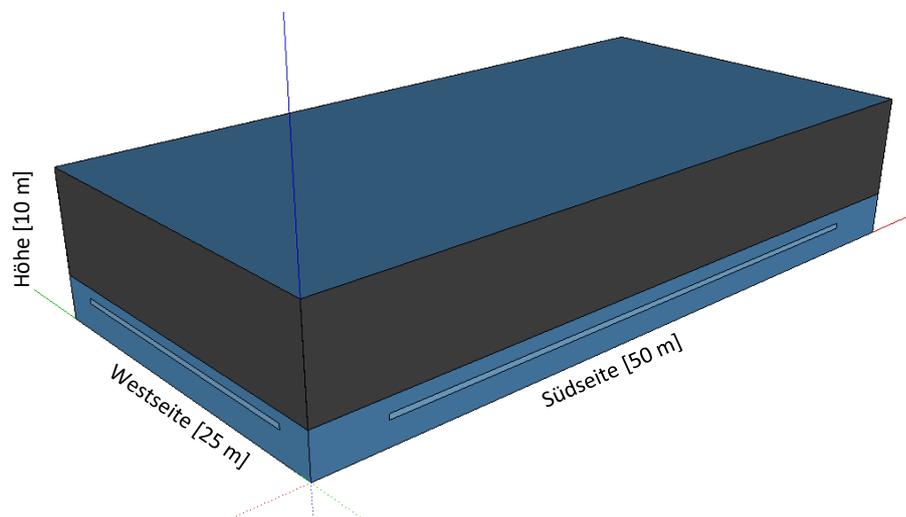


Abb. 14: Beispielgebäude; dunkler Bereich symbolisiert die Fläche in der eine thermisch aktivierte Massivabsorberfassade vollständig oder teilweise eingesetzt werden kann

3.1.2 Massivabsorber

Für den Massivabsorber wurde folgende Bauform zugrunde gelegt

- Wärmeträgerrohr (Kunststoff/Alu-Verbund) $D_i = 20 \text{ mm}$

- Verlegeabstand $d_x = 200 \text{ mm}$
- Strömungsgeschwindigkeit Wärmeträger $w_{max} = 0,5 \text{ m s}^{-1}$
- Massivabsorber, Elementgröße $A = 9,03 \text{ m}$

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Kollektorparameter zur Simulation des Wärmeertrags gemäß DIN EN ISO 9806:2014-06.

Tabelle 2: Kollektorparameter des Massivabsorbers gemäß DIN EN ISO 9806:2014-06

Kollektorparameter	Einheit
$\eta_0 = 0,5695$	[-]
$c_6 = 0,03240$	[s m ⁻¹]
$c_1 = 7,0753$	[W m ⁻² K ⁻¹]
$c_2 = 0$	[W m ⁻² K ⁻²]
$c_3 = 1,0979$	[J m ⁻³ K ⁻¹]
$c_4 = 0,34116$	[-]
$c_5 = 176,6$	[kJ m ⁻² K ⁻¹]

3.1.3 Wärmeerzeuger

Als Wärmeerzeuger wird eine Standardwärmepumpe mit nicht leistungsgeregelten Verdichtern eingesetzt. Die Charakteristik der hier verwendeten Wärmepumpe entspricht dem Typ Viessmann Vitocal 300-G (Typ 301.A45), welche auch in der Pilotanlage (Schlosserei) des Forschungsprojekts zum Einsatz gekommen ist. Abhängig von den Eintrittstemperaturen in den Verdampfer und Kondensator ergeben sich die Wärmeleistung und die elektrische Antriebsleistung.

Für die Betrachtung anderer Gebäu-
degrößen wird eine Skalierung der Wärme-
pumpenleistung bei unveränderter Betriebscharakteristik vorgenommen. Die idealisierte Wärmepumpe besteht aus drei identischen Verdichtern, die abhängig von der Heizlast zu- oder abgeschaltet werden. Da die Heizlast direkt von der Außenlufttemperatur abhängt, wird der Bereich zwischen 20 °C und -16 °C entsprechend der Verdichteranzahl unterteilt. Bei Temperaturen niedriger

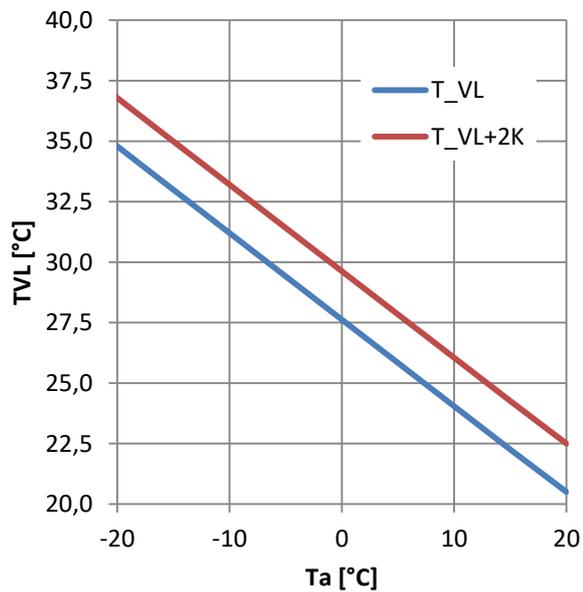


Abb. 15: Vorlauftemperatur der Bodenheizung des Beispielgebäudes für 20 °C Raumtemperatur

als -4 °C arbeiten alle drei Verdichter. Zwischen -4 und 8 °C nur zwei und oberhalb von 8 °C Außenlufttemperatur nur ein Verdichter. Für den Auslegungsfall gelten die Daten aus Tabelle 3.

Tabelle 3: Auslegungszustand der Wärmepumpe für das Beispielgebäude

Eigenschaft	Wert	Einheit
Anzahl Verdichter	3	-
Wärmeleistung (B0W35)	60,2	kW
Antriebsleistung (B0W35)	13,1	kW
Kälteleistung (B0W35)	47,1	kW
COP (B0W35)	4,6	-
Durchfluss Verdampfer (Wasser-Glykol-Gemisch 35 %)	15511	kg h ⁻¹
Durchfluss Kondensator (Wasser)	10783	kg h ⁻¹

Für das Beispielgebäude wurde mittels TRNSYS-Systemsimulator für verschiedene Außenlufttemperaturen die Vorlauftemperatur bestimmt, bei der sich im stationären Zustand der Sollwert der Raumtemperatur (20 °C) erreicht wird. Für den dynamischen Betrieb zu Erreichung einer realistischen Aufheizzeit wurde die Vorlauftemperatur um 2 K angehoben (siehe Abb. 15).

3.1.4 Wärmeverteilung

Werden Gebäude errichtet, wird eine detailgetreue Planung der einzelnen Gewerke durchgeführt. Ändern sich Anzahl oder Größe einzelner Anlagenteile, führt dies meist zu einer Vielzahl an Änderungen anderenorts. Werden am Beispielgebäude Vorsatzschalenelemente im Zuge der Variantenstudie in Massivabsorber getauscht, verändern sich auch Dimension und Anzahl der Versorgungsleitungen.

Für die Ermittlung der Investitionskosten zur Erstellung des hydraulischen Systems wird folgende Festlegung getroffen: Die Technikzentrale, von der aus die Verteilleitungen zu den Anlagenkomponenten führen, wird zentral im Beispielgebäude platziert, siehe Abb. 16.

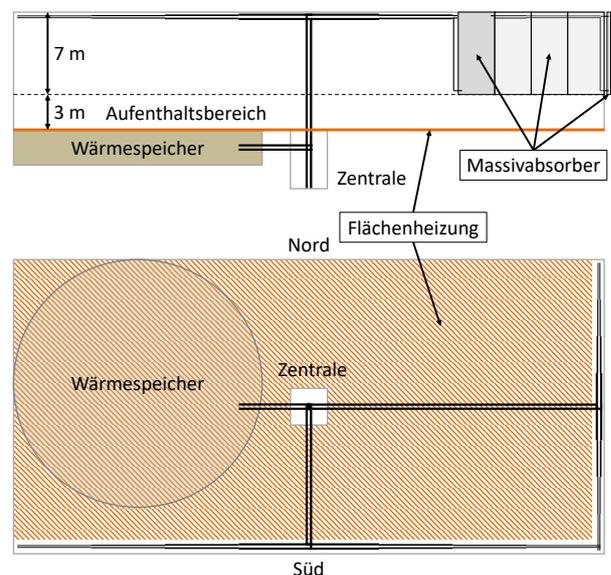


Abb. 16: Skizze des Beispielgebäudes mit Darstellung der Position der Anlagenkomponenten; oben: Seitenansicht; unten: Draufsicht

3.1.5 Wärmespeicher

Der Wärmespeicher wird unter dem Gebäude platziert, um die nutzbare, begehbare Hallenfläche nicht zu verkleinern. Für die Erdwärmespeicher wird eine Solltiefe als maximale vertikale Abmessung von 4 m festgesetzt. Bei kleineren Tiefen vergrößert sich die Oberfläche entsprechend, wodurch das A/V-Verhältnis steigt und die Wärmeverluste zunehmen. Damit das A/V-Verhältnis kleinstmöglich wird, wird eine zylindrische Bauform verwendet.

Als Speichermaterial wurden zwei Optionen untersucht: Elektroofenschlacke und Kies. Der günstigere Kies besitzt eine geringere Wärmekapazität und benötigt daher ein größeres Volumen, woraus sich insgesamt höhere Kosten in Anschaffung und Betrieb ergeben.

3.1.6 Betrieb der Massivabsorber-Fassaden

Die Fassaden am Gebäude sind zu den vier Haupthimmelsrichtungen hin orientiert und erhalten tageszeitabhängig unterschiedlich viel solare Strahlungsenergie. Demzufolge erwärmen sich die Fassaden differenziert und eignen sich teilweise nicht für einen gleichzeitigen Betrieb.

3.2 Hydraulisches System und Betriebskonzept

3.2.1 Systemverschaltung

Das Massivabsorber-Heizsystem verfügt über einen Langzeitwärmespeicher, der mit der Quelle der Wärmepumpe verbunden ist. Über die Massivabsorber kann in den Sommermonaten der Speicher geladen werden. Wenn es die Wetterbedingungen und der Heizbetrieb erlauben, ist auch eine Beladung während der Heizperiode möglich. Beginnt die Heizperiode, wird in der Anlagenregelung geprüft, ob geheizt werden soll und wenn ja, welche Wärmequelle dafür herangezogen werden soll.

Im Funktionsschema, siehe Abb. 17, ist die Verschaltung aller benötigten Komponenten dargestellt. Die Massivabsorber liefern Wärme an den Wärmespeicher oder an den Verdampfer der Wärmepumpe. Zusätzlich wird untersucht, ob eine direkte Wärmelieferung über den Wärmeübertrager ins Gebäude (Direktheizung) möglich ist. Die von der Wärmepumpe abgegebene Nutzwärme wird in den Wärmeverteiler eingespeist. Dort sind die Heizkreise für die Fußbodenheizung (FBH) und Bauteilaktivierung (BTA) angeschlossen. Der zusätzlich vorhandene Pufferspeicher auf der Sekundärseite der Wärmepumpe hat die Aufgabe einen taktenden Betrieb der Wärmepumpe zu verhindern.

An der Verteilerstation für die angebundenen Massivabsorberfassaden ist für jede einzelne davon eine eigene Pumpstation aufgebaut. Der Wärmespeicher wird über die Steuerungsschaltung je nach Betriebszustand be- und entladen. Die Wärmepumpe und der Wärmeübertrager trennen das System in einen primären und sekundären Kreis; auf der Primärseite wird ein Glykol-Wasser-Gemisch als Frostschutz eingesetzt und auf der Sekundärseite reines Wasser.

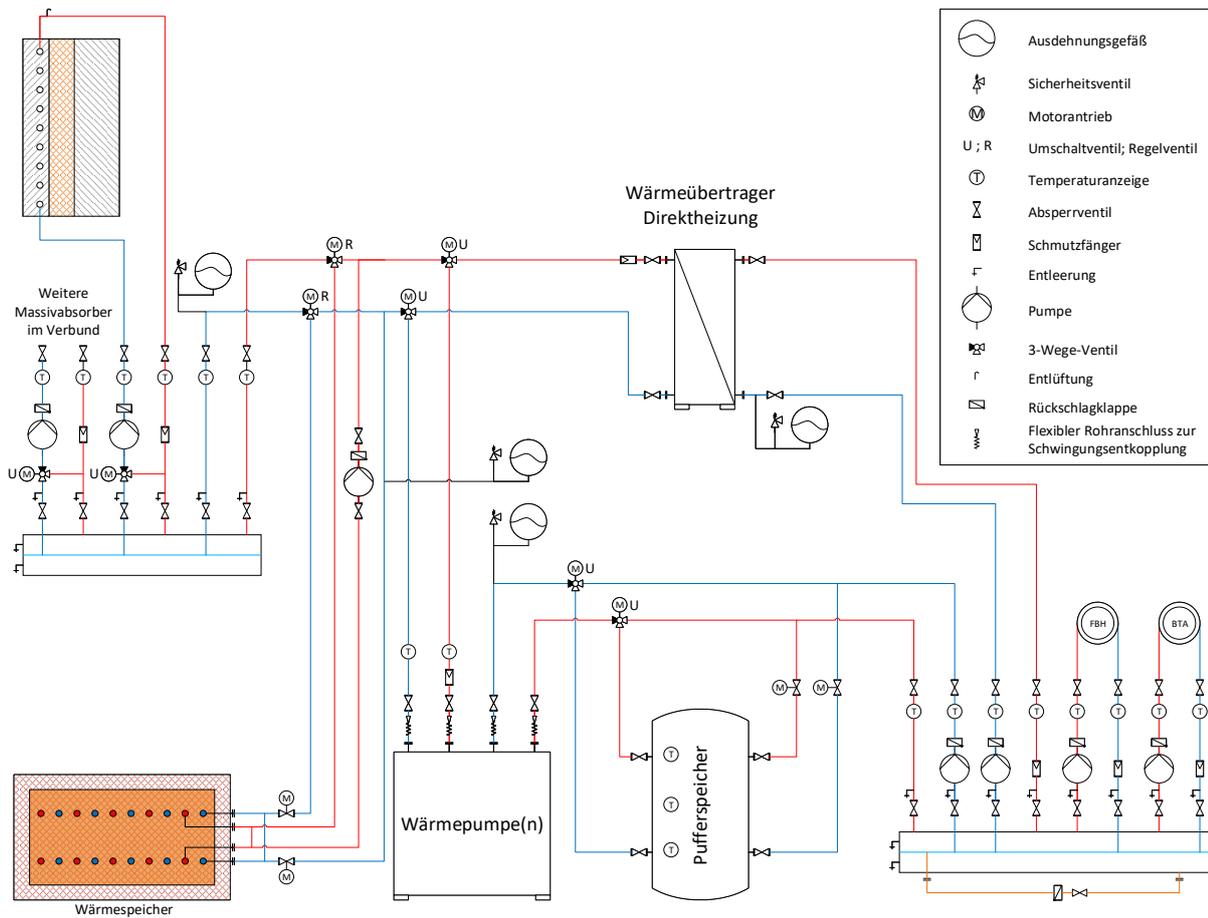


Abb. 17: Funktionsschema

3.2.2 Betriebsweise, Regelung

Während des Anlagenbetriebs wird kontinuierlich geprüft, welcher Betriebszustand von den Anlagenteilen eingenommen werden soll. Die Aktivierung der Betriebszustände erfolgt auf der Grundlage einer Betriebskriterienmatrix. Für jeden Betriebszustand gibt es eine Anforderung, die für die Aktivierung und das Beibehalten eines laufenden Betriebs notwendig ist. Sobald ein Betrieb bereits aktiv ist, wird kontinuierlich überprüft, ob die Bedingungen noch eingehalten werden. Ist dies nicht der Fall, muss der Betrieb beendet werden. Darüber hinaus werden Abbruchbedingungen genannt, die als Wächterfunktion agieren. Sie übernehmen z.B. den Schutz der Wärmepumpe vor zu tiefen oder zu hohen Temperaturen am Verdampfer.

Jeder Hauptbetriebszustand, der vom System eingenommen werden kann, erhält eine eindeutige Hierarchienummer *HIB*. Der Betriebszustand mit dem größeren Wert hat stets Vorrang. Neben den *HIB*-Werten gibt es eine weitere Untergliederung mancher Betriebszustände. Diese werden mit den Buchstaben a, b oder c bezeichnet. Mit „a“ wird dabei der Hauptzustand der Anlagenfahrweise beschrieben. „b“ und „c“ bezeichnen zugehörige Untervarianten. D.h. nur wenn ein „a“ Zustand

aktiv ist, kann auch der entsprechende „b“ oder „c“ Zustand aktiv werden, wenn dessen Bedingungen eingehalten werden. Dies ermöglicht z.B. im Heizfall die gleichzeitige Versorgung der Wärmepumpe durch den Massivabsorber und die Beladung des Speichers mit überschüssiger Massivabsorberwärme.

Die Hysteresen geben für die einzelnen Bedingungen die obere (UDB) und untere Totzone (LDB) an. Die obere Totzone ist für den Betriebsstart maßgebend und die untere für den laufenden Betrieb.

