



# **Evaluation verschiedener Technologien als saisonale Wärmespeicher für Solarthermie und Wärmepumpen als Wärmeerzeuger**

**Masterthesis**

Mario Rosso

Tutor: Prof. Jürg Rohrer

Abgabe: 01.07.2021

Forschungsgruppe Erneuerbare Energien

MRU Ecological Engineering

ZHAW - Life Science und Facility Management

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	1
1.1	Ausgangslage und Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung und Fragestellung.....	3
2	Theorie.....	4
2.1	PVT-Kollektoren.....	4
2.1.1	Passive Kühlung über PVT-Kollektoren.....	4
2.2	Wärmepumpen.....	5
2.2.1	Leistungszahlen COP und JAZ.....	6
2.3	Saisonale Wärmespeicher.....	7
3	Material und Methodik.....	8
3.1	Recherche und Beurteilung der Wärmespeichertechnologien.....	8
3.2	Beurteilung der Systemeffizienz.....	8
3.2.1	Solarer Deckungsgrad.....	8
3.2.2	Autarkiegrad und Eigenverbrauchsgrad.....	9
3.2.3	Jährlicher Netzbezug.....	9
3.2.4	Gesamtstromverbrauch.....	9
3.2.5	Systemjahresarbeitszahl.....	9
3.3	Definition der Gebäude und der verwendeten Systemkomponenten.....	10
3.3.1	Spezifischer jährlicher Heizwärmebedarf.....	10
3.3.2	Gebäudegrößen und jährlicher Heizwärmebedarf.....	11
3.3.3	Systemkomponenten.....	14
3.3.4	Fläche für eTank neben und unter dem Gebäude.....	17
3.3.5	Speichervolumen im Untergeschoss.....	19
3.4	Erstellung der Dimensionierungsmatrizen.....	19
3.4.1	Heizwärmebedarfe und solare Einstrahlung.....	20
3.4.2	Beurteilung der Systeme.....	20
3.4.3	Anwendung der Dimensionierungsmatrizen.....	23
3.5	Simulation der Systeme.....	23
4	Recherche Wärmespeichertechnologien.....	24
4.1	Sensible Wärmespeicher.....	24
4.2	Latentwärmespeicher.....	26
4.3	Sorptionwärmespeicher.....	28
4.4	Zusammenfassung und Auswertung Recherche Wärmespeichertechnologien.....	30
4.4.1	Auswahl der geeigneten Wärmespeichertechnologien.....	30
5	Definition der Heiz- und Kühlsysteme.....	31

- 5.1 eTank System..... 31
- 5.2 2-eTank System ..... 33
- 5.3 Eisspeicher System ..... 34
- 5.4 Paraffin-Speicher System ..... 36
  - 5.4.1 Auswahl des Wärmespeichermediums ..... 38
- 5.5 Paraffin-Speicher + eTank System ..... 41
  - 5.5.1 Variante «Speicherkapazität im Winter erhöhen»..... 41
  - 5.5.2 Variante «Speicherkapazität bei passiver Kühlung erhöhen»..... 42
  - 5.5.3 Variante «Speicherkapazität bei aktiver Kühlung erhöhen»..... 43
  - 5.5.4 Auswahl der Variante ..... 44
- 6 Resultate..... 45
  - 6.1 eTank System..... 46
  - 6.2 2-eTank System ..... 48
  - 6.3 Eisspeicher System ..... 50
  - 6.4 Paraffin-Speicher System ..... 51
  - 6.5 Paraffin-Speicher + eTank System ..... 53
  - 6.6 Vergleich der Systeme ..... 54
    - 6.6.1 Vergleich der Systeme mit eTanks ..... 56
    - 6.6.2 Vergleich mit 2SOL und L/W-WP System ..... 59
    - 6.6.3 Zusammenfassung des Systemvergleichs ..... 62
- 7 Fazit ..... 64
  - 7.1 Einordnung in andere Studien..... 65
- 8 Diskussion..... 67
  - 8.1 Auslegung der Eis- und der Paraffin-Speicher ..... 67
    - 8.1.1 Aufstellort..... 67
    - 8.1.2 Validierung Paraffin-Speicher..... 67
    - 8.1.3 Kosten Paraffin-Speicher ..... 67
  - 8.2 Dimensionierung der eTanks..... 68
    - 8.2.1 Minimaltemperatur des eTanks ..... 68
  - 8.3 Bildung von Kondenswasser bei aktiver Kühlung..... 69
  - 8.4 Reduktion der Anzahl PVT-Kollektoren ..... 69
  - 8.5 Beurteilung des Komponentenaufwands..... 69
  - 8.6 Anwendung der Dimensionierungsmatrizen..... 70
    - 8.6.1 Standort der betrachteten Systeme..... 70
  - 8.7 Korrektheit der Resultate ..... 70
- 9 Ausblick..... 71

10	Literaturverzeichnis.....	74
11	Abbildungsverzeichnis.....	78

## Zusammenfassung

Diese Masterthesis wurde in der Forschungsgruppe Erneuerbare Energien der Master Research Unit Ecological Engineering an der ZHAW in Wädenswil durchgeführt.

Das Ziel der Arbeit war, es bezüglich der verwendeten Wärmespeichertechnologie verschiedene kombinierte Heiz- und Kühlsysteme für den Einsatz in Gebäuden mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von mehr als 20 MWh, als Alternativen zu Systemen mit Erdwärmesonden, L/W-WPs oder Holzfeuerungen zu finden. Die Systeme sollen über eine PVT-Anlage zur Strom- und Wärmeengewinnung, einem saisonalen Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren sowie einer Sole/Wasser-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger verfügen.

In der Recherche zu den verfügbaren Speichertechnologien wurde ersichtlich, dass vor allem der eTank, der Eisspeicher sowie der Paraffin-Speicher als potenziell geeignete Speichertechnologien für den Einsatz als Wärmespeicher im vorgegebenen System eingestuft werden. Bei einem eTank handelt es sich um einen ins Erdreich eingelassenen sensiblen Wärmespeicher, der mit einem Füllmaterial wie Erde, Sand oder Kies gefüllt ist, und je nach Bedarf mit Wärme beladen oder Wärme daraus entzogen werden kann.

Mit den ausgewählten Speichertechnologien wurden folgende fünf kombinierten Heiz- und Kühlsysteme zur näheren Betrachtung definiert: eTank System, 2-eTank System, Eisspeicher System, Paraffin-Speicher System und Paraffin-Speicher + eTank System. Anschliessend wurden die Systeme anhand ihrer Eignung zum Einsatz in verschiedenen Gebäudetypen mittels Simulationsresultaten aus Polysun bewertet und mit einander verglichen. Die Gebäudetypen wurden durch ihren jährlichen Heizwärmebedarf und anhand der Unterscheidung zwischen Neubauten und Sanierungsgebäude charakterisiert. Mit den Simulationsresultaten wurde für jedes System eine Dimensionierungsmatrix erstellt, die eine Aussage darüber liefert, ob und wie gut sich ein bestimmtes Heiz- und Kühlsystemen für einen bestimmten Gebäudetyp eignet und mit welcher Speichergrösse, welcher Anzahl an PVT-Kollektoren und welcher Systemjahresarbeitszahl (SJAZ) zu rechnen ist.

In der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Systeme mit einem eTank als Wärmespeicher die besten Resultate lieferten und insbesondere bei Neubauten, mit der Möglichkeit den eTank unter dem Gebäude zu platzieren, eine geeignete Lösung als Heiz- und Kühlsystem darstellen. Im Gegensatz zu einem Eisspeicher System oder einem Paraffin-Speicher System wird dabei keine Grabung neben dem Gebäude benötigt, weshalb auch in urbanen Gebieten mit engen Platzverhältnissen neben den Gebäuden, in diesen Systemen grosses Potenzial gesehen wird. Bei Sanierungen in Bestandsgebäuden ist der verfügbare Platz neben den Gebäuden jedoch oft limitiert. Es ist deshalb generell zu beobachten, dass je grösser der Heizwärmebedarf der Gebäude, desto kleiner die Auswahl der geeigneten Systeme. Aufgrund der Festlegung einer maximalen eTank-Fläche und einer minimalen Temperatur im eTank eignen sich die Systeme mit eTank in Sanierungsgebäuden nur bis zu einem jährlichen Heizwärmebedarf von 20 bzw. 35 MWh (2-eTank System), obwohl sie auch bei höherem Heizwärmebedarf eine gute Performance mit einer hohen SJAZ aufweisen würden. Unter den in dieser Arbeit festgelegten Voraussetzungen bietet jedoch das Eisspeicher System für Sanierungsgebäude ab einem Heizwärmebedarf von 35 MWh die geeignetste Lösung.

Bezüglich der Eignung der Systeme ergibt sich bei Gebäuden mit Radiatorheizungen das gleiche Bild wie bei Gebäuden mit Fussbodenheizungen. Der Unterschied liegt darin, dass die erreichten SJAZ bei Gebäuden mit Radiatorheizungen bei gleichbleibendem Komponentenaufwand jeweils um 8 bis 15 % tiefer liegen.

Bezüglich des Vergleiches zwischen den Systemen mit einem eTank, bietet insbesondere das 2-eTank System (getrennte Einspeicherung der Wärme aus den PVT-Kollektoren und der Abwärme aus der passiven bzw. aktiven Kühlung) die beste Variante. Gegenüber dem eTank System kann mit dem 2-eTank System die Fläche des eTanks bei gleichbleibender Anzahl PVT-Kollektoren um ca. 22 % reduziert werden. Ausserdem ist bei gleicher eTank-Fläche und gleicher Anzahl an PVT-Kollektoren mit dem 2-eTank System mit einer um 3 % höheren SJAZ und einer effizienteren Kühlung zu rechnen. Im Vergleich zwischen allen untersuchten Systemen, erreicht das 2-eTank System bei empfohlenem Komponentenaufwand mit 6.8 die höchste SJAZ. Sie liegt auch gegenüber der SJAZ der beiden Vergleichssysteme (2SOL System und L/W-WP System), die laut den in dieser Arbeit definierten Rahmenbedingungen nicht möglich sind, um 15 bzw. 58 % höher. Auch die Anzahl Gradstunden sind beim 2-eTank System mit 142 (bei einer Grenztemperatur von 24°C) und 5 (bei einer Grenztemperatur von 24.5°C), was einer Reduktion gegenüber den beiden Vergleichssystemen von ca. 75 % bzw. 90 % entspricht, am geringsten und damit die Kühlung am effizientesten.

Mit dem 2-eTank System konnte ein System gefunden werden, dass sich für die Anwendung in Mehrfamilienhäusern mit Heizwärmebedarfen von mehr als 20 MWh gut eignet. Auch bezüglich der Kühlung der Gebäude hat das 2-eTank System mit dem Kühl-eTank als Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung grosses Potential und erwies sich in der Untersuchung als das erfolgversprechendste System. Die Anwendbarkeit in Sanierungsgebäuden hängt dabei jedoch stark von der verfügbaren Fläche neben dem Gebäude und der minimal zulässigen Temperatur in den eTanks ab.

### Take-Home Messages

- Der eTank, der Eisspeicher und der Paraffin-Speicher werden als geeignete Speichertechnologie für den Einsatz als saisonaler Pufferspeicher für die Wärme aus PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für eine Wärmepumpe eingestuft.
- Systeme mit einem eTank als Wärmespeicher eignen sich insbesondere in Neubauten besser als ein Eisspeicher oder Paraffin-Speicher System. Für den Einsatz in Sanierungsgebäuden hängt die Eignung stark von der verfügbaren Fläche neben dem Gebäude und der zulässigen Minimaltemperatur im eTank ab.
- Das 2-eTank System bietet eine geeignete Alternative zu Luft/Wasser-Wärmepumpen-Systemen oder «Erdwärmesonden-Systemen» für den Einsatz in Mehrfamilienhäusern mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von mehr als 20 MWh. Von den untersuchten Systemen erzielt es die besten Simulationsergebnisse.
- Alle in dieser Arbeit vorliegenden Ergebnisse basieren auf Systemsimulationen. Für eine endgültige Eignungsbeurteilung ist eine Validierung der Systeme in der Praxis erforderlich.

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangslage und Motivation

In Anbetracht der aktuellen Klimaerwärmung und der dringend benötigten Dekarbonisierung der Energiewirtschaft ist es wichtig den CO<sub>2</sub>-Ausstoss in naher Zukunft stark zu reduzieren. Die Aufteilung des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz im Jahre 2019 macht deutlich, dass knapp 40 % des inländischen Endenergieverbrauchs auf die Sektoren Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung und Lüftung gefallen sind, wobei diese noch vor der inländischen Mobilität mit 31 % die grössten Energieverbrauchssektoren in der Schweiz darstellen (BFE, 2020). Im Jahr 2017 basierten knapp 60 % aller Heizsysteme, die schweizweit im Einsatz sind, immer noch auf fossilen Energiequellen wie Erdöl und Erdgas, weshalb dort ein grosses Potential und Handlungsbedarf gesehen wird (BFS, 2017). Es gilt also neue Heizsysteme zu entwickeln, die effizient und nachhaltig durch erneuerbare Energiequellen betrieben werden können, um in diesem Sektor den Energieverbrauch und den CO<sub>2</sub>-Ausstoss langfristig zu senken. Als Beispiele möglicher erneuerbaren Energiequellen zur Gebäudebeheizung sind Holz, Solarthermie, Geothermie, oder im Allgemeinen Niedrigtemperaturquellen wie die Luft oder Gewässer, die über eine Wärmepumpe erschlossen werden können, zu nennen. Jede dieser Energiequellen hat jedoch seine Vor- und Nachteile. Holz gilt zwar als klimaneutrale Energiequelle, jedoch wird durch Holzfeuerungen das darin gespeicherte CO<sub>2</sub> innert kurzer Zeit in die Atmosphäre freigesetzt, wohingegen die erneute Bindung in Biomasse lange dauern kann. Die Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle für Wärmepumpen hingegen, ist aufgrund der Gesetzgebung (Auskühlung des Erdreichs bei zu hoher Sondendichte / Grundwasserschutz zonen) nicht überall möglich. Auch die Nutzung der Luft als Wärmequelle für Wärmepumpen birgt Probleme wie Geräuschemissionen sowie eine kleinere Effizienz gegenüber der Nutzung anderer Wärmequellen aufgrund der tiefen Temperaturen der Aussenluft (Wärmequelle) in Zeiten mit hohem Wärmebedarf. Dies belastet das Stromnetz insbesondere in den kalten Monaten wie Januar und Februar (Haller & Ruesch, 2019). Aufgrund der Nachteile und Einschränkungen der genannten Energiequellen bietet sich vor allem die Nutzung der Solarthermie zur Gebäudeheizung an.

Zusätzlich zur Anforderung an die Energiequelle werden bei der Entwicklung neuer Heizsysteme auch Anforderungen an die Wärmespeicherung gestellt. Die erwartete saisonale Verschiebung von Wärmeproduktion durch die Solarthermie im Sommer und Wärmenutzung im Winter soll durch den Einsatz von saisonalen Speichern, die die Wärme über einen Zeitraum von mehreren Monaten möglichst verlustarm speichern, ausgeglichen werden. Ausserdem soll bei neuen Heizsystemen auch die Möglichkeit ein Gebäude zu kühlen integriert werden, da auch in der Schweiz die Durchschnittstemperatur aufgrund der Klimaerwärmung in den kommenden Jahren ansteigen wird. Es gilt also kombinierte Heiz- und Kühlsysteme mit saisonalen Wärmespeichern zu entwickeln, die effizient mit erneuerbaren Energiequellen versorgt werden können.

In Abbildung 1 ist das Schema eines solchen Systems dargestellt. Um die Solarthermie zu nutzen, werden dabei PVT-Kollektoren verwendet, die Strom und Wärme auf derselben Fläche produzieren und zusätzlich für die passive Kühlung des Gebäudes im Sommer verwendet werden können, indem die Wärme aus dem Wohnraum in der Nacht über die PVT-Kollektoren an die Umwelt abgegeben wird. Vor allem bei Neubauten, wo nach den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) eine Pflicht zur Eigenstromerzeugung herrscht, stellen PVT-Kollektoren eine sinnvolle Lösung dar (EnDK, 2018). Für die Bereitstellung der Raumwärme und die Brauchwarmwasser-Erwärmung soll eine Sole/Wasser-Wärmepumpe (S/W-WP) als alleiniger Wärmeerzeuger verwendet werden, da diese eine effiziente und etablierte Technik darstellt, mit der niedrig temperierte Energiequellen erschlossen und ins Heizsystem eingebracht werden können. Zusätzlich kann das Gebäude über eine reversible Wärmepumpe im Sommer aktiv gekühlt werden. Der saisonale

Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren soll einerseits als Wärmequelle für die Wärmepumpe und andererseits als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung genutzt werden.

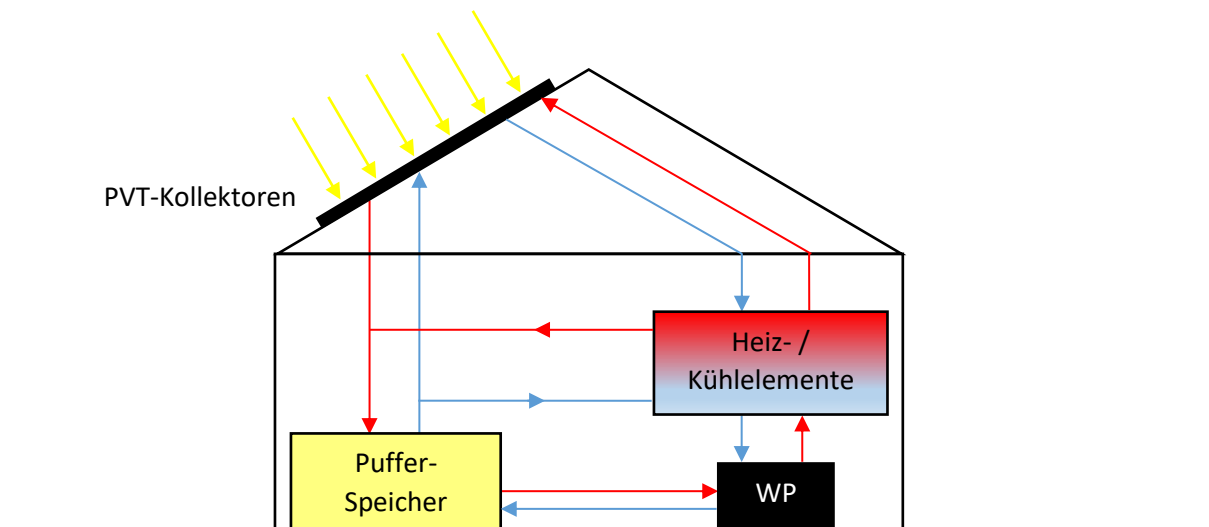


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines kombinierten Heiz- und Kühlsystems mit PVT-Kollektoren als Energiequelle, einer Wärmepumpe (WP) als Wärmeerzeuger und einem Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Die PVT-Module und der Pufferspeicher dienen zusätzlich als Wärmesenke für die Kühlung des Gebäudes.

Mit dem an der ZHAW untersuchten L-Sol-System konnte bereits gezeigt werden, dass PVT-Kollektoren in Kombination mit einer Wärmepumpe eine geeignete Alternative zu Luft/Wasser-Wärmepumpen-Systemen darstellen, da neben der Wärmeerzeugung gleichzeitig Strom für den Betrieb der Wärmepumpe produziert wird (Sauter, et al., 2020). Bei diesem System wird ein Tank mit einem Wasser-Glykol-Gemisch als Pufferspeicher («Kaltwasser-Speicher») eingesetzt, der durch die PVT-Kollektoren aufgewärmt wird und der Wärmepumpe als Wärmequelle dient. Bei der Untersuchung hat sich jedoch gezeigt, dass sich das L-Sol-System nur für Gebäude mit einem maximalen jährlichen Heizwärmebedarf von 20 MWh eignet, da die Anzahl installierter PVT-Kollektoren durch die Dachfläche begrenzt ist (Sauter, et al., 2020). Deshalb soll dieses System nun erweitert bzw. angepasst werden, um auch bei Verbrauchern (Neubauten und Sanierungen) mit einem höheren jährlichen Heizwärmebedarf Verwendung zu finden, wobei jeweils der jährliche Netzbezug an elektrischer Energie möglichst geringgehalten und eine möglichst hohe Systemjahresarbeitszahl erreicht werden soll.

Es stellt sich die Frage, welche Speichertechnologien oder Kombinationen von Speichertechnologien für eine solche Anwendung in Frage kommen. Der eTank, dessen Potential als Speichertechnologie im beschriebenen System im Vorfeld dieser Masterarbeit in einer PWRU2 mit dem Titel «Simulation eTank» untersucht wurde, wird als eine mögliche erfolversprechende Lösung angesehen (Rosso, 2021). Beim eTank handelt es sich um einen neben oder unter dem Gebäude ins Erdreich eingelassenen, saisonalen Wärmespeicher, der die oberflächennahen Erdschichten als sensibles Speichermedium nutzt (siehe Kapitel 4.1).



## 1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Als übergeordnetes Ziel der Arbeit soll bezüglich der Speichertechnologie des Pufferspeichers neuartige Heiz- und Kühlsysteme betrachtet werden, welche, falls Erdwärmesonden oder Grundwassernutzung nicht möglich sind, als Alternative bzw. Konkurrenz zu Holzfeuerungen oder Luft/Wasser-Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden können (siehe Abbildung 1). Neben dem Heizsystem soll jeweils auch eine passive Rückkühlmöglichkeit über die PVT-Kollektoren als auch über den Pufferspeicher sowie eine aktive Kühlung durch die Wärmepumpe geprüft bzw. simuliert werden. Die Effizienz und Realisierbarkeit dieser Heiz- und Kühlsysteme soll mittels im Simulationstool Polysun erstellten Simulationsmodelle geprüft und festgehalten werden. Ausserdem soll der eTank allein und in Kombination mit anderen geeigneten Speichertechnologien weiter untersucht werden, da er sich für die beschriebene Voraussetzung als Speichertechnologie eignet (Rosso, 2021).

Weiter soll für jedes untersuchte System eine Entscheidungsgrundlage (Dimensionierungsmatrix) erstellt werden, mit der die Eignung der Systeme für verschiedene Gebäude und Standorte abgeschätzt werden kann. Die Eignung wird jeweils dadurch beurteilt, ob und mit welchem Einsatz an Komponenten (Anzahl PVT-Kollektoren bzw. Grösse des Pufferspeichers) bei einer bestimmten solaren Einstrahlung der erforderliche Heizwärmebedarf gedeckt und eine definierte Mindest-Systemjahresarbeitszahl erreicht werden kann.

Die Masterarbeit soll folgende Fragestellungen beantworten:

- Welche Speichertechnologien oder Kombinationen von Speichertechnologien eignen sich als saisonale Pufferspeicher für Solarwärme und gleichzeitig als Wärmequelle einer Sole/Wasser-Wärmepumpe für die Wärme-Erzeugung in einem Gebäude mit mehr als 20 MWh Heizwärmebedarf pro Jahr?
- Gibt es eine Speichertechnologie oder Kombination von Speichertechnologien, welche die Systemeffizienz, im Vergleich zur alleinigen Verwendung des eTanks als saisonaler Pufferspeicher steigert?
- Für welchen Gebäudetyp (Heizwärmebedarf, solare Einstrahlung) ist welche der untersuchten Speichertechnologien/Kombinationen wie geeignet?

## 2 Theorie

In den folgenden Kapiteln wird auf die Theorie zu den in den Systemen verwendeten Komponenten sowie den wichtigsten System-Kennzahlen eingegangen.

### 2.1 PVT-Kollektoren

Als PVT-Kollektoren werden Hybrid-Solarmodule bezeichnet, die es ermöglichen nicht nur Strom, sondern auch Wärme auf derselben Dachfläche zu produzieren. PVT steht dabei für Photovoltaisch-Thermisch. Nebst dem standardmässigen Aufbau eines PV-Moduls, zirkuliert im Innern der Kollektoren ein Wärmeträgerfluid, um die Wärme abzuführen und damit einen Wärmespeicher zu erwärmen. Als Wärmeträgermittel, wird ein Wasser-Glykol-Gemisch eingesetzt, um das Gefrieren bei tiefen Aussentemperaturen zu verhindern. Durch die Kühlung der PV-Zellen wird einerseits der Wirkungsgrad der Stromproduktion, und andererseits der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erhöht, da der Gesamtenergiegewinn steigt. Die Abnahme der elektrischen Effizienz kann je nach PV-Module bis zu 0.52 % pro °C betragen, wonach der elektrische Mehrertrag durch die Kühlung bis zu 5 % pro Jahr betragen kann (energie Schweiz, 2017). Neben dem Mehrertrag an elektrischer Energie, ist der grosse Vorteil von PVT-Kollektoren jedoch die zusätzlich produzierte Wärme, die abhängig von der solaren Einstrahlung und der Anwendung das 2 bis 3-fache der produzierten elektrischen Energie betragen kann (Swissolar, 2018).

PVT-Kollektoren können in abgedeckte und nicht-abgedeckte Kollektoren unterteilt werden. Die gängigste Bauart sind die nicht-abgedeckten (nicht wärmegeämmten) PVT-Kollektoren, die höhere konvektive Wärmeverluste aufweisen. Diese Bauart wird auch in den Simulationen der vorliegenden Arbeit verwendet (siehe Kapitel 3.3.3.2). Aufgrund der fehlenden Wärmedämmung führt dies zu deutlich tieferen Rücklauftemperaturen als bei abgedeckten (wärmegeämmten) Kollektoren (energie Schweiz, 2017). Nicht-abgedeckte Kollektoren sind insbesondere für Niedertemperaturanwendungen geeignet, da sie dabei die höchsten thermischen Erträge und die grösste Steigerung des elektrischen Ertrags durch die Modulkühlung erreichen. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Kollektoren bei Niedertemperaturanwendungen auch die Umgebungswärme nutzen können und die Wärmeabgabe an die Umgebungsluft beim Einsatz der passiven Kühlung (siehe Kapitel 2.1.1) effizienter ist. Neben der klassischen Brauchwarmwasser-(Vor)erwärmung, und der Heizungsunterstützung ist ein grosses Anwendungsfeld der Einsatz in Kombination mit Wärmepumpen, wobei die erzeugte Solarwärme auf der Wärmequellenseite genutzt wird. Dabei sind vor allem die Regeneration von Erdwärmesonden, die Regeneration von Eisspeichern oder Solespeichern, die Vorwärmung von Grundwassertanks oder die Nutzung als direkte Wärmequelle für die Wärmepumpe zu nennen (energie Schweiz, 2017). Eine typische Anwendung von nicht-abgedeckten Kollektoren, ist aber auch die Erwärmung von Wasser in Swimming-Pools (Sauter, et al., 2020).

#### 2.1.1 Passive Kühlung über PVT-Kollektoren

PVT-Kollektoren bieten neben der Wärme- und Stromproduktion auch die Möglichkeit ein Gebäude passiv zu kühlen, indem in der Nacht oder bei kalten Aussentemperaturen Wärme über die Kollektoren an die Umgebung abgegeben wird. Durch die Abstrahlung gegen den Nachthimmel kühlen die PVT-Kollektoren ab und entziehen dem in der Anlage zirkulierenden Wärmeträgerfluid Wärme. Damit effizient gekühlt werden kann und sich der Betrieb der bei der Kühlung aktiven Pumpen lohnt, muss jedoch eine gewisse Temperaturdifferenz zwischen der Umgebung (Wärmesenke) und dem Wärmeträgermittel herrschen.

Einerseits können die PVT-Kollektoren zur direkten Kühlung des Fussbodens oder der Radiatoren verwendet werden und andererseits zum Rückkühlen eines Speichertanks, der als Wärmesenke einer Wärmepumpe dient, die das Gebäude aktiv auch tagsüber kühlen kann. In beiden Fällen ist auf eine

nicht zu grosse Temperaturdifferenz zwischen dem Raum und dem im Heizungselement zirkulierenden Wasser zu achten, um Kondenswasser an den Rohren und damit Wasserschäden zu verhindern (Afjei, Dott, & Huber, 2007). Eine weitere Möglichkeit ist die Kühlung der Räume durch thermoaktive Bauteile mit integriertem Phase-Change-Material (PCM) in Boden, Decke oder Wänden des Gebäudes. Diese PCM haben eine der Anwendung entsprechend geeignete Schmelztemperatur und nehmen bei steigender Raumtemperatur durch den Phasenwechsel von fest zu flüssig, latente Wärmeenergie auf. In der Nacht kann das durch die PVT-Kollektoren abgekühlte Wärmeträgerfluid durch die Bauteile mit dem geschmolzenen PCM geleitet werden, um dieses wieder zu erstarren und somit zu regenerieren (Cremer, Eicker, Fiedler, & Baumgartner, 2010).

## 2.2 Wärmepumpen

Um Wohn- und Arbeitsräumen bei sinkenden Umgebungstemperaturen energieeffizient zu heizen, werden immer häufiger Wärmepumpen eingesetzt. Die Hauptaufgabe einer Wärmepumpe liegt darin Temperaturen zu erzeugen, die oberhalb der Umgebungstemperatur liegen. Dabei werden die thermodynamischen Eigenschaften des im Kreis gepumpten Kältemittels (Arbeitsfluid) ausgenutzt, welches bei geringem Druck und geringer Temperatur im Verdampfer verdampft. Die zur Verdampfung benötigte Wärmeenergie wird dabei dem Quellmedium (hier Sole, die durch den jeweiligen Wärmespeicher zirkuliert) entzogen. Nach der Kompression des Kältemittels in einem Kompressor, kondensiert es bei hohem Druck und hoher Temperatur im Kondensator der Wärmepumpe. Die dabei freigesetzte Kondensationsenthalpie wird in Form von Wärme an ein Senkenmedium (hier Wasser, das im Heizkreis zirkuliert) abgegeben. Um diesen thermodynamischen Kreisprozess anzutreiben wird elektrische Energie im Kompressor benötigt. Auf die genaueren technischen Details dieses Prozesses wird hier nicht weiter eingegangen. Der grosse Vorteil von Wärmepumpen ist, dass der grösste Teil der Heizenergie aus der Umgebung bezogen werden kann und nur ein kleiner Teil in Form von elektrischer Energie aufgewendet werden muss. Da der aus der Umgebung bezogene Anteil als gratis betrachtet wird, haben Wärmepumpen Wirkungsgrade von weit über 100 %, die sich im COP (siehe Kapitel 2.2.1) widerspiegeln.

Die drei am weitest verbreiteten Arten von Wärmepumpen, sind Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP), Wasser/Wasser-Wärmepumpen (W/W-WP) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (S/W-WP). Die L/W-WP entzieht der Umgebungsluft Wärme und nutzt diese somit als Wärmequelle. Bei der W/W-WP wird Wasser (z.B. Grundwasser, Seewasser oder sonstige Wasserspeicher) Wärme entzogen und als Wärmequelle benutzt. Die S/W-WP wird meistens in Kombination mit einer Erdwärmesonde benutzt, wobei die Sole ins Erdreich gepumpt wird, dort Wärme aufnimmt und diese im Verdampfer der Wärmepumpe an das Arbeitsfluid abgibt. In der Schweiz findet die L/W-WP mit 71% aller verkauften Wärmepumpen am meisten Verwendung, da sie am günstigsten ist und die Luft als Wärmequelle überall frei verfügbar ist (FWS, 2019). Sie ist also standortunabhängig und nicht an ein nahegelegenes Gewässer oder Erdsondenbohrungen, die teuer und an vielen Orten in der Schweiz nicht oder nur unter gewissen Voraussetzungen erlaubt sind (Auskühlen des Erdreichs aufgrund zu hoher Sondendichte / Verschmutzung des Grundwassers bei Leckagen) gebunden (BAFU, 2009).

Die Nachteile der L/W-WP liegen jedoch in den Lärmemissionen des Ventilators und den Strömungsgeräuschen der Luft, da grosse Luftmassen bewegt werden müssen und diese als Wärmequelle zu nutzen. Deshalb gibt es auch hier genaue Vorgaben wo und in welchem Abstand zu anderen Gebäuden eine Verdampfeinheit im Freien aufgestellt werden darf (Cercle Bruit, 2018). Ausserdem ist die Quelltemperatur (Lufttemperatur) im Winter, wenn am meisten Wärme benötigt wird, am tiefsten, wodurch die Effizienz der Wärmepumpe aufgrund des grösseren Temperaturhubes sinkt (Arpagaus, 2018). Zusätzlich brauchen L/W-WP in der Regel mehr Platz, da der Wärmeübertrager im Verdampfer aufgrund der kleineren spezifischen Wärmekapazität von Luft

im Vergleich zu Wasser oder Sole als Wärmequelle, grösser sein muss, um noch genügend Wärmeleistung zu übertragen. Wie die übertragene Wärmeleistung und die Wärmeübertrager-Fläche zusammenhängen, ist den Formeln (1) und (2) zu entnehmen (VDI-Gesellschaft, 2013).

$$\dot{Q} = \dot{m}_{Luft} * c_{p,Luft} * \Delta T \quad (1)$$

$$\dot{Q} = k_{W\ddot{U}} * A_{W\ddot{U}} * \Delta T_{m,log} \quad (2)$$

$\dot{Q}$ : Im Wärmeübertrager übertragene Wärmeleistung [W]

$\dot{m}_{Luft}$ : Massenstrom Luft [kg/s]

$c_{p,Luft}$ : Spezifische Wärmekapazität der Luft [J/kg K]

$\Delta T$ : Temperaturdifferenz zwischen Quellmedium Luft und dem Arbeitsfluid in der Wärmepumpe [K]

$k_{W\ddot{U}}$ : Wärmedurchgangskoeffizient [ $W/m^2 K$ ]

$A_{W\ddot{U}}$ : Fläche des Wärmeübertragers [ $m^2$ ]

$\Delta T_{m,log}$ : Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zwischen Quellmedium Luft und dem Arbeitsfluid in der Wärmepumpe [K]

### 2.2.1 Leistungszahlen COP und JAZ

Die am weitesten verbreitete Leistungszahl, um die Effizienz einer Wärmepumpe oder einer Kälteanlage zu beschreiben, ist der Coefficient of Performance (COP). Dieser ist als Quotient von erzeugter Wärmeleistung oder Kälteleistung und elektrischer Leistungsaufnahme (Nutzen über Aufwand) definiert und ist immer grösser Eins.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{W\ddot{a}rme/K\ddot{a}lte}}{P_{el}} \quad (3)$$

$\dot{Q}_{W\ddot{a}rme/K\ddot{a}lte}$ : Im Kondensator abgegebene Wärmeleistung (Wärmepumpe) oder im Verdampfer aufgenommene Kälteleistung (Kälteanlage) [W]

$P_{el}$ : Im Kompressor aufgenommene elektrische Leistung [W]

Durch den COP wird jedoch nur die Effizienz in einem bestimmten Betriebspunkt (stationärer Betrieb) ausgewiesen, ohne dabei saisonale Wärmebedarfsschwankungen zu berücksichtigen. Um die Effizienz von zwei Anlagen mit Wärmepumpen über ein ganzes Jahr zu vergleichen, wird daher oft die Jahresarbeitszahl (JAZ) verwendet. Sie berücksichtigt den Umstand, dass Wärmepumpen nicht immer im Volllastbetrieb laufen, und sich die Betriebsbedingungen ständig ändern können und bildet so einen Durchschnittswert der Effizienz über ein gesamtes Jahr. Die JAZ ist definiert als Quotient zwischen der von der Wärmepumpe an das Heizsystem abgegebenen Wärme und der aufgenommenen elektrischen Energie über ein gesamtes Jahr (energie schweiz, 2015).

$$JAZ = \frac{Q_{W\ddot{a}rme/K\ddot{a}lte}}{E_{el}} \quad (4)$$

$Q_{W\ddot{a}rme/K\ddot{a}lte}$ : Im Kondensator abgegebene Wärmeenergie (Wärmepumpe) oder im Verdampfer aufgenommene Kälteenergie (Kälteanlage) [Wh]

$E_{el}$ : Im Kompressor aufgenommene elektrische Energie [Wh]

Vergleichbar mit der JAZ einer Wärmepumpe ist die European Seasonal Energy Ratio (ESEER) für Kälteanlagen. Sie berücksichtigt den Umstand, dass Kälteanlagen oft im Teillastbetrieb betrieben werden, und jeweils nur an wenigen Stunden im Jahr auf voller Leistung laufen. Die ESEER wird durch die COPs von vier verschiedenen gewichteten Betriebspunkten (25%, 50%, 75% und 100%) bestimmt. Der Gewichtungsfaktor ist dabei entsprechend der angenommenen Betriebszeit im jeweiligen Lastbereich. Dadurch wird die ESEER unabhängig von konstanten Betriebsbedingungen und spiegelt am besten die Effizienz einer Anlage über ein gesamtes Jahr wider (Brunner, 2019).

Um die Effizienz eines gesamten Systems (z.B. Gebäude) zu beschreiben, wird die Systemjahresarbeitszahl SJAZ verwendet (siehe Kapitel 3.2.5).

### 2.3 Saisonale Wärmespeicher

In der Schweiz gibt es eine grosse saisonale Verschiebung zwischen Angebot an Solarwärme im Sommer und Wärmebedarf für die Gebäudeheizung und Warmwassererwärmung im Winter. Besonders bei der Betrachtung des Solarstrahlungsangebotes wird diese Verschiebung deutlich (siehe Abbildung 2).