Tabelle 4 zeigt die Betriebskriterienmatrix für das Massivabsorber-Heizsystem. Die Betriebsart MA-FBH (5a) (Direktheizung von Massivabsorber auf Bodenheizung) ist gegenüber allen andern Zuständen favorisiert. Hier wird nur Pumpenergie und Energie für die Anlagensteuerung benötigt. Ist der Wärmeertrag aus dem Massivabsorber groß genug, kann gleichzeitig der Wärmespeicher geladen werden: MA-SP (5b). Die energetisch zweitgünstigste Variante ist die Direktheizung aus dem Wärmespeicher, SP-FBH (4), bei der ebenfalls nur Pumpenergie aufgewendet werden muss. Erst nach Prüfung dieser Betriebszustände erfolgt der Wärmepumpenbetrieb mit der Massivabsorberquelle: MA-WP-FBH (3a). Hier ist ebenfalls eine gleichzeitige Speicherladung möglich: MA-SP (3b). Auf niedrigster Hierarchiestufe befindet sich der Heizbetrieb mit Nutzung des Wärmespeichers als Wärmepumpenquelle: SP-WP-FBH (2). Liegt keine Heizanforderung mehr vor, kann Betrieb MA-SP (1) aktiviert und einzig der Wärmespeicher beladen werden.

Dabei sind zusätzlich folgende Bedingungen einzuhalten: Bei der Direktheizung muss die Speichertemperatur mindestens der Vorlauftemperatur entsprechen ($T_{sp} \geq T_{VL,soll}$). Nutzt die Wärmepumpe den Speicher als Quelle, muss die Speichertemperatur der minimal zulässigen Speichertemperatur entsprechen ($T_{sp} \geq T_{sp,min}$). Die Begrenzung ergibt sich über die gewählte Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Wärmeträger ΔT_{sp-fl} . Da aus Frostschutzgründen 0 °C im Speicher nicht unterschritten werden dürfen folgt: $T_{sp,min} = 0\text{ °C} + \Delta T_{sp-fl}$.

Tabelle 4: Betriebskriterienmatrix

Bedingung	Betrieb (HIB) Priorität steigend →						Hysterese		
	MA-SP (1)	SP-WP-FBH (2)	MA-WP-FBH (3a)	MA-SP (3b)	SP-FBH (4)	MA-FBH (5a)	MA-SP (5b)	obere Totzone (UDB)	untere Totzone (LDB)
$\dot{Q}_{Geb} > 0 \text{ kW}$								0	0
$T_{in,Ma} \geq T_{Tau}$								5	-1
$T_{e,Ma} \geq T_{VL,Soll}$								8	-1
$T_{e,Ma} \geq T_{Sp}$								4	2
$T_{e,Ma} \geq 0 \text{ °C}$								0	-10
$\dot{q}_{Ma} \geq 0 \text{ W m}^{-2}$								0	-5
$T_{Sp} \geq T_{VL,Soll}$								1	-0,5
$T_{e,Ma,G} \geq T_{Sp}$								4	2
$T_{Sp} \geq T_{Sp,min}$								2	0,1
$P_{el,Nhzg} = 0 \text{ kW}$								0	0
Abbruch									
$T_{WP,pr,in,min} \geq T_{WP,pr,in}$								0	-10
$T_{WP,pr,in} \geq T_{WP,pr,in,max}$								0,5	0,5
$0 \text{ °C} \geq T_{SP,in}$								1	$-T_{Sp,min}$

Legende:

- \dot{Q}_{Geb} Momentaner Wärmebedarf des Gebäudes
- $T_{in,Ma}$ Eintrittstemperatur in den Massivabsorber
- T_{Tau} Taupunkttemperatur
- $T_{e,Ma}$ Austrittstemperatur aus dem Massivabsorber
- $T_{VL,Soll}$ Sollvorlauftemperatur zur Deckung des Heizbedarfs; ermittelt aus der Heizkurve
- T_{Sp} Speichertemperatur, hier Mittelwert
- \dot{q}_{Ma} Spezifischer Wärmeertrag des Massivabsorbers
- $T_{e,Ma,G}$ Gesamtaustrittstemperatur aller aktiven Massivabsorber; Mischtemperatur
- $T_{Sp,min}$ Erwünschte, minimale mittlere Speichertemperatur; vereinfacht ermittelbar nach: $T_{Sp,min} = 0\text{°C} + \Delta T_{Sp-Fl}$
- $P_{el,Nhzg}$ Momentane elektrische Leistung der Nachheizung
- $T_{WP,pr,in,min}$ Minimal zulässige Eintrittstemperatur in den Verdampfer
- $T_{WP,pr,in}$ Momentane Eintrittstemperatur in den Verdampfer
- $T_{WP,pr,in,max}$ Maximal zulässige Eintrittstemperatur in den Verdampfer
- $T_{SP,in}$ Momentane Eintrittstemperatur in den Wärmespeicher

Die Direktheizung, $HIB = 4$, entzieht dem Wärmespeicher Energie, wenn dessen Temperatur ausreicht für die Versorgung der Fußbodenheizung. Dies geschieht überwiegend zu Beginn der Heizperiode, wenn das Temperaturniveau hoch genug ist. Die entnommene Wärme steht damit nicht mehr für den Heizbetrieb *mit* Wärmepumpe zur Verfügung. Daher ist zu prüfen, ob sich eine Verbesserung einstellt, wenn dem Heizbetrieb MA-WP-FBH (3a) hier Vorrang gegeben werden sollte. Damit wird die Wärmelieferung durch den Massivabsorber der direkten Wärmenutzung aus

dem Speicher vorgezogen. Der direkte Heizbetrieb mittels Speicher wird damit so lange wie möglich unterdrückt. Die neuen Betriebsarten sind somit MA-SP (1), SP-WP-FBH (2), SP-FBH (3), MA-WP-FBH (4a), MA-SP (4b), MA-FBH (5a) und MA-SP (5b). Die Nutzung des Massivabsorbers mit Wärmepumpe steigt dadurch in der Hierarchie der Betriebszustände, wodurch sich dessen Einsatzpriorität erhöht. Der Wärmeinhalt des Speichers bleibt länger in Reserve.

3.3 Anlagenfunktion und Energiebilanz

Das Ziel der Systemkonzeption und Auslegung der Komponenten besteht in einer sicheren Wärmelieferung während der gesamten Heizperiode mit möglichst geringem Einsatz an elektrischer Antriebsenergie für die Wärmepumpe, die Wärmeträgerumwälzung in den verschiedenen Kreisen und die Anlagensteuerung.

Die umgesetzten Wärmemengen und der Temperaturverlauf des Wärmespeichers sind in Abb. 18 bis Abb. 24 dargestellt. Wie aus Abb. 18 und Abb. 19 hervorgeht, wird die Wärmeversorgung des Gebäudes jeweils etwa zur Hälfte über die Massivabsorber und den Wärmespeicher als Wärmequelle für die Wärmepumpe gedeckt. Die Direktheizung mittels Wärmespeicher kann nur in den ersten drei Wochen der Wärmeanforderung genutzt werden. Später reicht die Temperatur des Speichers nicht mehr aus und die Wärmepumpe wird aktiviert. Gemäß der Simulation ist in geringem Umfang der Einsatz der elektrischen Nachheizung erforderlich. Dies kann jedoch bei entsprechend träger Regelung des Systems unterbunden werden.

Die Effizienz des Wärmepumpenbetriebs ist über die jeweiligen Arbeitszahlen dargestellt. Sie liegen aufgrund der hohen Quellentemperaturen etwa zwischen 7 und 8. Diese hohen Werte sind ein Beleg dafür, dass die Systemkomponenten passend dimensioniert wurden.

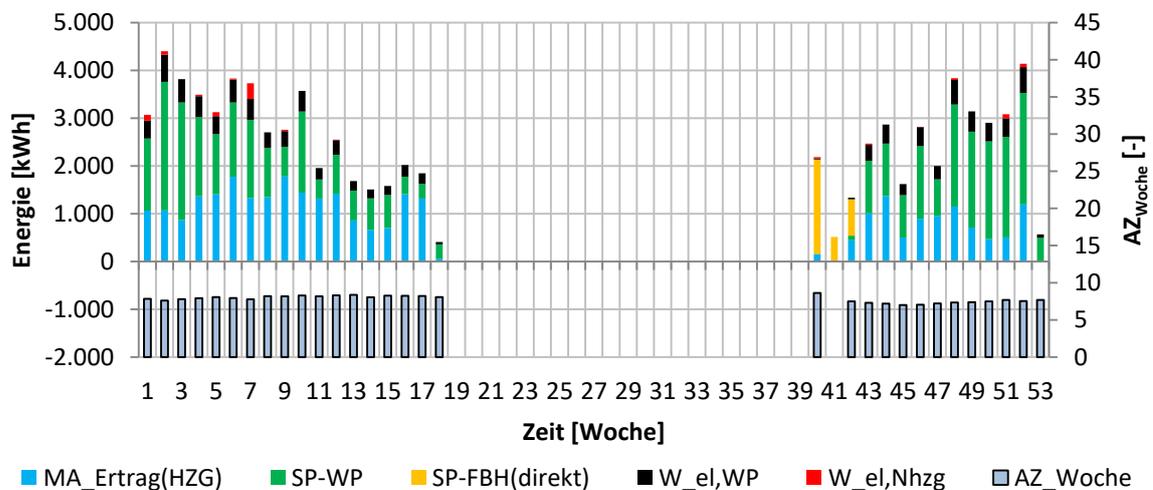


Abb. 18: Wöchentliche Energieumsätze und Wärmepumpeneffizienz

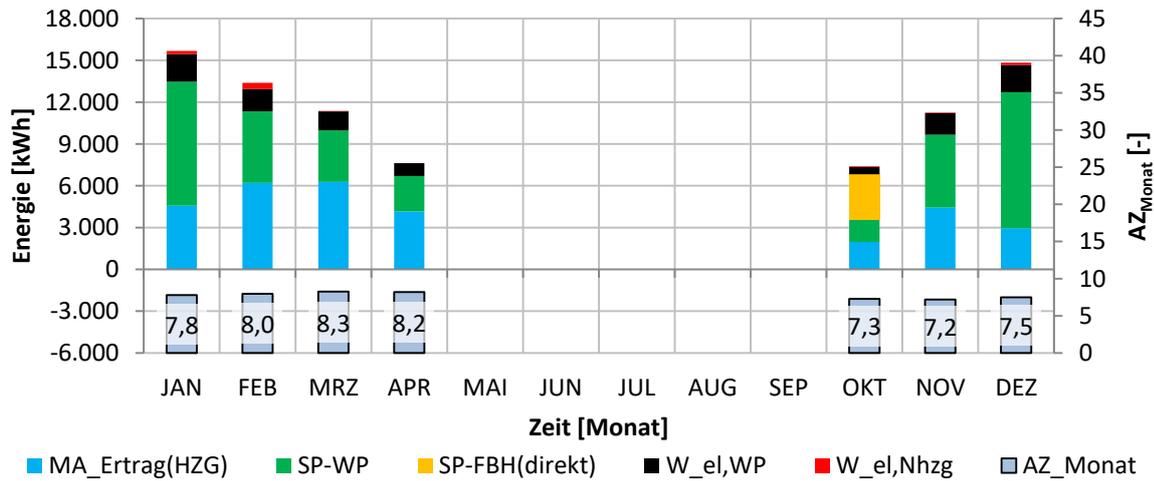


Abb. 19: Monatliche Energieumsätze und Wärmepumpeneffizienz

Wird die Wärmelieferung des Massivabsorbers näher betrachtet, siehe Abb. 20 und Abb. 21, fällt auf, dass die Speicherladung aufgrund der niedrigeren Temperaturen von März bis Mai vergleichsweise hoch ist. Zwar wird die höchste mittlere Speichertemperatur erst etwa im August erreicht, aber der höhere Sonnenstand und die stets steigenden Speichertemperaturen wirken einer fortwährenden Beladung entgegen.

Die Direktheizung über die Massivabsorber konnte nur in Woche 42 erreicht werden. Ein Verzicht auf die Umsetzung dieses Anlagenzustands wäre daher ohne große Auswirkungen denkbar. Hingegen ist der gemeinsame Betrieb von Massivabsorber und Wärmepumpe über die gesamte Heizperiode hinweg möglich. Zwar verhindert dies größtenteils das Nachladen des Speichers, allerdings hat zum einen der Heizbetrieb Vorrang und zum anderen sind Nachladephasen aufgrund der niedrigen Umgebungstemperaturen im Winter ohnehin selten möglich.

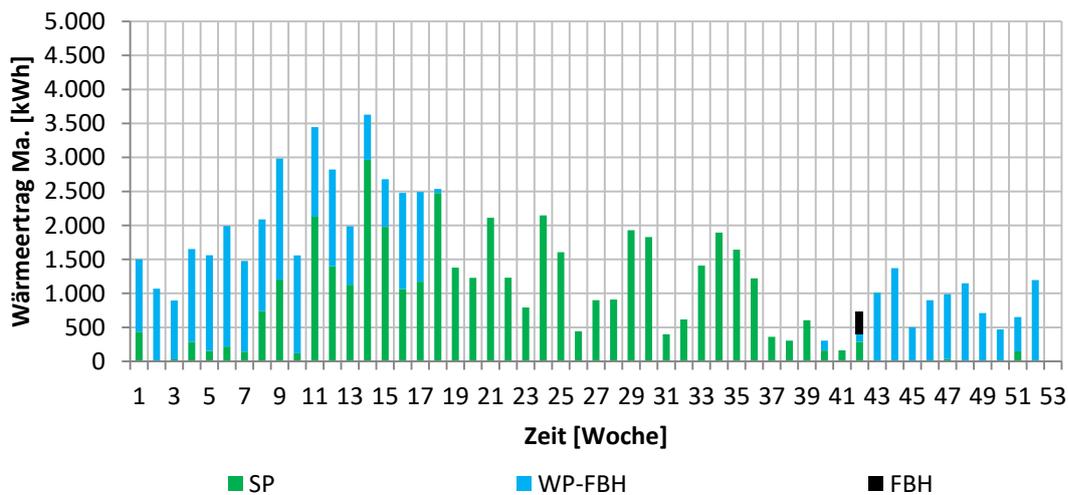


Abb. 20: Wöchentliche Massivabsorbererträge und deren Zuordnung

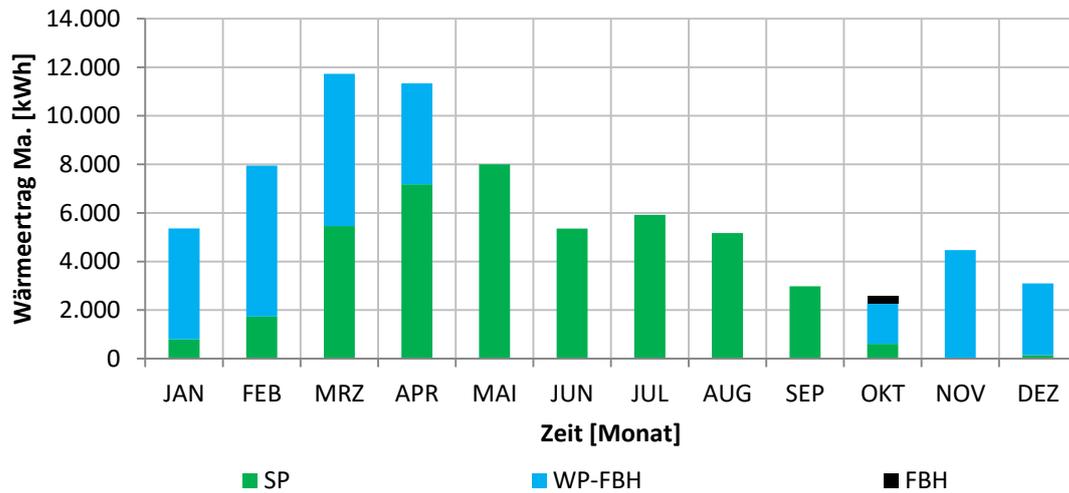


Abb. 21: Monatliche Massivabsorbererträge und deren Zuordnung

Der Wärmespeicher erreicht unter den gegebenen Randbedingungen etwa gegen Mitte bis Ende Februar seine niedrigsten mittleren Temperaturen von ca. 5 °C. Der Höchstwert wird im August mit 30 °C erreicht. Entsprechend dem Temperaturverlauf verhält es sich auch mit den Wärmeverlusten des Speichers an die Umgebung.

Die Lade- und Entladephasen des Speichers sind in Abb. 23 abzulesen. Auch in den Wintermonaten gibt es Zustände, die ein Nachladen erlauben, wenngleich der Anteil sehr gering ist. Ebenfalls zu erkennen ist, dass von Januar bis April die Nutzung des Speichers zu Heizzwecken deutlich zurückgeht, da vermehrt Wärme über den Massivabsorber dem Gebäude zugeführt werden kann.

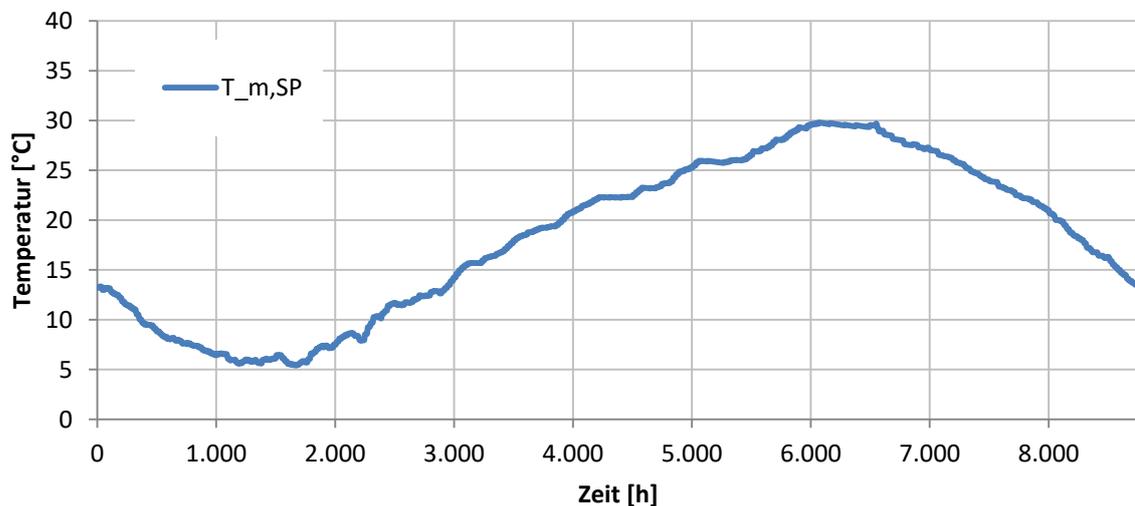


Abb. 22: Wärmespeichertemperaturverlauf

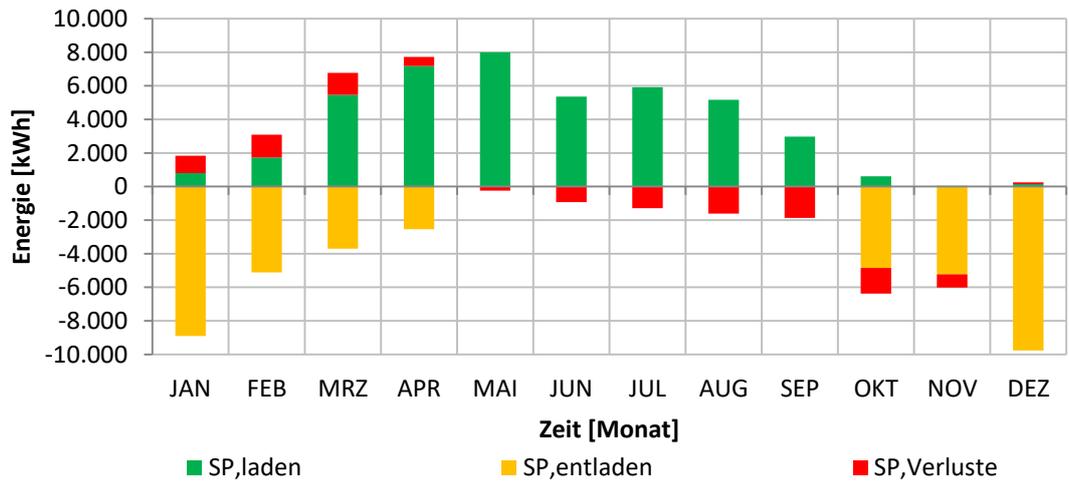


Abb. 23: Monatliche Wärmespeicherenergiebilanz

Die jährliche Energiebilanz, siehe Abb. 24, veranschaulicht nochmals den hohen Anteil der Umweltenergie am Heizwärmebedarf. Die elektrische Arbeit der Wärmepumpen ist analog zu den erwähnten, hohen Arbeitszahlen gering. Die elektrische Arbeit der Pumpen und der Gebäudeleittechnik ist entsprechend der Berechnung ebenfalls gering. Um dies auch bei realen Anlagen zu erreichen und die Systemeffizienz hoch zu halten, sollte die Auslegung der Rohrleitungen und anderer Komponenten stets eine angemessene Abwägung zwischen den Bedarfs- und Investitionskosten beinhalten.

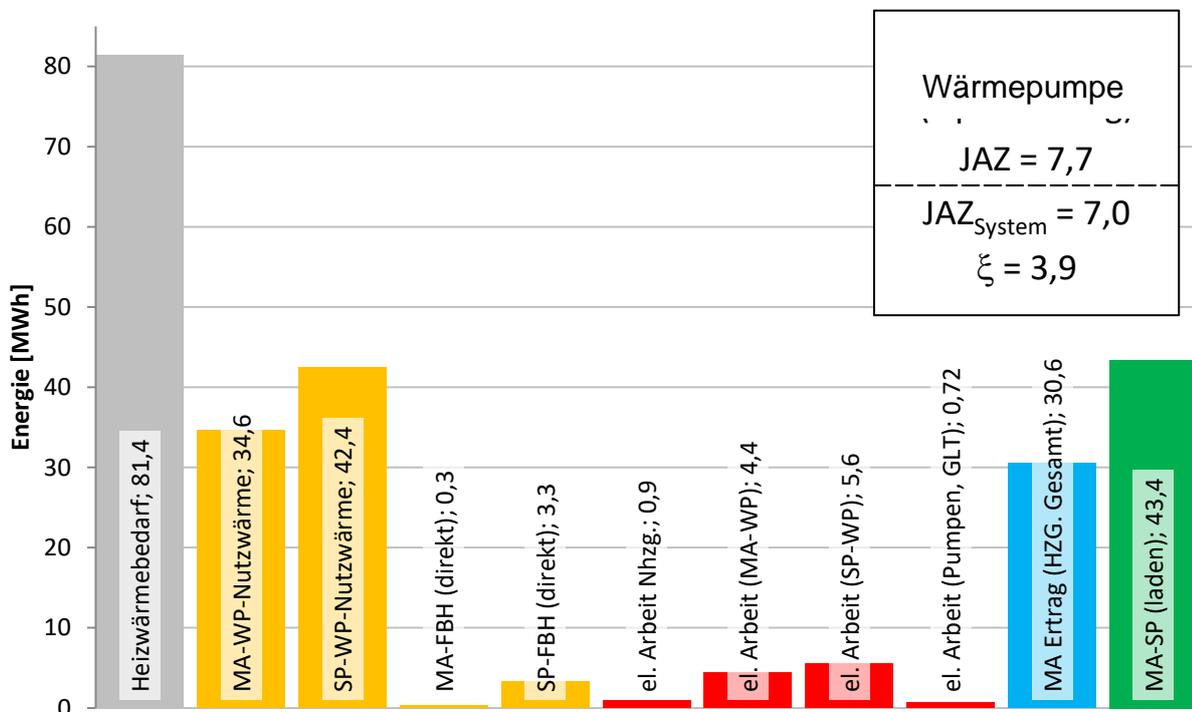


Abb. 24: Jährliche Energieumsätze; Jahresarbeitszahl Wärmepumpe JAZ sowie Jahresarbeitszahl System JAZ_{sys} und Heizzahl ξ

Die in dieser Arbeit beschriebene Systemoptimierung führte zu einer sehr effizienten Systemkonfiguration: Die Jahresarbeitszahl des Systems JAZ_{sys} beträgt 7,0; die Heizzahl ξ stellt den Bezug zum Primärenergieeinsatz her. Sie beträgt 3,9.

3.4 Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen

3.4.1 Grundlage des Verfahrens

Die bisherige Darstellung hat sich auf das in Abschnitt 3.1.1 beschriebene Gebäude bezogen. Im Folgenden wird ein Verfahren für die überschlägige Auslegung des Systems beschrieben, das bei geänderter wärmetechnischer Ausführung des Gebäudes angewendet werden kann. Das Verfahren fußt auf einer Systemanalyse für zwei Gebäudeausführungen identischer Geometrie aber mit stark unterschiedlichem Wärmebedarf. Daraus werden Regeln für die Systemdimensionierung für unterschiedliche Gebäudeeigenschaften abgeleitet. Zur Darstellung des Verhaltens eines Gebäudes mit deutlich geringerem Wärmebedarf werden im Modell die Wärmeverluste des Gebäudes so weit vermindert, dass sich eine Heizlast von 25,1 kW bei -16 °C und ein Jahreswärmebedarf von 45733 kWh a^{-1} ergeben. Der Wärmebedarf ist somit gegenüber der Referenz etwa halbiert. Darüber hinaus werden die Heizkurve und die Rohraufteilung in der Bodenheizung entsprechend der verminderten Wärmeanforderung angepasst.

Zur Ableitung der Dimensionierungsregeln wurden durch Simulationsrechnungen der jährliche Energieumsatz und die Systemkosten für die beiden Gebäudesituationen mit einem Jahreswärmebedarf von 45,7 MWh bzw. 84 MWh für eine Vielzahl von Systemauslegungen, bestimmt durch Fassadenbelegung und Wärmespeichergröße, ermittelt. Dabei wurden Fassadenkombinationen mit vorrangiger Massivabsorberbelegung der Südseite und gegebenenfalls zusätzlicher Belegung von Ost- und Westfassade betrachtet.

Aus den für die Analyse gewählten Variationsbereichen ergibt sich der Gültigkeitsbereich des Dimensionierungsverfahrens:

<i>Absolutwerte</i>		<i>Auf Grundfläche bezogen</i>
• $45,7\text{ MWh} \leq Q_{Geb} \leq 84\text{ MWh};$	bzw.:	$36,6\text{ kWh m}^{-2} \leq q_{Geb} \leq 67,2\text{ kWh m}^{-2}$
• $0\text{ m}^2 \leq A_{OST} \leq 175\text{ m}^2;$	bzw.:	$0\text{ m}^2\text{m}^{-2} \leq \tilde{A}_{OST} \leq 0,14\text{ m}^2\text{m}^{-2}$
• $87,5\text{ m}^2 \leq A_{SÜD} \leq 350\text{ m}^2;$	bzw.:	$0,07\text{ m}^2\text{m}^{-2} \leq \tilde{A}_{SÜD} \leq 0,28\text{ m}^2\text{m}^{-2}$
• $0\text{ m}^2 \leq A_{WEST} \leq 175\text{ m}^2;$	bzw.:	$0\text{ m}^2\text{m}^{-2} \leq \tilde{A}_{WEST} \leq 0,14\text{ m}^2\text{m}^{-2}$

Für die weiteren Dimensionierungsgrundsätze werden die spezifischen Werte verwendet. Gebäude mit einem anderen Wärmebedarf, die außerhalb der Absolutwertgrenzen liegen, werden da-

mit entsprechend skaliert. Als zusätzliche Einschränkung wird aufbauend auf den vorangegangenen Untersuchungen eine Südseitenaktivierung vorausgesetzt. Die dortige Massivabsorberfläche muss mindestens $87,5 \text{ m}^2/84 \text{ MWh} = 1,041 \text{ m}^2 \text{ MWh}^{-1}$ betragen. Ost- und Westfassade können zusätzlich genutzt werden. Die Nordseite bleibt ungenutzt.

In Abb. 25 ist die Abhängigkeit des Speichervolumens vom Wärmebedarf für Linien konstanter Massivabsorberfläche und Fassadenorientierung dargestellt. Der Kurvenverlauf basiert auf den Optimierungsergebnissen für die beiden Gebäude mit $45,7$ und 84 MWh a^{-1} Jahreswärmebedarf. Die gewählten Systemkonfigurationen weisen dabei jeweils den Bestwert des Verhältnisses $\xi/k_{\text{Sys},a}$ auf. Zur Übertragung der Ergebnisse auf Gebäude mit anderem Wärmebedarf wird ein quadratisches Polynom verwendet. Damit wird auch eine sinnvolle Aussage für sehr niedrigen Wärmebedarf und entsprechend kleine Speichervolumina möglich.

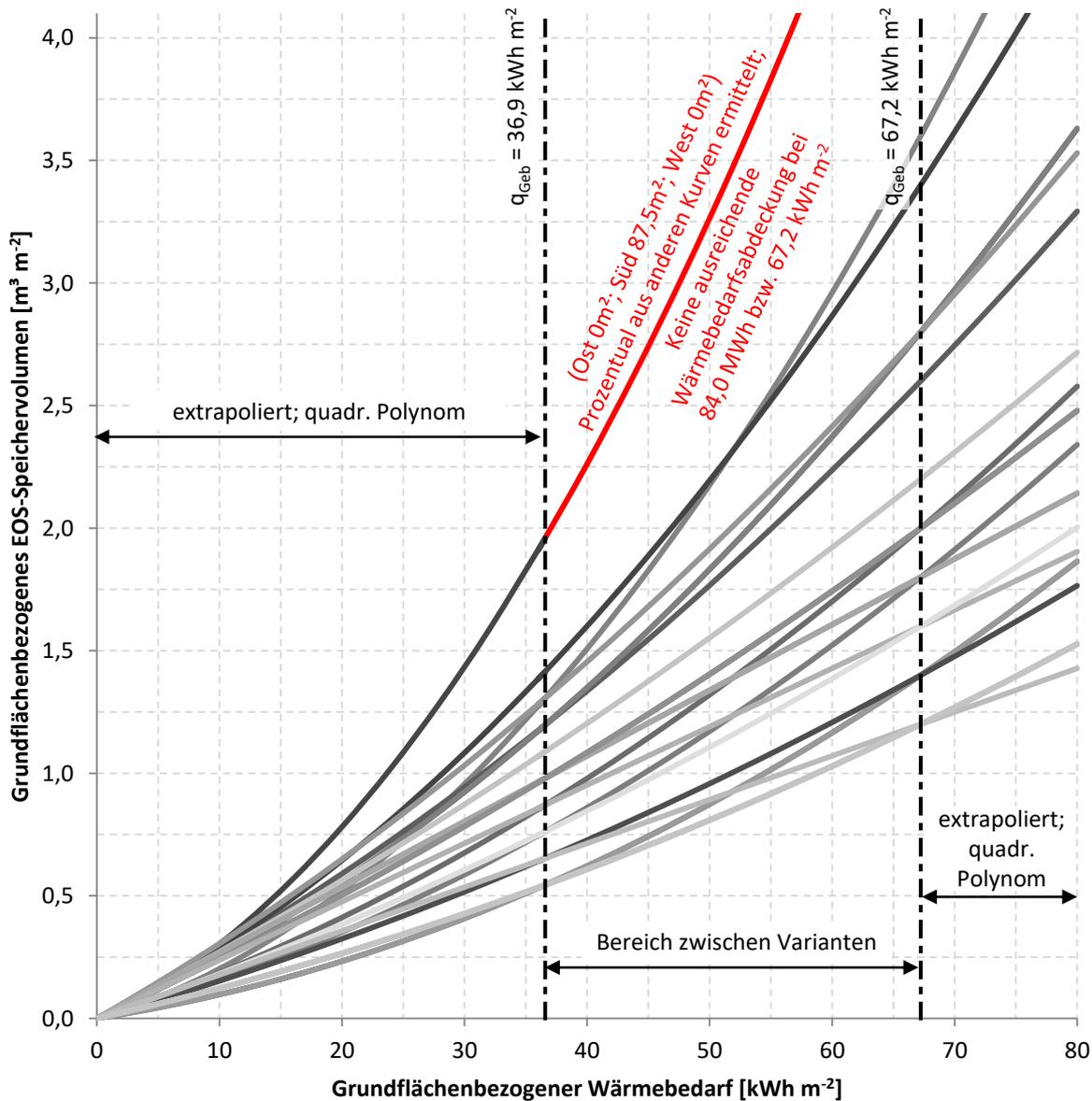


Abb. 25: Abhängigkeit des spezifischen Speichervolumens (mit Speicher material Elektroofenschlacke, EOS) vom spezifischen Wärmebedarf des Gebäudes für optimiertes Verhältnis von ξ zu $k_{\text{Sys},a}$

Die Kurvenverläufe besagen: Je kleiner der Wärmebedarf ist, desto geringer ist das notwendige Speichervolumen und dies bei konstanter Massivabsorberfläche. Im Grenzfall bei sehr kleinem Wärmebedarf ist anzunehmen, dass der alleinige Heizbetrieb mittels Massivabsorber ausreichend ist. Dieser Grenzwert konnte aufgrund des erheblichen Rechenaufwandes jedoch nicht bestätigt werden, weswegen sich eine weitere Detaillierung für den linken Diagrammbereich empfiehlt. Der Bereich zwischen den beiden Wärmebedarfswerten ist jedoch frei von unstetigem Verlauf.

3.4.2 Polynomfunktionen zur Ermittlung von Speichergröße, Energieeinsatz und Systemkosten

3.4.2.1 Polynomfunktion zur Ermittlung der Speichergröße

Die Regressionsanalyse der Modellierungsergebnisse liefert eine mehrdimensionale Polynomfunktion zur Bestimmung des benötigten Speichervolumens in Abhängigkeit von der gewählten Massivabsorberbelegung der Ost-, Süd-, und Westfassade.

Die Hauptform der Bestimmungsgleichung für das Speichervolumen ist ein quadratisches Polynom, ohne y-Achsenabschnitt p_0 :

$$\tilde{V}_{Sp} = p_1 \cdot q_{Geb} + p_2 \cdot q_{Geb}^2 \quad (3.1)$$

worin \tilde{V}_{Sp} [m³ m⁻²] das erforderliche Speichervolumen und q_{Geb} [kWh m⁻²] den Wärmebedarf – beides bezogen auf die Grundfläche – bezeichnet.

Die Polynomkoeffizienten p_1 und p_2 werden durch weitere quadratische Gleichungen in Abhängigkeit der Massivabsorberfassadenfläche abgebildet. Diese stufen sich in jeweils drei Ebenen, entsprechend den Haupthimmelsrichtungen (Ost, Süd, West). Das Schema der mehrdimensionalen Polynomfunktion sei auszugsweise durch die nachfolgenden Gleichungen beschrieben:

$$p_1 = p_{1,0} + p_{1,1} \cdot \tilde{A}_{OST} + p_{1,2} \cdot \tilde{A}_{OST}^2 \quad (3.2)$$

mit

$$p_{1,0} = p_{1,0,0} + p_{1,0,1} \cdot \tilde{A}_{SÜD} + p_{1,0,2} \cdot \tilde{A}_{SÜD}^2 \quad (3.3)$$

mit

$$p_{1,0,0} = p_{1,0,0,0} + p_{1,0,0,1} \cdot \tilde{A}_{WEST} + p_{1,0,0,2} \cdot \tilde{A}_{WEST}^2 \quad (3.4)$$

$$p_{1,0,1} = p_{1,0,1,0} + p_{1,0,1,1} \cdot \tilde{A}_{WEST} + p_{1,0,1,2} \cdot \tilde{A}_{WEST}^2 \quad (3.5)$$

$$p_{1,0,2} = p_{1,0,2,0} + p_{1,0,2,1} \cdot \tilde{A}_{WEST} + p_{1,0,2,2} \cdot \tilde{A}_{WEST}^2 \quad (3.6)$$

etc.

worin \tilde{A} [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] die grundflächenbezogene Massivabsorberfläche ist.