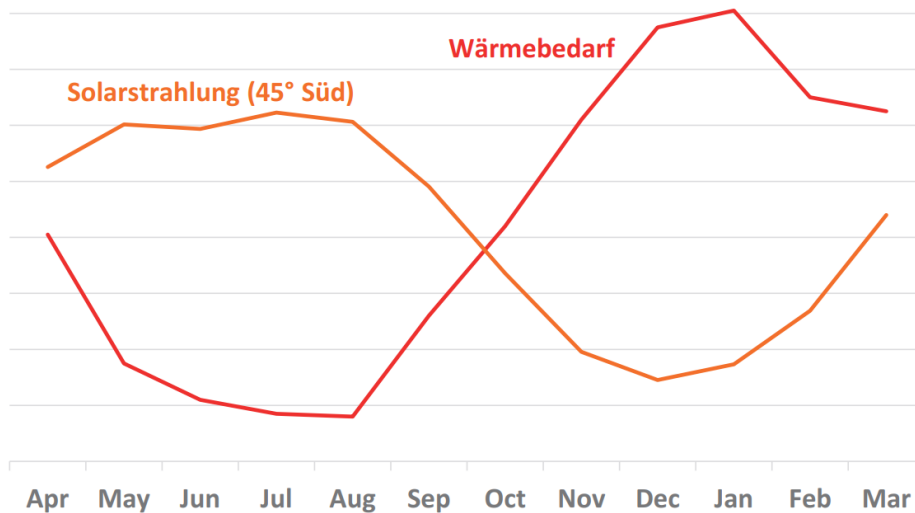


Abbildung 2: Qualitativer Verlauf des Wärmebedarfs zur Gebäudeheizung und Warmwassererzeugung eines Gebäudes und des Solarstrahlungsangebotes für einen exemplarischen Mittellandstandort in der Schweiz über ein Jahr (Haller & Ruesch, 2019).

Um diese Verschiebung zu kompensieren, bieten sich saisonale Wärmespeicher an, welche im Sommer Wärme einspeichern und diese im Winter für die Raumwärme und das Brauchwarmwasser wieder zur Verfügung stellen. Sie ermöglichen in erster Linie eine zeitliche Entkoppelung von Produktion und Nachfrage von Wärme. Je nach Anwendung können verschiedene Technologien als saisonale Wärmespeicher eingesetzt werden (siehe Kapitel 4).

### 3 Material und Methodik

In diesem Kapitel wird das Vorgehen in den verschiedenen Arbeitsschritten erklärt, und das dazu verwendete Arbeitsmaterial vorgestellt.

#### 3.1 Recherche und Beurteilung der Wärmespeichertechnologien

Die Recherche zu den Wärmespeichertechnologien (siehe Kapitel 4) wird mithilfe von Google und ScienceDirect, sowie mit direkter Kontaktaufnahme mit Firmen bzw. Forschungseinrichtungen per Mail, durchgeführt. Bei der Internetrecherche wird nach den einzelnen Wärmespeichertechnologien sowie nach Überbegriffen wie «Saisonale Wärmespeicher», «Wärmespeichertechnologien», «Pufferspeicher für PVT», «Wärmespeicher für Mehrfamilienhäuser» usw. in deutscher sowie teilweise in englischer Sprache gesucht.

Im Anschluss an die Recherche werden die verschiedenen Wärmespeichertechnologien anhand der folgenden Kriterien bewertet:

- Marktpräsenz: Die Technologie soll bereits auf dem Markt sein oder spätestens in den nächsten 3-4 Jahren auf dem Markt erhältlich sein.
- Speicherdichte: Die Technologie soll eine möglichst hohe Speicherdichte aufweisen, um das Speichervolumen möglichst gering zu halten.
- Arbeitstemperaturen: Die Technologie soll bezüglich der Temperaturen in einem Bereich arbeiten, wo ein direktes Laden mittels der Wärme aus den PVT-Kollektoren sowie eine Verwendung als Wärmequelle für die Wärmepumpe möglich ist.
- Speicherkosten: Die Technologie soll finanziell mit heute üblichen Wärmespeichertechnologien (mit Wasser gefüllter Tank-Wärmespeicher) vergleichbar sein.
- Saisonale Wärmespeicherung: Die Technologie soll Wärme verlustarm über mehrere Monate speichern können, um sich als saisonalen Wärmespeicher zu eignen.

Die qualitativen Kriterien «Marktpräsenz» und «Saisonale Wärmespeicherung» werden mit «Ja» oder «Nein» angegeben. Die Speicherdichte wird in gespeicherter Wärmeenergie pro Volumen Speichermaterial [ $\text{kWh}/\text{m}^3$ ] angegeben und jeweils direkt aus den jeweiligen Quellen entnommen oder mit Angaben zur Dichte, Wärmekapazität und der Temperaturerhöhung des Speichermaterials berechnet. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Speicherdichten der einzelnen Technologien zu gewährleisten wird immer mit der gleichen Temperaturerhöhung (60 K) gerechnet. Die Speicherkosten werden pro gespeicherte Wärmemenge [ $\text{CHF}/\text{kWh}$ ] angegeben und ebenfalls direkt aus den Quellen entnommen oder mit Angaben zu den Kosten pro Volumen, der Dichte, der Wärmekapazität und der Temperaturerhöhung des Speichermaterials berechnet. Der Temperaturbereich, in dem die Speicher die Wärme aufnehmen bzw. abgeben (Arbeitstemperatur) wird ebenfalls direkt aus den jeweiligen Quellen entnommen.

#### 3.2 Beurteilung der Systemeffizienz

Zur Beurteilung der Effizienz und der Praxis-tauglichkeit der simulierten Systeme werden verschiedene quantitative Kennzahlen verwendet, die in diesem Kapitel kurz erläutert werden.

##### 3.2.1 Solarer Deckungsgrad

Der solare Deckungsgrad ist eine Kennzahl für thermische Solaranlagen und bezeichnet den Anteil an der gesamten benötigten Wärmemenge (Heizung und Warmwasseraufbereitung) eines Gebäudes, der durch eine Solarthermieanlage in Form von Wärme gedeckt wird. Er ist ein typischer Bestandteil für die jährliche Bilanzierung der in einem Gebäude umgesetzten Energiemengen. Je höher der Wert ist, desto weniger Energie muss neben der Sonne durch andere Energieträger bereitgestellt werden (FASA AG, 2021).

Für solarthermische Anlagen, die ausschliesslich der Warmwasserbereitung dienen, ist ein Deckungsgrad von etwa 50 Prozent typisch. Für Anlagen mit Heizunterstützung ist dieser aber deutlich geringer. Höhere Deckungsgrade sind technisch meistens möglich, jedoch fast immer unwirtschaftlich. Eine Option den Deckungsgrad zu erhöhen, ist die Kollektorfläche so gross zu wählen, dass auch die geringe Wärmeausbeute im Winter ausreicht, um den Wärmebedarf zu decken. Die zweite Option ist der Einbau eines saisonalen Speichers, der Wärme im Sommer für den gesamten Winter aufnehmen kann. Beide Optionen sind jedoch ab einem bestimmten Deckungsgrad nicht mehr rentabel, aufgrund der hohen Investitionskosten einer solchen Anlage (ub.de Fachwissen GmbH, 2020).

Es gibt auch Quellen wie z.B. Swisssolar, die bei der Definition des solaren Deckungsgrades vom Verhältnis der gesamten durch die Solaranlage bereitgestellten Energiemenge zum gesamten Bedarf des Verbrauchers sprechen, wobei unklar ist, ob auch der produzierte PV-Strom mit einbezogen wird (Swisssolar, 2016). Eine Quelle von Minergie Schweiz, betrachtet sogar nur die elektrische Komponente und definiert den solaren Deckungsgrad als Verhältnis der gesamten Solarstromproduktion zum gesamten Stromverbrauch eines Gebäudes (Humm, 2017).

### 3.2.2 Autarkiegrad und Eigenverbrauchsgrad

Der Eigenverbrauchsgrad ist das Verhältnis des im Gebäude selbst genutzten Solarstroms (Haushaltsstrom, Betrieb Wärmepumpe/Kälteanlage usw.) zur gesamten Solarstromproduktion der PV-Anlage auf dem Gebäude. Die Nutzung kann dabei zeitgleich mit der Produktion oder auch nach der Speicherung in einer Batterie stattfinden (Swisssolar, 2016). Der Autarkiegrad hingegen ist das Verhältnis des Eigenverbrauchs an Solarstrom zur gesamten benötigten elektrischen Energiemenge eines Gebäudes (energie schweiz, 2018).

### 3.2.3 Jährlicher Netzbezug

Als jährlicher Netzbezug wird die elektrische Energiemenge bezeichnet, die zusätzlich zur selbst produzierten Energie aus dem Netz bezogen werden muss, um die gewünschte Wärme- oder Kälteenergie bereitzustellen und die verschiedenen Verbraucher im Heiz- und Kühlsystem zu betreiben. Zu den Verbrauchern gehört die Wärmepumpe, die elektrische Zusatzheizung im Brauchwarmwasser-Speicher (BWW-Speicher), die Pumpen im Heizsystem, die Umschaltventile sowie die Steuerungen der Komponenten.

### 3.2.4 Gesamtstromverbrauch

Der Gesamtstromverbrauch setzt sich aus allen Verbrauchern des Heiz- und Kühlsystems, sowie des elektrischen Verbraucherprofils für den Haushaltsstrom (Beleuchtung, Kochen, Unterhaltungselektronik usw.) zusammen (Vela Solaris AG, 2019).

### 3.2.5 Systemjahresarbeitszahl

Die Systemjahresarbeitszahl (SJAZ) ist ähnlich definiert wie die JAZ der Wärmepumpe (siehe Kapitel 2.2.1), beschreibt jedoch nicht nur die Effizienz der Wärmepumpe, sondern die des gesamten Wärmepumpensystems. Sie ist definiert als das Verhältnis zwischen der jährlich von der Wärmepumpe an das Fluid im Heizkreis abgegebenen Wärme (ohne Solarthermie) und dem elektrischen Verbrauch der Wärmepumpe plus dem Verbrauch für Pumpen (z.B. im Solarkreis oder Primärkreis der Wärmepumpe) etc., ohne der Heizkreispumpe (Vela Solaris AG, 2019).

$$SJAZ = \frac{Q_{W\ddot{a}rme}}{E_{el} + E_{par} - E_{Heizkreispumpe}} \quad (5)$$

$Q_{W\ddot{a}rme}$ : Vom Wärmeerzeuger an das Fluid im Heizkreis übertragen Warmenenergie [Wh]

$E_{el}$ : Elektrische Energieaufnahme des Wärmeerzeugers [Wh]

$E_{par}$ : Hilfs- oder parasitische Energien (inkl. Heizkreispumpe) [Wh]

$E_{Heizkreispumpe}$ : Elektrische Energieaufnahme der Heizkreispumpe [Wh]

Die Systemjahresarbeitszahl eignet sich gut als quantitative Kennzahl der Effizienz eines gesamten Systems, weshalb sie hier zur Beurteilung der Systeme herangezogen wird.

### 3.3 Definition der Gebäude und der verwendeten Systemkomponenten

In den folgenden Kapiteln werden alle für die Simulationen benötigten Attribute der Gebäude, nach den heute geltenden Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n), definiert. Um eine möglichst breite Anwendbarkeit der Dimensionierungsmatrizen zu gewährleisten, werden Sanierungsgebäude und Neubauten betrachtet. Die Grösse der zu untersuchenden Gebäude wird so festgelegt, dass der Gebäudepark der Schweiz möglichst gut repräsentiert ist.

#### 3.3.1 Spezifischer jährlicher Heizwärmebedarf

Der spezifische, jährliche Heizwärmebedarf gibt an, wieviel Heizwärme jährlich pro Quadratmeter Energiebezugsfläche (EBF) zur Sicherstellung der Sollraumtemperatur gebraucht wird. Die Berechnung der Grenzwerte des spezifischen Heizwärmebedarfs für Neubauten und Sanierungsgebäude werden in den MuKE n definiert. Bei den MuKE n handelt es sich um das von den Kantonen gemeinsam erarbeitete Gesamtpaket der energierechtlichen Mustervorschriften im Gebäudebereich (EnDK, 2018). Die Vorschriften gelten bei Neubauten, welche beheizt, belüftet, gekühlt oder befeuchtet werden, bei Umbauten und Umnutzungen von bestehenden Gebäude n, welche beheizt, belüftet, gekühlt oder befeuchtet werden, bei Neuinstallationen gebäude technischer Anlagen, sowie bei Erneuerungen, Umbauten oder Änderungen gebäude technischer Anlagen (EnDK, 2018).

In Tabelle 1 sind die Grenzwerte des spezifischen Heizwärmebedarfs für verschiedene Gebäudekategorien festgelegt. Die Werte gelten für eine Jahresmitteltemperatur von 9.4 Ç (Standort Zürich-Affoltern).

Tabelle 1: Grenzwerte für den spezifischen Heizwärmebedarf pro Jahr (bei 9.4 Ç Jahresmitteltemperatur) bei Neubauten und Umbauten laut MuKE n für verschiedene Gebäudekategorien (EnDK, 2018).

Gebäudekategorie		Grenzwerte für Neubauten			Grenzwerte für Umbauten und Umnutzungen $Q_{H,li, re}$ kWh/m <sup>2</sup>
		$Q_{H,li0}$ kWh/m <sup>2</sup>	$\Delta Q_{H,li}$ kWh/m <sup>2</sup>	$P_{H,li}$ W/m <sup>2</sup>	
I	Wohnen MFH	13	15	20	1, 5 * $Q_{H,li}$
II	Wohnen EFH	16	15	25	
III	Verwaltung	13	15	25	
IV	Schulen	14	15	20	
V	Verkauf	7	14	–	
VI	Restaurants	16	15	–	
VII	Versammlungslokale	18	15	–	
VIII	Spitäler	18	17	–	
IX	Industrie	10	14	–	
X	Lager	14	14	–	
XI	Sportbauten	16	14	–	
XII	Hallenbäder	15	18	–	



Die Berechnung des Grenzwerts erfolgt folgendermassen:

$$Q_{H,li} = [Q_{H,li0} + \Delta Q_{H,li} * \left(\frac{A_{th}}{A_E}\right)] * f_{cor} \quad (6)$$

Wobei:

$$f_{cor} = 1 + [(9.4 - \theta_{avg}) * 0.06] \quad (7)$$

$Q_{H,li}$ : Grenzwert des jährlichen spezifischen Heizwärmebedarfs für Neubauten [kWh/m<sup>2</sup> a]

$Q_{H,li0}$ : Basiswert des jährlichen spezifischen Heizwärmebedarfs für Neubauten [kWh/m<sup>2</sup> a]

$\Delta Q_{H,li}$ : Steigung des jährlichen spezifischen Heizwärmebedarfs für Neubauten [kWh/m<sup>2</sup> a]

$A_{th}$ : Thermische Gebäudehülle [m<sup>2</sup>]

$A_E$ : Energiebezugsfläche [m<sup>2</sup>]

$f_{cor}$ : Temperaturkorrekturfaktor [-]

$\theta_{avg}$ : Jahresmitteltemperatur des betrachteten Standortes [°C]

Der Quotient  $\left(\frac{A_{th}}{A_E}\right)$  wird auch als Gebäudehüllzahl bezeichnet und charakterisiert die Form und die Abmessungen des Gebäudes. Die durchschnittliche Gebäudehüllzahl von Mehrfamilienhäusern (MFH) im Gebäudepark Schweiz liegt bei ungefähr 1.4, wobei der Streubereich gross ist (Baudirektion Kt. ZH., 2009). Auch Olivier Brenner der EnDK (Konferenz Kantonalen Energiedirektionen) bestätigt, dass diese Annahme der durchschnittlichen Gebäudehüllzahl plausibel ist.

Da in der Schweiz die Bevölkerungsdichte (und somit auch die Gebäudedichte) im Gebiet um die Stadt Zürich deutlich am höchsten ist (BFS, 2016), wird Zürich als Standort für die zu untersuchenden Gebäude gewählt. Unter dieser Voraussetzung wird der Temperaturkorrekturfaktor  $f_{cor}$  mit 1 festgelegt, und der Grenzwert des spezifischen jährlichen Heizwärmebedarfs beträgt laut Formel (6) für einen Neubau **34 kWh/m<sup>2</sup>**. Die Grenzwerte für Umbauten und Umnutzungen betragen jeweils 150 % der Grenzwerte für Neubauten, womit sich der Grenzwert des spezifischen jährlichen Heizwärmebedarfs für Sanierungsgebäude auf **51 kWh/m<sup>2</sup>** beläuft.

In der Stadt Bern mit einer Jahresmitteltemperatur von 8.8°C würde der Grenzwert des spezifischen jährlichen Heizwärmebedarfs für Neubauten bei 35.2 kWh/m<sup>2</sup>, in Luzern mit einer Jahresmitteltemperatur von 9.6°C bei 33.6 kWh/m<sup>2</sup>, in Basel mit einer Jahresmitteltemperatur von 10.4°C bei 32 kWh/m<sup>2</sup> und in Genf mit einer Jahresmitteltemperatur von 10.5°C bei 31.8 kWh/m<sup>2</sup> liegen. Für die bevölkerungsreichsten Regionen der Schweiz liegt der Grenzwert also ungefähr im Bereich von +/- 5 % des gewählten Grenzwertes der Stadt Zürich.

### 3.3.2 Gebäudegrössen und jährlicher Heizwärmebedarf

Um den Gebäudepark der Schweiz zu repräsentieren sollen drei verschiedene Gebäudegrössen betrachtet werden. Da der jährliche Heizwärmebedarf und die Gebäudegrösse direkt über den spezifischen jährlichen Heizwärmebedarf zusammenhängen, werden zuerst die Heizwärmebedarfskategorien der Dimensionierungsmatrizen definiert und danach über den spezifischen jährlichen Heizwärmebedarf iterativ geprüft wie gut die dadurch definierten Gebäudegrössen den Gebäudepark der Schweiz abdecken.

Die Gebäudegrössen werden jeweils über die Energiebezugsfläche (EBF) definiert. Sie gibt die Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen an, die innerhalb der thermischen Gebäudehülle liegen und beheizt oder klimatisiert werden (EnFK, 2018). Die Wohnfläche hingegen bezeichnet den bewohnbaren Teil eines Gebäudes. Bei MFH ist die EBF durchschnittlich um einen Faktor von 1.25 grösser als die Wohnfläche (Hartmann & Jakob, 2016).

Die Verteilung der Gebäudegrößen im Gebäudepark der Schweiz wird mit Hilfe der Gebäudestatistik des Bundesamtes für Statistik berechnet. Dabei wird die Aufteilung in Anzahl Gebäude pro Anzahl Wohnungen im Gebäude sowie die durchschnittliche Wohnungsgröße in der Schweiz verwendet. Für Gebäude mit mehr als 2 Wohnungen ergibt sich die in Abbildung 3 dargestellte Verteilung (BFS, 2020). Der letzte Punkt repräsentiert alle Gebäude mit mehr als 20 Wohnungen, da die Grafik gegen rechts auf der X-Achse begrenzt wurde.

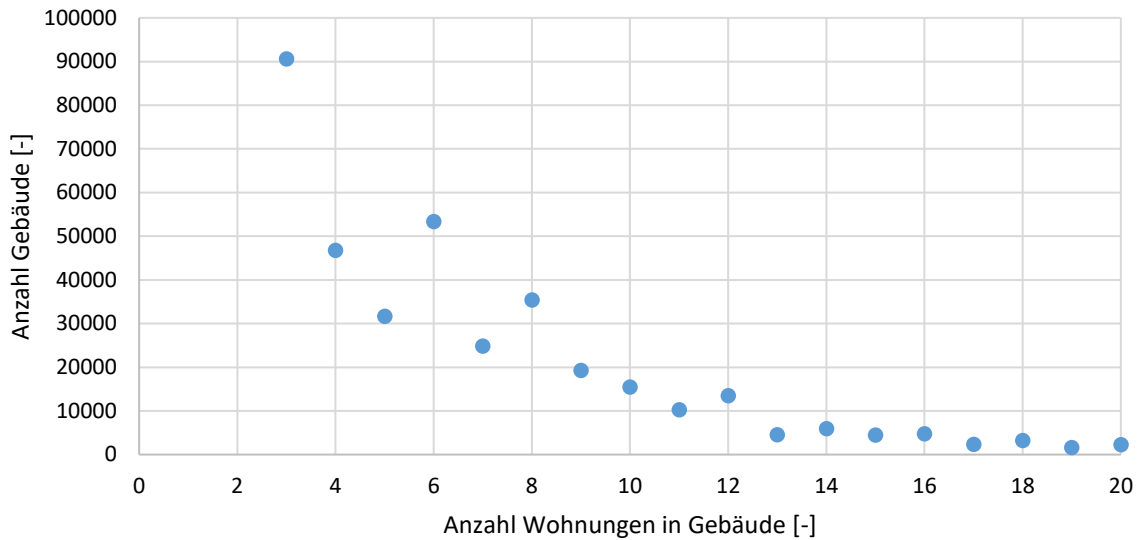


Abbildung 3: Anzahl Gebäude im Gebäudepark Schweiz pro Anzahl Wohnungen im jeweiligen Gebäude, Datenquelle: (BFS, 2020).

Mit der durchschnittlichen Wohnungsgröße von 99 m<sup>2</sup> (BFS, 2020) entsteht die in Abbildung 4 dargestellte prozentuale Verteilung der Gebäudegrößen für MFH mit mehr als 2 Wohnungen.

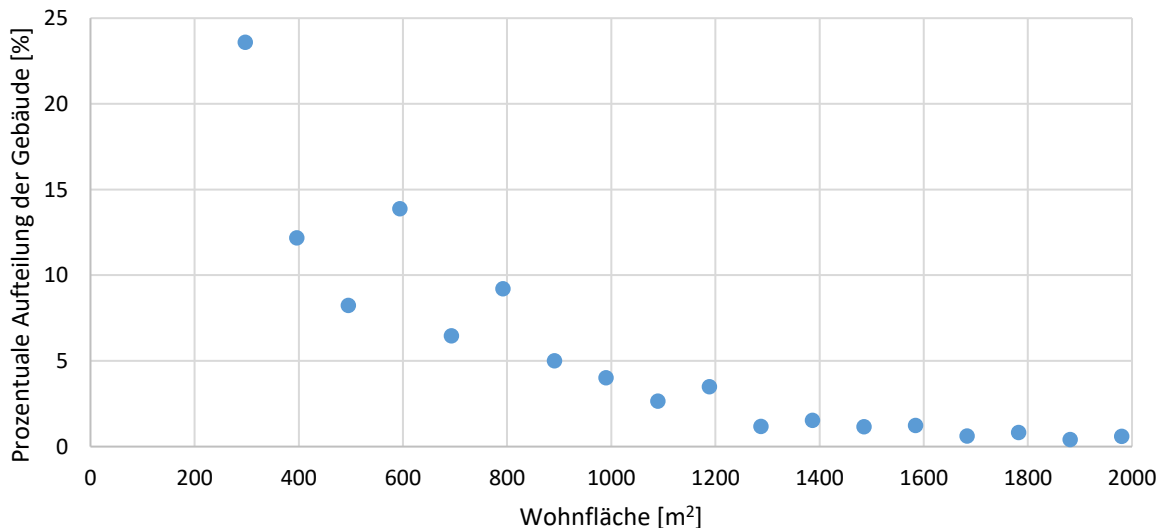


Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der Wohn-Gebäude im Gebäudepark Schweiz nach Wohnfläche, Datenquelle: (BFS, 2020).

Als nächstes werden die Heizwärmebedarfskategorien der Dimensionierungsmatrizen so gewählt, dass diese einerseits im Bereich oberhalb von 20 MWh liegen, sowie den Schweizer Gebäudepark möglichst breit abdecken. Für eine erste grobe Abschätzung zum erwartbaren Heizwärmebedarf bei MFH, wurden die Gebäudetypen des «SolSeasStore»-Berichts herangezogen. Dort wurde der

Gebäudepark von zwei Quartieren in Zürich analysiert und eine Klassifizierung der Gebäude nach dem Energiebedarf vorgenommen (Sauter, et al., 2020). Mit der Wahl der Heizwärmebedarfskategorien von **20 MWh, 35 MWh und 75 MWh** werden 78 % aller in diesen zwei Quartieren befindlichen Gebäuden mit jährlichen Heizwärmebedarfen von mehr als 20 MWh abgedeckt. Mit dem spezifischen jährlichen Heizwärmebedarf von **51 kWh/m<sup>2</sup>** bei Sanierungsgebäuden ergeben sich EBF von 392 m<sup>2</sup>, 686 m<sup>2</sup> und 1471 m<sup>2</sup>. Mit dem Umrechnungsfaktor zwischen der Wohnfläche und der EBF von 1.25 ergeben sich Wohnflächen von **314 m<sup>2</sup>, 549 m<sup>2</sup> und 1176 m<sup>2</sup>**. Dies entspricht Gebäuden mit 3 bis ca. 12 Wohnungen. Mit dieser Spannweite der Wohnflächen sind ca. 85 % aller MFH der Schweiz mit mehr 2 Wohnungen abgedeckt (siehe Abbildung 4). Indem der mittlere Heizwärmebedarf (35 MWh) nicht genau zwischen, sondern näher an der unteren Grenze (20 MWh) gewählt wird, kann der untere Bereich, in welchem eine höhere Anzahl der Gebäude liegt, besser abgedeckt werden. In Abbildung 5 ist die Abdeckung des Gebäudeparks durch die gewählten Heizwärmebedarfskategorien bzw. Gebäudegrößen dargestellt.

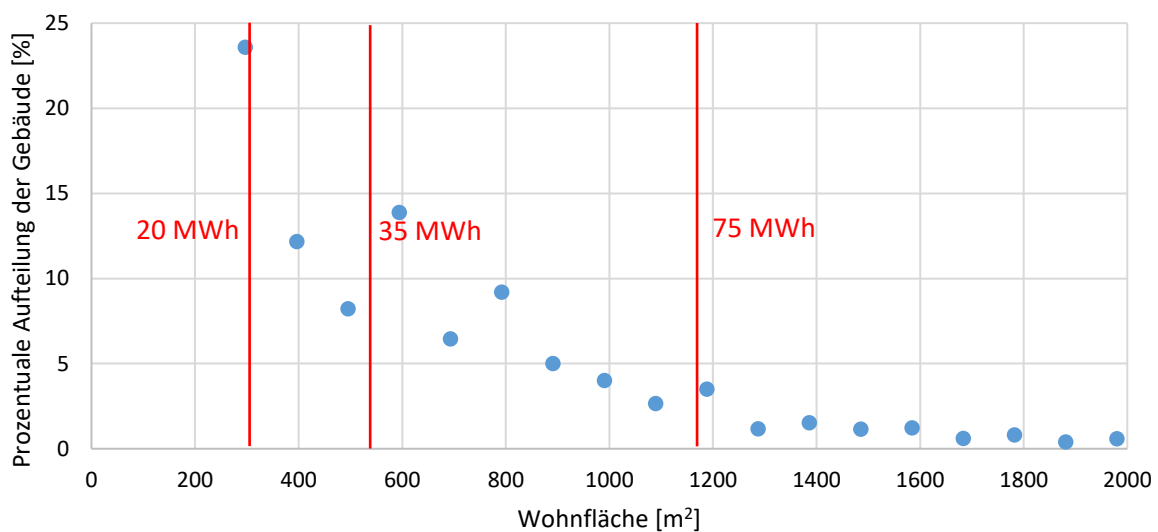


Abbildung 5: Prozentuale Aufteilung der Wohn-Gebäude in der Schweiz nach Wohnfläche. Die senkrechten roten Linien bezeichnen die Sanierungsgebäude mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 20, 35 und 75 MWh.

Unter der Annahme, dass sich die Verteilung der Gebäudegrößen bei Neubauten in einem ähnlichen Rahmen, wie beim bestehenden Gebäudepark bewegt, werden die gleichen Gebäudegrößen auch für die drei zu betrachtenden Neubauten gewählt. Aufgrund des jedoch kleineren spezifischen Heizwärmebedarfs bei Neubauten von **34 kWh/m<sup>2</sup>** ergeben sich hier kleinere jährliche Heizwärmebedarfskategorien. Diese betragen **13,3 MWh** für eine Wohnfläche von 314 m<sup>2</sup>, **23,3 MWh** für eine Wohnfläche von 549 m<sup>2</sup> und **50 MWh** für eine Wohnfläche von 1176 m<sup>2</sup>.

In Tabelle 2 sind die Gebäudegrößen sowie die jährlichen Heizwärmebedarfe der sechs zu untersuchenden Gebäude zusammengefasst, wobei die Sanierungsgebäude mit «San. 20MWh», «San. 35MWh» und «San. 75MWh» und die Neubauten mit «Neu. 13MWh», «Neu. 23MWh» und «Neu. 50MWh» bezeichnet werden.

Tabelle 2: Gebäudegrößen und jährliche Heizwärmebedarfe der 6 zu betrachtenden Sanierungsgebäuden und Neubauten, wobei die Sanierungsgebäude mit «San. 20MWh», «San. 35MWh» und «San. 75MWh» und die Neubauten mit «Neu. 13MWh», «Neu. 23MWh» und «Neu. 50MWh» bezeichnet werden.

Gebäudebezeichnung	EBF [m <sup>2</sup> ]	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	Anzahl Wohnungen [-]	Jährlicher Heizwärmebedarf [MWh]	Spez. jährlicher Heizwärmebedarf [kWh/m <sup>2</sup> ]
San. 20MWh	392	314	3	20.0	51
San. 35MWh	686	549	6	35.0	51
San. 75MWh	1471	1176	12	75.0	51
Neu. 13MWh	392	314	3	13.3	34
Neu. 23MWh	686	549	6	23.3	34
Neu. 50MWh	1471	1176	12	50.0	34

Um den Heizwärmebedarf für die Simulationen in Polysun einzustellen, wird jeweils einfachheitshalber der Wärmeverlustkoeffizient (U-Wert) der Gebäude als alleinige Einflussgrösse angepasst. Dies führt dazu, dass die U-Werte jeweils sehr tief ausfallen. In der Realität werden kleinere Heizwärmebedarfe neben der Dämmung der Fassade auch mit kompakterer Bauweise der Gebäude, sowie kleineren Geschosshöhen, erreicht. In Tabelle 3 sind die in den Simulationen eingestellten U-Werte für die verschiedenen Gebäude und die daraus resultierenden jährlichen Heizwärmebedarfe dargestellt.

Tabelle 3: Für die Simulationen eingestellte U-Werte der verschiedenen Gebäudekategorien und die daraus resultierenden Heizwärmebedarfe in den Simulationen.

Gebäude-typ	Jährlicher Heizwärmebedarf [kWh]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	Jährlicher Heizwärmebedarf in Simulation [kWh]
San. 20MWh	20'000	0.14	19'538
San. 35MWh	35'000	0.12	34'516
San. 75MWh	75'000	0.07	75'614
Neu. 13MWh	13'333	0.08	13'914
Neu. 23MWh	23'333	0.05	23'692
Neu. 50MWh	50'000	0.01	50'295

### 3.3.3 Systemkomponenten

In diesem Kapitel werden die in den jeweiligen Gebäuden verbauten Systemkomponenten (Wärmepumpe, PVT-Kollektoren, Brauchwarmwasser-Speicher, Wärmeabgabesystem), sowie die jeweils maximal einsetzbaren Baugrößen der verwendeten Wärmespeicher definiert. Dazu werden Auslegungen der Komponenten, Abschätzungen mit geeigneten Annahmen sowie Werte aus dem «SolSeasStore»-Bericht, verwendet (Sauter, et al., 2020).

Ein elektrisches Verbraucherprofil für den Haushaltsstrom (Beleuchtung, Kochen, Unterhaltungselektronik usw.) wird in den Simulationen nicht berücksichtigt. Somit werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Heiz- und Kühlsysteme auf die Simulationsergebnisse deutlicher. Die einzigen elektrischen Verbraucher in den Systemen sind die Wärmepumpe, die hydraulischen Pumpen, die Umschaltventile sowie die Steuerungen der Komponenten.

#### 3.3.3.1 Wärmeabgabe-/Kühlsystem

Als Wärmeabgabe- und Kühlsystem werden entweder Fussbodenheizungen (Neubauten und Sanierungsgebäude) oder Radiatorheizungen (Sanierungsgebäude) verwendet. Nach MuKEN-Vorschriften dürfen die Vorlauftemperaturen für neue oder ersetzte Wärmeabgabesysteme bei Fussbodenheizungen maximal 35°C und bei Radiatorheizungen maximal 50°C betragen (EnDK, 2018). Die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur soll jeweils mit 10 K eingestellt werden.

Messungen der effektiven Raumtemperaturen in MFH zeigen, dass in der Praxis Raumtemperaturen von 22 bis 23 °C zu erwarten sind, was deutlich über der Standardannahme der SIA 380/1 von 20 °C liegt (Brücker, 2015). Deshalb wird die Soll-Raumtemperatur für sämtliche Gebäudetypen auf 22°C festgelegt. Ausserdem wird wie im «SolSeasStore»-Bericht für die unbeheizten Räume eine mittlere Raumtemperatur von 16°C und ein Temperaturbereich von 4 K (jährliche Schwankung zwischen max. und min. Temperatur) angegeben (Sauter, et al., 2020).

In den Sommermonaten Juni, Juli und August, dient die Fussbodenheizung bzw. die Radiatorheizung auch als Kühlelement, über das Wärme aus dem Gebäude abgeführt wird. Die passive Kühlung über die PVT-Kollektoren (nachts) bzw. über den jeweiligen Wärmespeicher (tagsüber) wird eingeschaltet, sobald die Raumtemperatur über einen Wert von 24°C am Tag oder 23°C in der Nacht steigt. Die aktive Kühlung über die Wärmepumpe wird zusätzlich eingeschaltet, sobald die Raumtemperatur über 24.5°C steigt.

### 3.3.3.2 PVT-Anlage

Für die PVT-Anlage werden nicht-abgedeckte Kollektoren des Typs «Spring 310M unisolated» von DualSun verwendet. Da die Firma DualSun sowohl in der Entwicklung von PVT-Kollektoren als auch in der Forschung aktiv ist, repräsentierten diese Kollektoren gut den «state of the art» (Dualsun, 2020). Die maximale Anzahl PVT-Kollektoren, die auf dem jeweiligen Gebäude Platz findet, wird mit Hilfe der Beispielgebäude aus dem «SolSeasStore»-Bericht festgelegt. Dort wurde jeweils für verschiedene Gebäudegrössen (definiert durch Wohnfläche bzw. EBF), einem durchschnittlichen Ausnutzungsgrad der Dachfläche von 55 %, sowie einer PVT-Kollektorfläche von 1.65 m<sup>2</sup> für den verwendeten Typ, die maximale Anzahl an PVT-Kollektoren, die auf dem Dach Platz findet, definiert (Sauter, et al., 2020). Drei der Beispielgebäude aus «SolSeasStore» haben eine ähnliche Grösse wie die in dieser Arbeit definierten Gebäude. Die maximale Anzahl an PVT-Kollektoren wurde dementsprechend für die jeweiligen Gebäudetypen aus dem «SolSeasStore»-Bericht übernommen und zusätzlich proportional zur Wohnfläche korrigiert. In Tabelle 4 ist die für jeden Gebäudetyp festgelegte maximale Anzahl an PVT-Kollektoren zu sehen.

Tabelle 4: Maximale Anzahl an PVT-Kollektoren, die auf dem Dach des jeweiligen Gebäudetyps laut «SolSeasStore»-Bericht Platz findet.

Gebäudetyp	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	Maximale Anzahl PVT-Kollektoren [-]
SolSeasStore-Gebäude 1	288	35
SolSeasStore-Gebäude 2	512	58
SolSeasStore-Gebäude 3	1'136	82
San. 20MWh / Neu. 13MWh	314	38
San. 35MWh / Neu. 23MWh	549	62
San. 75MWh / Neu. 50MWh	1'176	85

Der spezifische Durchfluss im PVT-Kreislauf wird wie im «SolSeasStore»-Bericht auf 30 l/(h\*m<sup>2</sup>) gesetzt (Sauter, et al., 2020).

### 3.3.3.3 Brauchwarmwasser-Speicher und Brauchwarmwasser-Bedarf

Bei der Auswahl des zu verwendenden Brauchwarmwasser-Speichers (BWW-Speicher) werden ebenfalls die Beispielgebäude aus dem «SolSeasStore»-Bericht, die in der gleichen Grössenordnung wie die hier definierten Gebäudetypen liegen, als Referenz genommen. Da die BWW-Speicher in «SolSeasStore» etwas überdimensioniert sind und diese vom Hersteller in vorgegebenen Standardgrössen erhältlich sind, wurden die Speichervolumen direkt übernommen. Der Tagesbedarf an BWW bei einer Soll-Temperatur der BWW-Entnahmestelle von 50°C wurde ebenfalls von den Beispielgebäuden aus «SolSeasStore» übernommen und proportional zu der Wohnfläche für die

jeweiligen Gebäudetypen angepasst. Für Sanierungsgebäude und Neubauten gleicher Grösse werden jeweils die gleichen Speichervolumen bzw. Tagesbedarfe an BWW festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass bei gleicher Gebäudegrösse jeweils die gleiche Anzahl an Bewohnern in den Gebäuden lebt und somit der Bedarf der gleiche ist. In Tabelle 5 ist die Grösse des BWW-Speichers sowie der Tagesbedarf an BWW für jeden Gebäudetyp einzusehen.

Tabelle 5: Speichervolumen des BWW-Speichers sowie Tagesbedarf an BWW für die zu betrachtenden Gebäudetypen. Die drei Gebäude aus «SolSeasStore» dienen als Orientierung für die Dimensionierung.