Insgesamt besteht die Gesamtgleichung aus 54 Parametern, die im Anhang D, Tabelle 12 aufgeführt sind.

3.4.2.2 Polynomfunktion für Energieeinsatz und Kosten

Die zuvor für die Speicherauslegung beschriebene Polynomfunktion basiert zwar auf den ermittelten Bestpunkten der Variantenanalyse in Bezug auf das Verhältnis $\xi/k_{\text{sys},a}$. Sie liefert jedoch keine Aussagen über die wirtschaftlichen Daten der jeweils betrachteten Konfiguration. Aus diesem Grund wurde nach selbem Schema je eine Polynomfunktion zu $\xi/k_{\text{sys},a}$ und JAZ erstellt, die auf derselben Datengrundlage basieren. Damit kann eine Kosten-Nutzen-Abwägung zwischen den Varianten getroffen werden und mittels der Jahresarbeitszahl eine Schätzung der Betriebskosten vorgenommen werden.

Die Datengrundlage für die Anpassungen per Polynom zeigt Abb. 26. Bei konstanter aktivierter Fassadenfläche steigt das Verhältnis von $\xi/k_{\text{sys},a}$ mit größer werdendem Wärmebedarf, da für das Beispielgebäude die spezifischen Kosten z.B. für die Wärmepumpe, den Speicher und die Bedarfskosten geringer werden. Lediglich die Massivabsorberfläche wird identisch bewertet. Über diesen Zusammenhang kann eine – auf das Beispielgebäude bezogene – Kostenprognose mit Bezug zur Systemeffizienz gegeben werden.

Da die Heizzahl auch die Nachheizung umfasst und ebenso der Heizwärmebedarf dort einfließt, wird als dritte Kennzahl die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ausgewertet. Sie hingegen sinkt bei größerem Heizwärmebedarf, da die relativ verfügbare Massivabsorberfläche ebenso abnimmt, wodurch geringere Speichertemperaturen erreicht werden und die Wärmepumpe im Mittel mit geringerer Wärmequellentemperatur betrieben wird.

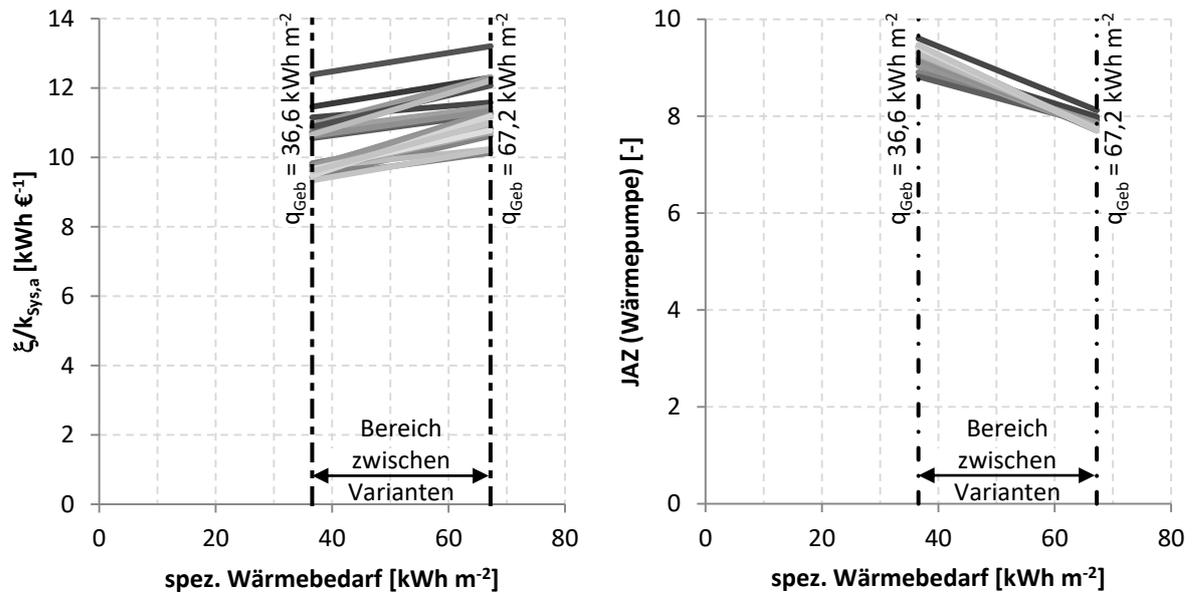


Abb. 26: Abhängigkeit von $\xi/k_{sys,a}$ und JAZ vom grundflächenbezogenen Wärmebedarf der Beispielgebäudevarianten. Grundlage für die jeweilige Schätzfunktion.

Für beide Kenngrößen ($\xi/k_{sys,a}$ und JAZ) ergeben sich Ausgangsgleichungen analog zu Gl. (3.1), hier in linearer Form:

$$y(q) = p_0 + p_1 \cdot q_{Geb} \quad (3.7)$$

Die Polynomkoeffizienten p_i werden wie zuvor über quadratische Gleichungen in Abhängigkeit der Massivabsorberfassadenfläche abgebildet, z.B.:

$$p_0 = p_{0,0} + p_{0,1} \cdot \tilde{A}_{OST} + p_{0,2} \cdot \tilde{A}_{OST}^2 \quad (3.8)$$

mit

$$p_{0,0} = p_{0,0,0} + p_{0,0,1} \cdot \tilde{A}_{SÜD} + p_{0,0,2} \cdot \tilde{A}_{SÜD}^2 \quad (3.9)$$

mit

$$p_{0,0,0} = p_{0,0,0,0} + p_{0,0,0,1} \cdot \tilde{A}_{WEST} + p_{0,0,0,2} \cdot \tilde{A}_{WEST}^2 \quad (3.10)$$

$$p_{0,0,1} = p_{0,0,1,0} + p_{0,0,1,1} \cdot \tilde{A}_{WEST} + p_{0,0,1,2} \cdot \tilde{A}_{WEST}^2 \quad (3.11)$$

$$p_{0,0,2} = p_{0,0,2,0} + p_{0,0,2,1} \cdot \tilde{A}_{WEST} + p_{0,0,2,2} \cdot \tilde{A}_{WEST}^2 \quad (3.12)$$

etc.

Die Berechnungsparameter sind in Anhang D aufgeführt, Tabelle 13 und Tabelle 14.

3.4.2.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein anderes Kostenszenario

Um eine allgemeine Gültigkeit dieser Herangehensweise für beliebige Gebäude auch bei unterschiedlichem Kostenansatz stichprobenartig zu belegen, wurde das Auslegungsverfahren zum Vergleich mit veränderten Kostenansätzen durchgeführt und erneut die beste Konfiguration, gekennzeichnet durch das $\xi/k_{sys,a}$ -Verhältnis, ermittelt. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Schätzung

von $\xi/k_{sys,a}$ für eine qualitative Einordnung geeignet ist. Der Absolutwert ist für die Wahl der optimalen Systemauslegung nicht relevant. Die Kennzahl $\xi/k_{sys,a}$ kann in jedem Fall als relative Größe zum Vergleich alternativer Auslegungen verwendet werden.

Mit der Abschätzung der Speichergröße wird der jeweilige Bestpunkt bestimmt und mit dem referenzbezogenen Verhältnis $\xi/k_{sys,a}$ kann innerhalb eines Parametersatzes die am besten geeignete Variante ausgewählt werden. Die Investitionskosten können für die daraus ermittelte Komponentenzusammenstellung kalkuliert werden. Für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse ist es aber notwendig die bedarfsgebundenen Kosten (Strom) miteinzubeziehen. Sie können über die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe angenähert werden.

Bei den Bestpunkten der untersuchten Systemauslegungen liegt der Anteil $f_{el,WP}$ [-] der Wärmepumpenarbeit am elektr. Gesamtaufwand (inkl. Nachheizung) im Mittel bei 85,6 % bzw. bei 89,1 % (ohne Nachheizung) und hat damit den größten Anteil. Dies bedeutet, dass aus der Jahresarbeitszahl des Systems eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe abgeleitet werden kann:

$$JAZ_{Sys} = \frac{Q_{Geb}}{W_{el,sys}} = \frac{Q_{WP,sek} + Q_{Nhzg}}{\frac{W_{el,WP}}{f_{el,WP}}} \quad (3.13)$$

Für den realen Betrieb der Anlage mit einem Pufferspeicher ist davon auszugehen, dass eine elektrische Nachheizung nicht notwendig ist. Damit vereinfacht sich die Bilanz:

$$JAZ_{Sys} = \frac{Q_{WP,sek}}{\frac{W_{el,WP}}{f_{el,WP}}} = \frac{Q_{Geb}}{\frac{W_{el,WP}}{f_{el,WP}}} = JAZ \cdot f_{el,WP} \quad (3.14)$$

bzw.:

$$W_{el,sys} = \frac{Q_{Geb}}{JAZ \cdot f_{el,WP}} = \frac{W_{el,WP}}{f_{el,WP}} \quad (3.15)$$

$f_{el,WP}$ ist ein individueller Faktor, der entsprechend der Hydraulik und übrigen Komponenten im System passend zu wählen ist. Für die untersuchten Beispielgebäude kann näherungsweise $f_{el,WP} \cong 0,9$ verwendet werden.

3.5 Systemoptimierung

Durch eine Variation der Massivabsorber-Fassadenbelegung kann eine bestehende Gebäudesituation eine optimale Dimensionierung des Systems gefunden werden. Den Ablauf der Systemoptimierung zeigt Abb. 27.

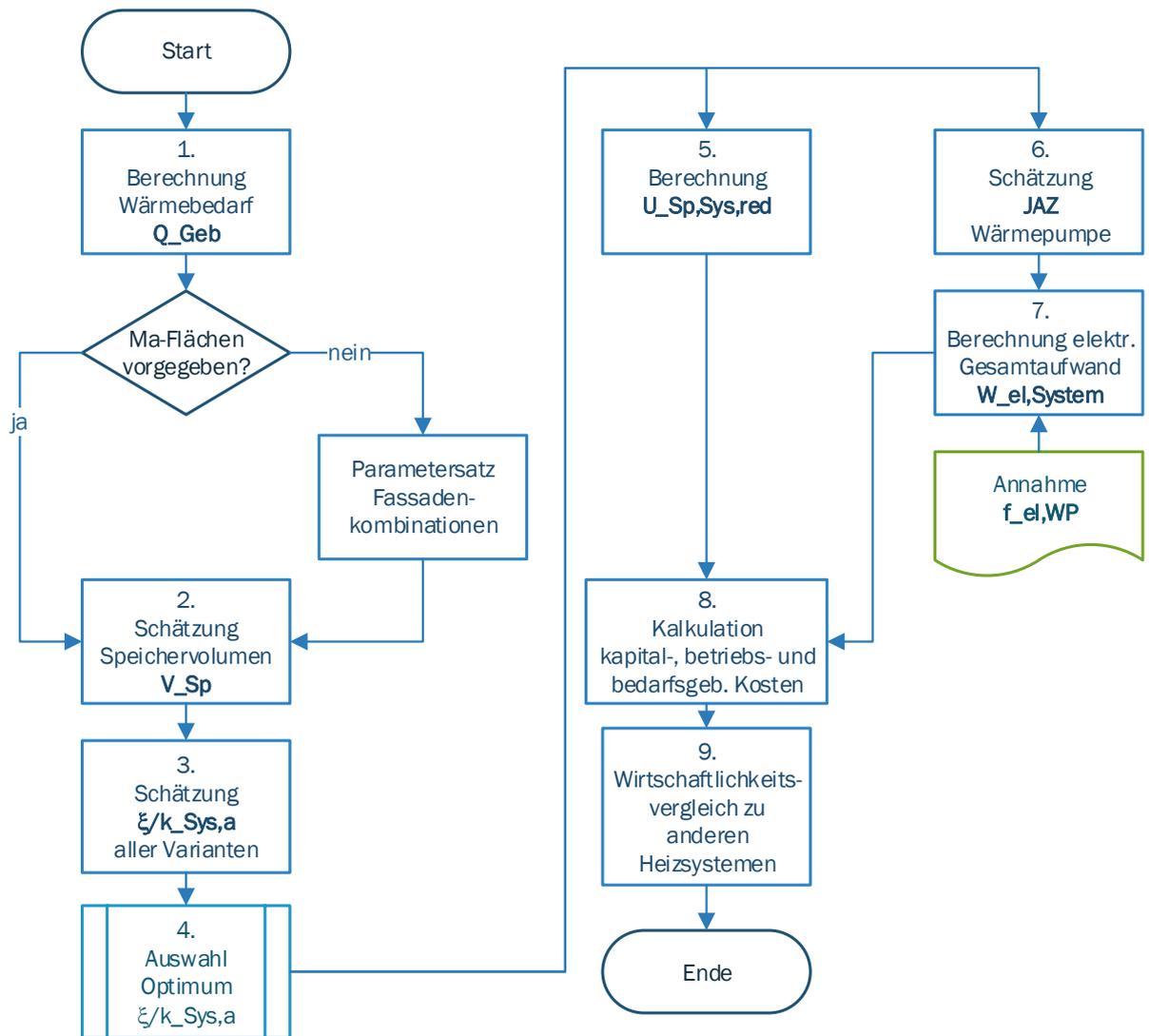


Abb. 27: Ablaufdiagramm der Systemoptimierung

Zunächst wird für das zu analysierende Gebäude der Wärmebedarf berechnet. Ist für das Gebäude bereits eine feste Anordnung möglicher Massivabsorberflächen vorgegeben, folgt im nächsten Schritt die Ermittlung der notwendigen Speichergröße nach Gl. (3.1). Soll die Gesamtanlage einschließlich der Massivabsorberfassadenbelegung grundlegend optimiert werden, wird ein Variantsatz mit unterschiedlichen Massivabsorberkonfigurationen erstellt, worauf für jede Variante die Speichergröße bestimmt wird. Die gemäß Gl. (3.1) ermittelte Speichergröße stellt für die jeweilige Konstellation bereits den Bestpunkt bzgl. des Kriteriums $\xi/k_{sys,a}$ dar. Zu jeder Variante kann jetzt nach dem Berechnungsschema von Gl. (3.7) dieser Verhältniswert $\xi/k_{sys,a}$ berechnet werden. Durch einen Vergleich der Ergebnisse des Variantsatzes kann die beste Kombination aus Speicher und aktivierter Fassadenflächen ausgewählt werden. Damit ist die Optimierung des Systems abgeschlossen.

Im Weiteren können bei Bedarf aktualisierte Kostenansätze für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Systemalternativen herangezogen werden. Hierzu müssen alle relevanten Kosten kalkuliert

werden. Die Kostenerhebung für kapital- und betriebsgebundene Kosten erfolgt aus den Investitionskosten, dem Betrachtungszeitraum und den Zins- und Preissteigerungssätzen. Der elektrische Gesamtaufwand des Systems wird für die bedarfsgebundenen Kosten über die Schätzung von JAZ nach dem Schema von Gl. (3.7) berechnet. Mit einer passenden Abschätzung des übrigen elektrischen Aufwands sonstiger Bauteile, wie z.B. Pumpen, anhand von $f_{el,WP}$ folgt $W_{el,sys}$ aus Gl. (3.15).

Weitergehende Hinweise für die Wirtschaftlichkeitsrechnung, insbesondere zur Ermittlung der Investitionskosten für den Langzeitwärmespeicher und die Massivabsorber finden sich im Anhang sowie im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens. Dort wird auch die Auslegung des Wärmespeichers mit verringerter Wärmeübertragungsfähigkeit $U_{Sp,sys,red}$ diskutiert, wie im Schritt 5 des Ablaufdiagramms (Abb. 27) angegeben.

3.6 Anwendung des Dimensionierungsverfahrens

Zur Darstellung der Aussagekraft des Dimensionierungsverfahrens wird im folgenden Abschnitt die Auslegung des Massivabsorber-Heizsystems für drei unterschiedliche Ausführungen des Gebäudes dargestellt. Der spezifische Jahreswärmebedarf beträgt 36,6, 50,0 bzw. 67,2 kWh/m² a. Entsprechend dem Gültigkeitsbereich des Auslegungsverfahrens wird die spezifische Massivabsorberfläche (bezogen auf die Gebäudegrundfläche) an der Südfassade von 0,07 bis 0,28 m²/m² variiert, die zusätzliche Belegung von Ost- und Westfassade beträgt jeweils 0 bis 0,14 m²/m².

Als Ergebniswerte werden die erforderliche Speichergröße, das Auslegungskriterium $\xi/k_{sys,a}$, die Jahresarbeitszahlen für die Wärmepumpe und das Gesamtsystem, die primärenergiebezogene Heizzahl und die Wärmegestehungskosten dargestellt.

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die Massivabsorberbelegung der Südfassade gegenüber der Nutzung der Ost- und Westfassade vorzuziehen ist (siehe Abb. 28). Bei höherem Wärmebedarfs ergibt sich ein überproportionaler größeres Volumen des Langzeitwärmespeichers, wie aus Abb. 28 durch Vergleich der Ergebnisse für Gebäude mit spezifischen Jahreswärmebedarf von 36,6 bzw. 67,2 kWh/m² a geschlossen werden kann.

Das Effizienzkriterium $\xi/k_{sys,a}$ wird in erster Linie durch die Wahl der Massivabsorber-Fassadenbelegung beeinflusst (siehe Ab. 29). Günstigste Werte ergeben sich bei alleiniger Belegung der Südfassade, weil hier Kosten für die Aktivierung weniger wirksamen Ost- und Westfassade eingespart werden können.

Bei den Kennzahlen für die Energieeffizienz (Jahresarbeitszahl Wärmepumpe (Abb. 30), Jahresarbeitszahl System (Abb. 31), Heizzahl (Abb. 32)) zeigen sich die günstigsten Werte für die Ge-

bäudeausführung mit minimalem Jahreswärmebedarf, weil in diesem Fall in Folge der relativ größeren Dimensionierung der Massivabsorber höhere mittlere Wärmequellentemperaturen für den Betrieb der Wärmepumpe zur Verfügung stehen.

Die wirtschaftlich günstigste Auslegung ergibt sich bei großer Dimensionierung der Massivabsorberflächen mit ausschließlicher Nutzung der Südfassade und entsprechend geringerem Volumen des Langzeitwärmespeichers (siehe Abb. 33). Dabei werden wegen der Skaleneffekte die geringsten Wärmegestehungskosten in Höhe von etwa 0,28 €/kWh bei der Gebäudekonfiguration mit dem höchsten spezifischen Jahreswärmebedarf erzielt.

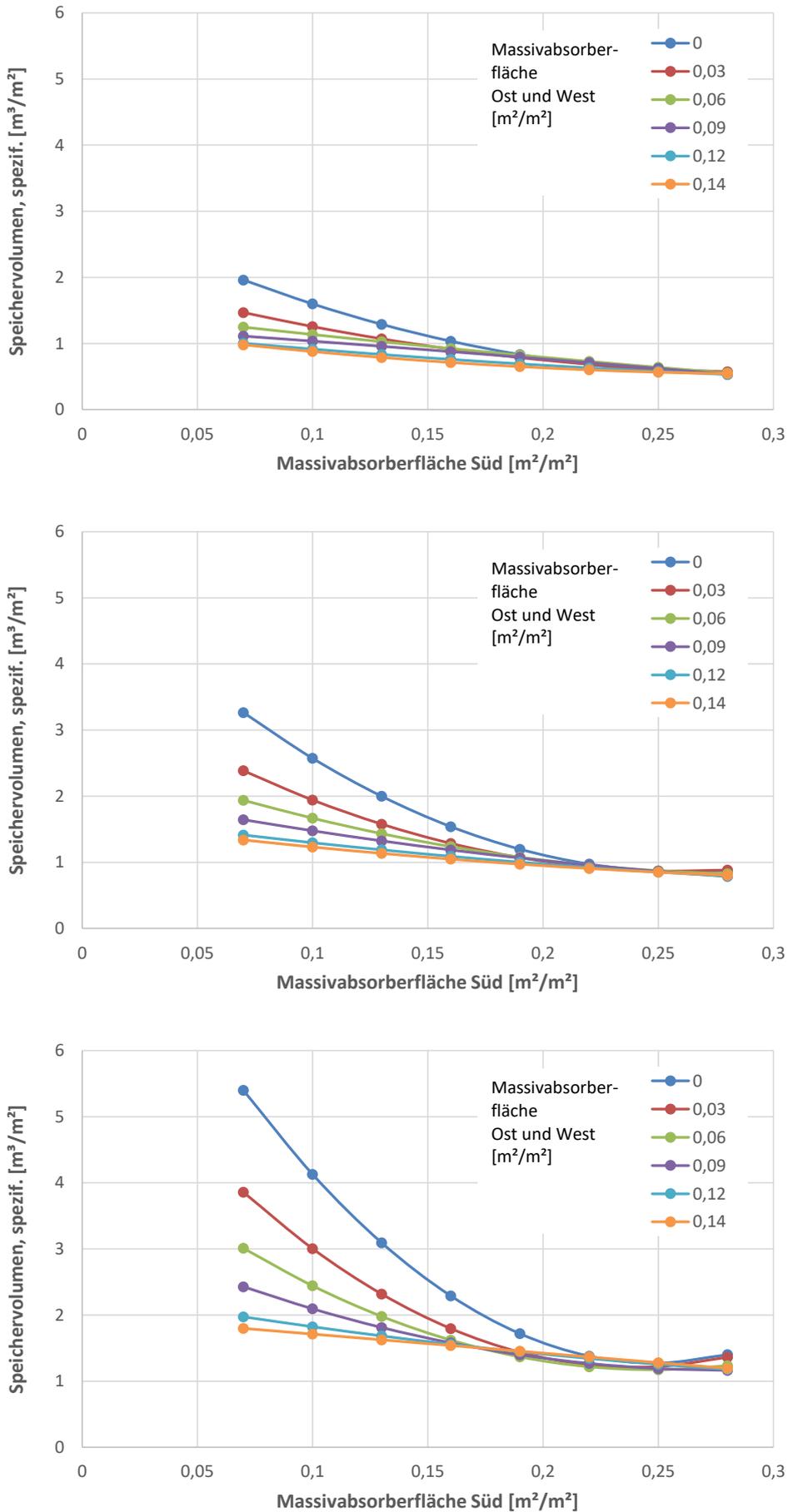


Abb. 28: Systemauslegung: Speichervolumen für 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m² a (unten).

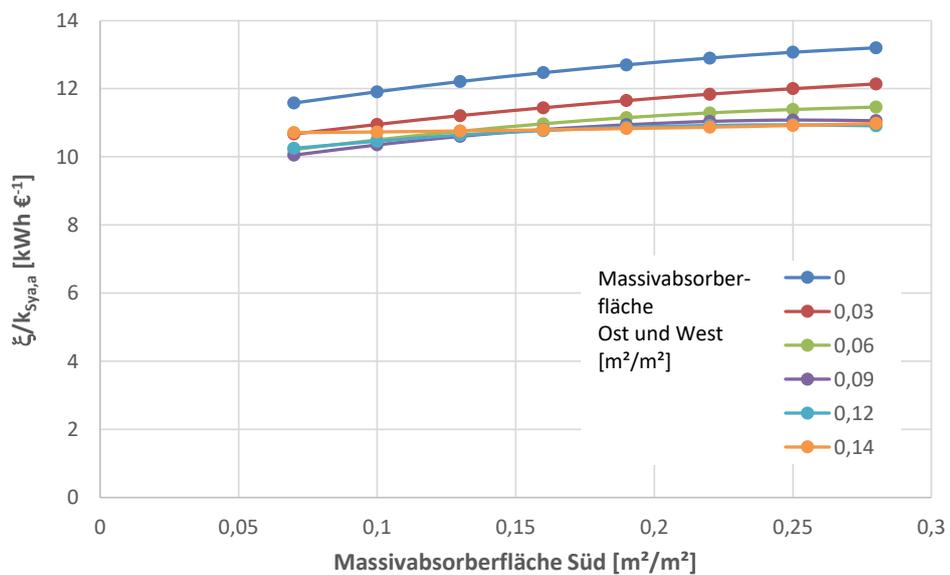
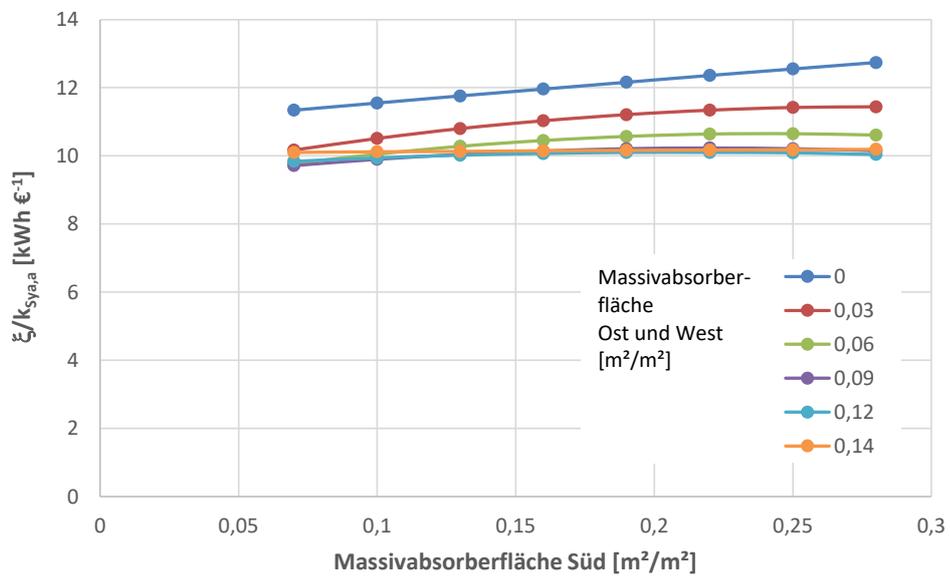
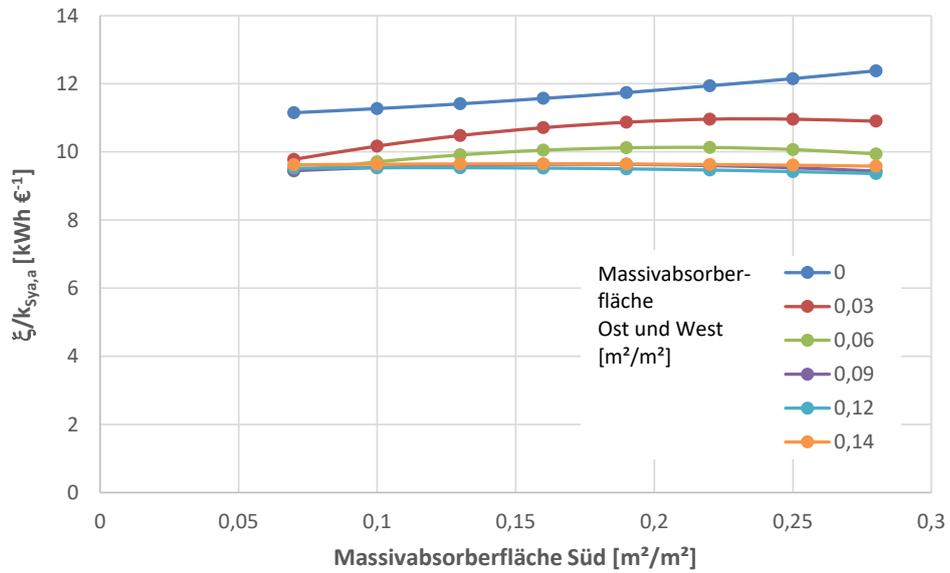


Abb. 29: Systemauslegung: Wirtschaftlichkeitskriterium $\xi/k_{\text{Sys},a}$ für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m² a (unten).

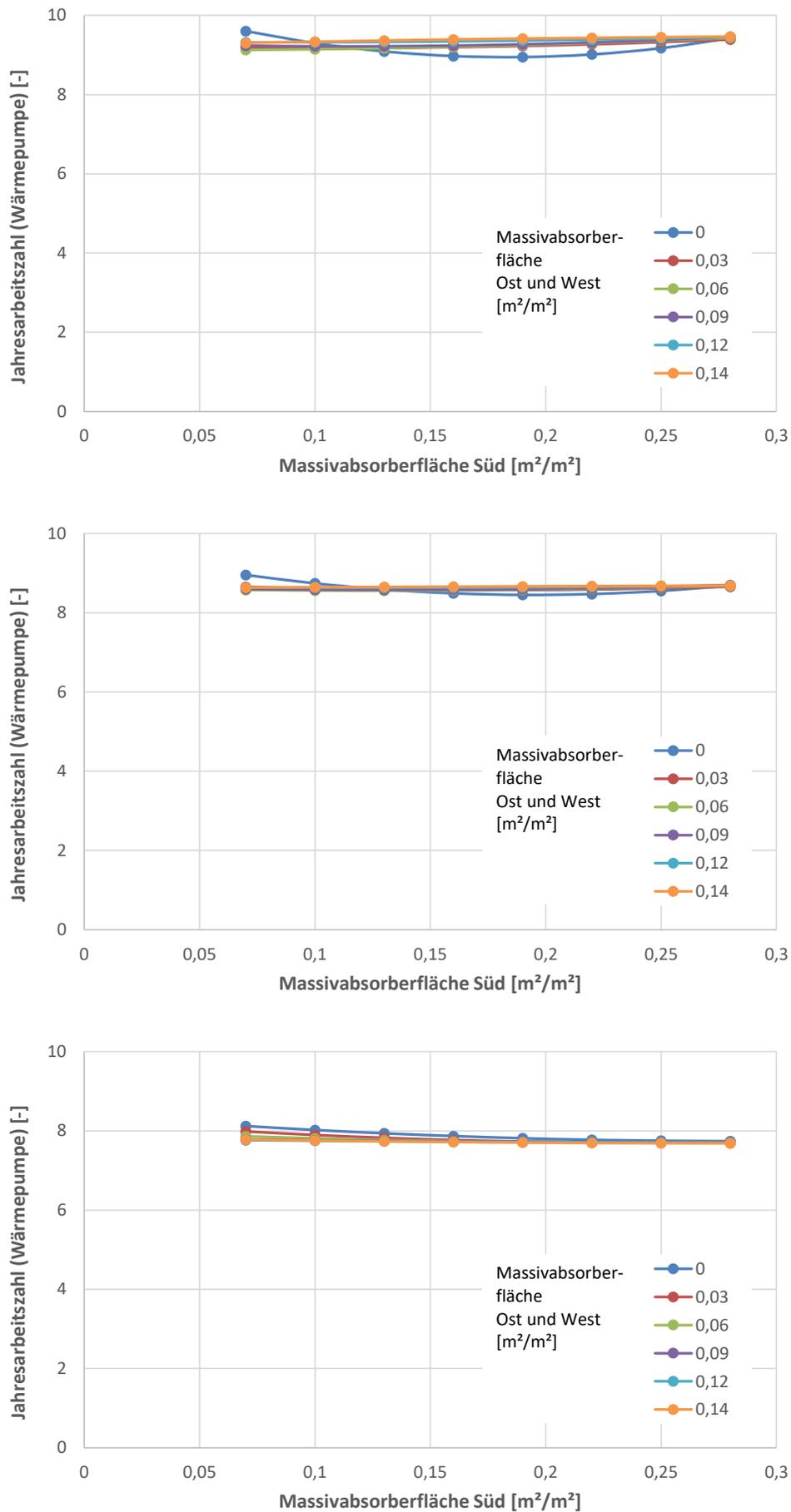


Abb. 30: Systemauslegung: Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe) für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m² a (unten).

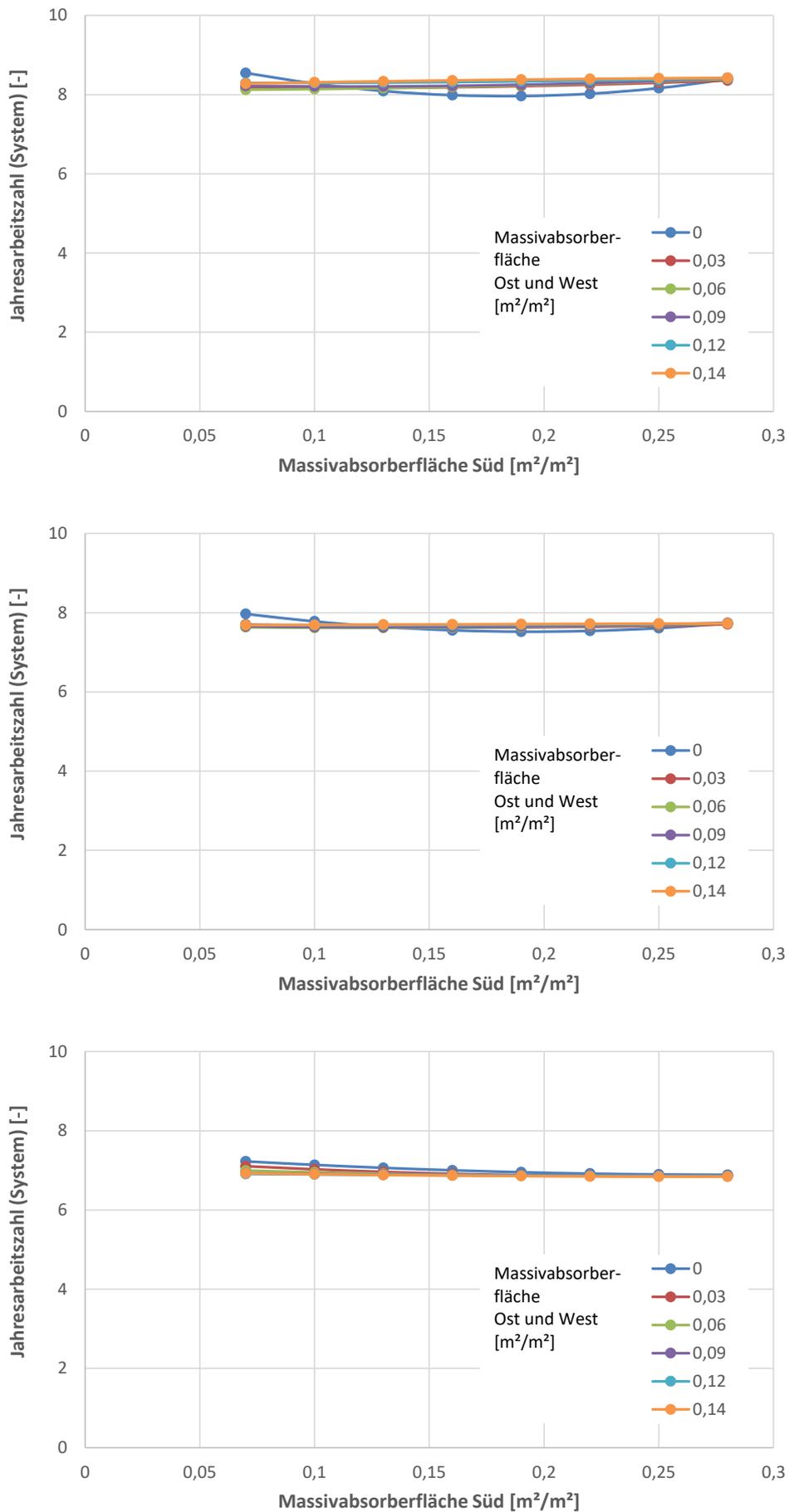


Abb. 31: Systemauslegung: Jahresarbeitszahl (System) für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m² a (unten).