Gebäudetyp	Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	Speichervolumen BWW-Speicher [l]	Tagesbedarf bei 50°C [l/d]
SolSeasStore-Gebäude 1	288	600	378
SolSeasStore-Gebäude 2	512	1'100	743
SolSeasStore-Gebäude 3	1'136	2'300	1'605
San. 20MWh / Neu. 13MWh	314	600	412
San. 35MWh / Neu. 23MWh	549	1'100	797
San. 75MWh / Neu. 50MWh	1'176	2'300	1'662

Die verwendeten BWW-Speicher weisen sowohl am Mantel als auch am Deckel eine 140 mm und am Boden eine 100 mm starke Dämmung aus Glas-/Steinwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.04 W/(m\*K) auf und verfügen über siphonierte Stützen mit Anschlussverlusten von jeweils 2 W/K (Sauter, et al., 2020).

#### 3.3.3.4 Wärmepumpe

Die verwendete Wärmepumpe (WP) wird für jeden Gebäudetyp anhand der erforderlichen Heizleistung, ausgelegt. Die erforderliche Heizleistung wird dabei anhand der folgenden Formel berechnet (Sauter, et al., 2020):

$$\dot{Q}_H = \left( \frac{Q_H}{t_{an}} + \dot{Q}_{BWW} \right) * f_{sperr} \quad (8)$$

Wobei:

$$f_{sperr} = \frac{24 \text{ h}}{24 \text{ h} - t_{sperr}} \quad (9)$$

$\dot{Q}_H$ : Erforderliche Heizleistung der WP [kW]

$Q_H$ : Jährlicher Heizwärmebedarf des Gebäudes [kWh]

$t_{an}$ : Anzahl jährlicher Volllaststunden der WP [-]

$\dot{Q}_{BWW}$ : Zuschlag zur erforderlichen Heizleistung aufgrund der BWW-Erwärmung [kW]

$f_{sperr}$ : Zuschlagsfaktor zur Berücksichtigung von Sperrzeiten durch Elektrizitätswerke [-]

$t_{sperr}$ : Anzahl Sperrstunden durch Elektrizitätswerke [h]

Die Anzahl an jährlichen Volllaststunden wurde auf 1'800 Stunden gesetzt (Baudirektion Kt. ZH, 2018). Der Leistungsbedarf für die BWW-Erwärmung wurde mit der spezifischen Leistung pro EBF von 3 W/m<sup>2</sup> berechnet (energie schweiz, 2015). Ausserdem wurde bei der Auslegung davon ausgegangen, dass es keine Sperrzeiten für den Betrieb der WP gibt.

Ausgewählt wird jeweils ein Modell der Firma Viessmann, dessen Heizleistung im jeweiligen Betriebspunkt (B0/W35 bei Fussbodenheizungen und B0/W55 bei Radiatorheizungen) der erforderlichen Heizleistung am nächsten kommt. Falls der erforderliche Heizwärmebedarf mit der

gewählten WP nicht gedeckt werden kann, wird das nächstgrössere Modell gewählt. Ausserdem wird darauf geachtet, dass der COP der ausgewählten Modelle jeweils möglichst wenig variiert, um die Vergleichbarkeit der Systeme sicherzustellen. Die gewählte WP für das Gebäude «Neu. 23MWh» hat jedoch mit 4.7 einen leicht tieferen COP als die restlichen Modelle, da im Bereich der erforderlichen Heizleistung kein anderes passendes Modell gefunden werden konnte. In Tabelle 6 sind die für die verschiedenen Gebäudetypen ausgewählten WP-Modelle, deren Heizleistung in zwei Betriebspunkten und die erforderliche Heizleistung um den Heizenergiebedarf zu decken, einsehbar.

*Tabelle 6: Auswahl des zu verwendenden Wärmepumpen-Modells für die verschiedenen Gebäudetypen. Die Heizleistung der WP soll, wenn möglich die erforderliche Heizleistung abdecken bzw. übersteigen.*

Gebäude-typ	Erforderliche Heizleistung [kW]	Heizleistung bei B0/W35 [kW]	Heizleistung bei B0/W50 [kW]	COP bei B0/W35 [-]	WP-Bezeichnung
San. 20MWh	12.3	13.0	12.3	5	300-G BW(S) 301.B13
San. 35MWh	21.5	28.7	26.2	4.9	350-G BWS 351.B27
San. 75MWh	46.1	42.3	37	4.9	350-G BW 351.B42
Neu. 13MWh	8.6	10.4	9.8	5	300-G BW(S) 301.B10
Neu. 23MWh	15.0	13.0	12.3	4.7	300-G BW(S) 301.B17
Neu. 50MWh	32.2	32.7	30.0	5	350-G BWS 351.B33

### 3.3.4 Fläche für eTank neben und unter dem Gebäude

Die Beschreibung des eTanks als Wärmespeicher ist in Kapitel 4.1 zu finden. Um die verfügbare Fläche für einen eTank neben den jeweiligen Gebäuden abzuschätzen, werden von den über 1000 Gebäuden, die in «SolSeasStore» untersucht wurden, 50 Gebäude verschiedenster Grössen zufällig ausgewählt, und mit dem Katasterplan in GIS und Google Earth die jeweils verfügbare Grundstücksfläche ausgemessen. Es wird darauf geachtet, dass für den eTank jeweils eine zusammenhängende Fläche entsteht (nur eine Grabung), sowie dass die Fläche nicht mehr als vier Seitenkanten aufweist (keine verwinkelten eTanks mit höherem Planungsaufwand und kleinerem Verhältnis von Speichervolumen zu Isolationsfläche). Ausserdem werden die Flächen aufgrund der Gesetzgebung zu Unterniveaubauten so gewählt, dass sie direkt an die Grundstücksgrenzen reichen, jedoch einen Abstand von 2 Metern zu Wegen oder Strassen aufweisen (Kanton Luzern, 2021). In Abbildung 6 ist die Auswahl der eTank Fläche an einem repräsentativen Gebäude im Katasterplan abgebildet.

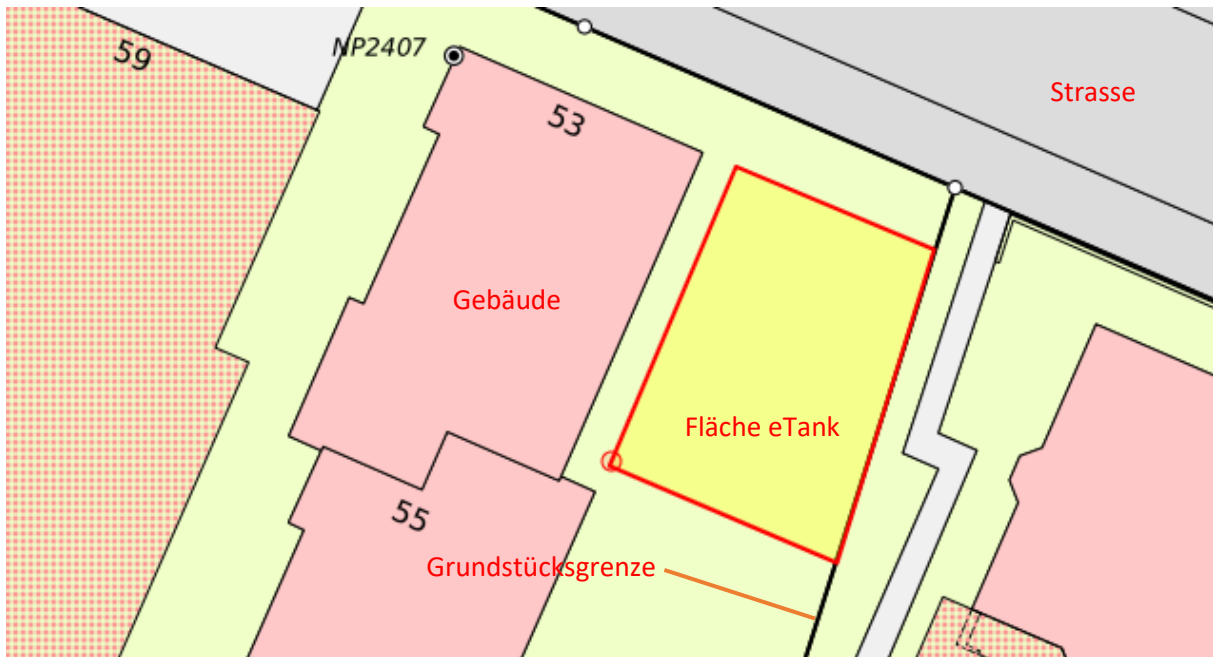


Abbildung 6: Verfügbare Fläche für einen eTank neben einem der ausgewählten Gebäude aus «SolSeasStore» im Katasterplan von Zürich in GIS.

Die Auswertung ergibt eine durchschnittliche Fläche neben den Gebäuden von 255 m<sup>2</sup>. Da auf diesen Flächen jeweils auch Bäume, Gärten, kleine Wege oder sonstige Objekte stehen, sowie unterirdisch mit Gas-, Wasser und Stromleitungen zu rechnen ist, die allenfalls den Bau eines eTanks verhindern oder beschränken könnten, wird diese Fläche pauschal um 50 % reduziert. Die resultierende **maximale Fläche von 130 m<sup>2</sup>** wird allen Gebäudegrößen gleichermassen zugeschrieben, da bei der Auswertung ersichtlich wurde, dass die Grösse des Gebäudes keinen Einfluss auf den verfügbaren Platz neben dem Gebäude hat.

Im Falle von Neubauten kann der eTank zusätzlich unter dem Gebäude platziert werden, weshalb jeweils eine Geschossfläche zur maximalen eTank-Fläche dazu gerechnet wird. Dazu wird zuerst mit der Wohnfläche pro Gebäude und der durchschnittlichen Wohnfläche pro Wohnung (99 m<sup>2</sup>) die Anzahl an Wohnungen pro Gebäude ermittelt. Danach wird mit der Gebäudestatistik des BFS die durchschnittliche Anzahl Geschosse der Gebäude ermittelt, und schlussendlich die EBF durch die Anzahl Geschosse des jeweiligen Gebäudes geteilt. Die Geschossfläche und somit die verfügbare Fläche für einen eTank unter den jeweiligen Neubauten sind Tabelle 7 zu entnehmen. Die maximale gesamte eTank-Fläche setzt sich aus der jeweiligen Geschossfläche und der maximalen Fläche neben den Gebäuden von 130 m<sup>2</sup> zusammen.

Tabelle 7: Anzahl Wohnungen, Anzahl Geschosse, Geschossfläche und resultierende maximale gesamte eTank-Fläche für die drei zu betrachtenden Neubauten.

Gebäudebezeichnung	EBF [m <sup>2</sup> ]	Anzahl Wohnungen [-]	Anzahl Geschosse [-]	Geschossfläche [m <sup>2</sup> ]	Maximale gesamte eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]
Neu. 13MWh	392	3	3	130	260
Neu. 23MWh	686	6	4	170	300
Neu. 50MWh	1471	12	4	370	500

Als Mindestgrösse für einen eTank, ab der sich eine Investition wirklich lohnt, gibt die Techno Therm AG, als momentan einziger Anbieter solcher Speicher in der Schweiz, ein Volumen von ca. 120 m<sup>3</sup> an (Nagel, 2021). Bei einer maximalen Aushubtiefe von 2 Metern beträgt die **minimale Fläche eines eTanks 60 m<sup>2</sup>**. In den Simulationen wird als Füllmaterial des eTanks wassergesättigter Sand mit einer



Dichte von 2'700 kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmekapazität von 926 J/kg K verwendet (Angaben aus Polysun), da dieser laut Techno Therm AG dem standardmässig verwendeten Füllmaterial entspricht (Nagel, 2021).

### 3.3.5 Speichervolumen im Untergeschoss

Als nächstes wird abgeschätzt, wie gross das Volumen eines Wärmespeichers im Untergeschoss der Gebäude maximal sein kann. Da Erdöl im Jahr 2017 mit knapp 40 % (gefolgt von Erdgas mit ca. 20 %) der in der Schweiz am weitesten verbreitete Energieträger zur Gebäudeheizung war (BFS, 2017), wird angenommen, dass die Gebäude vor der Sanierung mit Erdöl beheizt wurden (inkl. BWW-Bereitstellung) und sich im Untergeschoss somit ein Erdöltank befindet, dessen Volumen genutzt werden kann.

Als Gebäude im Zustand vor der Sanierung, werden die 3 Gebäude aus «SolSeasStore» mit den ungefähr gleichen Gebäudegrösse wie die Gebäude «San. 20MWh»/«San. 35MWh»/«San. 75MWh» gewählt. Mit dem jährlichen Heizwärmebedarf dieser Gebäude (vor der Sanierung), einer durchschnittlichen Befüllungsfrequenz der Tanks und einem Brennwert von Erdöl von 10.5 kWh/l (energie schweiz, 2015), kann das durchschnittlich verbaute Tankvolumen abgeschätzt werden. Als durchschnittliche Befüllungsfrequenz der Tanks geben verschiedene Heizöllieferanten 1 bis 1.5 Jahre und die Heizölvereinigung der Schweiz Avenenergy 2 Jahre an (Gasser B. , 2021). Deshalb wird hier eine mittlere Befüllfrequenz von 1.5 Jahre angenommen. Zusätzlich wird das berechnete Volumen jeweils noch um 50 % erhöht, da davon ausgegangen wird, dass der Platz in den Kellerräumen noch nicht optimal genutzt ist und noch Ausbaumöglichkeiten bestehen.

In Tabelle 8 ist das jeweils verbaute Tankvolumen bzw. das verfügbare Volumen für einen Wärmespeicher für die drei zu betrachtenden Gebäudegrössen dargestellt. Dieses beträgt ca. **7 m<sup>3</sup>** für die «San. 20MWh» und «Neu. 13MWh» Gebäude, **12 m<sup>3</sup>** für die «San. 35MWh» und «Neu. 23MWh» Gebäude und **24 m<sup>3</sup>** für die «San. 75MWh» und «Neu. 50MWh» Gebäude. Die Volumen gelten jeweils für die Sanierungsgebäude als auch für die Neubauten, da es sich bei beiden Typen um die gleiche Gebäudegrösse handelt und davon ausgegangen wird, dass sich die Grösse der Kellerräume in Neubauten nicht gross von der in Sanierungsgebäuden unterscheidet.

*Tabelle 8: Verfügbares Volumen für einen Wärmespeicher im Untergeschoss der zu betrachtenden Gebäude, wobei das Volumen des vor der Sanierung verbaute Erdöltanks unter der Annahme von Ausbaupotential der Kellerräume um 50% vergrössert wird, wobei sich das effektive verfügbare Speichervolumen ergibt.*

Gebäudetyp	Jährlicher Heizwärmebedarf vor Sanierung [kWh]	Befüllungsfrequenz [a]	Brennwert [kWh/l]	Tankvolumen [m <sup>3</sup> ]	Tankvolumen + 50 % [m <sup>3</sup> ]
San. 20MWh	32'900	1.5	10.5	4.7	7.1
San. 35MWh	55'300	1.5	10.5	7.9	11.9
San. 75MWh	113'400	1.5	10.5	16.2	24.3

## 3.4 Erstellung der Dimensionierungsmatrizen

Die Dimensionierungsmatrizen sollen als einfache Planungshilfe zur groben Dimensionierung der Systemkomponenten der in Kapitel 5 beschriebenen, kombinierten Heiz- und Kühlsystems verwendet werden können. Sie sollen eine erste Aussage darüber liefern, ob und wie gut sich ein bestimmtes Heiz- und Kühlsystemen für ein bestimmtes Gebäude eignet. Eine genaue fachmännische Auslegung der jeweiligen Komponenten ist bei der Realisierung eines Systems jedoch unabdingbar.

Die Matrizen geben in einer 4-teilige Abstufung von «sehr gute Eignung» bis «bedingte Eignung» die jeweilige Eignung der Systeme für die verschiedenen Gebäudetypen und solare Einstrahlungen an.

Die Eignung der jeweiligen Systeme wird durch den Komponentenaufwand (Anzahl PVT-Kollektoren und Grösse des Speichervolumen), der benötigt wird, um eine gewisse Mindest-SJAZ zu erreichen und den Heizwärmebedarf zu decken, definiert. Die Gewichtung der beiden Kategorien des Komponentenaufwands und die Aufschlüsselung zur Beurteilung der Systeme wird in Kapitel 3.4.2 detailliert beschrieben. Die zu erreichende Mindest-SJAZ wird durch ein L/W-WP-System als Vergleichssystem definiert, wobei dieses übertrifft werden soll. Ausserdem werden die mit Hilfe der Gebäudegrössen definierten Spannweiten für das verfügbare Speichervolumen sowie der Anzahl installierbaren PVT-Kollektoren zur Beurteilung der Eignung verwendet (siehe Kapitel 3.3.3.2, 3.3.4 und 3.3.5).

### 3.4.1 Heizwärmebedarfe und solare Einstrahlung

Als Dimensionierungskategorie wird zum einen der jährliche Heizwärmebedarf gewählt (Definition der Grösse und des Zustandes der Gebäude) und zum anderen die solare Einstrahlung (Definition des Standortes und der Ausrichtung der Gebäude). Die solaren Einstrahlungskategorien werden entsprechend der Dimensionierungsmatrizen des L-Sol-Projekts (Sauter, et al., 2020) gewählt. Für die Definition der zu betrachtenden jährlichen Heizwärmebedarfskategorien, werden Statistiken zum Gebäudepark der Schweiz sowie zu den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (siehe Kapitel 3.3.2) herangezogen.

Der Gebäudetyp sowie die Grösse der Gebäude werden durch die Heizwärmebedarfe definiert, welche wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben wie folgt definiert werden:

#### Sanierungsgebäude:

- 20 MWh
- 35 MWh
- 75 MWh

#### Neubauten:

- 13.3 MWh
- 23.3 MWh
- 50.0 MWh

Die solare Einstrahlung gibt an wie hoch die Einstrahlungsmenge pro Quadratmeter im Jahr ist und definiert dadurch den Standort des Gebäudes und die Ausrichtung der Dachfläche. Es werden die drei Kategorien **800, 1'050 und 1'300 kWh/m<sup>2</sup> a** festgelegt, da diese den erreichbaren Einstrahlungsmengen bei der vollen Spannweite der Dachausrichtung (0° bis 180°) entsprechen. 0° entspricht dabei einer südlichen Ausrichtung der Dachfläche. Um diese Werte in den Simulationen zu erreichen, wird jeweils die Dachausrichtung variiert, wobei der Anstellwinkel der Kollektoren bei 30° belassen wird. Der Anstellwinkel hat gemäss Sauter, et al. (2020) einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die SJAZ, und liegt mit 30° in einem, für den Gebäudepark Schweiz repräsentativen Bereich. In Tabelle 9 sind die Einstellungen der Dachausrichtung in den Simulationen einzusehen, mit denen die jeweilige Einstrahlungskategorie am genauesten erreicht werden kann.

*Tabelle 9: Solare Einstrahlungskategorien für die Dimensionierungsmatrizen und die am nächsten liegenden Simulationswerte sowie die dazugehörige Dachausrichtung. 0° entspricht einer südlichen Ausrichtung des Daches.*

Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
Dachausrichtung [°]	180	85	0
Zugehörige Einstrahlung in Simulation [kWh/m <sup>2</sup> a]	779	1'056	1'263

### 3.4.2 Beurteilung der Systeme

Um die Dimensionierungsmatrizen zu erstellen und die Systeme bezüglich ihrer Eignung zu beschreiben, wird der benötigte Komponentenaufwand verwendet, sowie eine Mindest-SJAZ, welche die untersuchten Systeme erreichen müssen, definiert.

### 3.4.2.1 Mindest-Systemjahresarbeitszahl

Um die Mindest-SJAZ festzulegen, wird für jeden Gebäudetyp ein System mit einer PVT-Anlage, einer L/W-WP als Wärmeerzeuger und einem Tank-Speicher als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren in Polysun definiert. Das L/W-WP System wird ausgewählt, da es als Konkurrenz gegenüber den in dieser Arbeit zu betrachtenden Systeme angesehen wird und bei der Sanierung der Heizsysteme in Bestandsgebäuden oft als Lösungsvariante angesehen wird (Gasser L., 2019). Eine Kühlmöglichkeit der Räume wird im Vergleichssystem nicht implementiert. Die verschiedenen Komponenten des Vergleichssystems (PVT-Kollektoren, BWW-Speicher, BWW-Bedarf usw.) werden wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ausgelegt. Um die Vergleichssysteme möglichst optimal zu gestalten, wird jeweils die maximale Anzahl PVT-Kollektoren (siehe Tabelle 4) bei einer Dachausrichtung von 0° (südliche Ausrichtung) eingestellt. Als WP wird jeweils das Modell von «Viessmann» ausgewählt, welches im Betriebspunkt A2W35 der in Kapitel 3.3.3.4 definierten erforderlichen Heizleistung am nächsten kommt. Der durchschnittliche COP der L/W-WPs ist mit 3.6 um 1.3 Punkte kleiner als der durchschnittliche COP der verwendeten S/W-WPs. In Tabelle 10 sind die erreichten SJAZ der Vergleichssysteme für die verschiedenen Gebäudetypen (Neubauten und Sanierungsgebäude) dargestellt.

Tabelle 10: Erreichte SJAZ des L/W-WP-Systems für die verschiedenen Gebäudetypen.

Gebäudetyp	Neu. 13MWh	Neu. 23MWh	Neu. 50MWh	San. 20MWh	San. 35MWh	San. 75MWh
SJAZ [-]	4	4.1	4	3.9	4.1	4

Die erreichten SJAZ liegen durchschnittlich bei einem Wert von 4. Um bei den zu untersuchenden Systemen eine Steigerung gegenüber dem L/W-WP System anzustreben, wird die Mindest-SJAZ, die es zu erreichen gilt, mit einem Aufschlag von 10 % auf **4.4** erhöht.

### 3.4.2.2 Beurteilung des Komponentenaufwands

Der Komponentenaufwand wird in die drei Kategorien «Anzahl PVT-Kollektoren», «Fläche für Speicher neben Gebäude» und «Speichervolumen im Untergeschoss der Gebäude» unterteilt. Die Systeme werden je nach Komponentenaufwand anhand dieser drei Kategorien zwischen 0 und 1 bewertet, wobei der Wert 1 einem System vergeben wird, das in der jeweiligen Kategorie den maximalen Komponentenaufwand benötigt, um die Mindest-SJAZ zu erreichen. Die maximale und somit auch schlechteste Gesamtnote, die ein System erhalten kann (bei maximalem Komponentenaufwand in allen 3 Kategorien) beträgt 3, wobei die Einzel-Bewertungen der drei Kategorien addiert werden.

Bei Sanierungsgebäuden wird der Grösse des jeweiligen Wärmespeichers bei der Bewertung eine grössere Bedeutung zugeschrieben als der Anzahl PVT-Kollektoren, weshalb der Wert der beiden Kategorien «Fläche für Speicher neben Gebäude» und «Speichervolumen im Untergeschoss der Gebäude» zusätzlich mit dem Faktor 1.2 multipliziert werden. Der Grund dafür liegt beim Platzbedarf neben und im Gebäude, der im Gegensatz zum verfügbaren Platz auf dem Dach als kritische Hürde für die Realisierung des Systems angesehen wird (Sauter, et al., 2020). Da bei Neubauten der Platzbedarf des Wärmespeichers bereits vor dem Bau des Gebäudes eingeplant werden kann, fallen dort diese Faktoren weg. Zusätzlich werden sobald der jeweilige Wärmespeicher neben dem Gebäude platziert werden muss, 0.3 «Strafpunkte» bei der Gesamtbewertung dazugerechnet, da dies sofort in einem höherem Planungsaufwand (Abklärungen zu bereits vorhandenen Strom-, Wasser-, Gas-Leitungen, Erstellung von Baugesuch, Rodung/Umsiedlung von allfälligen Bäumen usw.) und somit in höheren Kosten resultiert. Bei Neubauten ist dies der Fall, sobald die eTank-Fläche die Geschossfläche (Fläche unter Gebäude) übersteigt, oder der Eis- bzw. Paraffin-Speicher nicht im

Untergeschoss der Gebäude Platz findet. Ausserdem werden bei der Verwendung von Eis- bzw. Paraffin-Speichern 0.1 bzw. 0.4 «Strafpunkte» dazugerechnet, da bei diesen Speichern bei gleicher Speicherkapazität mit höheren Investitionskosten als beim eTank zu rechnen ist (siehe Tabelle 11).

Die verwendeten Faktoren und Strafpunkte wurden anhand verschiedener Beispielsysteme iterativ festgelegt. Zum Beispiel soll ein Sanierungsgebäude mit einem eTank-System, das den maximalen Komponentenaufwand benötigt (maximale Anzahl PVT-Kollektoren und 130 m<sup>2</sup> eTank-Fläche) das Label «bedingte Eignung» erhalten, da das System zwar realisierbar ist, jedoch nur falls es sich um ein Gebäude handelt, das auch wirklich die 130 m<sup>2</sup> zur Verfügung hat. Ein Sanierungsgebäude mit einem eTank-System, das die maximale Anzahl an PVT-Kollektoren, jedoch die minimale eTank-Fläche von 60 m<sup>2</sup> benötigt, soll hingegen das Label «gute Eignung» erhalten. Das Label «sehr gute Eignung» können nur Systeme in Neubauten erreichen.

**Beispiel:** Als Veranschaulichung wie sich die Gesamtnote zusammensetzt wird nun ein System mit einem Paraffin-Speicher im Untergeschoss des Gebäudes und einem eTank betrachtet. Es wird die maximale Anzahl an PVT-Kollektoren verbaut und jeweils die Hälfte des maximal verfügbaren Speichervolumens für den eTank und den Paraffin-Speicher genutzt. Im Falle des Neubaus fallen die 0.3 «Strafpunkte» für den eTank neben dem Gebäude nicht an, da der eTank bei dieser Grösse unter dem Gebäude Platz findet.

Neubauten:

$$1 \text{ Anz. PVT} + 0.5 \text{ Fläche eTank} + 0.5 \text{ Vol. Eis-/Para.} + 0.4 \text{ Kosten Para.-Speicher} \rightarrow \text{Gesamtnote von 2.4}$$

Sanierungsgebäude:

$$1 \text{ Anz. PVT} + 1.2 * 0.5 \text{ Fläche eTank} + 1.2 * 0.5 \text{ Vol. Eis-/Para.} + 0.3 \text{ eTank n. G.} + 0.4 \text{ Kosten Para.-Speicher} \rightarrow \text{Gesamtnote von 2.9}$$

Das betrachtete System wird im Falle eines Neubaus mit einer Gesamtnote von 2.4 und im Falle eines Sanierungsgebäude mit einer Gesamtnote von 2.9 bewertet. Generell werden bei Neubauten die Systeme aufgrund der weniger kritischen Platzverhältnisse und der Möglichkeit den eTank unter dem Gebäude zu platzieren bezüglich dem Komponentenaufwand tendenziell weniger streng bewertet als bei Sanierungsgebäuden.

### 3.4.2.3 Einteilung in die Eignungskategorien

Die Einteilung der Systeme in die 4 Eignungskategorien «sehr gute Eignung» bis «bedingte Eignung» erfolgt anhand der erhaltenen Gesamtnote des Systems. Dazu wird geprüft welchen Prozentanteil der maximalen Gesamtnote 3 die erhaltene Gesamtnote ausmacht. Es gilt, je kleiner die Gesamtnote desto geeigneter das System:

- **«sehr gute Eignung»:** Gesamtnote < 40 % der maximalen Gesamtnote
- **«gute Eignung»:** Gesamtnote 40 – 60 % der maximalen Gesamtnote
- **«genügende Eignung»:** Gesamtnote 60 – 80 % der maximalen Gesamtnote
- **«bedingte Eignung»:** Gesamtnote > 80 % der maximalen Gesamtnote

Das Label «keine Eignung» erhalten Systeme, die auch mit maximalem Komponentenaufwand die in Kapitel 3.4.2.1 definierte Mindest-SJAZ nicht erreichen oder den erforderlichen Heizwärmebedarf nicht decken.

### 3.4.3 Anwendung der Dimensionierungsmatrizen

Um die Dimensionierungsmatrizen anwenden zu können, muss der jährliche Heizwärmebedarf, der Standort sowie die Neigung und Ausrichtung der Dachfläche des Gebäudes bekannt sein. Die jährliche solare Einstrahlung lässt sich mit dem frei zugänglichen Online-Tool PVGIS für ein definiertes Gebäude ermitteln. Wenn die beiden Dimensionierungskategorien für ein Gebäude bekannt sind, kann in der Dimensionierungsmatrix im Schnittpunkt der beiden Kategorien die Eignung des jeweiligen Systems sowie die zu erwartende SJAZ und den benötigten Komponentenaufwand abgelesen werden.

In Abbildung 7 ist ein Beispiel einer Dimensionierungsmatrix dargestellt. Für ein Gebäude mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 35 MWh an einem Standort an dem mit einer jährlichen solaren Einstrahlung von um die 1'300 kWh/m<sup>2</sup> zu rechnen ist, weist diese Dimensionierungsmatrix die Kategorie «gelb» aus, womit sich das Beispiel-System für dieses Gebäude gut eignet.

Beispiel-System (Sanierungsgebäude)				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20	SJAZ [-]	...	...	...
	Speichervolumen [m <sup>3</sup> ]	...	...	...
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	...	...	...
35	SJAZ [-]	...	...	...
	Speichervolumen [m <sup>3</sup> ]	...	...	...
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	...	...	...
75	SJAZ [-]	...	...	...
	Speichervolumen [m <sup>3</sup> ]	...	...	...
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	...	...	...

Abbildung 7: Beispiel einer Dimensionierungsmatrix für ein Beispiel-System eingesetzt in Sanierungsgebäuden.

Die Einfärbung der Matrixeinträge hat folgende Bedeutung:

- Grün: «sehr gute Eignung»
- Gelb: «gute Eignung»
- Orange: «genügende Eignung»
- Rot: «bedingte Eignung»
- Grau: «keine Eignung»

Falls ein Gebäude zwischen zwei Heizwärmebedarfskategorien liegt, sollte im Zweifel immer die nächstgrössere Kategorie als Anhaltspunkt für die Dimensionierung gewählt werden. Falls ein Gebäude eine solare Einstrahlung zwischen zwei Kategorien aufweist, sollte sich immer an der nächsttieferen Kategorie orientiert werden.

### 3.5 Simulation der Systeme

In der vorliegenden Arbeit werden alle Simulationen der Heiz- und Kühlsysteme mit der Simulationssoftware Polysun (Version 12.0.10) durchgeführt. Damit lassen sich die Energiesysteme von Gebäuden oder ganzen Quartieren digital simulieren und Aussagen über Funktionalität, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit treffen. Entwickelt wurde die Software von der Schweizer Firma Vela Solaris AG. Für die Simulationen können jeweils Angaben zum Gebäude (Standort, Ausrichtung, Wärmebedarf usw.) sowie zu allen verwendeten Komponenten (Wärmepumpen, PVT-Kollektoren usw.) mit marktaktuellen Produkten gemacht werden. Jedem Standort sind Wetterdaten von Meteonorm hinterlegt, die Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Die Steuerung der Komponenten kann entweder direkt in Polysun programmiert, oder aus einer Auswahl an vorprogrammierten Steuerungen übernommen werden (Vela Solaris AG, 2019).

## 4 Recherche Wärmespeichertechnologien

In diesem Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten, die Wärme saisonal zu speichern aufgezeigt und die durchgeführte Recherche bezüglich den verschiedenen Wärmespeichertechnologien zusammengefasst.

Die verschiedenen Wärmespeicher können grob in folgende drei Kategorien eingeteilt werden (Scheffler, 2019).

- Sensible Wärmespeicher
- Latente Wärmespeicher
- Sorptive Wärmespeicher

Welche Technologie in welchem Fall bevorzugt wird, hängt von verschiedenen Randbedingungen ab, wie dem Temperaturniveau der Ladung und Entladung des Speichers, der Dauer über die die Wärme gespeichert werden soll, den Kosten sowie dem Platzbedarf des Speichers.

### 4.1 Sensible Wärmespeicher

Bei sensiblen Wärmespeichern wird das verwendete Speichermedium fühlbar (sensibel) um eine gewisse Temperatur erwärmt und somit Wärmeenergie gespeichert. Je höher die spezifische Wärmekapazität des Speichermediums ist, desto mehr Wärmeenergie kann pro Kilogramm Speichermedium bei der Erwärmung gespeichert werden. Aufgrund des entstehenden Temperaturunterschiedes zur Umgebung bei der Ladung (Erwärmung) des Speichers, entstehen Wärmeverluste falls die Speicher nicht gut wärmegeklämt werden. Diese Wärmeverluste sind umso grösser je höher die Temperaturdifferenz zur Umgebung ist. Die in diesem Kapitel erwähnten Wärmespeicher nutzen je nach Variante Wasser, das Erdreich oder Beton als Wärmespeichermedium.

#### **Tank-Wärmespeicher**

Als Tank-Wärmespeicher werden ins Erdreich eingelassene oder innerhalb der Gebäudehülle installierte, wärmegeklämtete Stahlbehälter bezeichnet. Die Behälter sind mit Wasser oder einem Wasser/Glykol-Gemisch gefüllt, das z.B. durch Solarwärme bis maximal 100°C erwärmt werden kann.

Als Beispiel für einen solchen Speicher ist der Swiss Solartank der Firma Jenni Energietechnik zu nennen. Beim Beladen des Speichers wird darauf geachtet, dass eine möglichst optimale Temperaturschichtung im Speicher herrscht und der Rücklauf zu den Solarkollektoren möglichst kühl ist, um deren Ertrag zu erhöhen. Erreicht wird die Schichtung unter anderem durch eine mehrstufige Solarbeladung, sowie einer ausgeklügelten Geometrie der Anschluss-Stutzen. Der Swiss Solartank fungiert als Zentrum des gesamten Wärmesystems und ist auch für die intelligente Sammlung und Verteilung der Wärme zuständig. Er wird idealerweise innerhalb der Gebäudehülle aufgestellt, damit die Abwärme nicht verloren geht. Somit kann der Speicher als praktisch ideal isoliert betrachtet werden. Die Trinkwassererwärmung erfolgt mit einem im Tank integrierten Edelstahlboiler, wodurch der Platzbedarf und die Wärmeverluste verringert werden (Jenni Energietechnik, 2020). Die Speicherdichte liegt bei einem Wasserspeicher bei ungefähr 70 kWh/m<sup>3</sup> bei einer Erwärmung um 60 Kelvin und die Speicherkosten belaufen sich auf rund 4 CHF/kWh (Gaegauf, et al., 2016).

#### **Erdbecken-Wärmespeicher**

Der Erdbecken-Wärmespeicher ist eine mit Wasser gefüllte und wärmegeklämtete Grube, die neben dem Gebäude im Erdreich eingelassen ist. Gegen oben ist die Grube mit einem schwimmenden, wärmegeklämteten Deckel geschlossen. Alternativ zum Wasser kann die Grube auch mit wassergesättigtem Kies oder Sand befüllt werden. Die Maximaltemperatur im Speicher beträgt aufgrund der Temperaturbeständigkeit der zur Dichtung benötigten Kunststofffolien etwa 90 °C. Die Kosten dieses Speichers sind vor allem durch den wärmegeklämteten Deckel des Speichers gegeben (Haller & Ruesch, 2019). Sie belaufen sich minimal auf 30 CHF/m<sup>3</sup> (ee-news, 2017). Die

Speicherdichte ist bei einem wassergefüllten Erdbeckenspeicher mit der des Tank-Wärmespeichers zu vergleichen, weshalb die Speicherkosten somit ca. 0.4 CHF/kWh betragen. Die Wärmeverluste betragen je nach Bauart und Isolation um die 10 % über ein ganzes Jahr (Haller & Ruesch, 2019). Als Nachteil ist vor allem der Platzbedarf des Speichers zu nennen, da er neben dem Gebäude platziert werden muss.

### **Erdsonden-Wärmespeicher**

Die Erdsonden-Wärmespeicher nutzen das Erdreich zur Wärmespeicherung. Die zum Zeitpunkt der Produktion nicht benötigte Wärme wird mit einem geeigneten Wärmeträgerfluid durch vertikale Bohrlöcher ins Erdreich geleitet, wobei dieses erwärmt wird. Bei aufkommendem Wärmebedarf können die Sonden wieder mit dem Wärmeträgerfluid durchflossen werden, wobei dieses die im Erdreich gespeicherte Wärme aufnimmt und dem Gebäude zur Verfügung stellt (Haller & Ruesch, 2019). Bei einer hohen Sondendichte oder grossem Wärmeentzug ist jedoch darauf zu achten, dass das Erdreich längerfristig nicht auskühlt, weshalb oft eine Regeneration der Sonden (beispielsweise mit Solarthermie) nötig ist (Sauter, et al., 2020).

Da in der vorliegenden Arbeit wie in Kapitel 1.1 erwähnt, keine Speicher mit Erdsondenbohrung untersucht werden sollen, wird diese Speichertechnologie nicht weiter betrachtet.

### **Aquifer-Wärmespeicher**

Bei Aquifer-Wärmespeichern werden unterirdische, wasserführende Gesteinsschichten als Wärmespeicher genutzt. Dazu wird ein Brunnen errichtet, aus dem im Sommer kaltes Grundwasser gepumpt, erwärmt und wieder zurück in Erdreich gepumpt wird. Bei Wärmebedarf im Winter wird dieser Vorgang umgekehrt und die Wärme zurückgewonnen. Bedingungen für diese Wärmespeichervariante sind eine hohe Wasserdurchlässigkeit der grundwasserführenden Schicht, eine gute Dichtheit der begrenzenden Schichten und eine geringe Fließgeschwindigkeit des Grundwassers. Die Kosten dieser Variante sind vor allem auf die vorgängigen, geologischen Abklärungen sowie die Erschliessung des Grundwassers zurückzuführen (Haller & Ruesch, 2019).

Da auch bei dieser Speichertechnologie eine Bohrung ins Erdreich nötig ist, wird dieser Speicher nicht in die weiteren Untersuchungen eingeschlossen.

### **eTank**

Als eTank wird eine von der deutschen Firma eZeit Ingenieure GmbH entwickelte Speicherlösung bezeichnet (eZeit Ingenieure, 2007). Es handelt sich um einen Wärmespeicher, der entweder neben dem Gebäude (bei Sanierungen) oder unterhalb des Gebäudes (bei Neubauten) platziert wird. Er besteht bis zu einer Tiefe von ca. 2 m aus mehreren Schichten Erdreich, in denen Sole-Leitungen verlegt sind. Der Hersteller gibt für eine Heizlast von 10 kW eine optimale Grösse des eTanks von 100 bis 120 m<sup>3</sup> an. Gegen oben und zur Seite ist der Speicher wärmedämmend, um die Wärmeverluste zu minimieren. Gegen unten ist der Speicher jedoch offen, um bei grossem Speicherbedarf auch das darunterliegende Erdreich als Speichermedium zu nutzen. Ausserdem wird so erreicht, dass bei besonders kalten Temperaturen im eTank Erdwärme von unten in den Speicher nachfliessen kann, wodurch sich der eTank thermisch träge verhält (Vela Solaris & ZHAW, 2016).

Die nicht direkt im Heizsystem benötigte Solarwärme (bzw. Wärme aus anderen Energiequellen) wird während der Wärmeproduktion im Speicher über die mit Soleflüssigkeit gefüllten Leitungen zwischengepuffert und bei Bedarf über eine S/W-WP dem Heizsystem zugeführt. Im Sommer kann der Speicher auch Abwärme aus dem Gebäude einspeichern und so zur passiven Kühlung des Gebäudes eingesetzt werden. Das Temperaturniveau bewegt sich im Jahresverlauf in der Regel zwischen 6 °C und 23 °C (deematrix Energiesysteme GmbH, 2019). Aufgrund dieser geringen Temperaturerhöhung des Speichers liegt die Speicherdichte je nach Füllmaterial nur bei 12 bis 14 kWh/m<sup>3</sup>. Bei einer angenommenen Temperaturerhöhung um 60 K betrüge die Speicherdichte jedoch um die 40 kWh/m<sup>3</sup>. Als Füllmaterial des eTanks kann grundsätzlich jeder verdichtungsfähige Boden benutzt werden (deematrix Energiesysteme GmbH, 2012). Generell gilt aber, je höher der Feuchtegehalt im Speicher, desto höher die Speicherkapazität. Um die Feuchtigkeit im Speicher zu

gewährleisten braucht es vor dem Bau Kenntnisse über den Baugrund und die vorherrschenden Schichtenverhältnisse (vorhandene Wasserleiter oder allfällige Sperrschichten). Zusätzlich werden Füllmaterialien verwendet, die durch den Kapillareffekt die Feuchtigkeit halten können (Nagel, 2021). Zur Seite und gegen oben ist der Speicher zusätzlich mit einer Folie abgedichtet, um die Verdunstung des Wassers bei höheren Temperaturen zu vermeiden.

Trotz der niedrigen Temperaturerhöhung im eTank liegt die Soletemperatur im Jahresdurchschnitt immer noch ca. 10 °C über der in einer herkömmlichen Erdwärmesonde (deematrix Energiesysteme GmbH, 2012). Der Preis für einen eTank (Materialkosten und Installation) liegt bei ca. 70 Euro pro m<sup>3</sup> (Bockelmann, Peter, & Schlosser, 2019). Mit den Angaben zum Füllmaterial «wassergesättigter Sand» aus Polysun (Dichte 2'700 kg/m<sup>3</sup> und als Wärmekapazität 926 J/kg K) lassen sich die Speicherkosten berechnen, die sich auf rund 6 CHF/kWh belaufen.

### Heatcrete

Eine andere Möglichkeit Wärmeenergie zu speichern, bietet der Heatcrete-Speicher der Firma EnergyNest. Als Wärmespeichermedium wird Spezialbeton verwendet, der in Betonsäulen mit je einem Durchmesser von ca. 25 cm und einer Länge von ca. 12 m eingegossen wird. Die Speichergrösse kann jedoch modular an den jeweiligen Bedarf angepasst werden. In den Betonsäulen befinden sich Rohre, durch die Wasserdampf oder Thermoöl mit Temperaturen bis zu 450°C geleitet wird, um die Wärme an den Beton abzugeben. Laut Hersteller können die Heatcrete-Speicher bei solarthermischen Kraftwerken, bei der Zwischenspeicherung von Abwärme aus energieintensiven Industrieprozessen oder bei der Verteilung der gespeicherten Wärmeenergie über Nah- bzw. Fernwärmenetze verwendet werden (Dietrich, 2017). Sie werden also vor allem für die Speicherung von grossen Wärmemengen bei hohen Temperaturen verwendet. Die Wärmeverluste betragen laut Hersteller weniger als 2 % in 24 h. Für kleinere Anlagen ist dieser Wert jedoch höher, da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Speichers zunimmt (EnergyNest, 2018). Die Speicherkosten betragen laut EnergyNest rund 25 CHF/kWh. Die Spezifische Wärmekapazität des Betons beträgt 0.75 kWh/m<sup>3</sup> K, was bei einer angenommenen Temperaturerhöhung um 60 K eine Speicherdichte von 45 kWh/m<sup>3</sup> bedeutet (Bergan & Greiner, 2014). Aufgrund der hohen Wärmeverluste und der eher kleinen Speicherdichte eignet sich dieser Speicher nicht als saisonaler Speicher für das vorgegebene System.

## 4.2 Latentwärmespeicher

Bei Latentwärmespeichern wird nicht nur die sensible (fühlbare), sondern auch die latente Wärme im Phasenübergang gespeichert. Diese Energie ist um ein Vielfaches grösser als der sensible Anteil. Der Vorteil der Nutzung des Phasenübergangs liegt also in der Erhöhung der Speicherdichte aber auch in der Verringerung der Temperaturerhöhung bei der Wärmespeicherung, was die Wärmeverluste verringert. Mit Latentwärmespeichern lässt sich Wärme nahezu verlustfrei über mehrere Monate speichern (Frigoteam, 2019). Als Wärmespeichermedium werden sogenannte Phase Change Materials (PCM) verwendet, deren Phasenübergangstemperatur je nach Produkt variiert und für jede Anwendung optimal gewählt werden kann. Der grosse Vorteil liegt darin, dass die Speicherkapazität in jenem Temperaturbereich, in dem die grösste Wärmemenge anfällt, erhöht und somit das benötigte Speichervolumen verringert werden kann. Neben Paraffinen oder Salzhydraten gilt auch Wasser als PCM und wird im Eisspeicher als Wärmespeichermedium verwendet.

### Eisspeicher

Der Eisspeicher kann im Heizsystem als Wärmequelle einer Wärmepumpe sowie als Pufferspeicher für die Solarwärme verwendet werden. Bei aufkommendem Wärmebedarf wird zuerst die sensible Wärme im Wasser durch dessen Abkühlung genutzt, und schlussendlich durch den auftretenden Phasenübergang von Wasser zu Eis die Erstarrungsenthalpie des Wassers freigesetzt. Das entstandene Eis kann im darauffolgenden Sommer zur passiven Kühlung des Hauses verwendet



werden. Ein Eisspeicher kann je nach Speichervolumen und verfügbarem Platz direkt im Heizungskeller aufgestellt oder neben dem Haus ins Erdreich eingelassen werden (Minder, Wagner, Mühlebach, & Weisskopf, 2014). Bei einem ins Erdreich eingelassen Speicher kann dieser zusätzlich wie der eTank die nachfliessende Erdwärme des umgebenden Erdreichs aufnehmen. Die Speicherdichte eines Eisspeichers liegt bei einem Arbeitsbereich zwischen 0 und 60°C bei rund 165 kWh/m<sup>3</sup>. Es können aber auch ohne Probleme Temperaturen von bis zu 100°C bevorratet werden (KKA, 2017). Angaben zu maximal zulässigen Ladetemperaturen konnten keine gefunden werden, weshalb aufgrund der Verwendung von Wasser als Speichermedium von einer maximalen Ladetemperatur von 100 °C ausgegangen wird. Die Kosten des Eisspeichers sind vor allem durch den Behälter und die Wärmeübertrager gegeben (Haller & Ruesch, 2019). Die Investitionskosten für einen erdverlegten Eisspeicher für ein Einfamilienhaus belaufen sich auf rund 40'000 CHF (Minder, Hefti, Ettlin, & Weisskopf, 2016). Bei einer angenommenen Grösse des Eisspeicher von 10 m<sup>3</sup> für ein Einfamilienhaus, betragen die Speicherkosten ca. 35 CHF/kWh.

### **Paraffin-Speicher**

Paraffine sind nicht wassergefährdend und zeichnen sich durch ihre gute Zyklenstabilität aus, was bedeutet, dass sie viele Phasenwechsel-Zyklen durchlaufen können, ohne ihre thermischen Eigenschaften zu verändern (Streicher, 2007). Bei Paraffin-Speichern befindet sich das Paraffin als PCM frei in einem Behälter, in Kunststoffröhren oder in kleinen Kugeln, die aufeinander geschüttet sind. Durch den Speicher verlaufen Rohre mit dem zu erheizenden Medium (hier Heizungswasser bzw. Quellmedium für die Wärmepumpe) oder dem abzukühlenden Medium (hier Solarfluid). Die Wärme wird eingespeichert, indem das Paraffin unter Wärmezufuhr erhitzt und aufgeschmolzen wird. Paraffine haben ihren Phasenwechsel je nach Produkt in einem Temperaturbereich von 5 °C bis 130 °C und haben Speicherdichten von bis zu 120 kWh/m<sup>3</sup> (Morhart, 2008). Die Möglichkeit zum Einsatz als saisonalen Wärmespeicher ist stark vom verwendeten Produkt (Schmelztemperatur) abhängig. Je tiefer die Schmelztemperatur und je besser der Speicher isoliert ist, desto eher ist davon auszugehen, dass das Speichermedium über die gewünschte Speicherdauer im flüssigen Zustand bleibt, und die Wärme somit über einen längeren Zeitraum speichern kann. Der grösste Nachteil sind bisher die Speicherkosten die etwa bei 150 bis 200 CHF/kWh liegen (Braun, 2015).

### **Thermobatterie**

Die Thermobatterie ist ein mit Natriumazetat-Trihydrat gefüllter PCM-Speicher der Firma HM Heizkörper, der je nach Anwendung modular erweiterbar ist. Der Speicher funktioniert auf Basis der unterkühlten Schmelze, womit die Absenkung der Temperatur einer Flüssigkeit unter den Erstarrungspunkt bezeichnet wird, ohne dass diese erstarrt (metastabiler Zustand) (HM Heizkörper, 2017). In diesem Zustand kann die latente Wärme langfristig gespeichert werden. Durch die Erstarrung (Kristallisation) des Natriumazetat-Trihydrat kann die Wärme schlussendlich wieder gezielt freigesetzt werden. Zur Erreichung des Zustandes der unterkühlten Schmelze (Zustand des Natriumazetat-Trihydrat für langfristige Speicherung der Wärme) ist eine komplette Aufschmelzung des PCMs nötig, was ca. 3 Stunden bei einer Aufschmelztemperatur von mind. 85°C dauert (HM Heizkörper, 2017). Aufgrund dieser hohen Ladetemperatur müssen entweder spezielle, isolierte PVT-Kollektoren, konzentrierende Solarthermie oder eine Wärmepumpe zur Ladung des Speichers verwendet werden. Bei der Entladung (Kristallisation) erwärmt sich der Speicher auf ca. 56°C. Durch die Unterteilung des Speichers in einzelne Zellen wird die plötzliche, ungewollte Entladung des Speichers aufgrund spontan ausgelöster Kristallisation der unterkühlten Schmelze verhindert (HM Heizkörper, 2017). Der Preis pro Batterie mit einer latenten Speicherkapazität von 53 kWh beträgt ca. 5'200 CHF, womit die Speicherkosten rund 100 CHF/kWh betragen. Die Speicherdichte von Natriumazetat-Trihydrat beträgt bei einer Erwärmung um 60 K ca. 160 kWh/m<sup>3</sup> (Lane, 1986).

### 4.3 Sorptionswärmespeicher

Sorptionswärmespeicher gehören in die Gruppe der thermochemischen Speicher. Sie basieren auf dem Prinzip der Adsorption eines gasförmigen Stoffes auf einer festen Oberfläche (Adsorptionsmaterial) oder der Absorption eines gasförmigen Stoffes in einer Flüssigkeit, wobei die Bindungsenthalpie des ad- oder absorbierten Stoffes in Form von Wärme frei wird. Als Sorptionsmaterial werden hygroskopische (Wasser bindende) Stoffe mit grossen spezifischen Oberflächen wie Silikagel oder Zeolith verwendet (IKZ-FACHPLANER, 2007). Als zu ad- oder absorbierenden Stoff findet oft Wasserdampf Verwendung. Die Vorteile von Sorptionswärmespeicher sind sowohl die vergleichsweise hohen Speicherdichten als auch die mögliche Kombination von Heiz- bzw. Kühlprozessen mit der Ent- und Befeuchtung von Luftströmen. Je nach verwendetem Sorptionsmaterial werden Speicherdichten von 200 bis 500 kWh/m<sup>3</sup> erzielt (IKZ-FACHPLANER, 2007). Diese bezieht sich jedoch rein auf das Volumen des Speichermediums und beinhaltet keine Systemkomponenten. Ausserdem eignen sich Sorptionswärmespeicher gut als saisonale Speicher, da sie keine sensiblen Wärmeverluste aufweisen und die Wärme über eine theoretisch unbegrenzte Dauer speichern können. Durch den Temperaturabfall beim Lade- und Entladeprozess entstehen jedoch Umwandlungsverluste, da der Speicher zuerst auf ein brauchbares Temperaturniveau gebracht werden muss (Fumey, 2015).

Im Folgenden werden drei verschiedene Sorptionsmaterialien vorgestellt. Zeolith wird nicht weiter betrachtet, da es im Vergleich zu Silikagel zur Desorption (Ladung) deutlich höhere Temperaturen benötigt. Diese Temperatur kann zwar je nach angestrebter Speicherdichte und Entladetemperatur variiert werden, jedoch gibt Hauer (2002) an, dass bei einer angestrebten Restwasserbeladung von 3 % Zeolithe mit einer Desorptionstemperatur von 300°C und Silikagele mit 80°C getrocknet werden müssen (Hauer, 2002). Auch eine Studie zu saisonalen Energiespeichern der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs (NTB) bestätigt, dass sich Silikagel in Kombination mit solarthermischen Anlagen aufgrund der tieferen Desorptionstemperaturen besser als Speichermaterial eignet (Bucher, 2014).

#### **Silikagel-Sorptionswärmespeicher**

Silikagel ist wie Zeolith ein wasseranziehender Stoff mit einer grossen inneren Oberfläche. Die Arbeitstemperaturen von Silikagel liegen in einem Bereich zwischen 40 und 100 °C. In der Verwendung als Speichermaterial können mit Silikagel zwar hohe Speicherdichten von ungefähr 150 kWh/m<sup>3</sup> erreicht werden (Wagner & Jähmig, 2006), allerdings liegen die Investitionskosten, sowohl für das Material selbst als auch für die Systemkomponenten noch deutlich höher als bei herkömmlichen Wärmespeichern (z.B. Wasser gefüllte Tank-Wärmespeicher), weshalb sie sich auf dem Markt noch nicht in breiter Basis durchgesetzt haben (SHK Profi, 2019). Zu den genauen Kosten eines solchen Speichers konnten keine Angaben gefunden werden. Das Beispiel von zwei Testanlagen in Brandenburg, DE der Firma UFE Solar mit Silikagel-Sorptionswärmespeicher zeigte, dass das angestrebte Ziel von 120 kWh/m<sup>3</sup> um zehn Prozent übertroffen werden konnte. Jedoch sei der apparative Aufwand (Dampferzeugung, Vakuumtechnik) eines solchen Speichers, sehr gross und somit ein solches Konzept nicht konkurrenzfähig (Deutschlandfunk, 2006). Dies bestätigt auch die hier durchgeführte Recherche zu den Sorptionswärmespeichern, wobei kein Hersteller der ein solches Produkt auf dem Markt hat, gefunden werden konnte.

#### **Natronlauge-Sorptionswärmespeicher**

Ein Sorptionswärmespeicher auf Basis von Natronlauge als Sorptionsmaterial wurde an der EMPA entwickelt und in einer Testanlage untersucht. Geladen wird der Speicher indem der Natronlauge unter Wärmezufuhr bei Temperaturen zwischen 60 und maximal 95°C Wasser ausgetrieben, und so die Lauge aufkonzentriert wird. Beim Entladevorgang wird der Natronlauge erneut Wasser zugeführt, wobei die Sorptionsenthalpie freigesetzt wird und die Lauge sich je nach Anfangskonzentration und

Verdünnungsgrad auf über 50°C erwärmt. Die Speicherdichte ist davon abhängig, wie stark die Natronlauge aufkonzentriert und beim Entladeprozess verdünnt werden kann, wobei die Konzentration der Lauge nach der Ladung von der Ladetemperatur abhängig ist. Maximal kann mit Speicherdichten von 440 kWh/m<sup>3</sup> gerechnet werden, wobei berücksichtigt werden muss, dass sich dies nur auf das Speichermedium bezieht und keine weiteren Systemkomponenten beinhaltet (Gaegauf, et al., 2016). Die Speicherkosten betragen rund 0.75 CHF/kWh wobei jedoch ebenfalls nur das Speichermedium und nicht die Installations- und Instandhaltungskosten betrachtet werden (Gaegauf, et al., 2016). Die Verwendung von Natronlauge als Sorptionsmaterial hat den Vorteil, dass das Medium gepumpt werden kann und somit die Lade- und Entladeeinheit örtlich getrennt voneinander installiert werden können.

In einer E-Mail-Korrespondenz mit Dr. Paul Gantenbein (Institut für Solartechnik, SPF), der ebenfalls an der Entwicklung dieses Speichers beteiligt war, teilte er mit, dass eine Markteinführung eines solchen Speichers noch einige Jahre dauern wird. Der Speicher sei jedoch als saisonaler Speicher geeignet, und kann je nach Laugenvorrat für mehrere Wintermonate Wärme liefern.

### **CSA-Zement Wärmespeicher**

Der CSA-Zement Speicher ist eine Kombination eines sorptiven und eines latenten Wärmespeichers, der ebenfalls an der EMPA entwickelt wurde. Als Speichermedium wird Calcium-Sulfoaluminat-Zement (CSA) verwendet, der zwischen 40 und 90 Prozent des Minerals Ettringit enthält (herkömmlicher Beton enthält maximal 15 Prozent Ettringit). Je mehr Ettringit der Zement enthält, desto grösser ist die erzielte Speicherdichte (Schweiz Patentnr. WO/2011/147748, 2011). Ein weiterer Vorteil gegenüber herkömmlichem Beton ist, dass der CSA-Zement bei der Herstellung ca. 40 Prozent weniger CO<sub>2</sub> freisetzt (ETH-RAT, 2012).

Um den Speicher zu laden und zu entladen, sind die Beton-Bauteile mit Heizschlangen durchzogen. Wird das Ettringit zum Beispiel über Solarkollektoren erwärmt, beginnt ab 50 °C, das darin gespeicherte Wasser zu verdunsten und es bildet sich Meta-Ettringit. Vorteilhaft ist jedoch eine Ladetemperatur von ca. 110 °C, um den Zement vollständig zu dehydrieren (Kaufmann & Winnefeld, 2019). Der ausgetriebene Wasserdampf wird aufgefangen und kondensiert. Bei Wärmebedarf wird dem dehydrierten Zementblock wieder Wasser zugeführt, wobei die Bindungsenthalpie des Wassers (sorptiv) und die Rehydratation des Ettringit (latent) Wärme freisetzt. Die abgegebene Wärmemenge ist dabei über die Wasserzufuhr regelbar. Bei einer Ladetemperatur von 100 °C kann der Zement ca. 227 kWh/m<sup>3</sup> speichern (Kaufmann & Winnefeld, 2019). Um ein Minergie-Einfamilienhaus über einen kompletten Winter zu heizen, reicht ein 15 m<sup>3</sup> grosser Betonblock bei einer Kollektorfläche von 15 m<sup>2</sup> (ETH-RAT, 2012). Der Preis für eine Tonne des CSA-Beton als Speichermedium beträgt weniger als 400 Franken (ohne Herstellung der Speicherblöcke, Installation und sonstige Systemkomponenten) (ETH-RAT, 2012). Die Speicherkosten für das Speichermedium allein betragen also rund 4 CHF/kWh.

In einer E-Mail Korrespondenz mit Dr. Josef Kaufmann (EMPA), ruht momentan jegliche Forschung zum Thema CSA-Zement Speicher, weshalb auch eine allfällige Markteinführung eines solchen Speichers noch weit entfernt liegt.

#### 4.4 Zusammenfassung und Auswertung Recherche Wärmespeichertechnologien

Die Wärmespeichertechnologien müssen verschiedene Kriterien erfüllen, um sich für den Einsatz im vorgegebenen System zu eignen. Dazu gehören die Verfügbarkeit auf dem Markt, die Speicherdichte, die Arbeitstemperatur, die Kosten und die Eignung als saisonaler Speicher. In Tabelle 11 sind für alle untersuchten Speichertechnologien quantitative Werte sowie qualitative Beurteilungen zu den Kriterien, zusammengefasst. Die quantitativen Werte beruhen jeweils auf unterschiedlichen Quellen, deren Wissenschaftlichkeit und Aktualität stark variieren, weshalb sie eher als ungefähre Richtwerte zu verstehen sind. Die Quellen, aus denen die Werte stammen, werden in den Unterkapiteln der jeweiligen Speicher (siehe Kapitel 4.1 bis 4.3) genannt.

Tabelle 11: Beurteilung der verschiedenen Speichertechnologien anhand der definierten Eignungskriterien und farbliche Einteilung in 3 Kategorien (rot = «nicht geeignet», gelb = «bedingt geeignet», grün = «geeignet») bezüglich der Eignung als saisonaler Wärmespeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmequelle für eine Wärmepumpe.

	Sensible Wärmespeicher				Latentwärmespeicher			Sorptionswärmespeicher		
	Tank-Speicher	Erd-becken	eTank	Heat-crete	Eis-speicher	Paraffin-Speicher	Thermo-batterie	Silikagel	Natron-lauge	CSA-Zement
Speicherkosten [CHF/kWh]	Ab 4	Ab 0.4	6	25	35	150 - 200	100	?	0.75	4
Speicherdichte [kWh/m <sup>3</sup> ]	70	70	40	45	165	120	160	150	max. 440	227
Marktpräsenz [-]	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Ladung durch PVT [-]	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Eher Ja	Ja	Eher Ja
Saisonale Wärmespeicherung [-]	Eher Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Eher Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Arbeits-temperatur [°C]	bis 100	bis 90	bis 90	bis 450	bis 100	5-130	55-85	40-100	35-95	25-110

##### 4.4.1 Auswahl der geeigneten Wärmespeichertechnologien

Aufgrund des Kriteriums der Marktpräsenz, scheiden alle Sorptionswärmespeicher aus. Aufgrund des Kriteriums zur Eignung als saisonaler Speicher, wird auch der Heatcrete-Wärmespeicher nicht weiter untersucht. Das Potential des mit Wasser gefüllten Tank-Wärmespeichers als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, wurde bereits im L-Sol-Projekt untersucht und beschrieben, weshalb dieser in der vorliegenden Arbeit auch nicht weiter untersucht wird. Als Vertreter für die erdverlegten, sensiblen Wärmespeicher wird im eTank aufgrund der Möglichkeit der Platzierung unterhalb des Gebäudes das grösste Potential gesehen. Bei den Latentwärmespeichern wird das grösste Potential im Eis-Speicher sowie im Paraffin-Speicher gesehen. Die Thermobatterie wird aufgrund der hohen Ladetemperatur von 85°C und der grösseren Komplexität bei der Modellierung eines solchen Speichers (Abkühlung der unterkühlten Schmelze unter die Schmelztemperatur ohne zu erstarren) nicht weiter betrachtet. Es bleiben also folgende, für das beschriebene System (siehe Abbildung 1) interessante Speichertechnologien übrig, die es zu untersuchen gilt:

- eTank
- Eisspeicher
- Paraffin-Speicher

In Kapitel 5 werden mögliche kombinierte Heiz- und Kühlsysteme definiert und ausgelegt, wobei die ausgewählten Speichertechnologien in verschiedenen Anordnungen miteinander kombiniert werden. Diese Speicher-Systeme werden anhand von typischen Gebäuden, die in Kapitel 3.3 definiert werden, simuliert und verglichen.

## 5 Definition der Heiz- und Kühlsysteme

In diesem Kapitel werden verschiedene kombinierte Heiz- und Kühlsysteme mit den in Kapitel 4.4.1 ausgewählten Wärmespeichertechnologien als saisonale Wärmespeicher, Pufferspeicher der Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmequelle für die WP definiert.

In Polysun werden jeweils zwei unterschiedliche WPs (Beheizung und Kühlung) implementiert, da somit die Komplexität des hydraulischen Aufbaus der Systeme und der Steuerungen reduziert werden kann. In den realen Systemen sollen jedoch beide Aufgaben mit einer reversiblen WP übernommen werden. Die passive und aktive Kühlung ist bei allen Systemen in den Monaten Juni, Juli und August aktiviert.

Auf den Steuerungsaufbau der einzelnen System-Varianten wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Dieser wurde in der vorhergegangenen PWRU2 detailliert erläutert und für die Systeme der vorliegenden Arbeit optimiert, angepasst und erweitert (Rosso, 2021).

### 5.1 eTank System

Das eTank-System nutzt den in Kapitel 4.1 vorgestellte eTank als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für die S/W-WP. Zusätzlich dient der gleiche eTank als Wärmesenke für die aktive sowie für die passive Kühlung im Sommer. Bei der Auslegung der Grösse des eTanks für die Erstellung der Dimensionierungsmatrizen (siehe Kapitel 6.1) wird neben der Einhaltung der minimalen und maximalen Grösse (siehe Kapitel 3.3.4) jeweils auch darauf geachtet, dass dieser im Jahresverlauf nie unter eine Temperatur von 1°C fällt, um das Gefrieren des Wassers im Füllmaterial und somit eine Volumenausdehnung und Schäden am eTank oder dem Gebäude zu verhindern. Falls der eTank auch bei maximaler Fläche und maximaler Anzahl PVT-Kollektoren unter eine Temperatur von 1°C fällt, erhält das System das Label «keine Eignung» und wird in der Dimensionierungsmatrix grau eingefärbt, obwohl die Mindest-SJAZ erreicht wurde. Eine Diskussion zur Auswirkung der Wahl dieser Minimaltemperatur ist in Kapitel 8.2.1 zu finden. Die im eTank verbaute Rohrlänge des Wärmeübertragers beträgt bei einer Fläche des eTanks von 100 m<sup>2</sup> ca. 800 m und wird davon ausgehend proportional zur verbauten Fläche angepasst (Nagel, 2021).

In Abbildung 8 ist das eTank System und dessen Einbindung im Gebäude schematisch dargestellt, wobei der eTank neben dem Gebäude (Sanierungsgebäude) platziert ist. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten inkl. der passiven Kühlung über die PVT-Kollektoren und über den eTank sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die aktive Kühlung über die Wärmepumpe wird der Übersichtlichkeit halber im Schema weggelassen.

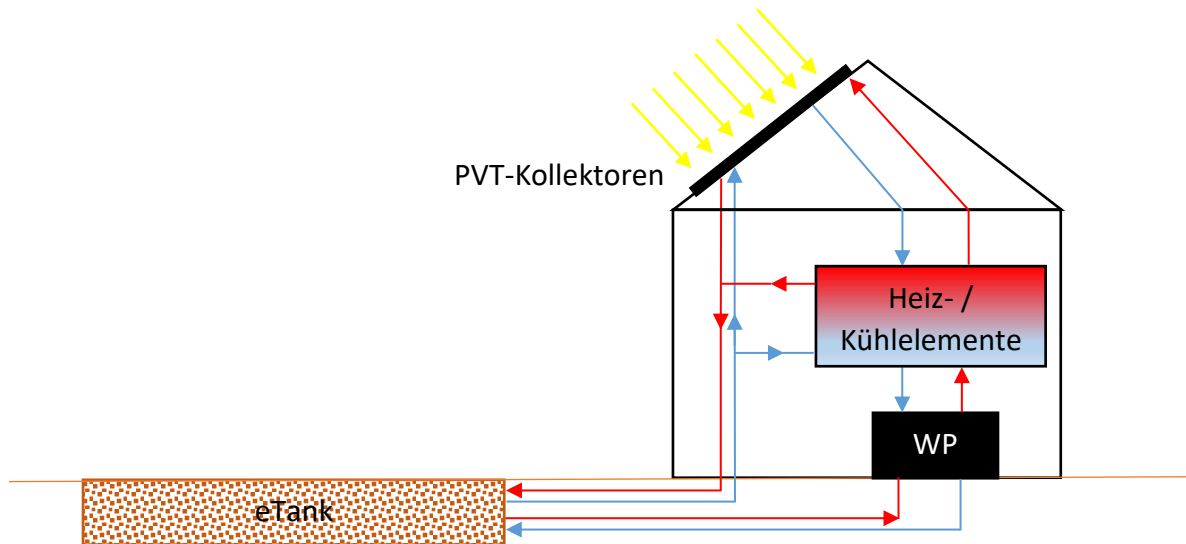


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines eTank Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und einem eTank neben dem Gebäude als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP).

In Abbildung 9 ist der hydraulische Aufbau des Systems mit allen benötigten Komponenten inkl. den zwei separaten WPs für die Beheizung und die Kühlung dargestellt.

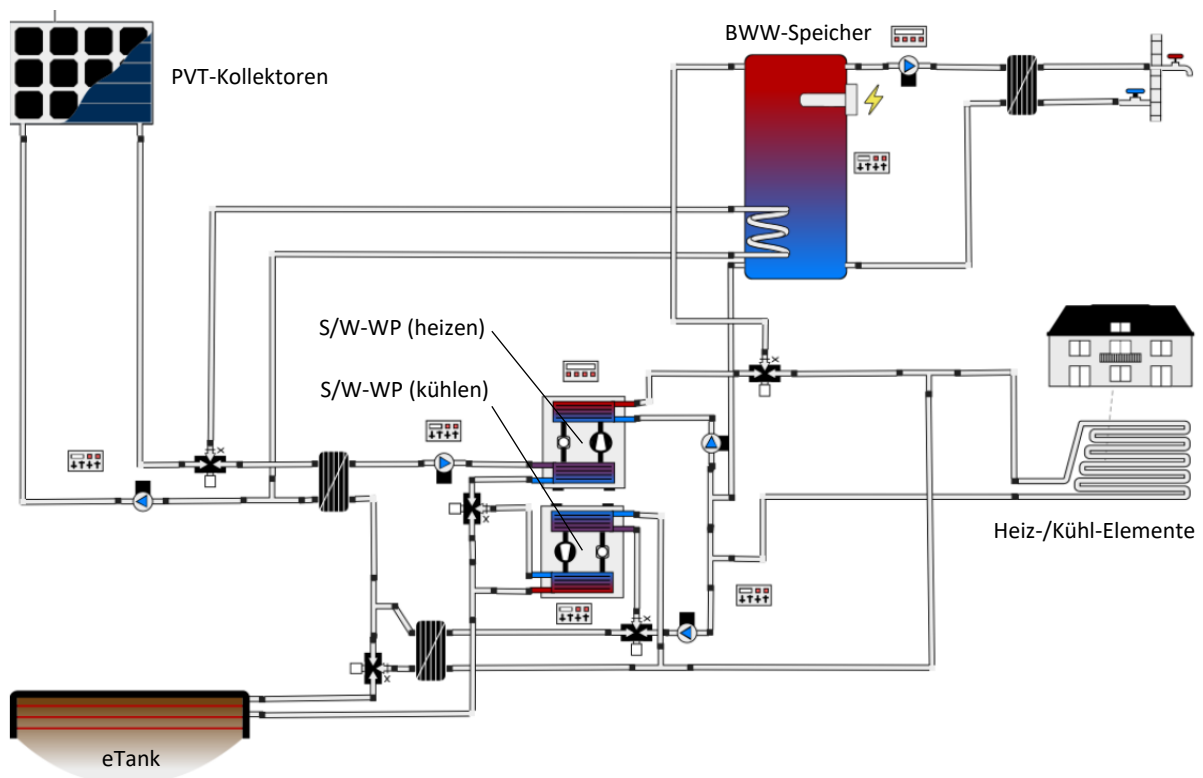


Abbildung 9: Hydraulischer Aufbau des eTank Systems mit der Verwendung des eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung.

## 5.2 2-eTank System

Da die passive Kühlung und die Wärmespeicherung im gleichen Wärmespeicher miteinander konkurrieren (während der Kühlung ist keine Wärmespeicherung möglich), wird als nächste Variante ein System mit zwei eTanks beschrieben. Dabei wird der eine eTank (Solar-eTank) als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren sowie als primäre Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet. Der zweite eTank (Kühl-eTank) wird in den Sommermonaten als Wärmesenke der passiven und der aktiven Kühlung genutzt und dadurch aufgeheizt. In den Wintermonaten wird er jedoch der Wärmepumpe als sekundäre Wärmequelle zugeschaltet, sobald die Temperatur des Solar-eTanks unter die des Kühl-eTanks fällt. Durch diese Anordnung der eTanks soll die Effizienz der Wärmepumpe erhöht werden, da die Wärmequelle über einen längeren Zeitraum ein höheres Temperaturniveau aufweist. Ausserdem wird somit auch die passive Kühlleistung über den Kühl-eTank erhöht, da dieser im Winter ausgekühlt wird, und dadurch über den Sommer ein grösseres Rückkühlpotential hat. Bezüglich dem Volumen- bzw. Flächenverhältnis zwischen Solar- und Kühl-eTank hat eine kurze Voruntersuchung gezeigt, dass der Kühl-eTank grösser als der Solar-eTank dimensioniert werden soll, um eine höhere SJAZ zu erreichen. Die Fläche des gesamten eTanks wird deshalb bei allen Anwendungen in 1/3 Solar-eTank und 2/3 Kühl-eTank unterteilt. Diese Aufteilung kann jedoch bei verschiedenen Einstrahlungskategorien und Gebäudegrössen leicht variieren. Zusätzlich wird auch bei dieser Variante die Kühlung über die PVT-Kollektoren bei Nacht implementiert. Bei der Dimensionierung der eTanks im 2-eTank System (siehe Kapitel 6.2) gelten bezüglich minimaler und maximaler Fläche sowie der Minimaltemperatur in den eTanks die gleichen Bedingungen wie beim eTank System (siehe Kapitel 5.1).

In Abbildung 10 ist das 2-eTank System schematisch dargestellt, wobei die eTanks neben dem Gebäude (Sanierungsgebäude) platziert sind. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten inkl. der passiven Kühlung über die PVT-Kollektoren und über den eTank sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die aktive Kühlung über die Wärmepumpe wird der Übersichtlichkeit halber im Schema weggelassen.

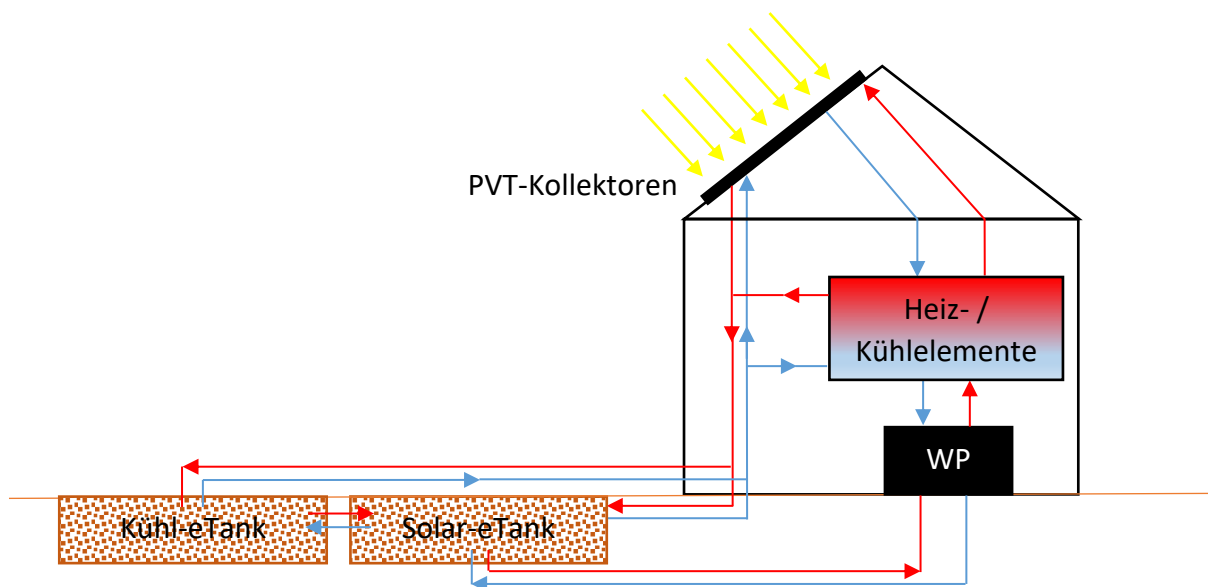


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines 2-eTank Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und den beiden eTanks neben dem Gebäude als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP) und Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren bzw. Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung.