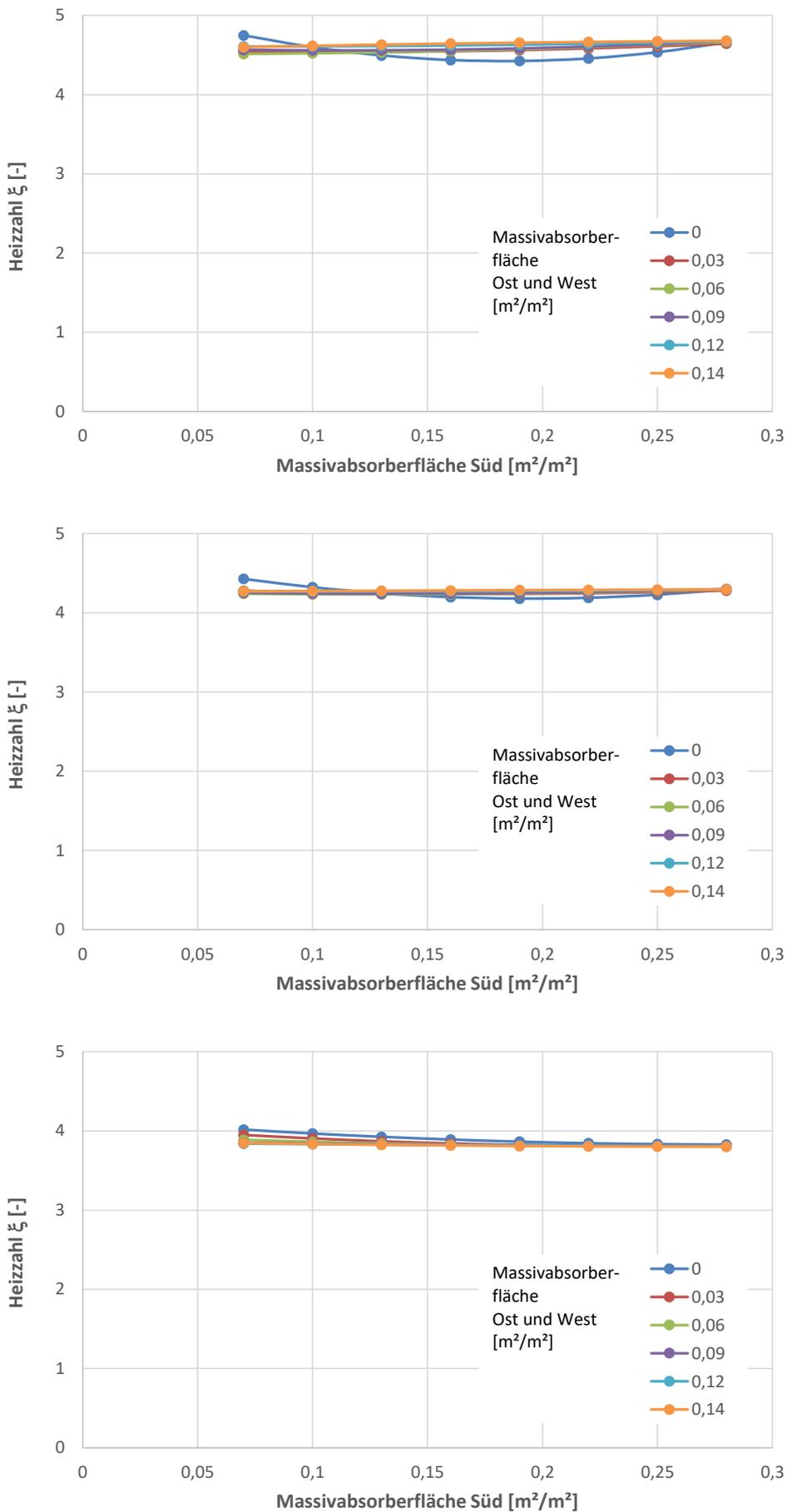


Abb. 32: Systemauslegung: Heizzahl (primärenergiebezogen) für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 $\text{kWh}/\text{m}^2 \text{ a}$ (unten).

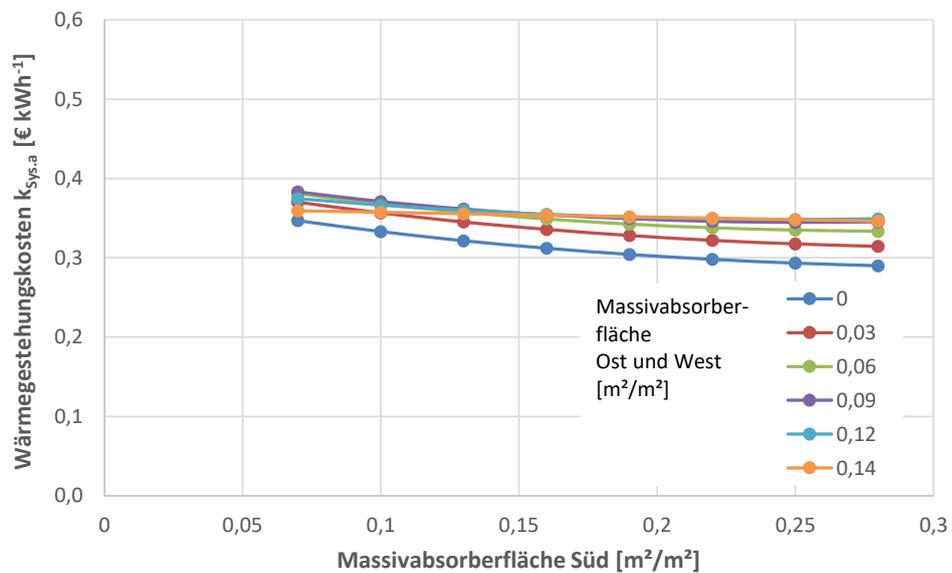
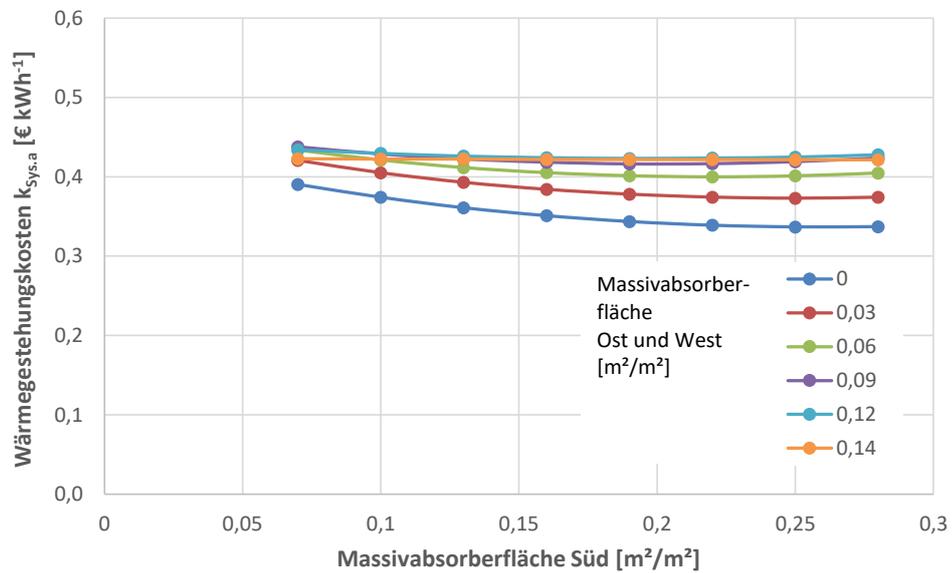
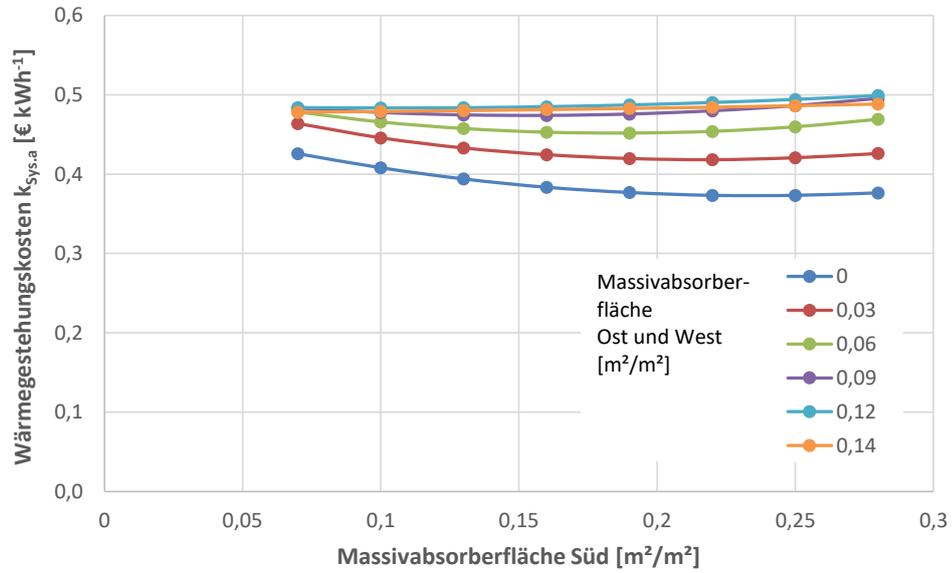


Abb. 33: Systemauslegung: Wärmegestehungskosten für Gebäudewärmebedarf 36,6 (oben), 50,0 (Mitte) und 67,2 kWh/m² a (unten).

3.7 Systemvergleich

Die optimierte Konfiguration des Massivabsorber-Heizsystems wird mit einem Standard-Wärmepumpenheizsystem mit Erdsondenquelle verglichen. Die Wirtschaftlichkeit wird u.a. nach der Annuitätenmethode (VDI 2067 Blatt 1:2012-09) berechnet. Hierzu liegt für die innerhalb des Forschungsprojekts errichtete Schlosserei eine Grobkostenschätzung (Richard Kaufmann GmbH) vor. Diese Kosten für die Erdsonde wurden prozentual über die Heizlast für das Beispielgebäude skaliert. Die Wärmepumpe wird mit identischen Kosten wie beim Massivabsorbersystem angesetzt. Die weiteren Kostenangaben für die Hydraulik bleiben unverändert. Die Kostenübersicht ist in Tabelle 5 aufgeführt und in Abb. 34 sind die Kosten grafisch abgebildet zusammen mit dem elektrischen Energiebedarf, den Annuitätswerten sowie dem entsprechenden Wärmepreis. Als Kostenansatz für das System mit Erdsonde wurden zum einen der Kalkulationsansatz der Richard Kaufmann GmbH (max. Kosten) und zum anderen über Literaturquellen ermittelte Preise (min. Kosten) herangezogen.

Für jede mit Kosten belegte Systemkomponente werden die kapital-, betriebs- und bedarfsgebundenen Kosten ermittelt. Da diese Kosten von der Strompreisbasis, dem Betrachtungszeitraum T , dem Kalkulationszinssatz q und den Preissteigerungsraten r abhängen, wird eine Parameteranalyse durchgeführt, um die Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit kenntlich zu machen.

Die singuläre Sensitivitätsanalyse, siehe Abb. 35, wird für zwei Referenzfälle vorgenommen, welche in den Diagrammen angegeben sind. Vor allem die bedarfsgebundene Preissteigerungsrate sorgt bei großen Werten für einen monetären Vorteil des Massivabsorbersystems gegenüber den Systemen mit Erdsonden. Dies ist begründet durch den geringeren elektrischen Aufwand. Ist der Strompreis zu Beginn des Betrachtungszeitraums höher, vergrößern sich die Auswirkungen des geringeren Energiebedarfs. Kapitalzinssatz und die zugehörige Preissteigerungsrate wirken sich hingegen aufgrund der geringeren Investitionskosten bei den Erdsondensystemen weniger stark aus. In jedem Fall ist eine genaue Untersuchung der Wirtschaftlichkeit erforderlich, um eine aussagekräftige Abwägung zwischen den Systemen treffen zu können. Ein eindeutiger und grundsätzlicher, unternehmerischer Vorteil des Massivabsorbersystems ist nicht gegeben. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Mehrkosten, die bei einer Variation der Preissteigerung für kapital- und betriebsgebundene Kosten verursacht werden, stark vom Betrachtungszeitraum und etwaigen Ersatzbeschaffungen abhängig sind.

Tabelle 5: Systemkosten [€] und elektrischer Aufwand [kWh a⁻¹] im Vergleich für optimiertes Beispielgebäude und konventionelles Erdsondensystem

Beschreibung	SV2a ⁽¹⁾ Beispielgebäude (84 MWh) (Optimierung) (V _{Sp} : 1750 m ³ , A _{SÜD} : 350 m ²)	Erdsonde ^{(1),(9)} Min. (JAZ _{WP} : 4,6 ⁽²⁾)	Erdsonde ^{(1),(9)} Max. (JAZ _{WP} : 4,6 ⁽²⁾)
Peripherie			
Wärmepumpe (415 € kW ⁻¹)	28283,00	28283,00	37108,87 ⁽⁹⁾
Ausdehnungsgefäß	1055,00	-	-
Wärmeübertrager	900,00	-	-
Pumpen	10228,00	-	-
Rohre	23961,84 ^{(3),(4)}	13800,00 ⁽¹⁰⁾	13800,00 ⁽¹⁰⁾
Armaturen	6550,99	-	-
Pufferspeicher	-	520,00	520,00
Regelung (SV2a mit 300 € Datenpunkt ⁻¹)	20100,00	6000,00 ⁽¹⁰⁾	6000,00 ⁽¹⁰⁾
Wärmequelle			
Massivabsorber Mehrkosten gegenüber Standardvorsatzschale	13786,50	-	-
Wärmespeicher: Material und Rohre	46061,12 ^{(5),(6)}	-	-
Wärmespeicher: betonierte Einhausung ⁽⁷⁾	14829,41	-	-
Wärmespeicher: Isolierung	27161,27	-	-
Erdsonde (1382,50 € kW ⁻¹ ⁽⁸⁾) (COP _{Schätzung} : 4,6 ⁽²⁾) (Q _{Sonde} : 45,6 kW bei Q _{Geb} : 58,3 kW)	-	63042,00 ⁽⁸⁾	117185,93 ⁽⁹⁾
Sonstiges			
Thermal response test	-	3500,00 ⁽¹¹⁾	3500,00 ⁽¹¹⁾
Summe	192917,13	115145,00	178114,80
Elektr. Aufwand			
Regelungstechnik	490,6 kWh a ⁻¹	490,6 kWh a ⁻¹	490,6 kWh a ⁻¹
Pumpen	224,9 kWh a ⁻¹	1689,1 kWh a ⁻¹ ⁽¹²⁾	1689,1 kWh a ⁻¹ ⁽¹²⁾
Wärmepumpe	9941,6 kWh a ⁻¹	18268,0 kWh a ⁻¹	18268,0 kWh a ⁻¹
Nachheizung	934,7 kWh a ⁻¹	-	-
Summe	11591,8 kWh a⁻¹	21052,1 kWh a⁻¹	21052,1 kWh a⁻¹

⁽¹⁾ Montagekosten in den Einzelpositionen inbegriffen

⁽²⁾ Jahresarbeitszahl als Schätzwert für monovalente Wärmepumpen mit Erdsonde (bwp 2017)

⁽³⁾ inkl. hydraulischem Abgleich

⁽⁴⁾ beinhaltet alle Rohre, Isolierarbeiten und Kosten für den Verteileraufbau

⁽⁵⁾ inkl. Aushub und Einbau

⁽⁶⁾ siehe Kalkulation der Speicherelementarzellen

⁽⁷⁾ es wird nur die Seitenwand berücksichtigt;

⁽⁸⁾ Kostenmittelwert nach VIKERSØNN Deutschland (o.J., o.S.)

⁽⁹⁾ Kosten (skaliert) auf Grundlage der Grobkostenschätzung Schlosserei (59,7 kW) (Richard Kaufmann GmbH)

⁽¹⁰⁾ Kosten (nicht skaliert) auf Grundlage der Grobkostenschätzung Schlosserei (59,7 kW) (Richard Kaufmann GmbH)

⁽¹¹⁾ (Hoppe 2017, o.S.)