In Abbildung 11 ist der hydraulische Aufbau des 2-eTank-Systems mit allen benötigten Komponenten inkl. den zwei separaten WPs für die Beheizung und die Kühlung dargestellt.

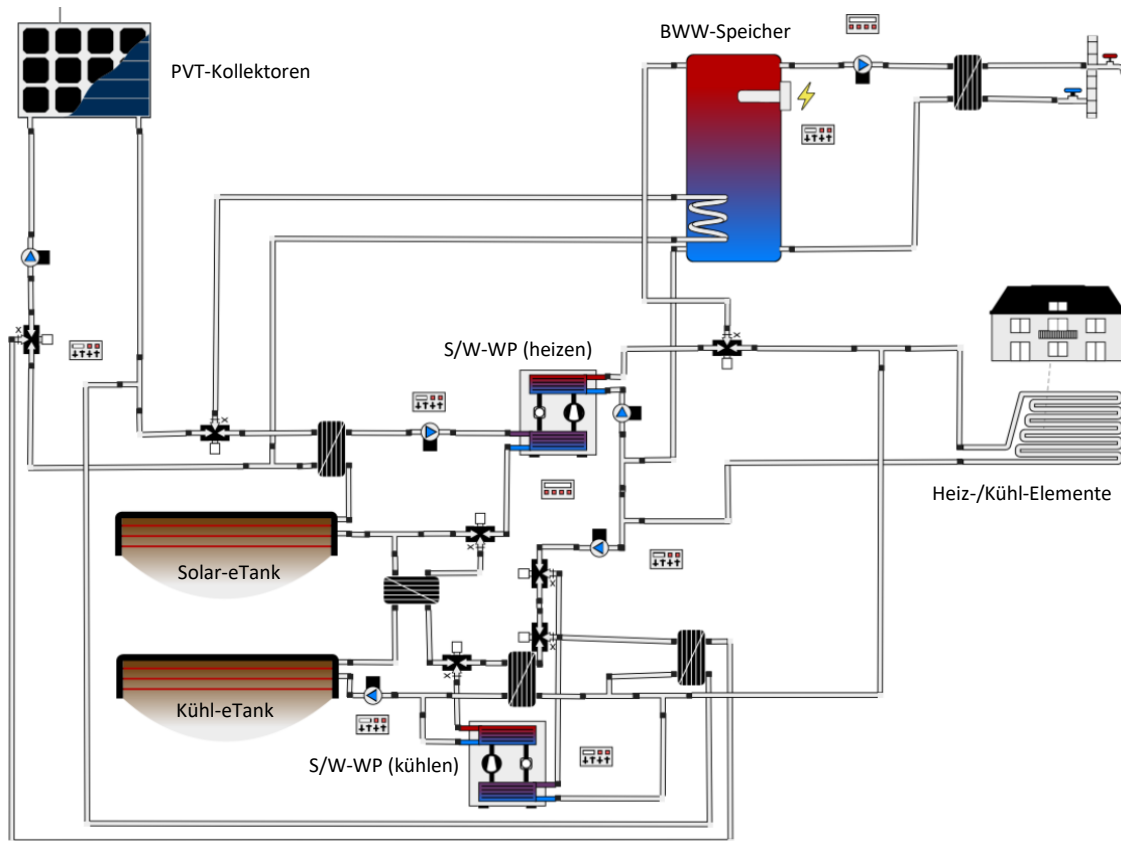


Abbildung 11: Hydraulischer Aufbau des 2-eTank-Systems mit der Verwendung der eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als primäre Wärmequelle für die S/W-WP (Solar-eTank) sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung und als sekundäre Wärmequelle für die S/W-WP (Kühl-eTank).

### 5.3 Eisspeicher System

Das Eisspeicher System nutzt Wasser als Speichermedium für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für die WP. Auch bei diesem System wird eine passive Kühlmöglichkeit über die PVT-Kollektoren implementiert. Im Sommer eignet sich auch der Speicher aufgrund der tiefen Temperaturen gut zur passiven Kühlung des Gebäudes. Zusätzlich wird in dieser Variante der Eisspeicher auch als Wärmesenke für die aktive Kühlung über die WP genutzt wobei die Temperaturen im Speicher schnell ansteigen können. Obwohl ein Eisspeicher wie in Kapitel 4.2 beschrieben auch Temperaturen von bis zu 100°C einspeichern kann, wird die Maximaltemperatur auf 60°C beschränkt, da dies den maximal erzeugbaren Vorlauftemperaturen (kondensatorseitig) der eingesetzten WPs entspricht (Viessmann, 2020). Diese Beschränkung hat vor allem auf die aktive Kühlung des Gebäudes einen Einfluss, da sobald die maximale Speichertemperatur erreicht ist nur noch passiv über die PVT-Kollektoren gekühlt werden kann. Um die Eintrittstemperatur in die WP trotz den teils hohen Wärmequellen-Temperaturen in einem günstigen Bereich zu halten wird verdampferseitig ein Beimischventil eingesetzt, welches die Soleeintrittstemperatur auf 20°C regelt. Für die eingesetzten WPs gibt Viessmann eine maximale Temperatur der Wärmequelle von 25°C an (Viessmann, 2020). Als Aufstellort des Eisspeichers wird, wenn immer möglich das Untergeschoss des Gebäudes gewählt, da dadurch keine Grabungen neben dem Gebäude nötig sind und der verfügbare Platz neben dem Gebäude eher als kritisch angesehen wird. Falls in gewissen Systemkombinationen (Gebäudetyp und Einstrahlungskategorie) jedoch ein größeres Speicher-Volumen als im Untergeschoss (siehe Kapitel 3.3.5) benötigt wird, kann der Eisspeicher auch ausserhalb der Gebäudehülle platziert werden.



Bei der Dimensionierung des Eisspeichers zur Erstellung der Dimensionierungsmatrizen (siehe Kapitel 6.3) wird darauf geachtet, dass dieser im Jahresverlauf möglichst oberhalb einer Temperatur von  $-5^{\circ}\text{C}$  bleibt und nur an einzelnen Tagen auf eine Minimaltemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  fällt (minimal zulässige Quelltemperatur der eingesetzten WPs (Viessmann, 2020)).

Um den Aufwand durch die Grabung neben dem Gebäude mit dem eines Systems mit eTank vergleichbar zu halten, werden die Eisspeicher jeweils auch mit einer Höhe (Grabungstiefe) von 2 Metern dimensioniert. Die jeweilige Länge des Regenerations- bzw. Entzugswärmeübertragers wurde mittels Dimensionierungshilfen für Eisspeicher von Viessmann bestimmt. In der Planungsanleitung zum Vitofriocal Eisspeichersystem wird bei einem Eisspeicher mit  $10\text{ m}^3$  Wasservolumen die Rohrlänge des Entzugswärmeübertragers mit 255 m und die des Regenerationswärmeübertragers mit 145 m angegeben (Viessmann, 2019). Für einen Eisspeicher mit  $20\text{ m}^3$  Wasservolumen werden laut der Planungsanleitung die doppelten Rohrlängen verwendet, weshalb für alle anderen Speichergrossen die Rohrlängen proportional zum Speichervolumen angepasst werden.

In Abbildung 12 ist das Eisspeicher System inkl. Gebäude schematisch dargestellt, wobei ein erdverlegter Eisspeicher neben dem Gebäude dargestellt wird. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die aktive Kühlung über die Wärmepumpe wird der Übersichtlichkeit halber im Schema weggelassen.

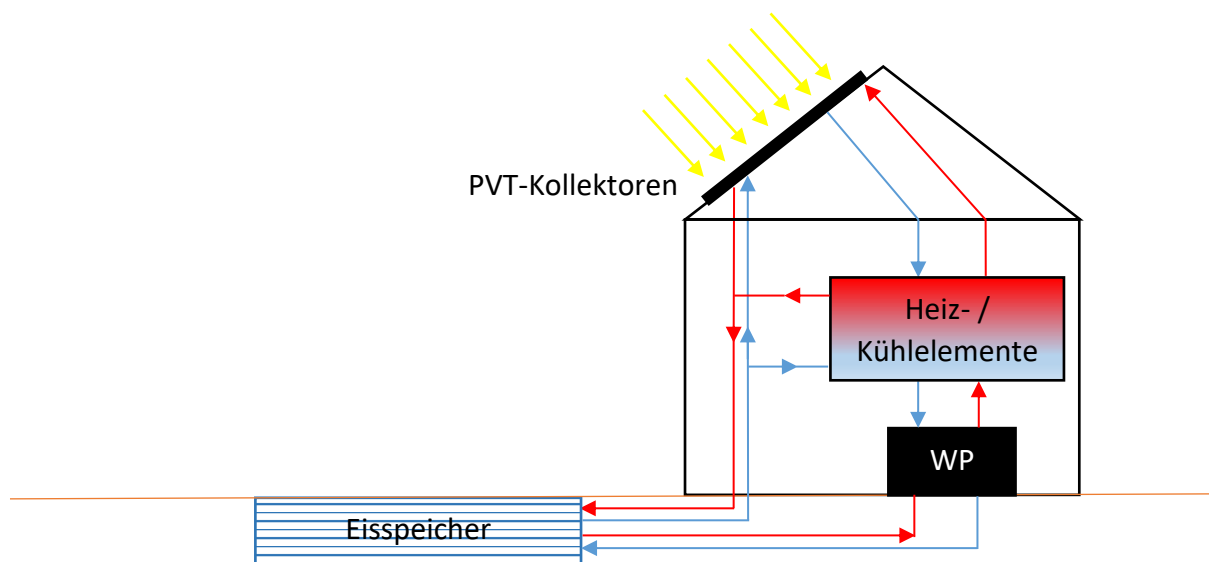


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Eisspeicher Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und dem im Erdreich eingelassenen Eisspeicher neben dem Gebäude als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung.

In Abbildung 13 ist der hydraulische Aufbau des Eisspeicher Systems mit allen benötigten Komponenten inkl. den zwei separaten WPs für die Beheizung und die Kühlung dargestellt.

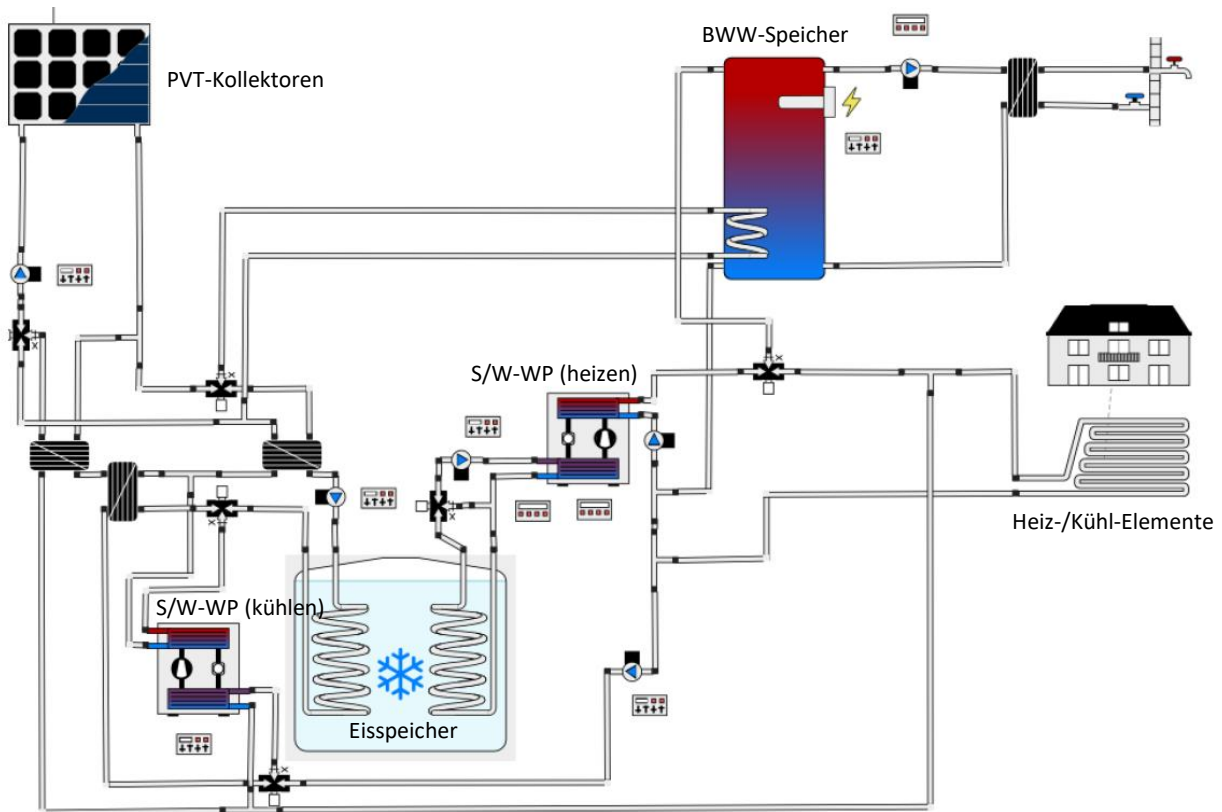


Abbildung 13: Hydraulischer Aufbau des Eisspeicher Systems mit der Verwendung des Eisspeichers als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung.

#### 5.4 Paraffin-Speicher System

Das Paraffin-Speicher System weist den gleichen hydraulischen Aufbau wie das Eisspeicher System auf. Der Unterschied besteht darin, dass für die Simulation in Polysun ein Tank-Speicher mit angepasstem Wärmespeicherfluid anstelle des Eisspeichers verwendet werden muss. Da das Wärmespeicherfluid in Polysun nur in geschlossenen Kreisläufen manuell geändert werden kann, muss im Tank ein Kreislauf erzeugt werden, indem eine Umwälzpumpe links am Tank angebracht wird. In der Simulation ist diese Pumpe jedoch ausgeschaltet. Die Grösse und Art der Wärmeübertrager im Tank sowie dessen Isolation wurde so gewählt, dass bei einem mit Wasser gefüllten Tank die erzeugten System-Resultate möglichst nahe an die eines Eisspeichers gleicher Grösse herankommen. Es wurden auf beiden Seiten des Tanks jeweils zwei Wärmeübertrager auf unterschiedlichen Niveaus eingesetzt, da diese Anordnung die besten Simulationsergebnisse erzeugt und so das ganze Volumen des Speichermediums ausgenutzt wird.

Zusätzlich wird im Paraffin-Speicher ein elektrischer Wärmeerzeuger eingesetzt, der anspringt, sobald die Temperatur im Speicher unter  $-10^{\circ}\text{C}$  sinkt, um möglichst unabhängig vom Speichervolumen immer eine genügend hohe Wärmequellentemperatur für die WP zu gewährleisten. Die Grenze wird durch die minimal zulässige Quelltemperatur der eingesetzten WP, die bei  $-10^{\circ}\text{C}$  liegt, bestimmt (Viessmann, 2020). Der elektrische Wärmeerzeuger wird jedoch nur tagsüber eingesetzt, um möglichst den produzierten PV-Strom zu nutzen.

Neben der Nutzung als Wärmequelle wird auch der Paraffin-Speicher zusätzlich als Wärmesenke für die passive und die aktive Kühlung des Gebäudes genutzt, wobei auch hier die Maximaltemperatur des Speichers auf  $60^{\circ}\text{C}$  gesetzt wird. Als Aufstellort des Speichers wird, wenn immer möglich das

Untergeschoss des Gebäudes gewählt, wobei bei erhöhtem Platzbedarf ebenfalls auf eine Aufstellung neben dem Gebäude ausgewichen werden kann.

Um den Aufwand durch die Grabung neben dem Gebäude mit dem eines Systems mit eTank vergleichbar zu halten, wird dieser bei der Dimensionierung des Paraffin-Speichers zur Erstellung der Dimensionierungsmatrizen (siehe Kapitel 6.4), ebenfalls mit einer Höhe (Grabungstiefe) von 2 Metern dimensioniert.

In Abbildung 14 ist das Paraffin-Speicher System inkl. Gebäude schematisch dargestellt, wobei der Paraffin-Speicher neben dem Gebäude ins Erdreich eingelassen ist. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die aktive Kühlung über die Wärmepumpe wird der Übersichtlichkeit halber im Schema weggelassen.

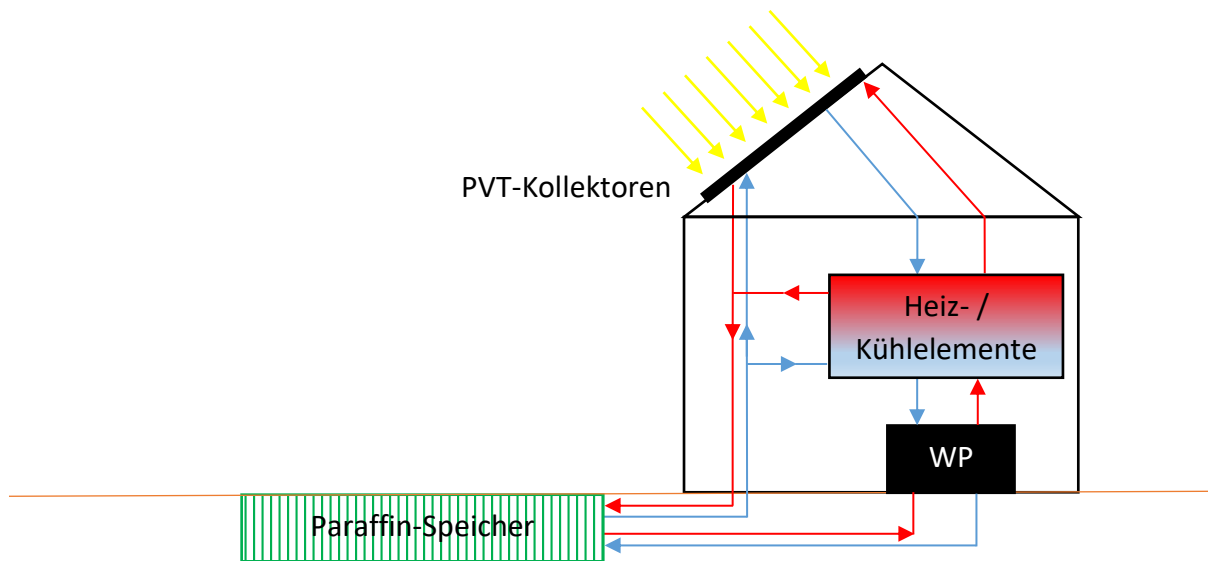


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Paraffin-Speicher Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und dem im Erdreich eingelassenen Paraffin-Speicher neben dem Gebäude als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung.

In Abbildung 15 ist der hydraulische Aufbau des Paraffin-Speicher Systems mit allen benötigten Komponenten inkl. den zwei separaten WPs für die Beheizung und die Kühlung dargestellt.

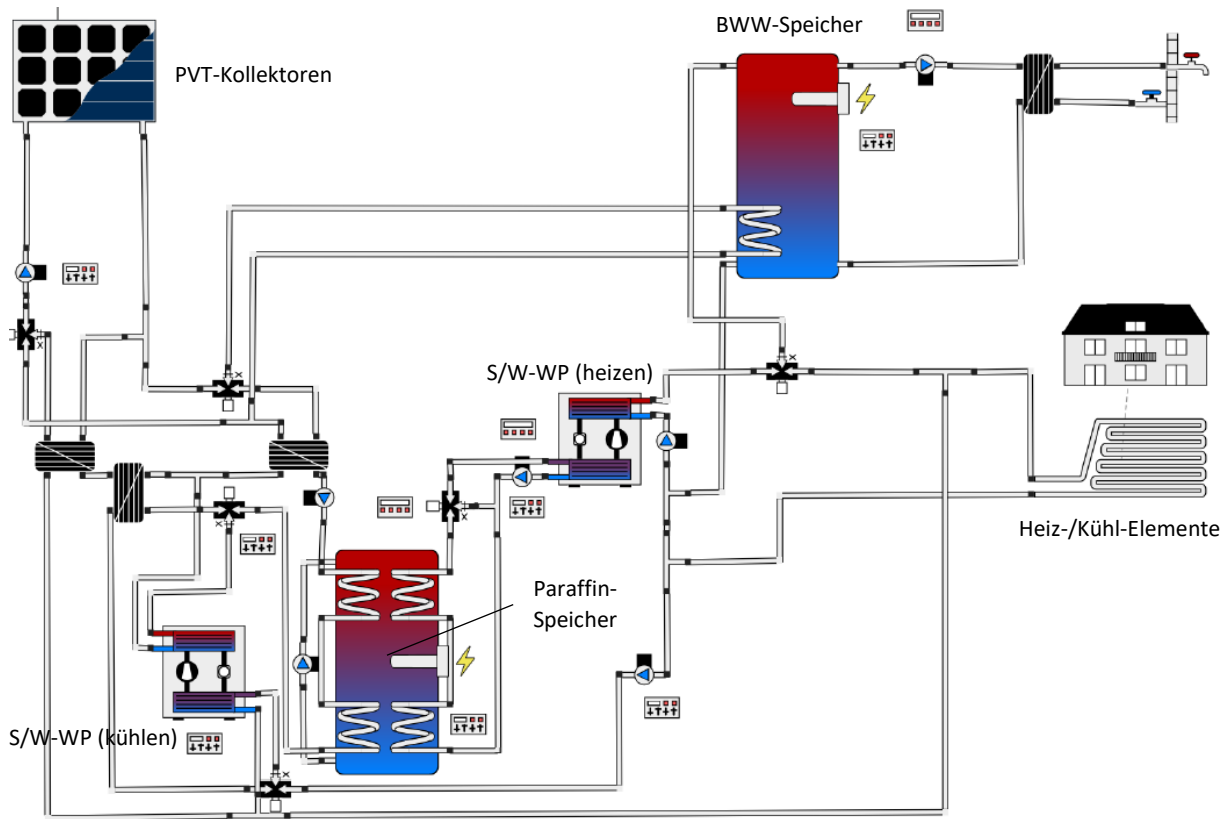


Abbildung 15: Hydraulischer Aufbau des Paraffin-Speicher Systems mit der Verwendung des Paraffin-Speichers als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung.

#### 5.4.1 Auswahl des Wärmespeichermediums

Die Auswahl des Wärmespeichermediums ist vor allem von der Wahl des Schmelzpunktes abhängig, wobei dieser so zu wählen ist, damit der Speicher durch die erzeugten Temperaturen der PVT-Kollektoren aufgeschmolzen werden kann. Die zu erwartenden durchschnittliche Kollektor-Austrittstemperaturen bei der mittleren solaren Einstrahlungskategorie ( $1'050 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ ) für verschiedene Zeitintervalle sind der

Tabelle 12 zu entnehmen. Dazu werden jeweils nur die Zeitabschnitte mit einbezogen, in denen der Solarkreislauf auch wirklich aktiv ist und auch Wärme aus den PVT-Kollektoren in den Speicher eingelagert werden soll. Zusätzlich wird auch die durchschnittliche Einspeichertemperatur angegeben, welche direkt am Eingang des Wärmespeichers herrscht, und somit auch durch die aktive und passive Kühlung beeinflusst wird. Auch hier werden jeweils nur die Zeitabschnitte mit einbezogen, in denen wirklich Wärme in den Speicher eingelagert wird.

Tabelle 12: Durchschnittliche Kollektor-Austrittstemperatur und Einspeichertemperatur vor dem Paraffin-Speicher für verschiedene Zeitintervalle.

Zeitintervall	Durchschnittliche Kollektor-Austrittstemperatur [°C]	Durchschnittliche Einspeichertemperatur [°C]
Ganzes Jahr	9.9	11.6
Mai bis September	30.4	33.5
Juni bis August	35.9	39.6
Oktober bis April	4.9	3.9

Es ist ersichtlich, dass die Einspeichertemperatur aufgrund der Kühlung jeweils oberhalb der Kollektor-Austrittstemperatur liegt (ausser in den Monaten Oktober bis April in denen nicht gekühlt wird). In den Sommermonaten Juni bis August ist mit Einspeichertemperaturen von bis zu 40°C und in den Monaten Oktober bis April mit Einspeichertemperaturen von lediglich 4 °C zu rechnen.

Als Wärmespeichermedium im Paraffin-Speicher werden geeignete Produkte der deutschen Firma Rubitherm Technologies GmbH gewählt, da diese gut dokumentiert und in grosser Auswahl verfügbar sind (Rubitherm, 2021). Ausserdem werden Produkte von Rubitherm in verschiedenen Studien zu Paraffinen als Wärmespeichermedium analysiert oder zitiert (Streicher, 2007) & (Morhart, 2008). Betrachtet werden die fünf Paraffine der RTHC-Serie, deren Schmelzpunkte im Bereich der erwartbaren Kollektor-Austrittstemperaturen (zwischen 5 und 35°C) liegen. Unter 5°C werden keine Produkte betrachtet, da deren Schmelzenthalpien in diesem Bereich stark abnehmen und da bei einem Schmelzpunkt um 0°C Wasser als PCM die geeignetere Lösung bietet. Bei den betrachteten Produkten handelt es sich um organische Hochleistungs-Paraffine, die aufgrund der gegenüber der klassischen RT-Serie höheren Schmelzenthalpie, vor allem bei begrenztem Speichervolumen eingesetzt werden (Rubitherm, 2021). Die Spezifikationen der fünf ausgewählten Produkte, sowie von Wasser zum Vergleich, sind der Tabelle 13 zu entnehmen.

Tabelle 13: Spezifikationen der 5 ausgewählten RTHC-Produkten von Rubitherm als Speichermedium im Paraffin-Speicher System im Vergleich zu Wasser als PCM.

	Wasser	RT5HC	RT18HC	RT25HC	RT28HC	RT35HC
Schmelzpunkt [°C]	0	5	18	25	28	35
Spez. Wärmekapazität flüssig [J/kg K]	4'183	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000
Spez. Wärmekapazität fest [J/kg K]	2'100	2'000	2'000	2'000	2'000	2'000
Schmelzenthalpie [kJ/kg]	333	250	260	230	250	240
Dichte fest [kg/m <sup>3</sup> ]	917	880	880	880	880	880
Dichte flüssig [kg/m <sup>3</sup> ]	997	760	770	770	770	770
Wärmeleitfähigkeit fest [W/m K]	2.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Wärmeleitfähigkeit flüssig [W/m K]	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Rubitherm gibt die spezifische Wärmekapazität ohne Unterscheidung zwischen flüssig und fest aus. Messungen des Österreichischen Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie zu verschiedenen Paraffin-Produkten bestätigen jedoch, dass sich die spezifische Wärmekapazität im festen und flüssigen Zustand nicht gross unterscheiden (Streicher, 2007). Es ist ersichtlich, dass alle betrachteten Paraffin-Produkte gegenüber Wasser eine kleinere Dichte, eine kleinere spezifische Wärmekapazität, sowie eine kleinere Schmelzenthalpie haben. Um das beste Produkt für die Simulationen auszuwählen, wurde die Performance der jeweiligen Paraffine in einem Test-System (siehe Abbildung 15) für das Gebäude «San. 20MWh» analysiert. Die Testresultate wie die SJAZ, der jährliche Netzbezug, sowie der jährliche gesamte Stromverbrauch sind in Tabelle 14 zu sehen. Die Resultate dienen jedoch lediglich dem Vergleich zwischen den Paraffinen und sind nicht mit denen der Dimensionierungsmatrizen (siehe Kapitel 6.4) zu vergleichen, da im Test-System andere Speichergrössen gewählt wurden.

Tabelle 14: Simulationsresultate (SJAZ, jährlicher Netzbezug und gesamter Stromverbrauch) für das Test-System mit 5 verschiedenen Paraffin-Produkten von Rubitherm als Wärmespeichermedium.

	RT5HC	RT18HC	RT25HC	RT28HC	RT35HC
SJAZ [-]	5.5	5.4	5.4	5.4	5.4
Netzbezug [kWh/a]	4'848	4'917	5'012	5'002	5'061
Gesamter Stromverbrauch [kWh/a]	5'954	5'980	6'057	6'095	6'176

Es ist ersichtlich, dass die verschiedenen Produkte ähnliche Simulationsergebnisse liefern. Das RT5HC mit dem Schmelzpunkt bei 5°C erzeugt jedoch mit einer um 2 % höheren SJAZ leicht bessere Ergebnisse als die restlichen Produkte. Um den alleinigen Einfluss der Schmelztemperatur zu erkennen, wird diese in einem nächsten Schritt bei sonst gleichbleibenden Spezifikationen des Paraffins variiert. In Tabelle 15 sind die Testresultate für die verschiedenen Schmelztemperaturen einzusehen.

*Tabelle 15: Simulationsergebnisse (SJAZ, jährlicher Netzbezug und gesamter Stromverbrauch) für das Test-System mit Paraffin-Produkten mit verschiedenen Schmelztemperaturen und sonst gleichbleibenden Spezifikationen als Wärmespeichermedium.*

Schmelzpunkt [°C]	5	10	15	20	25	30	35
SJAZ [-]	5.5	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Netzbezug [kWh/a]	4'848	4'892	4'939	4'953	4'990	5'042	5'020
Gesamter Stromverbrauch [kWh/a]	5'954	5'961	5'959	5'987	6'053	6'117	6'207

Auch hier ist ersichtlich, dass mit einer Schmelztemperatur von 5°C die besten Systemresultate erzielt werden. Gegenüber einer Schmelztemperatur von 10°C, liegt die SJAZ um 2 % höher, der jährliche Netzbezug um 0.9 % tiefer. Ein Grund für den geringen Einfluss des Schmelzpunktes auf die Systemresultate könnte darin liegen, dass die Einspeichertemperatur direkt am Eingang des Wärmespeichers im Jahresverlauf den ganzen Bereich bis 65°C abdeckt und somit der Speicher bei jedem der untersuchten Schmelzpunkte im Jahresverlauf aufgeschmolzen wird. Der Phasenübergang wird also bei jedem Schmelzpunkt genutzt, jedoch bei tieferen Schmelzpunkten öfters. Weitere Gründe für den geringen Einfluss des Schmelzpunktes konnten in dieser Arbeit keine gefunden werden.

Da die gespeicherte Wärmeenergie vor allem im Winterhalbjahr knapp ist, ist es sinnvoll sicherzustellen, dass während dieser Zeit möglichst viel der verfügbaren Sonnenenergie in Form von Wärme auch gespeichert werden kann. Mit der Wahl des **RT5HC** als Wärmespeichermedium im Paraffin-Speicher werden einerseits die besten Systemresultate erzielt und zusätzlich liegt die Schmelztemperatur im Bereich der durchschnittlichen Einspeichertemperatur im Winterhalbjahr (siehe Tabelle 12).

Auffallend ist, dass ein Schmelzpunkt nahe bei 0°C die besten Resultate liefert. Auch das Projekt LEWASEF des BFE bestätigt, dass bei erdvergrabenen Latentwärmespeichern als Wärmequelle für eine Wärmepumpe ein Schmelzpunkt von 0°C die beste Systemeffizienz erzielt, weshalb Wasser als bevorzugtes Speicherfluid gewählt werden soll (Dott, et al., 2019). Der Grund für die höhere Effizienz liegt laut dem Projektbericht darin, dass ein geänderter Schmelzpunkt auch sehr stark die Wärmegewinne aus dem Erdreich beeinflusst. Ein höherer Schmelzpunkt des Speichermediums führt zu einer geringeren Temperaturdifferenz zum Erdreich und damit zu geringeren Wärmegewinnen. Bei gleichem Wärmeentzug wird dadurch die Kapazität des PCM schneller ausgeschöpft wobei es schneller vollständiger erstarrt. Sobald dies passiert, sinkt die Temperatur der Wärmequelle schnell unter die Phasenwechseltemperatur und häufig auch unter die Einsatzgrenze der Wärmepumpe (Dott, et al., 2019).

## 5.5 Paraffin-Speicher + eTank System

Das Paraffin-Speicher + eTank System kombiniert den eTank mit einem zusätzlichen Paraffin-Speicher. Der Vorteil gegenüber einem System ohne Paraffin-Speicher wird darin gesehen, dass die Speicherkapazität in einem bestimmten Temperaturbereich erhöht und somit der Platzbedarf des eTanks verringert werden kann. Um zwei separate Grabungen neben dem Gebäude zu umgehen, wird der Paraffin-Speicher in diesem System jeweils im Untergeschoss des Gebäudes platziert, wodurch sein Volumen begrenzt ist (siehe Tabelle 8). Dieses beträgt für das Gebäude «San. 20MWh»  $7 \text{ m}^3$ , für das Gebäude «San. 35MWh»  $12 \text{ m}^3$  und für das Gebäude «San. 75MWh»  $24 \text{ m}^3$ . Für die drei Neubauten werden aufgrund des kleineren Heizwärmebedarfs die Grenzen bei  $4 \text{ m}^3$ ,  $8 \text{ m}^3$  und  $16 \text{ m}^3$  gesetzt, da dies dem verfügbaren Volumen ohne Aufschlag von 50 % (Umgestaltung und Ausbaumöglichkeiten der Kellerräume) entspricht. Durch dieses geringere Volumen wird in der Realität auch die Einbringung eines solchen Speichers vereinfacht. Es werden nachfolgend drei verschiedene Möglichkeiten für die Kombination eines eTanks und eines Paraffin-Speichers betrachtet.

In Abbildung 16 ist das Paraffin-Speicher + eTank System inkl. Gebäude schematisch dargestellt. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Die aktive Kühlung über die Wärmepumpe wird der Übersichtlichkeit halber im Schema weggelassen.

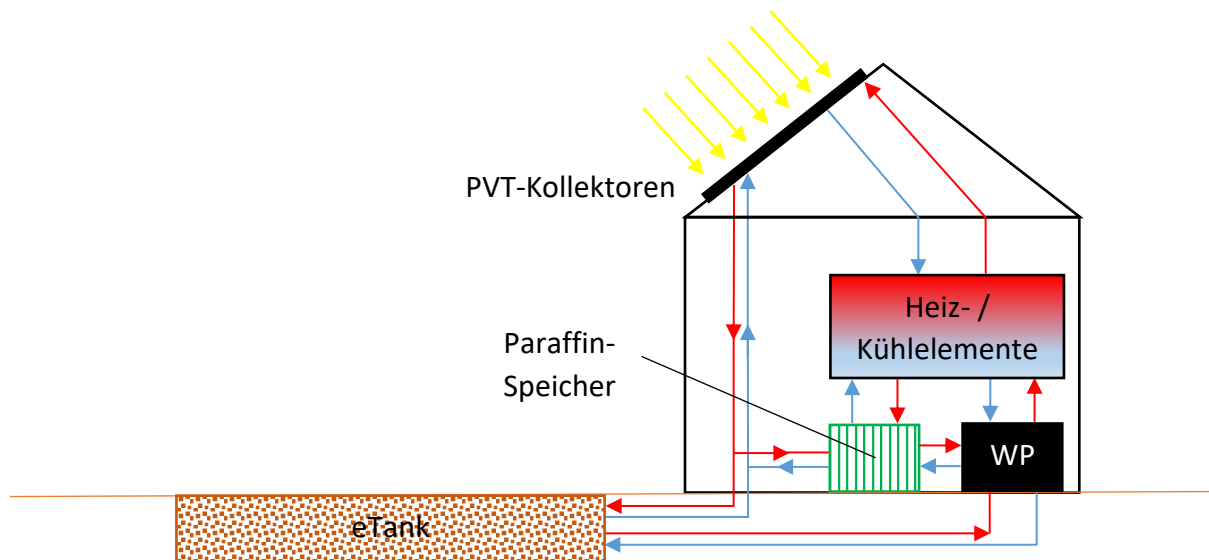


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Paraffin-Speicher + eTank Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und dem eTank neben dem Gebäude bzw. dem Paraffin-Speicher im Untergeschoss des Gebäudes als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmesenke für die passive Kühlung.

### 5.5.1 Variante «Speicherkapazität im Winter erhöhen»

In der ersten Variante wird der Paraffin-Speicher zusätzlich zum eTank als Wärmespeicher bzw. sekundäre Wärmequelle für die WP verwendet. Abhängig von der Kollektor-Austrittstemperatur wird, wenn immer möglich der Paraffin-Speicher durch die PVT-Kollektoren erwärmt. Sobald dieser komplett durchgeschmolzen ist, wird die Wärme nur noch in den eTank eingespeist. Als Paraffin wird das Produkt RT5HC mit einem **Schmelzpunkt von  $5^\circ\text{C}$**  genutzt, da dies in einem geeigneten Temperaturbereich für die Wärmespeicherung im Winterhalbjahr liegt (siehe Kapitel 5.4.1).

Der eTank wird so lange als alleinige Wärmequelle für die WP genutzt, bis dessen Temperatur unter die des Paraffin-Speichers fällt. Ab diesem Punkt werden die beiden Wärmespeicher seriell geschaltet und als Wärmequelle genutzt. Somit kann im Vergleich zu einem parallelen Wärmebezug aus den beiden Wärmespeichern die Komplexität des hydraulischen Aufbaus in Polysun stark vereinfacht

werden. Ein System mit parallel geschalteten Wärmespeichern wurde in dieser Arbeit nicht realisiert. Da nur Wärme aus dem Paraffin-Speicher entzogen wird, sobald die Temperatur im eTank unter diejenige im Paraffin-Speicher fällt, sinkt auch die Temperatur des Paraffin-Speichers nie unter die Minimaltemperatur des eTanks. Im Sommer wird der Paraffin-Speicher zusätzlich als Wärmesenke für die passive Kühlung des Gebäudes genutzt. Um die Temperatur im Paraffin-Speicher möglichst tief und die passive Kühlung dadurch möglichst effizient zu halten, wird dieser im Sommer als alleinige Wärmequelle für die WP zur BWW-Erwärmung genutzt. Als Wärmesenke für die aktive Kühlung dient bei dieser Variante der eTank.

In Abbildung 17 ist der hydraulische Aufbau des Paraffin-Speicher + eTank Systems mit der Variante «Speicherkapazität im Winter erhöhen» dargestellt.

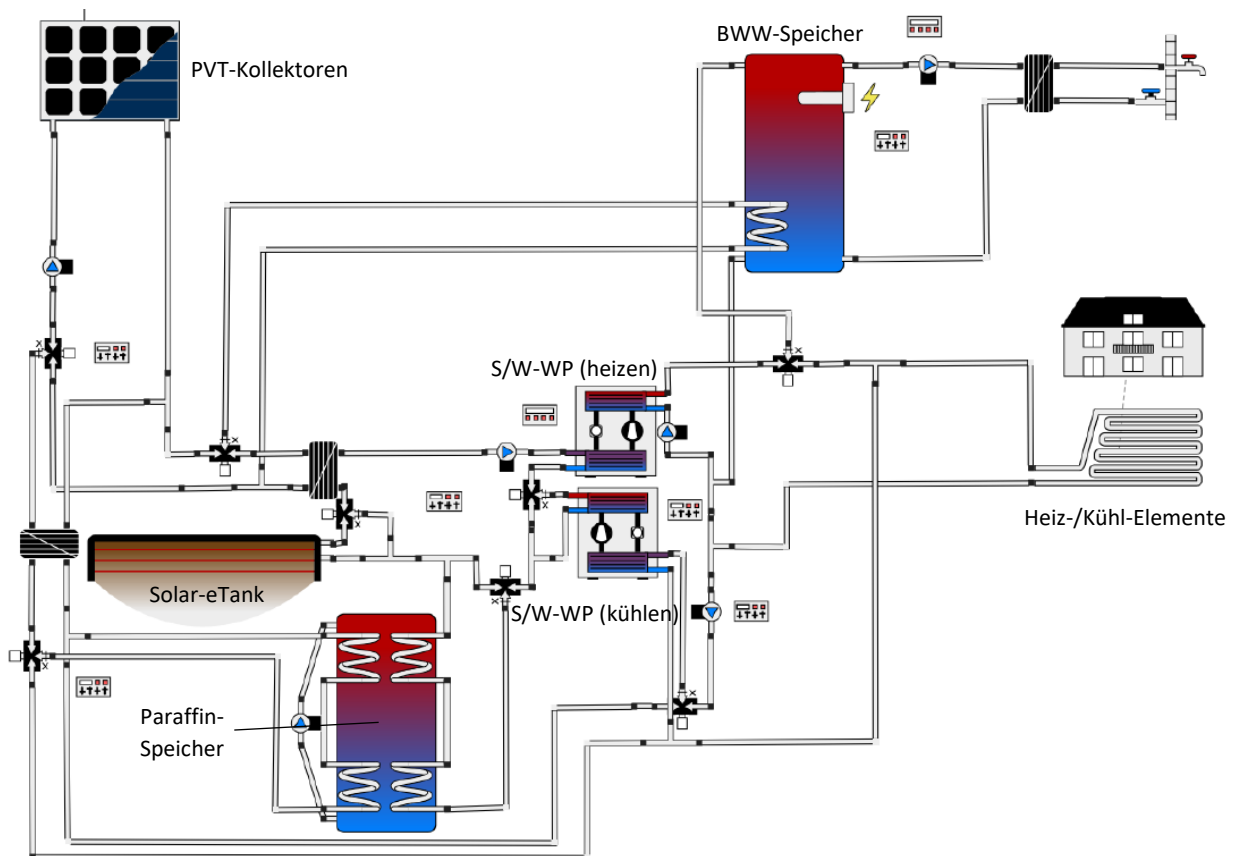


Abbildung 17: Hydraulischer Aufbau des Paraffin-Speicher + eTank Systems (Variante «Speicherkapazität im Winter erhöhen») mit der Verwendung des eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als primäre Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive Kühlung über die WP. Der Paraffin-Speicher wird neben den PVT-Kollektoren als Wärmesenke für die passive Kühlung sowie als sekundäre Wärmequelle für die S/W-WP verwendet und kann ebenfalls über die PVT-Kollektoren geladen werden.

### 5.5.2 Variante «Speicherkapazität bei passiver Kühlung erhöhen»

In der zweiten Variante wird der Paraffin-Speicher als Wärmesenke für die passive Kühlung des Gebäudes, sowie als sekundäre Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet. Er wird also nur im Sommer erwärmt und nicht zusätzlich über die PVT-Kollektoren geladen. Bei anfallendem Wärmebedarf wird der Paraffin-Speicher jedoch auch in dieser Variante dem eTank seriell als sekundäre Wärmequelle für die WP zugeschaltet, sobald die Temperatur im eTank unter diejenige des Paraffin-Speichers fällt. Ausserdem wird auch hier der Paraffin-Speicher im Sommer als alleinige Wärmequelle für die WP genutzt, um die passive Kühlung möglichst effizient zu halten. Die durchschnittliche Einspeichertemperatur in den Paraffin-Speicher während den Kühlmonaten (Juni, Juli und August) beträgt bei diesem System 21.6°C, weshalb hier das RT18HC mit einem



**Schmelzpunkt von 18°C** als Wärmespeichermedium eingesetzt wird. Der hydraulische Aufbau dieser Variante entspricht dem in Abbildung 17 dargestellten.

### 5.5.3 Variante «Speicherkapazität bei aktiver Kühlung erhöhen»

In der dritten Variante wird eine Erhöhung der Speicherkapazität während der aktiven Kühlung angestrebt. Dabei wird der Paraffin-Speicher als Wärmesenke für die passive sowie die aktive Kühlung des Gebäudes und als sekundäre Wärmequelle für die WP genutzt. Auch bei dieser Variante wird der Paraffin-Speicher im Sommer als alleinige Wärmequelle für die WP zur BWW-Erwärmung genutzt. Die durchschnittliche Einspeichertemperatur in den Paraffin-Speicher während der aktiven Kühlung in den Kühlmonaten (Juni, Juli und August) beträgt bei diesem System 38.8°C, weshalb hier das RT35HC mit einem **Schmelzpunkt von 35°C** als Wärmespeichermedium eingesetzt wird. Um den Paraffin-Speicher nicht zu überhitzen und die aktive Kühlung möglichst lange betreiben zu können, wird sobald der Paraffin-Speicher komplett aufgeschmolzen ist, Wärme daraus über den Primärkreislauf der WP in den eTank abgegeben.

In Abbildung 18 ist der hydraulische Aufbau des Paraffin-Speicher + eTank Systems mit der Variante «Speicherkapazität bei aktiver Kühlung erhöhen» dargestellt.

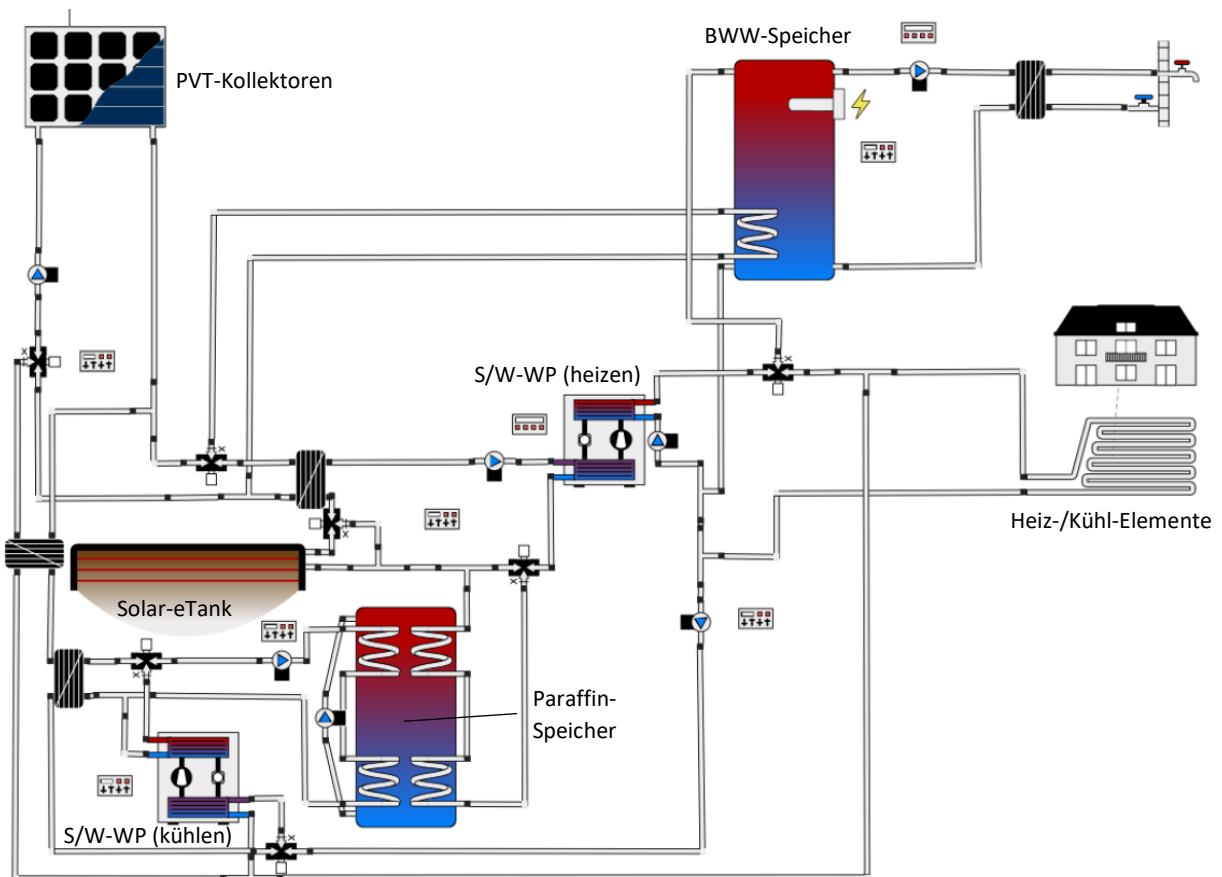


Abbildung 18: Hydraulischer Aufbau des Paraffin-Speicher + eTank Systems (Variante «Speicherkapazität bei aktiver Kühlung erhöhen») mit der Verwendung des eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren sowie als primäre Wärmequelle für die S/W-WP. Der Paraffin-Speicher wird neben den PVT-Kollektoren als Wärmesenke für die passive Kühlung, als Wärmesenke für die aktive Kühlung über die WP sowie als sekundäre Wärmequelle für die S/W-WP verwendet.

#### 5.5.4 Auswahl der Variante

Von den drei vorgestellten Varianten wird diejenige, die die besten Systemresultate erzielt für die weiterführenden Simulationen ausgewählt. Dazu werden die drei Varianten in einem Test-System für das Gebäude «San. 20MWh» in Zürich bei einer südlichen Ausrichtung der PVT-Kollektoren simuliert und die Resultate verglichen. In

Tabelle 16 sind die Simulationsresultate wie die SJAZ, der jährliche Netzbezug an elektrischer Energie und der jährliche gesamte Stromverbrauch der drei betrachteten Varianten einzusehen.

*Tabelle 16: Vergleich der drei betrachteten Paraffin-Speicher + eTank Systemvarianten anhand der SJAZ, des jährlichen Netzbezuges an elektrischer Energie und dem jährlichen gesamten Stromverbrauch.*

Variante	Speicherkapazität Winter	Speicherkapazität passive Kühlung	Speicherkapazität aktive Kühlung
SJAZ [-]	6.3	6.3	6.0
Netzbezug [kWh/a]	4'711	4'757	4'731
Gesamter Stromverbrauch [kWh/a]	5'903	5'928	6'092

Die Variante «Speicherkapazität im Winter erhöhen» erzielt die besten Ergebnisse und wird deshalb für die Erstellung der Dimensionierungsmatrix des Paraffin-Speicher + eTank Systems verwendet. Der Netzbezug und der gesamte Stromverbrauch sind jedoch nur minimal geringer als bei den beiden anderen Varianten. Gegenüber der Variante «Speicherkapazität bei aktiver Kühlung erhöhen» liegt die SJAZ jedoch um 5 % höher. Ein Grund dafür liegt in der tieferen Temperatur der Wärmesenke für die aktive Kühlung bei der Verwendung des eTanks anstelle des Paraffin-Speichers als Wärmesenke, und dem somit kleineren Temperaturhub und höherer Effizienz der WP.

## 6 Resultate

Um die Dimensionierungsmatrizen zu erstellen, werden die 5 ausgewählten Systeme (siehe Kapitel 5) für alle 6 verschiedenen Gebäudetypen (siehe Kapitel 3.3.2) und je 2 solare Einstrahlungskategorien in Polysun simuliert. Die Resultate der mittleren solaren Einstrahlungskategorie ( $1'050 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ ) werden interpoliert. Für die Sanierungsgebäude werden die Simulationen jeweils für Fussbodenheizungen und Radiatorheizungen separat durchgeführt.

Die Anzahl PVT-Kollektoren wird jeweils in 5-er Schritten, das eTank-Volumen in  $10 \text{ m}^3$ -Schritten, das Volumen des Paraffin-Speichers in  $2.5 \text{ m}^3$ -Schritten und die Eisspeichergrosse bis zu einem Volumen von  $20 \text{ m}^3$  in  $2 \text{ m}^3$ -Schritten und bei grösseren Volumen in  $5 \text{ m}^3$ -Schritten variiert. Durch eine modulare Bauweise sind zumindest Eisspeicher jedoch theoretisch in jeder Grösse erhältlich (BMS, 2012).

Da, wie in Kapitel 3.4.2.2 erwähnt, das Speichervolumen bzw. die Speicherfläche im Vergleich zur Anzahl PVT-Kollektoren einen grösseren Einfluss auf die Eignung eines Systems hat, wird im Falle einer zu niedrigen SJAZ oder einer Nichtdeckung des Heizwärmebedarfs immer zuerst die Anzahl PVT-Kollektoren bei minimalem Speichervolumen variiert und maximiert, bevor auch tatsächlich das Speichervolumen erhöht wird. Dies führt dazu, dass in den Dimensionierungsmatrizen oft die maximale Anzahl an PVT-Kollektoren gewählt wird. Bei gewissen Systemen kann es zudem vorkommen, dass bei der kleinsten solaren Einstrahlungskategorie eine höhere SJAZ erreicht wird als mit der grössten solaren Einstrahlungskategorie. Der Grund dafür liegt darin, dass die Komponenten (Speicher und PVT-Kollektoren) nicht stufenlos, sondern in definierten Schritten vergrössert bzw. verkleinert werden. Wenn zum Beispiel bei einem eTank-System in der grössten solaren Einstrahlungskategorie ein kleinerer eTank als bei der kleinsten Einstrahlungskategorie möglich ist, wird dieser direkt in  $10 \text{ m}^3$ -Schritten reduziert, was auch mit einer Reduktion der SJAZ einhergeht. Diese Reduktion der SJAZ kann gegebenenfalls grösser sein als die Vergrösserung der SJAZ aufgrund der grösseren solaren Einstrahlung. Ausserdem verändert sich mit der Anpassung der Speichergrosse nicht nur das Speichervolumen, sondern auch die Wärmeübertragerfläche, was auch die Änderung der SJAZ zusätzlich verstärkt.

Die Einfärbung der Matrixeinträge hat jeweils folgende Bedeutung:

- Grün: «sehr gute Eignung»
- Gelb: «gute Eignung»
- Orange: «genügende Eignung»
- Rot: «bedingte Eignung»
- Grau: «keine Eignung»

Falls ein System für eine Kombination der Dimensionierungskategorien das Label «keine Eignung» erhält, wird der Grund dafür jeweils im entsprechenden Feld der Matrix genannt.

## 6.1 eTank System

Die Dimensionierungsmatrizen für das eTank System in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen sind in Abbildung 19 zu sehen. Für jede Kombination aus Heizwärmebedarf und Einstrahlungskategorie ist jeweils die benötigte Anzahl PVT-Kollektoren, die benötigte eTank-Fläche sowie die damit erreichte SJAZ angegeben. Die Rahmenbedingungen für die Dimensionierung des eTanks (minimale und maximale Grösse, Minimaltemperatur, Rohrlänge des Wärmeübertragers) sind in Kapitel 5.1 zu finden.

<b>eTank System (Sanierungsgebäude - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	6.0	6.0	5.8
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	80	80	70
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	5.1	5.1	5.2
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130	130	130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.8	4.8	4.9
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130	130	130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
<b>eTank System (Neubauten - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
13 (Neu. 13MWh)	SJAZ [-]	5.8	5.8	5.8
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	60	60	60
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	30	25	15
23 (Neu. 23MWh)	SJAZ [-]	5.7	5.6	5.5
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130	120	100
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
50 (Neu. 50MWh)	SJAZ [-]	6.7	6.7	6.5
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	350	320	280
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 19: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das eTank System (siehe Abbildung 8) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.

Das eTank System erhält für die Sanierungsgebäude der kleinsten Heizwärmebedarfskategorie das Label «genügende Eignung» bei maximaler Anzahl PVT-Kollektoren und eTank-Flächen von 70 bis 80 m<sup>2</sup>. Je nach solarer Einstrahlung werden dabei SJAZ von 5.8 bis 6.0 erreicht. Für die beiden grösseren Gebäude (35 und 75 MWh) wird der eTank auch bei maximaler Grösse unter die erlaubte Minimaltemperatur von 1°C abgekühlt, bzw. wird der Heizwärmebedarf nicht gedeckt, weshalb sich das eTank System für diese Gebäude nicht eignet obwohl die erreichte SJAZ oberhalb der Mindest-SJAZ von 4.4 liegt.

Für die Neubauten erhält das eTank System in allen Heizwärmebedarfskategorien eine gute bis sehr gute Eignung. In der kleinsten Heizwärmebedarfskategorie kann im Vergleich zu den Sanierungsgebäuden zusätzlich zur Minimierung der eTank-Fläche um 10 bis 20 m<sup>2</sup> auch die Anzahl PVT-Kollektoren reduziert werden, wobei immer noch eine SJAZ von 5.8 erreicht wird. Beim Gebäude «Neu. 50MWh» fällt auf, dass der eTank stark vergrössert werden musste, damit er im Winter nicht unter die Minimaltemperatur abgekühlt wird. Ein Grund dafür könnte sein, dass im Sommer aufgrund der kompakteren Bauweise bei einem «Neu. 50MWh» Gebäude weniger gekühlt werden muss und so neben der Wärme aus den PVT-Kollektoren weniger Wärme durch die aktive und

passive Kühlung im eTank gespeichert wird. Dies ist vor allem in der Laufzeit der aktiven Kühlung zu sehen, die bei einem «Neu. 23MWh» Gebäude 460 h und bei einem «Neu. 50MWh» Gebäude noch 35 h beträgt. Auch die durchschnittliche Raumtemperatur liegt während dem Sommer im «Neu. 50MWh» Gebäude ca. 1°C unter der im «Neu. 23MWh» Gebäude. Durch den resultierenden, geringeren Stromverbrauch zur Kühlung ist auch die grössere SJAZ des «Neu. 50MWh» Gebäudes zu erklären. Ein anderer Grund für die starke Vergrösserung des eTanks liegt in der nicht proportional zum Heizwärmebedarf zunehmenden Dachfläche. Während der Heizwärmebedarf bei Gebäude «Neu. 50MWh» mehr als das Doppelte des Gebäudes «Neu. 23MWh» beträgt, nimmt die maximale Anzahl PVT-Kollektoren nur um ca. 40 % zu. Dieses Defizit wird mit dem grösseren eTank wett gemacht.

Bei allen Neubauten findet die benötigte eTank-Fläche unter dem Gebäude Platz, wodurch keine Grabungen neben den Gebäuden nötig sind. Der Grund wieso das System in einem Sanierungsgebäude mit einem Heizwärmebedarf von 20 MWh «orange» und in einem Neubau mit einem Heizwärmebedarf von 23 MWh «gelb» eingefärbt wird obwohl im Neubau der Komponentenaufwand (Anzahl PVT-Kollektoren und eTank-Fläche) grösser ist, liegt in der unterschiedlichen Gewichtung des Komponentenaufwands in Sanierungsgebäuden und Neubauten (siehe Kapitel 3.4.2.2). Diese Problematik der Punktevergabe wird in der Diskussion in Kapitel 8.5 besprochen.

Die Dimensionierungsmatrix für das eTank System in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen ist in Abbildung 20 zu sehen.

eTank System (Sanierungsgebäude - Radiatorheizung)				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	5.1	5.1	5.0
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	80	80	70
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.4
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130	130	130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.2	4.2	4.3
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130	130	130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 20: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das eTank System (siehe Abbildung 8) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.

Auch beim Einsatz von Radiatorheizungen erhält das eTank System nur für die kleinste Heizwärmebedarfskategorie das Label «genügende Eignung», wobei mit maximaler Anzahl PVT-Kollektoren und eTank-Flächen von 70 bis 80 m<sup>2</sup> SJAZ von 5.0 bis 5.1 erreicht werden. Im Vergleich zu Gebäuden mit Fussbodenheizungen liegen die bei gleichem Komponentenaufwand erzielten SJAZ bei Radiatorheizungen ca. 12 bis 15 % tiefer. Für die Gebäude «San. 35MWh» und «San. 75MWh» wird entweder die Minimaltemperatur des eTanks unterschritten oder die Mindest-SJAZ bei maximalem Komponentenaufwand nicht erreicht, weshalb sich das eTank System dort nicht eignet.

## 6.2 2-eTank System

In Abbildung 21 sind die Dimensionierungsmatrizen für das 2-eTank System in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen abgebildet. In der tiefgestellten Klammer ist jeweils die Aufteilung der gesamten eTank-Fläche in Solar-eTank (S) und Kühl-eTank (K) einzusehen.

<b>2-eTank System (Sanierungsgebäude - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	5.3	5.3	5.3
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	60 (S20 K40)	60 (S20 K40)	60 (S20 K40)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	30	25
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	5.3	5.2	5.2
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130 (S40 K90)	130 (S40 K80)	120 (S40 K80)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.8	4.8	4.9
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130 (S40 K90)	130 (S40 K90)	130 (S40 K90)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
<b>2-eTank System (Neubauten - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
13 (Neu. 13MWh)	SJAZ [-]	4.8	4.8	4.9
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	60 (S20 K40)	60 (S20 K40)	60 (S20 K40)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	5	5	5
23 (Neu. 23MWh)	SJAZ [-]	4.6	4.6	4.6
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	80 (S30 K50)	80 (S30 K50)	80 (S30 K50)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	30	25
50 (Neu. 50MWh)	SJAZ [-]	6.2	6.2	6.1
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	270 (S110 K160)	250 (S100 K150)	220 (S80 K140)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 21: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das 2-eTank System (siehe Abbildung 10) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.

Für ein «San. 20MWh» Gebäude erhält das 2-eTank System das Label «gute Eignung» bei minimaler eTank Fläche und einer SJAZ von 5.3. Je nach solarer Einstrahlung ist es möglich die Anzahl PVT-Kollektoren von 35 auf 25 zu reduzieren. Der eTank wird dabei in 20 m<sup>2</sup> Solar-eTank und 40 m<sup>2</sup> Kühl-eTank aufgeteilt. Für ein «San. 35MWh» Gebäude erhält das System je nach solarer Einstrahlungskategorie das Label «genügende Eignung» bis «bedingte Eignung». Bei der grössten Heizwärmebedarfskategorie eignet sich dieses System jedoch nicht mehr, da der Heizwärmebedarf bei maximalem Komponentenaufwand nicht gedeckt werden kann.

Bei Neubauten ist das 2-eTank System für alle Gebäude gut bis sehr gut geeignet. Die Anzahl verbauter PVT-Kollektoren kann bei dem «Neu. 13MWh» Gebäude aufgrund des geringen Heizwärmebedarfs und der im Sommer gespeicherten Abwärme bei minimaler eTank-Fläche auf 5 reduziert werden wobei immer noch eine SJAZ von 4.8 erreicht wird. Auch bei einem «Neu. 23MWh» Gebäude wird nur rund die Hälfte der möglichen PVT-Kollektoren benötigt wobei immer noch eine SJAZ von 4.6 erreicht wird. Diese Reduktion der PVT-Kollektoren in Neubauten ist auch der Grund für die im Vergleich zu Sanierungsgebäuden kleineren SJAZ bei gleicher Gebäudegrösse.

Bei einem «Neu. 50MWh» Gebäude ist im Gegensatz zu einem «Neu. 23MWh» Gebäude auch hier ein deutlicher Anstieg der benötigten eTank-Fläche und der erreichten SJAZ zu sehen, was wie in Kapitel 6.1 beschrieben auf die geringere Gebäudekühlung zurückzuführen ist. Bei allen Neubauten finden die beiden eTanks jeweils unter dem Gebäude Platz.

Die Dimensionierungsmatrix für das 2-eTank System in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen ist in Abbildung 22 zu sehen.

<b>2-eTank System (Sanierungsgebäude - Radiatorheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	4.8	4.6	4.6
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	70 (S20 K50)	60 (S20 K40)	60 (S20 K40)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	30	25
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.4
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130 (S40 K90)	130 (S40 K90)	130 (S40 K90)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.2	4.2	4.3
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130 (S40 K90)	130 (S40 K90)	130 (S40 K90)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 22: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das 2-eTank System (siehe Abbildung 10) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.

Im Falle von «San. 20MWh» Gebäuden mit Radiatorheizungen eignet sich das 2-eTank System genügend bis gut, wobei im Vergleich zu Gebäuden mit Fussbodenheizungen um 10 bis 13 % tiefere SJAZ erreicht werden. Bei «San. 35MWh» Gebäuden erhält das System bei höherer solarer Einstrahlung das Label «bedingte Eignung» bei maximalem Komponentenaufwand und knappem Erreichen der Mindest-SJAZ von 4.4. Für grössere «San. 75MWh» Gebäude mit Radiatorheizungen eignet sich dieses System bei den festgelegten Rahmenbedingungen nicht.

### 6.3 Eisspeicher System

In Abbildung 23 sind die Dimensionierungsmatrizen für das Eisspeicher System in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen abgebildet. Die Rahmenbedingungen für die Dimensionierung des Eisspeichers (Einbautiefe, Minimal- und Maximaltemperatur, Rohrlänge der Wärmeübertrager) sind in Kapitel 5.3 zu finden.

<b>Eisspeicher System (Sanierungsgebäude - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	5.2	5.1	5.1
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	20	18	16
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.9	4.9	4.9
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	35	35	30
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.9	4.9	5.0
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	110	100	90
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
<b>Eisspeicher System (Neubauten - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
13 (Neu. 13MWh)	SJAZ [-]	5.1	5.0	5.0
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	14	12	12
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
23 (Neu. 23MWh)	SJAZ [-]	5.0	5.0	4.8
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	25	25	20
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
50 (Neu. 50MWh)	SJAZ [-]	5.0	5.0	5.0
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	65	60	50
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 23: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das Eisspeicher System (siehe Abbildung 12) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.

Das Eisspeicher System eignet sich für alle betrachteten Sanierungsgebäude genügend bis gut mit erreichten SJAZ von 4.9 bis 5.2. Es wird jeweils die maximale Anzahl an PVT-Kollektoren bei Speichervolumen zwischen 16 und 110 m<sup>3</sup> eingesetzt. Die benötigten Speichervolumen übersteigen jedoch in allen Fällen das verfügbare Volumen im Untergeschoss der Gebäude, weshalb die Eisspeicher jeweils neben den Gebäuden aufgestellt werden müssen. Auch bei den Neubauten erzielt das Eisspeicher System in jeder Kategorie eine gute Eignung. Gegenüber den Sanierungsgebäuden werden um 30 – 40 % kleinere Speichervolumen zur Erreichung gleicher SJAZ benötigt. Auch hier übersteigen jedoch in allen Fällen die benötigten Speichervolumen das verfügbare Volumen im Untergeschoss der Gebäude.

Die Dimensionierungsmatrix für das Eisspeicher System in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen ist in Abbildung 24 zu sehen.



<b>Eisspeicher System (Sanierungsgebäude - Radiatorheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	4.6	4.5	4.5
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	20	18	16
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.4
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	45	45	40
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.5	4.5	4.5
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	110	100	90
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 24: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das Eisspeicher System (siehe Abbildung 12) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.

Für Sanierungsgebäude mit Radiatorheizungen werden im Vergleich zu Gebäuden mit Fussbodenheizungen bei gleichem oder minimal höherem Komponentenaufwand um 8 bis 12 % tiefere SJAZ erreicht, wobei diese knapp die Mindest-SJAZ übersteigen.

#### 6.4 Paraffin-Speicher System

In Abbildung 25 sind die Dimensionierungsmatrizen für das Paraffin-Speicher System in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen abgebildet. Die Rahmenbedingungen für die Dimensionierung des Paraffin-Speichers (Höhe, Minimal- und Maximaltemperatur, Dimensionierung der Wärmeübertrager) sind in Kapitel 5.4 zu finden.

<b>Paraffin-Speicher System (Sanierungsgebäude - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	4.9	5.0	5.1
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	40	40	35
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.7	4.8	4.9
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	75	70	65
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.4
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	190	170	150
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
<b>Paraffin-Speicher System (Neubauten - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
13 (Neu. 13MWh)	SJAZ [-]	4.9	5.1	5.3
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	30	25	20
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
23 (Neu. 23MWh)	SJAZ [-]	4.7	4.8	5.0
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	45	40	35
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
50 (Neu. 50MWh)	SJAZ [-]	4.5	4.6	4.7
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	110	100	90
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 25: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher System (siehe Abbildung 14) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.

Das Paraffin-Speicher System erhält für den Einsatz in «San. 20MWh» Gebäuden je nach solarer Einstrahlung eine genügende bis gute Eignung, wobei mit Paraffin-Volumen von 35 bis 40 m<sup>3</sup> SJAZ von 4.9 bis 5.1 erreicht werden. Für «San. 35MWh» Gebäude werden mit Paraffin-Volumen von 65 bis 75 m<sup>3</sup> noch SJAZ von 4.7 bis 4.9 erreicht. Bei der grössten Heizwärmebedarfskategorie ist ein starker Anstieg des benötigten Paraffin-Volumens auf 150 bis 190 m<sup>3</sup> zu beobachten, wobei die Mindest-SJAZ knapp erreicht wird und sich das System bezüglich des Komponentenaufwands nur noch bedingt eignet. Eine Diskussion bezüglich der Kosten eines solchen Paraffin-Speichers ist in Kapitel 8.1.3 zu finden.

In Neubauten kann die Grösse des Paraffin-Speichers bei ungefähr gleichbleibender SJAZ jeweils um ca. 40 % reduziert werden. Für die kleinste Heizwärmebedarfskategorie wird eine gute Eignung und für die beiden grösseren Heizwärmebedarfskategorien eine genügende Eignung erzielt.

Die Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher System in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen ist in Abbildung 26 zu sehen.

<b>Paraffin-Speicher System (Sanierungsgebäude - Radiatorheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.5	4.6
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	45	42.5	37.5
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.4
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	140	120	90
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.4
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	260	230	200
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 26: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher System (siehe Abbildung 14) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.

In Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen müssen die benötigten Paraffin-Volumen im Vergleich zu Fussbodenheizungen um bis zu 70 % erhöht werden, damit die Mindest-SJAZ von 4.4 erreicht werden kann. Die Systeme erreichen dabei eine bedingte bis genügende Eignung.

## 6.5 Paraffin-Speicher + eTank System

In Abbildung 27 sind die Dimensionierungsmatrizen für das Paraffin-Speicher + eTank System in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen abgebildet. Für jede Kombination aus Heizwärmebedarf und Einstrahlungskategorie ist jeweils die benötigte Anzahl PVT-Kollektoren, das benötigte Paraffinvolumen und die benötigte eTank-Fläche sowie die damit erreichte SJAZ angegeben.

Die Rahmenbedingungen für die Dimensionierung des Paraffin-Speichers (Höhe, Minimal- und Maximaltemperatur, Dimensionierung der Wärmeübertrager) sind in Kapitel 5.4 zu finden. Bei der Dimensionierung des eTanks gelten bezüglich minimaler und maximaler Fläche sowie der Minimaltemperatur in den eTanks die gleichen Bedingungen wie beim eTank System (siehe Kapitel 5.1).

<b>Paraffin-Speicher + eTank System (Sanierungsgebäude - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	5.8	5.7	5.7
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	7 / 80	7 / 70	7 / 60
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	5.1	5.2	5.3
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	12 / 130	12 / 130	12 / 130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.6	4.7	4.8
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	24 / 130	24 / 130	24 / 130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
<b>Paraffin-Speicher + eTank System (Neubauten - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
13 (Neu. 13MWh)	SJAZ [-]	5.7	5.7	5.7
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	4 / 60	4 / 60	4 / 60
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	25	20	15
23 (Neu. 23MWh)	SJAZ [-]	5.7	5.5	5.4
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	8 / 120	8 / 100	8 / 80
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
50 (Neu. 50MWh)	SJAZ [-]	5.8	5.8	5.8
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	16 / 340	16 / 300	16 / 260
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 27: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher + eTank System (siehe Abbildung 16) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.

Das Paraffin-Speicher + eTank System ist für das «San. 20MWh» Gebäude genügend geeignet. Mit einer eTank-Fläche von 60 bis 80 m<sup>2</sup> und dem maximalen, im Untergeschoss Platz findenden Paraffinvolumen von 7 m<sup>3</sup> wird eine SJAZ von 5.7 bis 5.8 erreicht. Für das «San. 35MWh» Gebäude ist das System nur bei der grössten solaren Einstrahlung bedingt geeignet, da andernfalls die Minimaltemperatur im eTank bei maximaler eTank-Fläche unterschritten wird.

In Neubauten wird für alle Heizwärmebedarfskategorien eine genügende bis sehr gute Eignung bei SJAZ von 5.4 bis 5.8 erreicht. Der eTank findet dabei unter den Gebäuden und der Paraffin-Speicher im Untergeschoss der Gebäude Platz. Bei «Neu. 13MWh» Gebäuden kann die Anzahl verbauter PVT-Kollektoren je nach Einstrahlungskategorie zusätzlich auf 25 bis 15 reduziert werden.

Die Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher + eTank System in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen ist in Abbildung 28 zu sehen.

Paraffin-Speicher + eTank System (Sanierungsgebäude - Radiatorheizung)				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	5.1	5.0	5.0
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	7 / 80	7 / 70	7 / 60
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	4.4	4.4	4.5
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	12 / 130	12 / 130	12 / 130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.1	4.2	4.3
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	24 / 130	24 / 130	24 / 130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 28: Simulationsergebnisse und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher + eTank System (siehe Abbildung 16) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.

In Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen eignet sich das Paraffin-Speicher + eTank System nur bei einem Heizwärmebedarf von 20 MWh und erhält dort das Label «genügende Eignung». Mit maximaler Anzahl an PVT-Kollektoren und eTank-Flächen zwischen 60 und 80 m<sup>2</sup> werden SJAZ von 5.0 bis 5.1 erreicht was im Vergleich zu Gebäuden mit einer Fussbodenheizung einer Reduktion von 12 % entspricht.

### 6.6 Vergleich der Systeme

Eine Zusammenstellung der Eignung der fünf Systeme für die betrachteten Gebäudekategorien mit Fussbodenheizungen ist in Abbildung 29 zu sehen. Für den Vergleich werden jeweils die Ergebnisse der mittleren solaren Einstrahlungskategorie (1'050 kWh/m<sup>2</sup> a) herangezogen.

		San. 20MWh	San. 35MWh	San. 75MWh	Neu. 13MWh	Neu. 23MWh	Neu. 50MWh
eTank	SJAZ [-]	6.0			5.8	5.6	6.7
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	80			60	120	320
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35			25	60	85
2-eTank	SJAZ [-]	5.3	5.2		4.8	4.6	6.1
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	60	130		60	80	250
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	30	60		5	30	85
Eisspeicher	SJAZ [-]	5.1	4.9	4.9	5.0	5.0	5.0
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	18	35	100	12	25	60
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	60	85	35	60	85
Paraffin	SJAZ [-]	5.0	4.8	4.4	5.1	4.8	4.6
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	40	70	170	25	40	100
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	60	85	35	60	85
Paraffin + eTank	SJAZ [-]	5.7			5.7	5.5	5.8
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	7 / 70			4 / 60	8 / 100	16 / 300
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35			20	60	85

Abbildung 29: Eignung der jeweiligen Systeme für die 6 betrachteten Gebäudekategorien mit Fussbodenheizungen bei der solaren Einstrahlungskategorie von 1'050 kWh/m<sup>2</sup> a inkl. jeweiligem Komponentenaufwand und erreichter SJAZ.