⁽¹²⁾ 1200 W Pumpleistung bei 1407,6 Vollbenutzungsstunden pro Jahr

Tabelle 6: Annuitätswerte [€ a^{-1}] im Vergleich für optimiertes Beispielgebäude und konventionelles Erdsondensystem

Beschreibung	SV2a	Erdsonde Min.	Erdsonde Max.
Kapitalgebunden (Rechnerische Nutzungsdauern T_N nach Anhang A; inkl. Berücksichtigung der Restwerte)			
Wärmepumpe	2504,09	2504,09	3285,51
Peripherie (Rohre, u.a.)	3852,02	645,33	645,33
MSR	2367,02	706,57	706,57
Massivabsorber	415,10	-	-
Wärmespeicher	2651,14	-	-
Erdsonde	-	2003,51	3633,72
<i>Teilsumme</i>	<i>(11789,37)</i>	<i>(5859,50)</i>	<i>(8271,13)</i>
Betriebsgebunden (Instandsetzung, Wartung und Inspektion zusammengefasst; Parameter nach Anhang A)			
Wärmepumpe	1262,78	1262,78	1656,84
Peripherie (Rohre, u.a.)	1279,75	255,74	255,74
MSR	4307,64	1285,86	1285,86
Massivabsorber	98,49	-	-
Wärmespeicher	-	-	-
Erdsonde	-	3377,64	6278,55
<i>Teilsumme</i>	<i>(6948,66)</i>	<i>(6182,03)</i>	<i>(9476,99)</i>
Bedarfsgebunden			
Regelungstechnik	189,84	189,84	189,84
Pumpen	86,99	669,29	669,29
Wärmepumpe	3846,97	7068,97	7068,97
Nachheizung	361,69	-	-
<i>Teilsumme</i>	<i>(4485,49)</i>	<i>(7928,10)</i>	<i>(7928,10)</i>
Summe	23223,52	19969,63	25676,22

Strompreis $17,12 \text{ Ct. kWh}^{-1}$; $T = 50 \text{ a}$; $q = 1,74 \%$; $r_{\text{Kapital,Betrieb}} = 2,5 \%$; $r_{\text{Bedarf}} = 3,5 \%$

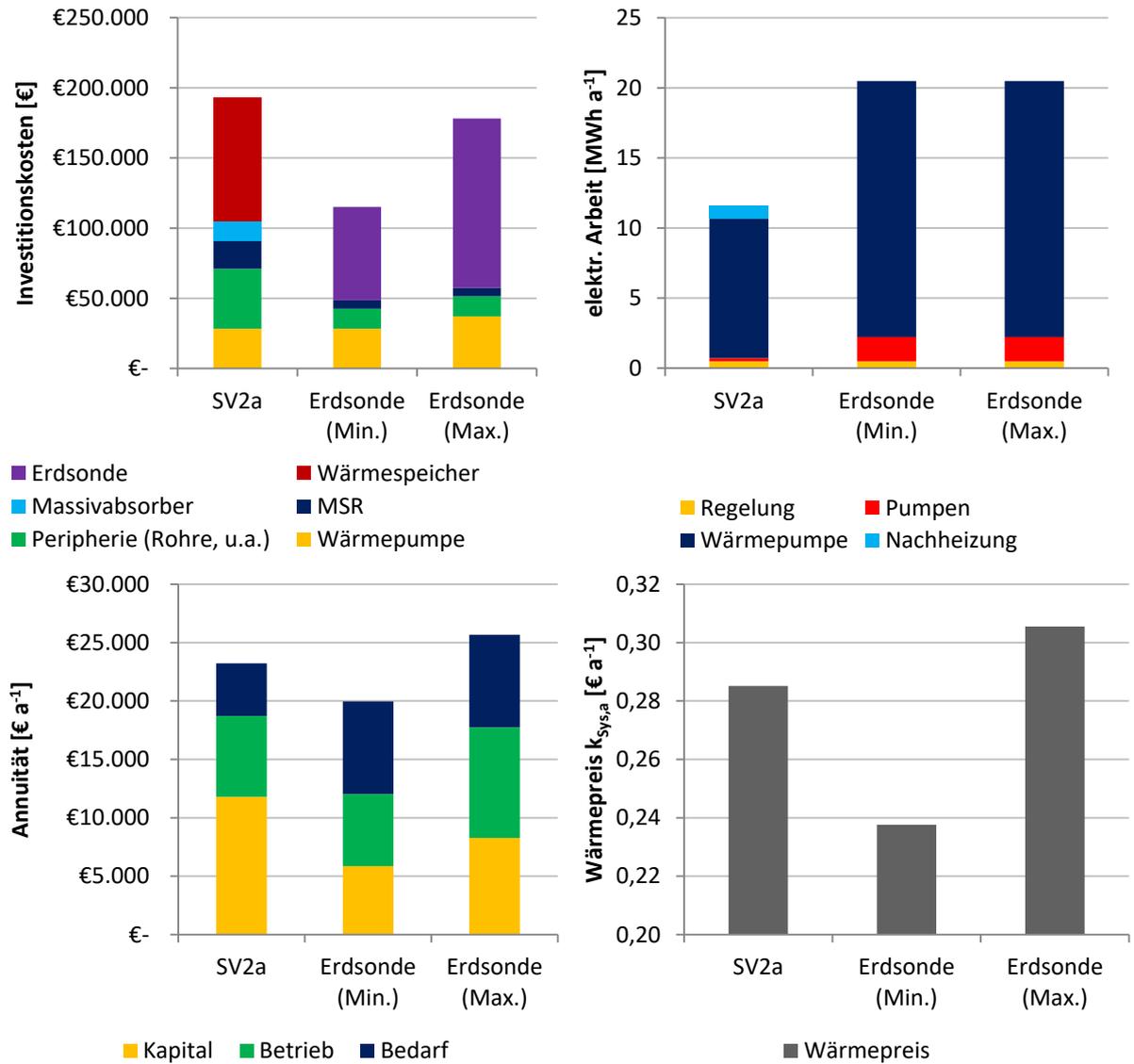


Abb. 34: links oben: Investitionskosten; rechts oben: Jahresbedarf an elektrischer Energie; links unten: jährliche Annuität auf Grundlage der Kalkulationsdaten von Anhang A; rechts unten: Wärmepreis.

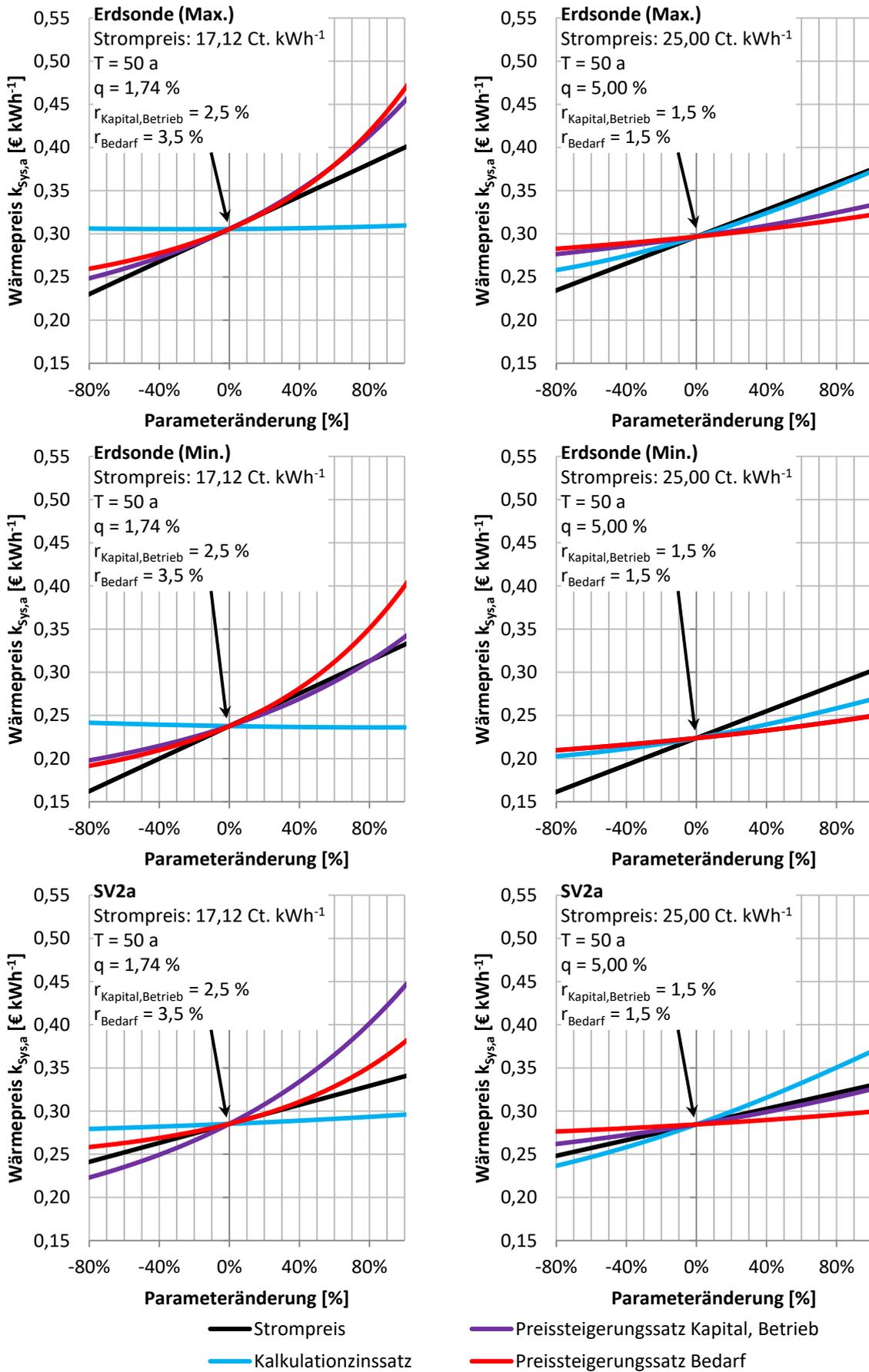


Abb. 35: Singuläre Sensitivitätsanalyse in zweifacher Ausführung für das optimierte Massivabsorberheizsystem (SV2a) sowie das Wärmepumpenheizsystem mit Erdsonde bei minimalen und maximalem Kostenansatz; links: Grunddaten nach Anhang A; rechts: frei gewählte Grunddaten

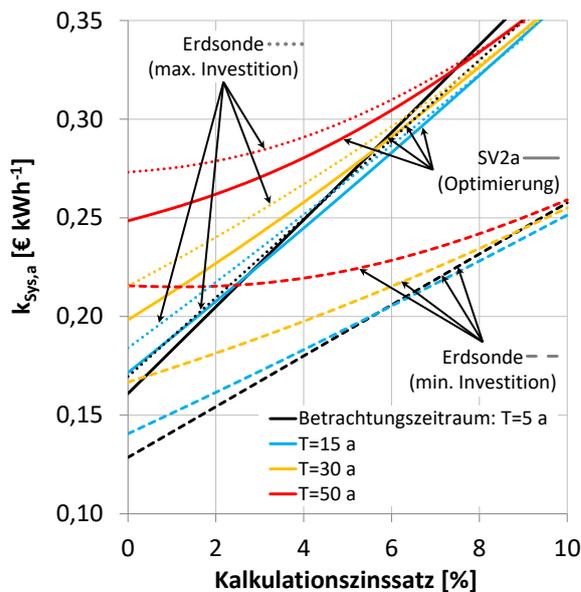


Abb. 36: Abhängigkeit des Wärmepreises vom Kalkulationszinssatz für verschiedene Betrachtungszeiträume. Dargestellt sind das optimierte Massivabsorbersystem (SV2a) sowie die Erdsondensysteme mit minimalem und maximalem Kostenansatz. Strompreisbasis: 17 Ct. kWh⁻¹, Preissteigerungsrate (Kapital, Betrieb): 2 %; (Bedarf): 3 %

In einer eingeschränkteren Betrachtung mit einem Strompreis von 0,17 € kWh⁻¹, einer Preissteigerungsrate von 2 % für kapital- und betriebsgebundene Kosten und 3 % für bedarfsgebundene Kosten, zeigt Abb. 36 den Einfluss den Kalkulationszinssatzes für unterschiedliche Betrachtungszeiträume. Auf den ersten Blick zeigt sich, dass mit steigendem Zinssatz die Wirtschaftlichkeit des Massivabsorbersystems abnimmt, begründet durch die höheren Anschaffungskosten. Gegenüber dem günstigen Ansatz des Erdsondensystems ist eine Wirtschaftlichkeit unter den gegebenen Randbedingungen nicht möglich. Das teurere Vergleichssystem verursacht jedoch an jedem Punkt höhere Wärmegestehungskosten.

Die Wirtschaftlichkeit des Massivabsorbersystems ist gegenüber einem Erdsondenheizsystem bei konservativem Kostenansatz darstellbar. Ein günstig ausgeführtes Erdsondenheizsystem erzielt jedoch nach den hier gewonnenen Erkenntnissen meist einen niedrigeren Wärmepreis als das Massivabsorberheizsystem.

Neben den rein wirtschaftlichen Kriterien sorgt ein geringer elektrischer Energiebedarf für eine geringere CO₂-Emission. Die jährliche CO₂-Einsparung des optimierten Massivabsorbersystems (2020: 5,6 t a⁻¹; 2030: 4,5 t a⁻¹) gegenüber dem Erdsondensystem (2020: 9,9 t a⁻¹; 2030: 7,9 t a⁻¹) ist proportional zum Energiebedarf und beläuft sich auf 184 t über 50 a Betrachtungszeit für das Beispielgebäude, siehe Abb. 37. Der Berechnungsansatz basiert auf den von IINAS (2017) veröffentlichten CO₂-Äquivalenten für 2020 und ab 2030. Damit ist das Massivabsorbersystem gegenüber dem Erdsondensystem in ökologischer Sicht zu bevorzugen.

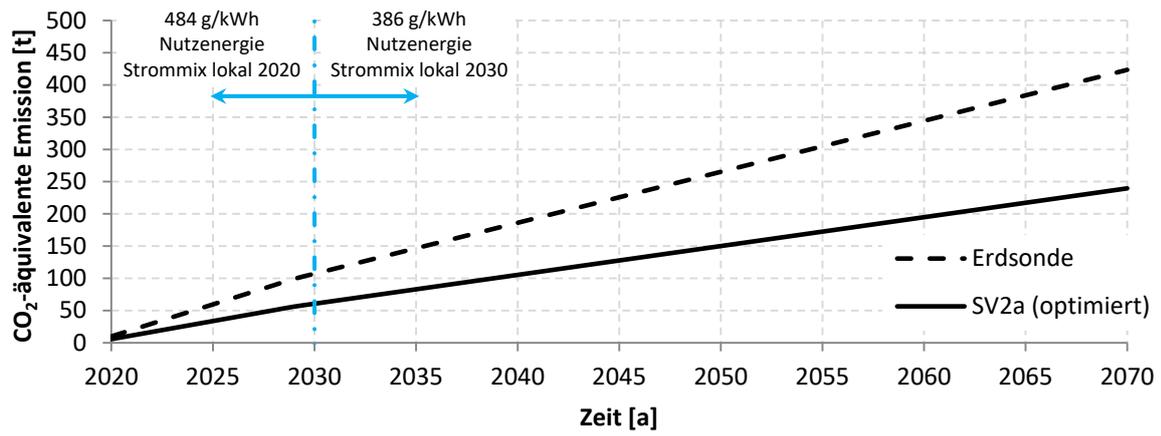


Abb. 37: CO₂-äquivalente Emission des optimierten Massivabsorbersystems im Vergleich zum Erdsondenheizsystem.

4 Anhang

A. Kostenanalyse nach Annuitätenmethode

Alle zu betrachtenden Komponenten und das System selbst umfassen neben den Investitionskosten zur Herstellung auch zyklische, jährliche Betriebskosten. Während die Einmalzahlungen zu Beginn eine Aussage über den Material- und Verarbeitungsaufwand geben und direkte Vergleiche ermöglichen, ändert sich der Einfluss der Betriebskosten auf den monetären Gesamtaufwand mit der Länge des betrachteten Zeitraums. Eine Möglichkeit beide Kostenarten zu vereinen bietet die Annuitätenmethode, die für gebäudetechnische Anlagen in der VDI 2067 Blatt 1:2012-09 beschrieben wird.

Im Detail wird unterschieden zwischen kapital-, bedarfs- und betriebsgebundenen sowie sonstigen Kosten. Der Bezugszeitraum beträgt per Definition ein Jahr, wonach die kombinierten Kosten als Annuität AN [€ a^{-1}] bezeichnet werden:

$$AN = AN_K + AN_V + AN_B + AN_S \quad (4.1)$$

worin AN_K , AN_V , AN_B und AN_S die jährlichen kapital-, bedarfs- und betriebsgebundenen sowie sonstigen Kosten bezeichnen. Wie sich zeigt, können die Annuitäten summiert werden. Eine detaillierte Auflistung der Berechnungsgleichungen ist VDI 2067 Blatt 1:2012-09 (16ff.) zu entnehmen. In Tabelle 7 sind die nach VDI 2067 Blatt 1:2012-09 (21ff.) für diese Arbeit relevanten Kennwerte zur Bestimmung von AN_K und AN_B aufgeführt; Unterschiede wurden gekennzeichnet.