Die Einfärbung der Matrixeinträge hat folgende Bedeutung:

- Grün: «sehr gute Eignung»
- Gelb: «gute Eignung»
- Orange: «genügende Eignung»
- Rot: «bedingte Eignung»
- Grau: «keine Eignung»

Bei Sanierungsgebäuden ist generell zu beobachten, dass je grösser die Gebäude, desto kleiner die Auswahl der geeigneten Systeme. Der Grund dafür liegt vor allem in der verfügbaren Fläche neben Bestandsgebäuden, die im urbanen Gebiet stark beschränkt ist. Während sich für ein Sanierungsgebäude mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 20 MWh alle betrachteten Systeme genügend bis gut eignen, kommen bei grösseren Gebäuden mit 75 MWh Heizwärmebedarf nur noch das Eisspeicher und das Paraffin-Speicher System in Frage, wobei jedoch das Eisspeicher System mit einer um 11 % höheren SJAZ und einem um 70 m<sup>3</sup> kleineren Speichervolumen deutlich besser abschneidet. Die bessere Eignung des Eisspeicher Systems gegenüber dem Paraffin-Speicher System ist bei allen Gebäudetypen zu beobachten. Der Grund dafür liegt in der um 110 Prozent höheren spezifischen Wärmekapazität und der um 30 Prozent höheren Dichte von Wasser (siehe Tabelle 13), wodurch bei gleichem Speichervolumen viel mehr Wärme gespeichert werden kann. Zusätzlich ist der in den Polysun-Simulationen verwendete Paraffin-Speicher nicht offiziell von Vela Solaris validiert, was ebenfalls einen Einfluss auf die Richtigkeit der Resultate haben kann (siehe Kapitel 8.1.2).

Für ein «San. 20MWh» Gebäude eignet sich das 2-eTank oder das Eisspeicher System am besten. Der Grund, weshalb das Eisspeicher System trotz kleinerer SJAZ in eine bessere Eignungskategorie als das eTank System fällt, liegt in der kleineren Fläche, die für das Eisspeicher-Volumen neben dem Gebäude benötigt wird. Für Neubauten, bei denen der eTank jeweils unterhalb des Gebäudes platziert werden kann, erreichen die Systeme mit eTank bei der kleinsten Heizwärmebedarfskategorie jeweils eine sehr gute Eignung, wobei mit minimaler eTank-Fläche jeweils auch die Anzahl an PVT-Kollektoren reduziert werden kann. Bei «Neu. 50MWh» Gebäuden erzielen die Systeme mit einem Paraffin-Speicher aufgrund der hohen Kosten für diese Speichertechnologie eine genügende Eignung, während alle anderen Systeme eine gute Eignung erzielen. Bezüglich der Systeme, die einen eTank verwenden, wird das 2-eTank System aufgrund des reduzierten Komponentenaufwands generell eine Eignungskategorie besser eingestuft als die anderen Systeme. Ein genauerer Vergleich der drei Systeme mit eTank ist in Kapitel 6.6.1 zu finden.

In Abbildung 30 ist die Zusammenstellung der Eignung der fünf Systeme für Sanierungsgebäude mit Radiatorheizungen zu sehen. In der Klammer neben der SJAZ ist jeweils die prozentuale Reduktion gegenüber Gebäuden mit Fussbodenheizungen zu sehen.

		San. 20MWh (Radiatorheiz.)	San. 35MWh (Radiatorheiz.)	San. 75MWh (Radiatorheiz.)
eTank	SJAZ [-]	5.1 (-15 %)		
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	80		
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35		
2-eTank	SJAZ [-]	4.6 (-13 %)	4.4 (-15 %)	
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	60	130	
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	30	60	
Eisspeicher	SJAZ [-]	4.5 (-12 %)	4.4 (-10 %)	4.5 (-8 %)
	Eisspeichervolumen [m <sup>3</sup> ]	18	45	100
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	60	85
Paraffin	SJAZ [-]	4.5 (-10 %)	4.4 (-8 %)	4.4 (-0 %)
	Paraffinvolumen [m <sup>3</sup> ]	42.5	120	230 (+35 %)
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	60	85
Paraffin + eTank	SJAZ [-]	5.0 (-12 %)		
	Par. Vol. [m <sup>3</sup> ] / eTank [m <sup>2</sup> ]	7 / 70		
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35		

Abbildung 30: Eignung der jeweiligen Systeme für die 3 betrachteten Sanierungsgebäude mit Radiatorheizungen bei der solaren Einstrahlungskategorie von 1'050 kWh/m<sup>2</sup> a inkl. jeweiligem Komponentenaufwand und erreichter SJAZ.

Bezüglich der Eignung der Systeme ergibt sich bei Gebäuden mit Radiatorheizungen das gleiche Bild wie bei Gebäuden mit Fussbodenheizungen. Der Unterschied liegt darin, dass die erreichten SJAZ bei Gebäuden mit Radiatorheizungen bei gleichbleibendem Komponentenaufwand jeweils um 8 bis 15 % tiefer liegen. Beim Paraffin-Speicher System muss gegenüber Gebäuden mit Fussbodenheizungen das Paraffin-Volumen erhöht werden, um die Mindest-SJAZ von 4.4 noch zu erreichen. Das Paraffin-Speicher System schneidet auch bei den Gebäuden mit Radiatorheizungen bezüglich dem benötigten Speichervolumen in allen Gebäudetypen schlechter ab als das Eisspeicher System.

#### 6.6.1 Vergleich der Systeme mit eTanks

Im Folgenden werden nur die drei Systeme, die einen eTank beinhalten anhand des Gebäudes «Neu. 50MWh» und der mittleren solaren Einstrahlungskategorie (1'050 kWh/m<sup>2</sup> a) verglichen. Das Gebäude «Neu. 50MWh» wird als Vergleichsobjekt gewählt, da keines der Systeme dort das Label «keine Eignung» erhalten hat und da es sich durch den höheren Heizwärmebedarf von 50 MWh/a nicht für eine Lösung mit einem L-Sol-System eignet (Sauter, et al., 2020). In Tabelle 17 ist der Vergleich der drei Systeme anhand der SJAZ, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie und dem gesamten jährlichen Stromverbrauch dargestellt. Es werden jeweils die laut den Dimensionierungsmatrizen (siehe Abbildung 29) empfohlene eTank-Fläche und Anzahl an PVT-Kollektoren verwendet. In den Klammern neben den Resultaten wird jeweils die Änderung gegenüber den Resultaten des eTank Systems angegeben.

Tabelle 17: Vergleich der drei Systeme mit eTanks und dem jeweils laut Dimensionierungsmatrizen (siehe Abbildung 29) empfohlenen Komponentenaufwand anhand der SJAZ, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie und dem gesamten jährlichen Stromverbrauch. Die Systeme wurden anhand des Gebäudes «Neu 50MWh» bei der mittleren solaren Einstrahlung von 1'050 kWh/m<sup>2</sup> a simuliert.

	eTank System	2-eTank System	Paraffin-Speicher+ eTank System
Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	320	250 (-22 %)	300 (-6 %)
SJAZ [-]	6.7	6.2 (-7 %)	5.8 (-13 %)
Jährlicher Netzbezug [kWh]	12'736	13'499 (+6 %)	13'630 (+7 %)
Gesamter Stromverbrauch [kWh]	15'370	16'140 (+5 %)	16'418 (+7 %)

Gegenüber dem eTank System kann mit dem 2-eTank System die Fläche des eTanks bei gleichbleibender Anzahl PVT-Kollektoren um 22 % reduziert werden. Der Grund dafür liegt in der grösseren Wärmemenge, die durch das Wegfallen der Konkurrenz zwischen Wärmeeinspeicherung und passiver Kühlung über denselben eTank, von den PVT-Kollektoren geerntet werden kann. Somit steht in den Wintermonaten mehr Wärme zur Verfügung, wodurch der eTank weniger schnell auskühlt und seine Fläche bzw. Volumen somit reduziert werden kann. Der jährliche Netzbezug sowie der gesamte Stromverbrauch liegen beim 2-eTank System um 6 % bzw. 5 % über den Werten des eTank Systems. Der Grund dafür liegt vermutlich in der längeren Einsatzdauer der Solarkreis-Pumpe und der Pumpe im Primärkreislauf der WP im 2-eTank System. Diese sind im 2-eTank System auch während der passiven und aktiven Kühlung des Gebäudes zur Einspeicherung der Wärme aus den PVT-Kollektoren eingeschaltet, wo hingegen beim eTank System immer entweder Wärme eingespeichert wird oder gekühlt wird. Durch die kleinere eTank-Fläche im 2-eTank System sinkt auch die erreichte SJAZ um 7 % auf einen immer noch sehr guten Wert von 6.2.

Auch das Paraffin-Speicher + eTank System ermöglicht eine Einsparung der benötigten eTank-Fläche von 6 % gegenüber dem eTank System. Jedoch steigt auch hier der jährliche Netzbezug sowie der gesamte Stromverbrauch um jeweils 7 % an und die erreichte SJAZ sinkt um 13 %. Als Gründe für diese Veränderungen gegenüber dem eTank System sind die gleichen wie für das 2-eTank System zu nennen. Es ist festzuhalten, dass mit dem 2-eTank System der Platzverbrauch am geringsten gehalten werden kann, wobei immer noch sehr gute SJAZ erreicht werden.

Um den Einfluss der unterschiedlichen eTank-Fläche zu eliminieren, werden nun die drei Systeme bei gleichem Komponentenaufwand miteinander verglichen und die Resultate wie die erreichte SJAZ, der jährliche Netzbezug an elektrischer Energie sowie der gesamte Stromverbrauch in Tabelle 18 festgehalten. Dazu wird jeweils eine eTank-Fläche von 280 m<sup>2</sup> und eine Anzahl an PVT-Kollektoren von 85 gewählt. In den Klammern neben den Resultaten wird jeweils die Änderung gegenüber den Resultaten des eTank Systems angegeben.

Tabelle 18: Vergleich der drei Systeme mit eTanks und jeweils gleichem Komponentenaufwand anhand der SJAZ, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie und dem gesamten jährlichen Stromverbrauch.

	eTank System	2-eTank System	Paraffin-Speicher+ eTank System
Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85
eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	280	280	280
SJAZ [-]	6.3	6.5 (+3 %)	5.7 (-10 %)
Jährlicher Netzbezug [kWh]	13'282	13'286 (+0.0 %)	13'662 (+2.9 %)
Gesamter Stromverbrauch [kWh]	15'853	15'784 (-0.4 %)	16'544 (+4.4 %)

In Abbildung 31 ist der Vergleich der drei betrachteten Systeme anhand des jährlichen, gesamten Stromverbrauchs, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie sowie der SJAZ zusätzlich graphisch dargestellt.

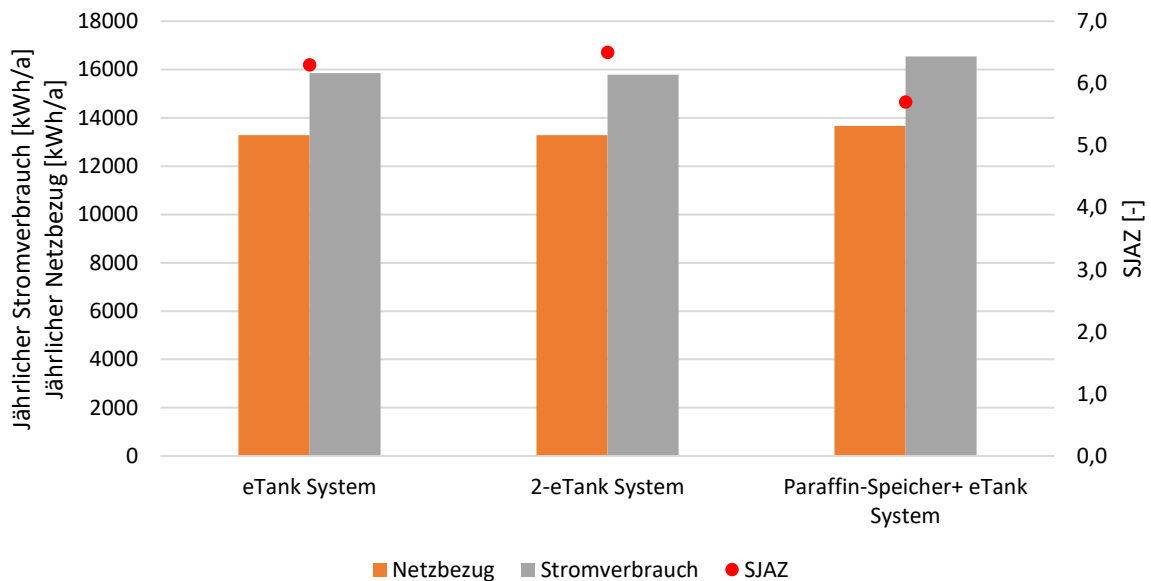


Abbildung 31: Vergleich des eTank Systems, des 2-eTank Systems und des Paraffin-Speicher + eTank Systems anhand dem jährlichen, gesamten Stromverbrauch, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie sowie der SJAZ.

Bei gleichem Komponentenaufwand erreicht das 2-eTank System gegenüber dem eTank System eine um 3 % höhere SJAZ, wobei sich der jährliche Netzbezug sowie der gesamte Stromverbrauch nicht merklich ändern. Der Grund dafür liegt auch hier in der grösseren Wärmemenge, die durch das Wegfallen der Konkurrenz zwischen Wärmeeinspeicherung und Kühlung über denselben eTank, von den PVT-Kollektoren geerntet werden kann. Der höher Stromverbrauch der Solarkreis-Pumpe und der Pumpe im Primärkreislauf der WP im 2-eTank System wird hier vermutlich durch den geringeren Stromverbrauch der WP aufgrund des höheren Temperaturniveaus in den eTanks des 2-eTank Systems ausgeglichen, weshalb sich der Netzbezug und der Stromverbrauch nicht merklich ändern. Das Paraffin-Speicher + eTank System erreicht gegenüber dem eTank System eine um 10 % tiefere SJAZ wobei der Netzbezug sowie der gesamte Stromverbrauch um 2.9 bzw. 4.4 % ansteigen. Es fällt auf, dass das Paraffin-Speicher + eTank System bezüglich allen betrachteten Simulationsergebnisse schlechter abschneidet, obwohl mit dem zusätzlichen Paraffin-Speicher eigentlich mit Verbesserungen des Systems zu rechnen wäre (höhere Speicherkapazität und mehr geerntete Wärme von den PVT-Kollektoren aufgrund der passiven Kühlung über den Paraffin-Speicher und nicht über den eTank). Ein Unterschied zwischen den beiden Systemen liegt sicher in der Betriebsdauer der aktiven Kühlung, die beim eTank System 40 h und beim Paraffin-Speicher + eTank System 180 h beträgt, was auch zu einem Mehrverbrauch an Strom führt. Der Grund wieso beim Paraffin-Speicher + eTank System die aktive Kühlung bei gleichen Gebäudespezifikationen jedoch um den Faktor 4.5 länger läuft, konnte noch nicht gefunden werden (siehe Kapitel 9).

Auch bei diesem Vergleich ist festzuhalten, dass das 2-eTank System generell die besten Systemresultate erzielt.



### 6.6.2 Vergleich mit 2SOL und L/W-WP System

Neben den fünf in Kapitel 5 definierten Systeme sollen zusätzlich auch noch zwei Vergleichssysteme betrachtet werden. Dabei handelt es sich um ein L/W-WP System mit einer PV-Anlage und einer L/W-WP als Wärmeerzeuger und um ein 2SOL System mit einer PVT-Anlage, einer S/W-WP als Wärmeerzeuger und einer Erdwärmesonde als Wärmespeicher und Wärmequelle für die WP (siehe Abbildung 32). Diese beiden Systeme werden gewählt, da sie als direkte Konkurrenzsysteme für die in dieser Arbeit betrachteten Systeme zur Beheizung von grossen MFH angesehen werden (siehe Kapitel 1.1).

Das Gebäude im L/W-WP System wird aktiv über einen Rückkühler (Luft/Wasser-Wärmeübertrager) auf dem Dach mit einer Kühlleistung von 10 kW gekühlt, sobald die Raumtemperatur über den Grenzwert von 24.5°C steigt. Ein reversibler Betrieb der L/W-WP ist in Polysun nicht realisierbar. Als PV-Modultyp wird wie bei den PVT-Kollektoren (siehe Kapitel 3.3.3.2) ein monokristallines Modell von DualSun mit einer gleichen elektrischen Nennleistung von 310 W gewählt. Das Gebäude im 2SOL System wird passiv über die PVT-Kollektoren sowie aktiv über die Wärmepumpe mit der Erdwärmesonde als Wärmesenke gekühlt.

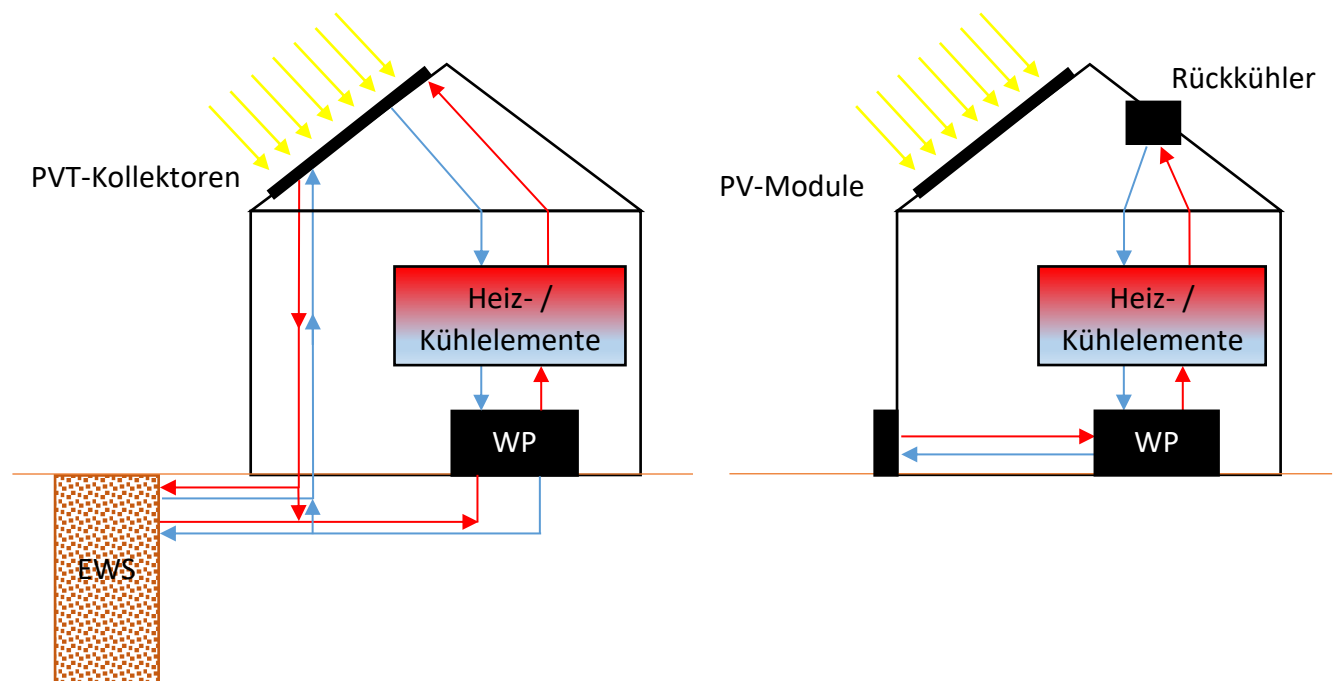


Abbildung 32: Schematische Darstellung des 2SOL Systems (links) inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und einer Erdwärmesonde (EWS) neben dem Gebäude als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle und Wärmesenke für eine Wärmepumpe (WP). Auf der rechten Seite ist das L/W-WP System dargestellt inkl. aktiver Kühlung über den Rückkühler auf dem Dach und Verdampferinheit der Wärmepumpe (WP) neben dem Gebäude zur Nutzung der Luft als Wärmequelle.

Im Folgenden werden nun die fünf in dieser Arbeit untersuchten Systeme und die zwei Vergleichssysteme anhand verschiedenen Kennzahlen, wie dem solaren Deckungsgrad, dem Eigenverbrauchsgrad, dem jährlichen Netzbezug und dem gesamten Stromverbrauch verglichen. Ausserdem soll auch die Qualität der Kühlung der Systeme betrachtet werden, wozu als Indikator die Anzahl Gradstunden gewählt wird. Dabei handelt es sich um die aufsummierten Temperaturdifferenzen zwischen der Raumtemperatur und der Grenztemperatur von 24 bzw. 24.5°C multipliziert mit der Anzahl Stunden pro Jahr, in denen diese Grenztemperatur überschritten wurde. Somit lässt sich nicht nur die Anzahl Überschreitungen der Grenztemperatur quantifizieren, sondern auch in welchem Mass diese überschritten wurde.

Die Systeme werden ebenfalls anhand des Gebäudes «Neu. 50MWh» bei der mittleren solaren Einstrahlungskategorie von 1050 kWh/m<sup>2</sup> a verglichen, wobei die folgenden Speichergrossen bei einer jeweiligen Anzahl an PVT-Kollektoren von 85 eingesetzt werden. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Systemen mit eTank zu gewährleisten, wird jeweils die gleiche eTank-Fläche von 320 m<sup>2</sup> verwendet:

- eTank System 320 m<sup>2</sup>
- 2-eTank System 320 m<sup>2</sup> (S130 K190)
- Eisspeicher System 60 m<sup>3</sup>
- Paraffin-Speicher System 100 m<sup>3</sup>
- Paraffin-Speicher + eTank System 16 m<sup>3</sup> / 320 m<sup>2</sup>

Tabelle 19: Vergleich der fünf untersuchten Systeme und der beiden Vergleichssysteme anhand dem solaren Deckungsgrad, dem Eigenverbrauchsgrad, der SJAZ, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie, dem gesamten jährlichen Stromverbrauch und der Anzahl Gradstunden bei 2 verschiedenen Grenztemperaturen.

	eTank System	2-eTank System	Eis-speicher System	Paraffin-Speicher System	Paraffin-Speicher + eTank System	L/W-WP System	2SOL System
Solarer Deckungsgrad [%]	32.6	31.3	34.2	34.4	34.1	-	20.4
Eigenverbrauchsgrad [%]	11.9	11.1	13.4	12.5	12.9	21.0	19.8
Systemjahres-arbeitszahl [-]	6.7	6.8	5.0	4.6	5.8	4.3	5.9
Jährlicher Netzbezug [kWh]	12'736	12'883	15'294	16'822	13'237	17.316	13'097
Jährlicher gesamter Stromverbrauch [kWh]	15'370	15'408	18'326	19'855	16'192	21'957	16'043
Gradstunden bei Grenztemperatur von 24°C [-]	194	142	443	569	399	678	526
Gradstunden bei Grenztemperatur von 24.5°C [-]	9	5	13	63	13	105	46

Bezüglich dem solaren Deckungsgrad schneidet das Paraffin-Speicher System mit 34.4 % am besten ab. Der Eigenverbrauchsgrad hingegen liegt beim L/W-WP System mit 21 % am höchsten, da aufgrund des höheren Stromverbrauchs der L/W-WP mehr des produzierten Solarstromes direkt genutzt werden kann. Der Netzbezug sowie der gesamte Stromverbrauch sind beim eTank System, dicht gefolgt von 2-eTank System, am geringsten. Der Grund für die geringen Differenzen von ca. 1 % zwischen den beiden Systemen wurde bereits in Kapitel 6.6.1 besprochen.

Mit 6.8 erreicht das 2-eTank System die höchste SJAZ aller betrachteten Systeme. Sie liegt auch gegenüber der SJAZ der beiden Vergleichssysteme (2SOL System und L/W-WP System) um 15 bzw. 58 % höher. Auch die Anzahl Gradstunden sind mit 142 (bei einer Grenztemperatur von 24°C) und 5 (bei einer Grenztemperatur von 24.5°C) beim 2-eTank System am geringsten und damit die Kühlung am effizientesten. Die ist darauf zurückzuführen, dass in diesem System eine grosse Wärmesenke (Kühl-eTank) für die aktive sowie die passive Kühlung zur Verfügung steht, die nicht zusätzlich durch die PVT-Kollektoren erwärmt wird und somit lange auf einem tiefen Temperaturniveau bleibt. Das L/W-

WP System zeigt mit 678 (bei einer Grenztemperatur von 24°C) und 105 (bei einer Grenztemperatur von 24.5°C) die höchste Anzahl an Gradstunden, was auf die fehlende passive Kühlung in diesem System zurückzuführen ist.

Von den fünf in dieser Arbeit untersuchten Systemen (siehe Kapitel 5) zeigt das Paraffin-Speicher System mit 569 und 63 die höchste Anzahl an Gradstunden, was darauf zurückzuführen ist, dass der gleiche Speicher als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren als auch als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung dient, und somit schneller auf einem hohen Temperaturniveau ist. Dadurch wird die Kühlung ineffizient bzw. komplett ausgeschaltet sobald der Speicher seine Maximaltemperatur erreicht hat.

In Abbildung 33 ist der monatliche Netzbezug an elektrischer Energie der Systeme dargestellt. Dieser ist bei allen Systemen im Winter höher, da dort der Stromverbrauch zur Beheizung der Gebäude höher ist und weniger Solarstrom auf den Dächern produziert wird und somit mehr Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Diese Winterstromproblematik wird verstärkt durch den vermehrten Umstieg von fossilen Heizsystemen zu Wärmepumpensystemen.

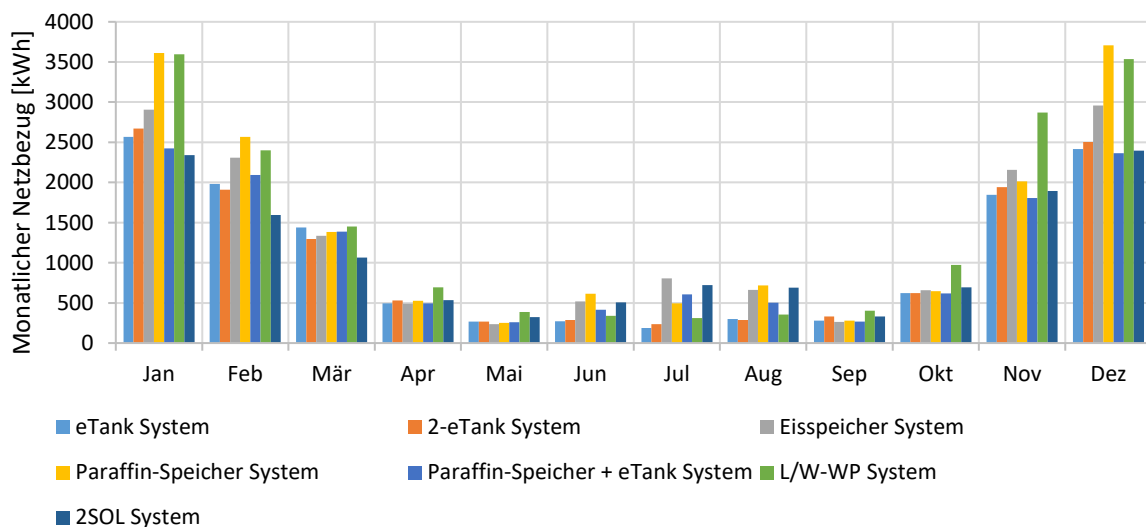


Abbildung 33: Monatliche Aufteilung des Netzbezuges an elektrischer Energie der 5 in dieser Arbeit betrachteten Systeme und der 2 Vergleichssysteme (L/W-WP System und 2SOL System).

Es ist ersichtlich, dass vor allem in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar der Netzbezug beim Paraffin-Speicher System und dem L/W-WP System den der anderen Systeme deutlich übersteigt. Im Januar liegt er ca. um 40 % höher als bei den restlichen Systemen. Der Grund dafür liegt in der deutlich geringeren Effizienz von L/W-WPs' im Vergleich zur Verwendung von anderen Wärmequellen (siehe Kapitel 2.2). Beim Paraffin-Speicher System könnte der Grund für den hohen Netzbezug darin liegen, dass bei andauerndem Wärmeentzug die Temperatur des Paraffins an den Wärmeübertragern aufgrund der um den Faktor 3 kleineren Wärmeleitfähigkeit des Paraffins im Vergleich zu Wasser (siehe Tabelle 13) schneller sinkt, und die WP somit einen grösseren Temperaturhub überwinden muss und ineffizienter arbeitet. Ein weiterer Grund könnte die nicht korrekte Auslegung des Paraffin-Speichers (Verhältnis von Höhe zu Breite) und der Wärmeübertrager im Speicher sein, wodurch evtl. nicht das Ganze Paraffin-Volumen genutzt wird (siehe Kapitel 8.1).

In Abbildung 34 ist der solare Deckungsgrad der fünf in dieser Arbeit untersuchten Systeme und des 2SOL Systems pro Monat dargestellt. Das L/W-WP System wird nicht betrachtet, da es sich hierbei um den solarthermischen Deckungsgrad handelt.

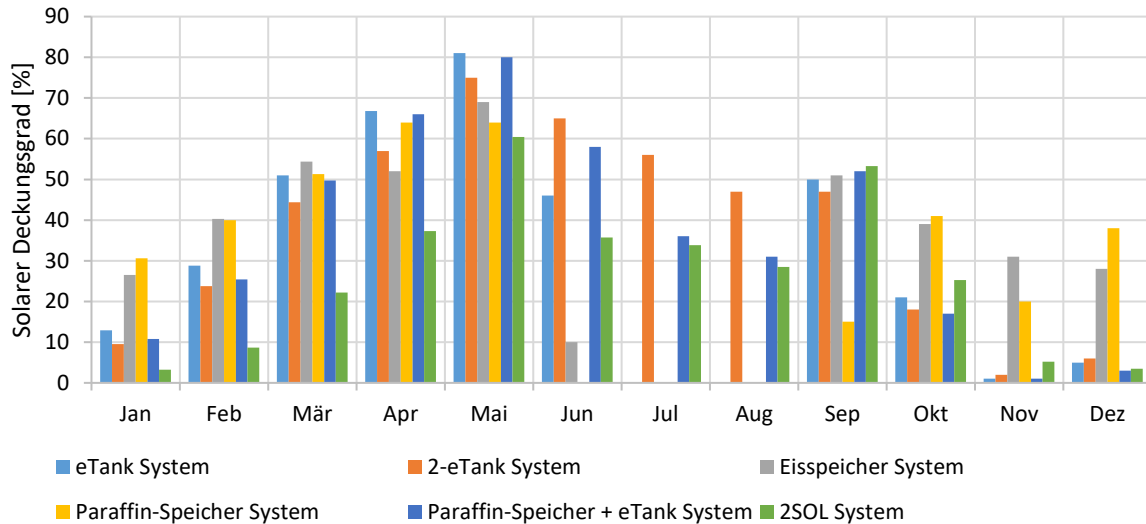


Abbildung 34: Solarer Deckungsgrad pro Monat der 5 in dieser Arbeit untersuchten Systeme und des 2SOL Systems.

Es ist ersichtlich, dass bei allen Systemen der solare Deckungsgrad im Sommer steigt. Der Grund für die Abnahme in den Monaten Juni, Juli und August liegt jedoch darin, dass während diesen Monaten die PVT-Kollektoren auch zur passiven Kühlung der Gebäude eingesetzt werden, und so weniger Wärme geerntet wird. Beim eTank System, dem Eisspeicher System und dem Paraffin-Speicher System liegt der solare Deckungsgrad in diesen Monaten sogar bei null oder nahe bei null. Bei diesen Systemen wird jeweils der gleiche Wärmespeicher für die passive Kühlung als auch für die Einspeicherung der Wärme aus den PVT-Kollektoren verwendet. Da in den Kühlmonaten (vor allem Juli und August) tagsüber oft mit dem Wärmespeicher als Wärmesenke passiv oder aktiv gekühlt wird, kann gleichzeitig keine Wärme aus den PVT-Kollektoren eingespeichert werden und der solare Deckungsgrad sinkt. Das 2-eTank zeigt insbesondere in den drei Kühlmonaten den höchsten solaren Deckungsgrad aller Systeme, da durch den separaten Solar-eTank viel Wärme aus den PVT-Kollektoren eingespeichert werden kann.

In den Wintermonaten ist auffallend, dass der solare Deckungsgrad des Eisspeicher und des Paraffin-Speicher Systems den der anderen Systeme deutlich übersteigt. Der Grund dafür liegt in der deutlich tiefere Minimaltemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  in diesen beiden Speichern im Vergleich zu  $1^{\circ}\text{C}$  beim eTank. Dadurch kann Wärme auch bereits bei tiefen Kollektor-Austrittstemperaturen eingespeichert werden.

### 6.6.3 Zusammenfassung des Systemvergleichs

Welches System wann ausgewählt wird, hängt sehr stark von den individuellen Gegebenheiten eines Gebäudes, wie der verfügbaren Fläche neben und im Untergeschoss der Gebäude ab. Im Falle von Sanierungsgebäuden, deren verfügbare Fläche neben dem Gebäude stark begrenzt ist, bietet das Eisspeicher System die beste Lösung. Je nach Gebäudegrösse werden bei einer Höhe der Eisspeicher von 2 m nur rund 10 bis 50  $\text{m}^2$  Fläche neben dem Gebäude benötigt, um den Heizwärmebedarf zu decken. Dabei werden SJAZ um die 5 erreicht.

Falls der Platz neben dem Sanierungsgebäude nicht eingeschränkt ist, bietet vor allem bei Heizwärmebedarfen von um die 20 MWh das 2-eTank System die beste Lösung wobei mit einer Fläche von 60  $\text{m}^2$  und einer reduzierten Anzahl an PVT-Kollektoren von 30 eine SJAZ von 5.3 erreicht wird. Falls 130  $\text{m}^2$  oder sogar mehr neben dem Gebäude zur Verfügung stehen, bietet dieses System auch für höhere Heizwärmebedarfe die geeignetste Lösung mit der höchsten SJAZ der untersuchten Systeme.

Bei Neubauten, bei denen der eTank unter dem Gebäude platziert werden kann, bietet jeweils das 2-eTank System die beste Lösung. Im Gegensatz zu einem Eisspeicher, einem Paraffin-Speicher oder einem Paraffin-Speicher + eTank System wird keine Grabung neben dem Gebäude, bzw. kein Speicher im Untergeschoss des Gebäudes benötigt. Gegenüber dem eTank System kann mit dem 2-eTank System bei minimaler eTank-Fläche die Anzahl an PVT-Kollektoren oder bei gleicher Anzahl an PVT-Kollektoren die benötigte eTank-Fläche reduziert werden. Bei gleichem Komponentenaufwand ist mit dem 2-eTank System mit einer um 3% höheren SJAZ und einer effizienteren Kühlung zu rechnen (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19).

Bezüglich des Vergleiches zwischen einem Eisspeicher und einem Paraffin-Speicher System bietet in allen Anwendungen das Eisspeicher System die geeignetere Lösung. Je nach Gebäudetyp werden um den Faktor 1.6 bis 2.2 kleinere Speichervolumen benötigt, wobei je nach System um 2 - 12 % bessere SJAZ erzielt werden. Wie in Kapitel 5.4.1 besprochen, bestätigt auch das Projekt LEWASEF des BFE, dass bei erdvergrabenen Latentwärmespeichern als Wärmequelle für eine Wärmepumpe ein Schmelzpunkt von 0°C die beste Systemeffizienz erzielt, weshalb Wasser als bevorzugtes Speicherfluid gewählt werden soll (Dott, et al., 2019). Auch bezüglich der Kosten, der Verfügbarkeit und der Ökologie hat Wasser gegenüber anderen PCMs' Vorteile (siehe Tabelle 11).

## 7 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es kombinierte Heiz- und Kühlsysteme für den Einsatz in Gebäuden mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von mehr als 20 MWh, als Alternativen zu Systemen mit Erdwärmesonden, L/W-WPs oder Holzfeuerungen zu finden. Folgende Fragestellungen galt es zu beantworten:

- Welche Speichertechnologien oder Kombinationen von Speichertechnologien eignen sich als saisonale Pufferspeicher für Solarwärme und gleichzeitig als Wärmequelle einer Sole/Wasser-Wärmepumpe für die Wärme-Erzeugung in einem Gebäude mit mehr als 20 MWh Heizwärmebedarf pro Jahr?
- Gibt es eine Speichertechnologie oder Kombination von Speichertechnologien, welche die Systemeffizienz, im Vergleich zur alleinigen Verwendung des eTanks als saisonaler Pufferspeicher steigert?
- Für welchen Gebäudetyp (Heizwärmebedarf, solare Einstrahlung) ist welche der untersuchten Speichertechnologien/Kombinationen wie geeignet?

In der Recherche zu den Speichertechnologien (siehe Kapitel 4) wurde ersichtlich, dass vor allem der eTank, der Eisspeicher sowie der Paraffin-Speicher als potentiell geeignete Speichertechnologien für den Einsatz als saisonale Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren sowie gleichzeitig als Wärmequelle einer S/W-WP eingestuft werden.

Nach der Definition der zu untersuchenden Systemen (siehe Kapitel 5), konnte gezeigt werden, dass ein System mit einem eTank als Wärmespeicher die besten Systemresultate liefert. Die Anordnung mit 2 eTanks (getrennte Einspeicherung der Wärme aus den PVT-Kollektoren und der Abwärme aus der passiven bzw. aktiven Kühlung) bietet hier die beste Variante, wie in Tabelle 17 und Tabelle 18 ersichtlich ist. Auch im Vergleich zu den beiden Konkurrenzsystemen (2SOL und L/W-WP), die laut den in dieser Arbeit definierten Rahmenbedingungen nicht möglich sind, schnitt das 2-eTank System bezüglich der SJAZ, dem Stromverbrauch und der Gebäude-Kühlung besser ab.