Tabelle 7: Angesetzte Werte für die rechnerische Nutzungsdauer, den Aufwand für Inspektion, Wartung und Instandsetzung; wenn nicht anders angegeben Werte nach VDI 2067 Blatt 1:2012-09

Anlagenkomponente	Rechnerische Nutzungsdauer T_N [-]	Aufwand für Instandsetzung f_{Inst} [%]	Aufwand für Wartung und Inspektion f_{W+Insp} [%]
Massivabsorber	50 ⁽¹⁾	20% / 50a = 0,4% / a ⁽²⁾	0 ⁽³⁾
Festkörperwärmespeicher	50 ⁽¹⁾	0 ⁽³⁾	0 ⁽³⁾
Wärmepumpe	20	1	1,5
MSR ⁽⁴⁾	15	10	2
Rohre und Formteile	40	1	0
Ausdehnungsgefäße	15	1	1
Wärmeübertrager	20	2	0
Umwälzpumpen	10	2	1
Armaturen	15	1	1
Erdsonde ⁽⁵⁾	50	2	1

⁽¹⁾ Integrierter Bestandteil des Gebäudes, daher identisch mit Lebensdauer des Gebäudes

⁽²⁾ Annahme: Innerhalb der Nutzungszeit muss die Fassade einmal neu gestrichen werden. Fassadenanstrich 8 € m⁻² bei einem angesetzten Investitionsbetrag für Massivabsorber von 40 € m⁻²

⁽³⁾ Ansatz des Autors

⁽⁴⁾ VDI 2067 Blatt 1:2012-09 (27): verallgemeinerter Ansatz von „Regelventile, Hähne, Klappen“ für die gesamte MSR-Technik

⁽⁵⁾ Für den Systemvergleich relevant

AN beschreibt konstante, jährlich wiederkehrende Kosten und können zukünftige Kostenentwicklungen berücksichtigen. Darin enthalten sind die in Tabelle 7 aufgeführten, unterschiedlichen Nutzungszeiten der einzelnen Bestandteile, der Zinssatz der aufzuwendenden Kosten sowie mögliche Preissteigerungsraten. Die Grundlage für alle Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dieser Arbeit ist:

- Nach VDI 6025:2012-11 (40): „Zu wählen ist als Betrachtungszeitraum die Nutzungsdauer der kürzerlebigen und/oder kapitalintensiveren Anlagenkomponenten, sodass für die übrigen Anlagenkomponenten der Restwert zu ermitteln ist.“ Da die kapitalintensiveren Anlagenkomponenten die Massivabsorberfassade und der Wärmespeicher sind, wird als Betrachtungszeitraum 50 Jahre gewählt. Ein kürzerer Betrachtungszeitraum führt zu geringeren Annuitäten, da der Restwert größer ist.
- Der Kalkulationszins wird ausgehend vom mittleren Effektivzinssatz nach Deutsche Bundesbank (2017, 6) von April 2016 bis März 2017 für Kredite bis 0,25 Mio. € mit einer Laufzeit von über 10 Jahren für nichtfinanzielle Kapitalgesellschaften mit anfänglicher Zinsbindung ermittelt und beträgt $1,82\% \text{ a}^{-1}$. Der mittlere Effektivzinssatz für Einlage von über 2 Jahren liegt bei $1,66\% \text{ a}^{-1}$. Es wird eine Fremd- und Eigenkapitalquote von 50 % angenommen, wodurch sich der zinsstatische Kalkulationszinsfuß i [-] (nominell) ergibt zu: $i = 0,0182 \cdot 0,5 + 0,0166 \cdot 0,5 = 0,0174$. Der Zinsfaktor q [-] folgt zu: $q = 1 + i = 1,0174$.
- Als Preissteigerungsrate für kapitalgebundene Kosten wird nach Statistisches Bundesamt (2017, 28) $2,5\% \text{ a}^{-1}$ als Mittelwert der prozentualen Veränderungen des Preisindex gegenüber dem Vorjahr (Zeitraum 2005 bis 2016) für gewerbliche Betriebsgebäude herangezogen. Dieser Wert wird ebenfalls für betriebsgebundene Kosten und Instandhaltung angesetzt.
- Es wird der durchschnittliche Strompreis für Industrie (Jahresverbrauch 160 bis 20000 MWh) angesetzt nach der aktuellen Strompreisanalyse des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017, 25) mit $17,12 \text{ Ct. kWh}^{-1}$ (2017) inkl. Stromsteuer und anderer Abgaben². Ein Sondertarif für Wärmepumpenstrom und eine monatliche Grundpreispauschale werden nicht angewendet.

² Zusammengesetzt aus (Werte in Ct. kWh⁻¹): 8,05 (Beschaffung, Netzentgelt, Vertrieb); 0,11 (Konzessionsabgabe); 6,88 (Umlage nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz); 0,29 (Umlage nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz); 0,25 (Umlage nach der Stromnetzentgeltverordnung); -0,002 (Offshore-Haftungsumlage); 0,006 (Umlage für abschaltbare Lasten); 1,537 (Stromsteuer)

- Als Preissteigerungsrate für bedarfsgebundene Kosten, hier Strom, wird die durchschnittliche Strompreisentwicklung von 2011 bis 2017 nach Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017, 25) zugrunde gelegt. Die ermittelte prozentuale jährliche Änderung beträgt $3,4 \% a^{-1}$ als Mittelwert der prozentualen Veränderungen der Strompreise gegenüber dem Vorjahr.

Über die Annuität und über eine zugehörige, jährliche Wärmemenge Q [kWh a^{-1}], z.B. die dem Gebäude zugeführte Heizenergie Q_{Geb} [kWh a^{-1}], kann ein spezifischer Wärmepreis $k_{sys,a}$ [€ kWh^{-1}] angegeben werden:

$$k_{sys,a} = \frac{AN}{Q} \quad (4.2)$$

B. Beispielgebäude: U-Werte**Tabelle 8: U-Werte des Beispielgebäudes**

Bauteil	U-Wert [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
Bodenplatte über Erdreich (30 cm Beton, 12 cm XPS Wärmedämmung)	0,28
Bodenplatte über Wärmespeicher: 24 cm XPS Wärmedämmung trennen die oberste Speicherschicht von der Bodenplatte	0,15
Dach	0,21
Fassade (16 cm Tragschale (Beton), 14 cm WLG031 Wärmedämmung, 7 cm Vorsatzschale (Beton))	0,21
Fensterband	1,06

C. Basis zur Kostenkalkulation der Systemkomponenten

Gebäudeleittechnik

Für die Gebäudeleittechnik werden die Kosten pauschal über die Datenpunktmenge einer Anlage bestimmt, siehe Tabelle 9. Jeder Datenpunkt inkl. der Installationsarbeiten wird dabei mit 300 € DP⁻¹ angesetzt; Angabe durch MESCADO Regeltechnik GmbH.

Tabelle 9: Datenpunktliste

Bauteil	Veranschlagte Datenpunktanzahl DP
Pumpe	4
Ventil	1
Klappe mit Rückmeldung	3
Wärmepumpe	8
Temperatursensor	1

Bauteilkosten

Die Investitionskosten der Zentrale werden über die Anzahl der einzelnen Bestandteile ermittelt. Sie sind für jede Anlagenkonfiguration einmalig zu bestimmen.

Tabelle 10: Betriebsrelevante Anlagenbestandteile; Preisansatz durch Richard Kaufmann GmbH

Bauteile Zentrale	Stückpreis netto [€]
Zusatzkomponenten Wärmepumpe, z.B. Komponsator	2500
Inbetriebnahme pauschal	800
Verteiler/Sammler Massivabsorber	850
Glykolegemisch pauschal	2300
Ausdehnungsgefäß (klein)	130
Ausdehnungsgefäß (groß)	535
Wärmeübertrager	900
Hydraulische Weiche	715
Pufferspeicher 1000 L inkl. Dämmung	520
Umwälzpumpen pauschal	2500
Rückschlagklappe	35
Absperrklappe	80
Schmutzfänger	50
Vorschweißflansch	18

Massivabsorber

Bei der Kalkulation der Massivabsorber werden die spezifischen Herstellkosten abzüglich der Kosten für eine Standardvorsatzschale von 15 € m⁻² bewertet (Mehrpreiskalkulation).

Wärmepumpe

Für die Wärmepumpe wurden je zwei Wärmepumpen im Bereich zwischen 40 und 75 kW von drei Herstellern³ verglichen. Bezogen auf die Wärmeleistung bei B0W35 ist der mittlere spezifische Preis bei 413,56 € kW⁻¹; für die Berechnungen werden 415,00 € kW⁻¹ netto angesetzt.

Rohre für Wärmeverteilung

Die Rohre innerhalb der Halle und Zentrale werden als nahtloses Stahlrohr nach DIN EN 10220:2003-03 gewählt. Die verwendeten Maße sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Nahtloses Stahlrohr nach DIN EN 10220:2003-03 mit Preisansatz ohne Rohrmontage

D_i [mm]	Rohrpreis [€ m ⁻¹]	Korrosionsanstrich und tauwasserverhindernde Wärmedämmung inkl. Montage [€ m ⁻¹]*	Gesamtpreis [€ m ⁻¹]
43,1	4,58	34,93	39,51
51,2	6,46	38,62	45,08
70,3	8,26	44,16	52,41
82,5	10,75	49,69	60,44
100,8	15,67	57,07	72,73
125,0	19,50	66,29	85,79
150,0	23,96	75,51	99,47

* bei Betrieb oberhalb des Taupunkts nicht erforderlich; in Systemkalkulation nicht berücksichtigt

Wärmespeicher

Zusätzlich zu den Kosten für das thermisch aktivierte Speichervolumen wird eine umschließende Wärmedämmung mit 0,15 W m⁻² K⁻¹ für 37 € m⁻² angesetzt. Darüber hinaus wird die Wandfläche mit einer wasserfesten, 20 cm starken Betonwand für 50 € m⁻² versehen; Preisangabe durch Laumer Bautechnik GmbH.

Arbeitspreis für Montage

Die Montagezeit wird nach den Empfehlungen der Handwerksinnung (o.V. 2015) errechnet und mit einem Nettostundenlohn für einen A-Monteur von 42,75 € h⁻¹ verrechnet; Preisansatz Richard Kaufmann GmbH.

Unternehmerische Preiskalkulation

Preisreduzierungen oder –erhöhungen aufgrund des Gesamtumfangs der Baumaßnahme werden nicht berücksichtigt. Zuschläge für Gemeinkosten oder Wagnis und Gewinn sind in den Nettopreisen bereits enthalten.

³ Preisangabe Viessmann-Wärmepumpen (BW 301.A45, BWS 301.A29) durch Richard Kaufmann GmbH; ait-deutschland GmbH (Alpha Innotec): alterra pro (SWP 451, SWP 581); Glen Dimplex Deutschland GmbH (SI 50TU, SI 75TU)

D. Polynomkoeffizienten zur Dimensionierung des Gesamtsystems

Tabelle 12: Polynomkoeffizienten zur Speicherdimensionierung, siehe Gl. (3.1)

Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
p1,0,0,0	1,5998E-02	p1,1,0,0	7,4978E-02	p1,2,0,0	4,7268E-01
p1,0,0,1	-2,5922E-01	p1,1,0,1	-7,0407E+00	p1,2,0,1	4,7566E+01
p1,0,0,2	1,9815E+00	p1,1,0,2	6,7158E+01	p1,2,0,2	-4,5419E+02
p1,0,1,0	1,1610E-01	p1,1,1,0	-8,5877E-01	p1,2,1,0	-5,6635E+00
p1,0,1,1	1,9474E-01	p1,1,1,1	1,9683E+02	p1,2,1,1	-1,1765E+03
p1,0,1,2	-1,9895E-13	p1,1,1,2	-1,8062E+03	p1,2,1,2	1,0895E+04
p1,0,2,0	-5,1960E-01	p1,1,2,0	3,5711E+00	p1,2,2,0	1,0326E+01
p1,0,2,1	2,2872E+00	p1,1,2,1	-6,1670E+02	p1,2,2,1	3,5458E+03
p1,0,2,2	-2,0651E+01	p1,1,2,2	5,5449E+03	p1,2,2,2	-3,2569E+04
p2,0,0,0	1,8125E-03	p2,1,0,0	-1,6183E-02	p2,2,0,0	3,9631E-02
p2,0,0,1	-7,6290E-03	p2,1,0,1	2,9063E-01	p2,2,0,1	-1,5569E+00
p2,0,0,2	-9,9078E-03	p2,1,0,2	-1,9344E+00	p2,2,0,2	1,2132E+01
p2,0,1,0	-1,5951E-02	p2,1,1,0	1,1889E-01	p2,2,1,0	-1,4154E-01
p2,0,1,1	6,9354E-02	p2,1,1,1	-3,9277E+00	p2,2,1,1	2,0725E+01
p2,0,1,2	1,0658E-14	p2,1,1,2	3,2857E+01	p2,2,1,2	-1,9498E+02
p2,0,2,0	3,6328E-02	p2,1,2,0	-2,3590E-01	p2,2,2,0	4,2633E-14
p2,0,2,1	-1,4154E-01	p2,1,2,1	9,9415E+00	p2,2,2,1	-5,0550E+01
p2,0,2,2	-1,0658E-14	p2,1,2,2	-8,9064E+01	p2,2,2,2	5,1581E+02

Tabelle 13: Polynomkoeffizienten zur Abschätzung von $\xi / k_{Sys,a}$, siehe Gl. (3.7)

Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
p0,0,0,0	1,1256E+01	p0,1,0,0	-1,1817E+02	p0,2,0,0	5,2008E+02
p0,0,0,1	-1,5952E+02	p0,1,0,1	4,1937E+03	p0,2,0,1	-1,8263E+04
p0,0,0,2	8,5167E+02	p0,1,0,2	-1,9259E+04	p0,2,0,2	7,7285E+04
p0,0,1,0	-1,1969E+01	p0,1,1,0	1,1736E+03	p0,2,1,0	-4,9500E+03
p0,0,1,1	1,7590E+03	p0,1,1,1	-4,8680E+04	p0,2,1,1	2,0110E+05
p0,0,1,2	-9,3610E+03	p0,1,1,2	2,2362E+05	p0,2,1,2	-8,5057E+05
p0,0,2,0	4,4673E+01	p0,1,2,0	-3,1587E+03	p0,2,2,0	1,2734E+04
p0,0,2,1	-4,7866E+03	p0,1,2,1	1,2219E+05	p0,2,2,1	-4,9240E+05
p0,0,2,2	2,4821E+04	p0,1,2,2	-5,5656E+05	p0,2,2,2	2,0876E+06
p1,0,0,0	-8,5050E-03	p1,1,0,0	1,5645E+00	p1,2,0,0	-5,9230E+00
p1,0,0,1	2,0858E+00	p1,1,0,1	-6,1041E+01	p1,2,0,1	2,3519E+02
p1,0,0,2	-1,1062E+01	p1,1,0,2	2,6990E+02	p1,2,0,2	-8,3789E+02
p1,0,1,0	3,8737E-01	p1,1,1,0	-1,8979E+01	p1,2,1,0	7,2122E+01
p1,0,1,1	-2,7040E+01	p1,1,1,1	7,5873E+02	p1,2,1,1	-2,7889E+03
p1,0,1,2	1,4380E+02	p1,1,1,2	-3,4177E+03	p1,2,1,2	1,0264E+04
p1,0,2,0	-9,3419E-01	p1,1,2,0	5,0078E+01	p1,2,2,0	-1,8239E+02
p1,0,2,1	7,4512E+01	p1,1,2,1	-1,9383E+03	p1,2,2,1	6,9021E+03
p1,0,2,2	-3,9107E+02	p1,1,2,2	8,7125E+03	p1,2,2,2	-2,5705E+04

Tabelle 14: Polynomkoeffizienten zur Abschätzung von JAZ , siehe Gl. (3.7)

Parameter	Wert	Parameter	Wert	Parameter	Wert
p0,0,0,0	1,3360E+01	p0,1,0,0	-7,1523E+01	p0,2,0,0	3,2912E+02
p0,0,0,1	-1,1409E+02	p0,1,0,1	2,6967E+03	p0,2,0,1	-1,2176E+04
p0,0,0,2	5,9584E+02	p0,1,0,2	-1,3839E+04	p0,2,0,2	6,2124E+04
p0,0,1,0	-3,5534E+01	p0,1,1,0	9,3396E+02	p0,2,1,0	-4,3105E+03
p0,0,1,1	1,4983E+03	p0,1,1,1	-3,6728E+04	p0,2,1,1	1,7249E+05
p0,0,1,2	-8,1163E+03	p0,1,1,2	2,0598E+05	p0,2,1,2	-9,7756E+05
p0,0,2,0	1,0236E+02	p0,1,2,0	-2,4627E+03	p0,2,2,0	1,1306E+04
p0,0,2,1	-3,9349E+03	p0,1,2,1	9,9139E+04	p0,2,2,1	-4,7247E+05
p0,0,2,2	2,1691E+04	p0,1,2,2	-5,7490E+05	p0,2,2,2	2,7874E+06
p1,0,0,0	-7,3633E-02	p1,1,0,0	1,0454E+00	p1,2,0,0	-5,0136E+00
p1,0,0,1	1,6935E+00	p1,1,0,1	-4,2044E+01	p1,2,0,1	1,8949E+02
p1,0,0,2	-9,1957E+00	p1,1,0,2	2,1966E+02	p1,2,0,2	-9,7450E+02
p1,0,1,0	4,5837E-01	p1,1,1,0	-1,4095E+01	p1,2,1,0	6,6401E+01
p1,0,1,1	-2,2871E+01	p1,1,1,1	5,7444E+02	p1,2,1,1	-2,6662E+03
p1,0,1,2	1,2689E+02	p1,1,1,2	-3,2535E+03	p1,2,1,2	1,5170E+04
p1,0,2,0	-1,3990E+00	p1,1,2,0	3,7398E+01	p1,2,2,0	-1,7342E+02
p1,0,2,1	6,0472E+01	p1,1,2,1	-1,5423E+03	p1,2,2,1	7,2263E+03
p1,0,2,2	-3,3923E+02	p1,1,2,2	9,0024E+03	p1,2,2,2	-4,2761E+04