Bei der Erstellung der Dimensionierungsmatrizen konnte gezeigt werden, dass die Systeme mit einem eTank als Wärmespeicher (eTank System, 2-eTank System und Paraffin-Speicher + eTank System) insbesondere bei Neubauten, mit der Möglichkeit den eTank unter dem Gebäude zu platzieren, eine geeignete Lösung als Heiz- und Kühlsystem darstellen. Auch in urbanen Gebieten mit engen Platzverhältnissen neben den Gebäuden, wird deshalb in diesen Systemen grosses Potenzial gesehen. Bei Sanierungen in Bestandsgebäuden ist der verfügbare Platz neben den Gebäuden jedoch oft limitiert. Aufgrund der Festlegung einer maximalen eTank-Fläche und einer minimalen Temperatur im eTank eignen sich die Systeme mit eTank in Sanierungsgebäuden nur bis zu einem jährlichen Heizwärmebedarf von 20 bzw. 35 MWh (2-eTank System), obwohl sie auch bei höherem Heizwärmebedarf eine gute Performance mit einer hohen SJAZ aufweisen. Diese Begrenzung der Eignung aufgrund der Minimaltemperatur im eTank wird in Kapitel 8.2.1 besprochen. Falls die verfügbare Fläche neben dem Gebäude die in Kapitel 3.3.4 definierte maximale Fläche übersteigt oder die Minimaltemperatur im eTank unterschritten werden kann, können die Systeme mit eTank auch bei höherem Heizwärmebedarf in Sanierungsgebäuden eine geeignete Lösung darstellen. Unter den in dieser Arbeit festgelegten Voraussetzungen bietet jedoch das Eisspeicher System für die Sanierungsgebäude ab einem Heizwärmebedarf von 35 MWh aufwärts die geeignetste Lösung.

Mit dem 2-eTank System konnte ein System gefunden werden, dass sich für die Anwendung in MFH mit Heizwärmebedarfen von mehr als 20 MWh gut eignet. Auch bezüglich der Kühlung der Gebäude hat das 2-eTank System mit dem Kühl-eTank als Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung grosses Potential (siehe Tabelle 19) und erwies sich als das erfolgversprechendste der untersuchten Systeme. Die Anwendbarkeit in Sanierungsgebäuden hängt dabei jedoch stark von der verfügbaren Fläche neben dem Gebäude und der minimal zulässigen Temperatur in den eTanks ab.

## 7.1 Einordnung in andere Studien

Um einen Überblick darüber zu schaffen zu welchen Ergebnissen andere Autoren auf dem gleichen Forschungsgebiet gekommen sind, werden nachfolgend ausgewählte Studien und deren wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Der Einsatz von L/W-WPs als Heizungersatz in bestehenden Bestandsgebäuden mit hohen erforderlichen Heizleistungen von 40 bis 100 kW in der Stadt Zürich wurde in einer Studie von Energie Schweiz, dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich und der Hochschule Luzern untersucht (Gasser L. , 2019). Die L/W-WPs werden hier vor allem als Alternative zu Heizsystemen mit Erdwärmesonden betrachtet, da diese aufgrund der hohen Sondendichte im urbanen Raum das Erdreich im Aktionsradius langfristig auskühlen. Zudem sind in gewissen Gebieten der Stadt Zürich Erdsonden nicht zulässig (Gasser L. , 2019). In der Studie werden fünf verschiedenen Lösungsansätze für die Einbindung von «grossen» L/W-WPs in Bestandgebäuden unter Einhaltung bestimmter Anforderungen an die Lärmemissionen, die Effizienz (COP), sowie den Denkmalschutz der Gebäude erarbeitet und präsentiert. Ausserdem wurde eine Variantenmatrix erarbeitet, welche die Eignungsprüfung und die Lösungsfindung bezüglich der Einbindung einer L/W-WP in ein Bestandsgebäude im urbanen Raum vereinfachen soll.

Eine Studie zu saisonalen Wärmespeichern des Forum Energiespeicher Schweiz untersuchte verschiedene Speichertechnologien auf deren Eignung als saisonale Wärmespeicher (Haller & Ruesch, 2019). Laut der Studie nutzen die derzeit am Markt am weitesten verbreiteten Wärmespeicher Wasser oder Erdreich/Gestein als sensibles Speichermaterial. Als PCM-Speicher konnte sich bisher laut der Studie nur der Eisspeicher im Bereich der saisonalen Wärmespeicherung am Markt etablieren. Die untersuchten Sorptionsspeicher sind momentan nur in Nischenanwendungen auf dem Markt und befinden sich für den Zweck der saisonalen Wärmespeicherung im Stadium der Forschung und Entwicklung (Haller & Ruesch, 2019). Als prinzipielle Tendenz hält die Studie ausserdem fest, dass die Kosten der Wärmespeicherung vor allem dann gering sind, wenn die Wärme auf tiefem Temperaturniveau und somit verlustarm gespeichert werden kann. Zur Nutzung dieser Wärme wird jedoch der Einsatz einer Wärmepumpe benötigt. Dank den höheren Temperaturen der Wärmequelle in einem Wärmespeicher im Vergleich zur Aussenluft als Wärmequelle wird jedoch weniger elektrische Energie als bei L/W-WPs benötigt. Für die Wärmespeicherung auf dem Temperaturniveau des Wärmebedarfs können laut der Studie tiefe Kosten nur dann realisiert werden, wenn eine hohe Energiemenge gespeichert wird. Ausserdem sollte bei der Planung und Überwachung der Wärmespeicher nicht nur die energetische Bilanz, sondern auch die exergetische Bilanz, die sich durch das Erhalten des Temperaturniveaus auszeichnet, berücksichtigt werden (Haller & Ruesch, 2019).

Die «SPEQUA»-Studie des BFE liefert eine Übersicht zu thermischen und elektrischen Speichersystemen und ihrer dezentralen Anwendung in Quartieren (Gaegauf, et al., 2016). Es wurden verschiedene konventionelle und neuartige Speichersysteme in den Punkten Effizienz, Umweltverträglichkeit, technische Einbindung und Verfügbarkeit charakterisiert. Insbesondere wurde das Potential der Kurzzeitspeicherung in elektrischen Speichersystemen und Minderung der elektrischen Lastspitzen sowie das Potential der saisonalen Wärmespeicherung auf Stufe Gebäude und Quartier untersucht. Dabei wurden folgende Wärmespeicher betrachtet: Wasserspeicher, Erdsondenspeicher, Natronlaugenspeicher (Sorptionsspeicher), Eisspeicher und Natriumacetat-Speicher (PCM). Bei der Beurteilung der Effizienz der Speicher wird davon ausgegangen, dass die Häuser jeweils eine PV-Anlage besitzen, und die Speicher im Sommer aktiv über eine Wärmepumpe mit dem produzierten PV-Strom regeneriert und aufgewärmt werden.

Laut der Studie können alle genannten Wärmespeicher gut in die Energieversorgung von Quartieren integriert werden und eignen sich als saisonale Wärmespeicher. Die Simulationen von Energiebedarf und -produktion zeigten, dass die saisonalen Wärmespeicher jedoch nur dann vorteilhaft sind, wenn grossflächige PV-Anlagen einen hohen Stromüberschuss produzieren, mit dem die Wärmepumpen die Speicher laden können.

Bei der durchgeführten Life Cycle Analysis (LCA) zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit, wurde davon ausgegangen, dass die Speicher im Sommer direkt mit Solar-Kollektoren geladen werden. Die LCA zeigte, dass der Wasserspeicher bei allen Indikatoren am besten abschneidet. Daher empfiehlt die Studie, wenn immer möglich dessen Einsatz zu prüfen. Der Einsatz eines Eisspeichers oder eines Erdsondenspeichers soll vor allem geprüft werden, wenn ein Wasserspeicher nicht installiert werden kann oder dieser die Anforderungen der Heizung und Kühlung abdecken kann. Der Natronlaugenspeicher hat laut der Studie aus Umweltperspektive ein grosses Potential, jedoch muss sich das System aus technologischer Sicht noch stark entwickeln. Der Natriumacetat-Speicher wies in der LCA ebenfalls sehr gute und dem Wasserspeicher ähnliche Ergebnisse auf. Die Studie sagt aus, dass die untersuchten Speicher nur mit einem maximalen Ausbau der Produktion von erneuerbaren Energien wie PV die Umweltauswirkungen der Energieversorgung von Quartieren deutlich reduzieren. Die Förderung der erneuerbaren Energieproduktion sei daher deutlich stärker zu gewichten als die saisonale Speicherung.

Unabhängige Studien bezüglich Anwendungen des eTanks als saisonalen Wärmespeicher wurden keine gefunden. Eine Präsentation der eTank-Herstellerfirma deematrix zum eTank System gibt jedoch an, dass bei der Verwendung eines eTanks als Pufferspeicher für die Solarthermie mit SJAZ von 6-8 zu rechnen ist (Fürst, 2018). Es werden verschiedene Referenzprojekte und deren gemessene SJAZ vorgestellt, die nachfolgend in Tabelle 20 aufgelistet sind. Weitere Angaben zu den jeweiligen Gebäuden oder zu einem allfälligen Kühlsystem werden in der Präsentation nicht gemacht.

*Tabelle 20: Die von der eTank-Herstellerfirma deematrix angegebenen Referenzprojekte für ein eTank System inkl. den erreichten SJAZ (Fürst, 2018).*

Gebäudetyp	Heizlast [kW]	EBF [m <sup>2</sup> ]	SJAZ [-]
EFH	10	190	> 6
EFH	10	240	> 7.1
EFH	10	222	> 7.1
EFH	7.5	197	> 7.2
Gewerbe	17	740	> 6

Damit liegen die von deematrix angegebenen SJAZ im Bereich der in dieser Arbeit mit dem eTank System erreichten SJAZ oder teilweise sogar darüber. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Referenzprojekten bis auf das Gewerbegebäude um EFH mit kleineren EBF, als die der in dieser Arbeit betrachteten Gebäudetypen, handelt.



## 8 Diskussion

Im folgenden Kapitel wird auf verschiedene, in dieser Arbeit angetroffenen Problematiken und offene Fragen eingegangen und diese diskutiert.

### 8.1 Auslegung der Eis- und der Paraffin-Speicher

Vor der Realisation eines Eisspeicher Systems oder eines Systems mit einem Paraffin-Speicher ist eine fachmännische Auslegung des Speichers (Wärmetauscher, Speichervolumen, Verhältnis von Fläche zu Tiefe usw.) unabdingbar. Für die in dieser Arbeit betrachteten Systeme wurde die Höhe der Speicher unabhängig von ihrem Volumen gleich belassen, um bezüglich dem Platz- und Grabungsaufwand ausserhalb des Gebäudes die Vergleichbarkeit mit einem eTank zu gewährleisten. Vor allem bei grösseren Speichervolumen dürfte jedoch in der Realität eine Anpassung der Höhe des Speichers nötig sein. Auch die Wärmeübertragerflächen bzw. die Rohrlänge der jeweiligen Wärmeübertrager wurde in der vorliegenden Arbeit einfachheitshalber proportional zum Speichervolumen variiert und nicht exakt auf die Speicherdimensionen ausgelegt.

#### 8.1.1 Aufstellort

In allen Simulationen des Eisspeicher und des Paraffin-Speicher Systems übersteigt das benötigte Speichervolumen den verfügbaren Platz im Untergeschoss der jeweiligen Gebäude, weshalb für die diese Speicher in allen betrachteten Fällen eine Aufstellung ausserhalb der Gebäude gewählt werden muss. Damit ein Paraffin-Speicher seinen Zweck erfüllt, muss darauf geachtet werden, dass der Phasenübergang von flüssig zu fest kontrolliert dann abläuft, wenn auch Wärmeenergie benötigt wird und nicht aufgrund von Wärmeverlusten an die Umwelt. Es bedarf deshalb Abklärungen dazu in wie fern die Aufstellung des Paraffin-Speichers ausserhalb des Gebäudes Sinn macht, und wie dieser isoliert werden muss. Je höher die Schmelztemperatur des eingesetzten Paraffins, desto grösser ist das Risiko einer unkontrollierten Erstarrung. Beim Paraffin-Speicher + eTank System wurde das Paraffin-Volumen so festgelegt, dass es jeweils im Untergeschoss Platz findet.

#### 8.1.2 Validierung Paraffin-Speicher

Da PCM-Speicher in Polysun zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit nicht standartmässig verfügbar sind, wurde beim Aufbau der Paraffin-Speicher-Simulationsmodelle auf eine unkonventionelle Methode mit Hilfe eines Tank-Speichers zurückgegriffen (siehe Kapitel 5.4). Da die Tank-Speicher in der Regel innerhalb der Gebäudehülle aufgestellt werden, wird in Polysun keine nachfliessende Erdwärme simuliert, obwohl dies bei einem erdverlegten Paraffin-Speicher der Fall wäre. Deshalb und da diese Verwendung eines Tank-Speichers als Paraffin-Speicher nicht durch Vela Solaris geprüft und die verwendeten PCM-Speicher somit nicht validiert wurden, sind insbesondere die Resultate des Paraffin-Speicher Systems mit Vorsicht zu behandeln.

#### 8.1.3 Kosten Paraffin-Speicher

Die Kosten für ein Kilogramm eines Hochleistungsparaffin von Rubitherm betragen ca. 3 Euro (Streicher, 2007). Bei den benötigten Speichervolumen von 150 bis 190 m<sup>3</sup> bei einem Sanierungsgebäude mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 75 MWh betragen nur die Kosten für das Speichermedium (ohne andere Komponenten oder Installation des Speichers) bereits 400'000 bis 500'000 Euro. Für ein Gebäude mit einem jährlichen Wärmebedarf (Heizwärme + BWW) von 86,5 MWh schätzt das BFE die Investitionskosten für ein komplettes Heizsystem mit einer Erdwärmesonde und einer S/W-WP mit 120'000 CHF und die einer Pelletsheizung mit 69'500 CHF ab (Klingler, Ott, & Rom, 2011). Bei einem jährlichen Heizwärmebedarf von 20 MWh betragen nur die Kosten für das Speichermedium beim Paraffin-Speicher System bereits 110'000 Euro. Im Vergleich dazu werden die Kosten für die Anschaffung plus dem Einbau einer L/W-WP für ein gleiches Gebäude mit 29'000 bis 42'000 CHF und die einer Pelletheizung mit 30'000 – 42'000 CHF abgeschätzt (energieheld, 2021). Die

Kosten für das komplette Heizsystem mit einer Erdwärmesonde und einer S/W-WP hingegen wird für ein Gebäude mit einem jährlichen Wärmebedarf (Heizwärme + BWW) von 30 MWh mit rund 53'000 CHF abgeschätzt (VSG, 2018).

Bei einem Paraffin-Speicher System ist demnach je nach Quellenangabe nur für das Speichermedium bereits mit um den Faktor 2 – 6 höheren Kosten als bei Vergleichssystemen wie Pelletsheizungen, L/W-WP Systemen oder S/W-WP Systemen zu rechnen. Angesichts dieser hohen Kosten scheint der Einsatz eines Paraffin-Speichers als alleiniger Wärmespeicher generell nicht geeignet. Der zusätzliche Einsatz eines Paraffin-Speichers in einer geeigneten Kombination mit anderen Wärmespeichern kann jedoch gewisse Verbesserungen wie eine Reduktion des Speichervolumens bringen, wie mit dem Paraffin-Speicher + eTank System gezeigt werden konnte. In Kapitel 9 werden diese weiteren Einsatzmöglichkeiten besprochen.

## 8.2 Dimensionierung der eTanks

Die Dimensionierung eines eTanks wird in der Realität stark von den lokalen Gegebenheiten wie der Zusammensetzung des Untergrunds oder dem Vorhandensein von Wasserleiter oder allfällige Sperrschichten im Untergrund beeinflusst. Auch das Verhältnis von Fläche zu Höhe des eTanks muss geschickt gewählt werden, um das Nachfliessen von genügend Erdwärme in den eTank zu garantieren (Nagel, 2021). In der vorliegenden Arbeit wurde die Höhe der eTanks immer bei 2 m belassen und die Fläche anhand der Deckung des Heizwärmebedarfs und der Einhaltung der Minimaltemperatur von 1°C dimensioniert.

Bei einem 2-eTank System ist davon auszugehen, dass die beiden eTanks aus Platzgründen direkt nebeneinander angeordnet werden, wodurch eine gegenseitige Beeinflussung der eTanks bezüglich der nachfliessenden Erdwärme und somit kleinere Wärmeeinträge nicht zu verhindern sind. Da in Polysun bei der Verwendung mehrerer eTanks diese jeweils als alleinstehend betrachtet werden, fehlt die gegenseitige Beeinflussung in den Simulationen wodurch in der Realität mit tendenziell grösseren eTanks bzw. grösseren Temperaturabsenkungen in den eTanks zu rechnen ist.

### 8.2.1 Minimaltemperatur des eTanks

Um das Einfrieren des eTanks auch in besonders kalten Jahren garantiert zu verhindern ist die Grenze von 1°C eher knapp gewählt. Der Hersteller deematrix Energiesysteme GmbH gibt an, dass ihre eTanks sogar gegen einen Temperaturabfall von unter 3°C gesichert sind (deematrix Energiesysteme GmbH, 2019). In der Realität dürften die eTanks deshalb tendenziell eher grösser als in den Dimensionierungsmatrizen des eTank und des 2-eTank Systems (siehe Abbildung 19 und Abbildung 21) dimensioniert werden. Es bleibt jedoch abzuklären inwiefern das Einfrieren eines eTanks wirklich Schaden an der Isolation oder dem Gebäude anrichten kann, und ob nicht sogar durch eine gezielte Einfrierung und zusätzliche Nutzung der Erstarrungsenthalpie des Wassers (analog zum Eisspeicher) die Speicherkapazität und die Performance der Systeme erhöht werden könnte. Insbesondere im Falle von Sanierungsgebäuden, bei denen der eTank neben dem Gebäude platziert wird, dürfte die Einfrierung unproblematisch sein. In Abbildung 35 ist die Dimensionierungsmatrix des eTank Systems für Sanierungsgebäude mit Fussbodenheizungen im Falle einer erlaubten Einfrierung des eTanks abgebildet. Im Vergleich zu der Begrenzung der Minimaltemperatur bei 1°C (siehe Abbildung 19) wird hier für das Gebäude «San. 35MWh» in allen solaren Einstrahlungskategorien eine bedingte Eignung erzielt.

<b>eTank System (Sanierungsgebäude - Fussbodenheizung)</b>				
Heizwärmebedarf [MWh/a]	Einstrahlungskategorie [kWh/m <sup>2</sup> a]	800	1'050	1'300
20 (San. 20MWh)	SJAZ [-]	6.0	6.0	5.8
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	80	80	70
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	35	35	35
35 (San. 35MWh)	SJAZ [-]	5.1	5.1	5.2
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130	130	130
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	60	60	60
75 (San. 75MWh)	SJAZ [-]	4.8	4.8	4.9
	eTank-Fläche [m <sup>2</sup> ]	130 Heizwärmebedarf nicht gedeckt	130 Heizwärmebedarf nicht gedeckt	130 Heizwärmebedarf nicht gedeckt
	Anzahl PVT-Kollektoren [-]	85	85	85

Abbildung 35: Dimensionierungsmatrix des eTank Systems für Sanierungsgebäude mit Fussbodenheizungen im Falle einer erlaubten Unterschreitung der Minimaltemperatur von 1°C im eTank.

### 8.3 Bildung von Kondenswasser bei aktiver Kühlung

Bei der aktiven Kühlung des Gebäudes kann es vorkommen, dass die Temperatur des Kühlelements (Fussboden oder Radiator) unter die Taupunkttemperatur der Raumluft fällt, und es somit zur Bildung von Kondenswasser am Kühlelement kommt. Um dies und damit verbundene Wasserschäden zu verhindern, sollte auf nicht zu hohe Temperaturunterschiede zwischen Kühlsystem und Raumtemperatur geachtet werden. Laut einer Untersuchung des BFE ist bei geringen Temperaturdifferenzen von 2 bis 6 K und dem Vorhandensein einer mechanischen Lüftung keine Kondensatbildung zu erwarten (Afjei, Dott, & Huber, 2007). In der vorliegenden Arbeit wurde die Begrenzung der Kühlelement-Temperatur jedoch nicht implementiert, weshalb bei realen Systemen mit einer etwas längeren Laufzeit der aktiven Kühlung bei gedrosselter Leistung zu rechnen ist.

### 8.4 Reduktion der Anzahl PVT-Kollektoren

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Variation der Anzahl PVT-Kollektoren. Neben der Anschaffung der Kollektoren sind die grössten Kostenpunkte die Installation der Anlage, die Leitungen für Strom und Wärme, die Pumpen sowie die Wechselrichter. Diese Kosten fallen auch bereits bei geringer Anzahl an PVT-Kollektoren an. Es stellt sich also die Frage ob es nicht sinnvoll ist die ganze Dachfläche zu nutzen, um eine möglichst hohe SJAZ zu erreichen, auch wenn das System gut mit weniger Kollektoren auskommen würde. Als weitere Möglichkeit kann auch der nicht für die PVT-Kollektoren genutzte Teil des Daches mit PV-Modulen eingedeckt werden, was den Netzbezug senken würde, ohne die Investitionskosten stark zu vergrössern.

### 8.5 Beurteilung des Komponentenaufwands

Die Punktevergabe bei der Beurteilung des Komponentenaufwands (siehe Kapitel 3.4.2.2) sowie die Einteilung in die verschiedenen Eignungskategorien (siehe Kapitel 3.4.2.3) für die Dimensionierungsmatrizen, wurde anhand verschiedener Beispielsysteme und der Festlegung in welche Eignungskategorie diese fallen sollen, festgelegt. Auch die Vergabe der «Strafpunkte» für Grabungen neben dem Gebäude oder aufgrund der höheren Kosten gewisser Speichertechnologien, wurde nicht exakt auf quantitative Werte gestützt, sondern mit den ungefähr zu erwartenden Speicherkosten der Technologien (siehe Tabelle 11) und den Beispielsystemen und deren zu erreichenden Eignungskategorien begründet. Um die Auswirkungen dieser Punktevergabe auf die Einteilung in die jeweiligen Eignungskategorien zu untersuchen wäre eine Sensitivitätsanalyse sinnvoll. Vor allem bei der Unterscheidung zwischen Neubauten und Sanierungsgebäuden ist die Auswirkung der Punktevergabe deutlich sichtbar, da die Systeme in Neubauten generell deutlich besser bewertet werden (Einfachere Einplanung des Speichervolumens beim Gebäudebau / Möglichkeit eTank unter dem Gebäude zu platzieren usw.). Deshalb fallen die Systeme in Neubauten

trotz höherem Komponentenaufwand oftmals in eine bessere Eignungskategorie als in Sanierungsgebäuden bei kleinerem Komponentenaufwand.

## 8.6 Anwendung der Dimensionierungsmatrizen

Die erarbeiteten Dimensionierungsmatrizen sollen als erste, grobe Abschätzung der Eignung der Systeme sowie der benötigten Komponenten dienen und nicht als alleinige Planungsgrundlage herangezogen werden. Eine genaue fachmännische Auslegung der jeweiligen Komponenten wurde nicht vorgenommen. Werden konkrete Projekte betrachtet, bei denen die Platzverhältnisse neben dem Gebäude, im Untergeschoss oder auf dem Dach der Gebäude stark von den in dieser Arbeit definierten Randbedingungen abweichen, ist eine genauere Betrachtung der Eignung der Systeme erforderlich.

### 8.6.1 Standort der betrachteten Systeme

Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben wird zur Festlegung der Grenzwerte für den spezifischen jährlichen Heizwärmebedarf der Standort Zürich mit einer Jahresmitteltemperatur von 9.4°C gewählt, da dieser die grösste Gebäudedichte in der Schweiz aufweist. Für die bevölkerungsreichsten Regionen der Schweiz liegt der Grenzwert ungefähr im Bereich von +/- 5 % des gewählten Grenzwertes der Stadt Zürich. Werden jedoch Anlagen in Regionen mit einer von Zürich stark abweichenden Jahresmitteltemperatur (z.B. alpine Regionen) betrachtet, werden auch die Grenzwerte des spezifischen Heizwärmebedarfs abweichen, wodurch die Anwendbarkeit der Dimensionierungsmatrizen allenfalls nicht mehr gegeben ist.

## 8.7 Korrektheit der Resultate

Da die Simulationsmodelle nicht tiefgründig von weiteren Personen überprüft wurden, und die Simulationsresultate auch nicht mit Messresultaten eines realen Systems verglichen werden konnten, sind gewisse Unsicherheiten in den angegebenen Resultaten möglich. Es ist nicht auszuschliessen, dass die Modelle Fehler beinhalten, die die Simulationsresultate beeinflussen könnten. Zusätzlich wurden die Modelle noch keinem längeren Optimierungsprozess unterzogen, weshalb das Verbesserungspotential der betrachteten Systeme noch nicht ausgeschöpft ist. Ausserdem sind die Steuerungen der Komponenten in den Modellen zum Teil komplex aufgebaut und benötigen Temperatur und Durchfluss-Sensoren an verschiedensten Orten im Gebäude. Für ein reales System ist damit zu rechnen, dass diese Steuerungen weniger komplex aufgebaut werden würden, was sich schlussendlich ebenfalls auf die erreichten Kennzahlen auswirkt.

## 9 Ausblick

In diesem Kapitel wird ein Ausblick darüber gegeben, welche weiterführenden Untersuchungen zukünftig sinnvoll und spannend sein könnten.

- **Weitere Einsatzmöglichkeiten / Optimierungspotenzial eines Paraffin-Speichers:**  
In der vorliegenden Arbeit wurde der Paraffin-Speicher als alleiniger Wärmespeicher sowie in Kombination mit einem eTank untersucht. Es ist aber durchaus möglich, dass es noch weitere sinnvolle Kombinationen gibt, die in dieser Arbeit nicht betrachtet wurden. Insbesondere bei der Verwendung von konzentrierender Solarthermie dürfte aufgrund der höheren Kollektor-Austrittstemperatur ein Paraffin-Speicher mit einer hohen Schmelztemperatur die Speicherkapazität des Systems erhöhen. Ausserdem sollte untersucht werden, weshalb das Paraffin-Speicher + eTank System gegenüber dem eTank System wie in Kapitel 6.6.1 beschrieben schlechter abschneidet bzw. woher die hohe Differenz in der Laufzeit der aktiven Kühlung kommt.

Neben dem Einsatz von Paraffin als alleiniger Wärmespeicher, kann auch ein Paraffin/Wasser-Gemisch im gleichen Speicher verwendet werden. Dabei wird Paraffin entweder in abgeschotteten Kapseln oder als Emulsion dem Wasser beigemischt (Deutschland Patentnr. EP2127737A2, 2009). Laut dem Patent liegt der Vorteil darin, dass in einem gewissen Temperaturbereich (Schmelzbereich des Paraffins) im Vergleich zu reinem Wasser eine höhere Speicherdichte erzielt werden kann, wobei aber trotzdem noch die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser genutzt werden kann. Ein solcher Speicher könnte bei geeignetem Einsatz und Steuerung das Speichervolumen eines herkömmlichen Wasser-Pufferspeicher erhöhen oder die negativen Aspekte der Paraffine (kleinere Dichte, kleinere spez. Wärmekapazität usw.) ausgleichen.

Weiteres Verbesserungspotential bietet auch die Modellierung des Paraffin-Speichers. Vor allem die exakte Dimensionierung und Anordnung der Wärmeübertrager sowie ein optimales Verhältnis von Höhe zu Breite des Speichers könnten die Systemresultate bei der Verwendung eines Paraffin-Speichers positiv beeinflussen. Zusätzlich sollte auch der Grund für den geringen Einfluss des Schmelzpunktes des Paraffins noch genauer untersucht werden (siehe Kapitel 5.4.1).

- **Untersuchung der Kosten der Speichertechnologien:**  
Bis anhin wurden nur die ungefähren Speicherkosten der jeweiligen Wärmespeichertechnologien betrachtet. Es wäre spannend die exakten, finanziellen Einflüsse der jeweiligen Systeme zu bestimmen (inkl. Unterscheidung des Einflusses der PVT-Anlage gegenüber dem Wärmespeicher) um somit noch genauere Aussagen darüber treffen zu können, ob sich die Systeme auch finanziell eignen und mit anderen Heiz- und Kühlsystemen finanziell konkurrenzfähig sind. Die Tatsache, dass die Kosten eines Paraffin-Speichers bei hohem Speichervolumen schnell in die Höhe schiessen können und deshalb diese Systeme trotz der Vergabe einer «guten Eignung» eventuell finanziell nicht konkurrenzfähig sind, wird in Kapitel 8.1.3 besprochen.

Weiter wäre es spannend die Betriebskosten der jeweiligen Systeme über einen gewissen Zeitraum zu betrachten und in Relation zu herkömmlichen Heizsystemen zu setzen, um die potenziellen Einsparungen über die Betriebsdauer abzuschätzen. Durch eine genaue Bestimmung der Installations- und Betriebskosten könnte auch, wie in Kapitel 8.5

besprochen, die Bewertung des Komponentenaufwand und die Einteilung der Systeme in die verschiedenen Eignungskategorien exakter definiert werden.

- **Allgemeine Optimierungsmöglichkeiten der Modelle:**

Als Optimierungsmöglichkeit der Modelle könnte zusätzlich die Begrenzung der Vorlauftemperatur des Heizungswassers in die Heiz- und Kühlelemente während der aktiven Kühlung implementiert werden. Um die Bildung von Kondenswasser zu verhindern, sollte diese Temperatur wie in Kapitel 8.3 beschrieben, nicht mehr als 6 K unterhalb der Raumtemperatur liegen.

Weiter kann die Anzahl an Steuerungen reduziert werden, indem mehrere Komponenten mit der gleichen Steuerung angesteuert werden. Auch steuerungstechnisch gibt es noch Optimierungspotential wie zum Beispiel bei den Ein- und Ausschalt-Temperaturdifferenzen. Durch eine geschicktere Wahl der Temperaturdifferenzen könnten evtl. die Ein- und Ausschaltfrequenzen einzelner Systemkomponenten noch gesenkt werden und so die Systeme realitätstauglicher gestaltet werden.

Weiter könnte probiert werden möglichst viele Wärmeübertrager wegzulassen, um Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Kreisläufen und die dadurch entstehenden Exergieverluste zu verhindern.

Da sich die Betriebskosten eines Systems primär im Netzbezug widerspiegeln, sollte weiter untersucht werden, wie dieser gesenkt werden kann. Eine Möglichkeit könnte hier der Einsatz von Batteriespeichern bieten, um den produzierten PV-Strom besser selbst nutzen zu können. Eine andere Möglichkeit wäre die Verschiebung des WP-Betriebes auf sonnenreiche Zeiten (Sperrzeiten einstellen), damit diese direkt mit dem PV-Strom betrieben werden kann. Auch weitere Massnahmen, die den Betrieb der WP effizienter machen, sollten untersucht werden. Besonders zu nennen ist hier die Reduktion des Temperaturhubs, indem entweder die Temperatur der Wärmequelle erhöht wird (zusätzlich konzentrierende Solarthermie) oder die Temperatur der Wärmesenke gesenkt wird (Vorlauftemperatur des Heizkreises senken).

- **Weitere Untersuchungen zum eTank:**

Um die Performance der Systeme mit eTank weiter zu steigern wäre es sinnvoll die gezielte Einfrierung des eTanks und dadurch zusätzliche Nutzung der Erstarrungsenthalpie des Wassers (analog zum Eisspeicher) zu untersuchen. Dafür sind Abklärungen bei den Herstellern bezüglich der Materialbeständigkeit der Isolation oder anderen Risiken, die durch eine Volumenausdehnung des Speichermaterials entstehen könnten, nötig. Ausserdem muss im Vorhinein abgeklärt werden, ob und inwiefern Polysun den Phasenübergang des Wassers im Speichermaterial des eTanks bei den Simulationen berücksichtigt.

In den Simulationen des 2-eTank Systems wurde sichtbar, dass vor allem bei grösseren, kompakten Gebäuden der Kühlbedarf geringer ist und somit der der Kühl-eTank ebenfalls für die Beladung mit Wärme aus den PVT-Kollektoren freigegeben werden könnte, anstatt ihn nur als Wärmesenke der aktiven und passiven Kühlung zu verwenden. Alternativ kann bei grösseren Gebäuden der Kühl-eTank im Vergleich zum Solar-eTank auch kleiner dimensioniert werden.

Weiter könnte untersucht werden, inwiefern mehrere Gebäude mit eTanks in einem Verbundnetz kombiniert und somit die Performance der einzelnen Systeme erhöht werden kann. Eine Möglichkeit wäre, dass im Sommer mehrere Gebäude einen eTank zusammen durch die PVT-Kollektoren erwärmen, um die restlichen eTanks für die passive Kühlung auf einem tiefen Temperaturniveau zu halten. Sobald der erste eTank «geladen» ist, wird der nächste zur Beladung durch die PVT-Kollektoren freigeschaltet.

## 10 Literaturverzeichnis

- Afjei, T., Dott, R., & Huber, A. (2007). *Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen*. Bern: BFE.
- Arpagaus, C. (2018). *Hochtemperatur-Wärmepumpen*. VDE.
- BAFU. (2009). *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund*.
- Baudirektion Kt. ZH. (2018). *Energie in Wohnbauten 2018*.
- Baudirektion Kt. ZH. (2009). *Einführungskurs Systemnachweis für Baufachleute*.
- Bergan, P. G., & Greiner, C. J. (2014). A new type of large scale thermal energy storage. *Energy Procedia*, S. 152-159.
- BFE. (2020). *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2019 nach Verwendungszwecken*.
- BFS. (2016). *Bevölkerungsdichte 2016*. Von [https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/de/12614\\_75\\_3501\\_70/20695.html](https://www.atlas.bfs.admin.ch/maps/13/de/12614_75_3501_70/20695.html) abgerufen
- BFS. (2017). *Heizsystem und Energieträger*.
- BFS. (2020). *Wohngebäude nach Bauperiode und Anzahl Wohnungen im Gebäude*. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen/gebaeude/groesse.assetdetail.14407251.html> abgerufen
- BFS. (2020). *Wohnungsgrösse*. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen/wohnungen/groesse.html> abgerufen
- BMS. (2012). *Flyer - Latentspeichersysteme*.
- Bockelmann, F., Peter, M., & Schlosser, M. (2019). *Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen*. Technische Universität Braunschweig.
- Braun, A. (Mai 2015). *Energiespeicher*. Von <https://ei.hs-duesseldorf.de/personen/braun/lehre/Documents/Energiespeicher%20SS15/Energiespeicher%2005%20-%20Latente%20Waermespeicher.pdf> abgerufen
- Brücker, S. (2015). *Nutzereinflüsse und der Einfluss auf den effektiven Energieverbrauch im Vergleich zur Berechnung SIA 380/1*. Horw.
- Brunner, K. P. (2019). *Klimakälte heute*. Zürich : Energie Schweiz.
- Bucher, T. (2014 ). *Vorstudie Saisonale Energiespeicher*. NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs.
- Cercle Bruit. (2018). *Lärmrechtliche Beurteilung von Luft/Wasser-Wärmepumpen*.
- Cremer, J., Eicker, U., Fiedler, S., & Baumgartner, S. (2010). Beispiel für die Wechselwirkung einer komplexen,. *Special Innovative Fassadentechnik*.
- deematrix Energiesysteme GmbH. (2012). *Wir verkaufen kein Heizsystem. Wir schaffen Unabhängigkeit*.
- deematrix Energiesysteme GmbH. (2019). *Offener Pufferspeicher*. Von <http://www.etank.de/etank-funktion/etank-offener-pufferspeicher/> abgerufen



- Deutschlandfunk. (2006). *Tolle Idee! – Was wurde daraus?* Von [https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus.676.de.html?dram:article\\_id=23469](https://www.deutschlandfunk.de/tolle-idee-was-wurde-daraus.676.de.html?dram:article_id=23469) abgerufen
- Dietrich, J. (August 2017). Heatcrete - Ein Spezialbeton für die Hochtemperatur-Wärmespeicherung. *NewsletterTechnik*.
- Dott, R., Ackermann, C., Koch, M., Messmer, C., Afjei, T., & Eismann, R. (2019). *LEWASEF - Leistungsgeregelte Wärmepumpenanlagen mit Solar-Eisspeicher und Fotovoltaik*. BFE.
- Dualsun. (2020). *Spring – Leistungsmerkmale*. Von <https://dualsun.com/de/produkt/leistungsmerkmale/> abgerufen
- ee-news. (2017). *Saisonale Wärmespeicherung: Überblick über verfügbare Techniken*. Von <https://www.ee-news.ch/de/article/37187/saisonale-warmespeicherung-ueberblick-ueber-verfuegbare-techniken#:~:text=Laut%20den%20Berechnungen%20von%20Plan,von%203.5%20Eurocent%20FkWh%20entspricht.> abgerufen
- EnDK. (2018). *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE)*.
- energie schweiz. (2015). *Ermittlung der Wärmeerzeugerleistung*.
- energie schweiz. (2015). *Wärmepumpen Dimensionierungshilfe*.
- energie Schweiz. (2017). *PVT Wrap-Up. Energiesysteme mit Photovoltaisch-Thermischen Solarkollektoren*.
- energie schweiz. (2018). *Solarstrom-Eigenverbrauch optimieren*.
- energieheld. (2021). *Preise und Einbau - Kosten für eine Heizung in der Schweiz*. Von <https://www.energieheld.ch/heizung/kosten> abgerufen
- EnergyNest. (2018). *Frequently Asked Questions*. Von <https://energy-nest.com/faq/> abgerufen
- EnFK. (2018). *Wärmeschutz von Gebäuden*.
- ETH-RAT. (2012). *Die Sommersonne im Beton*. Von <https://www.ethrat.ch/de/sektion-medien-news/die-sommersonne-im-beton> abgerufen
- eZeit Ingenieure. (2007). *eTank Entwicklung, Berechnung, Erprobung*. Von <https://ezeit-ingenieure.de/projekt/etank-erdpufferspeicher-langzeitenergiespeicher/> abgerufen
- FASA AG. (2021). *Aktiv Sonnenhaus - Solarer Deckungsgrad*. Von <https://aktivsonnenhaus.de/informationen/baulexikon/solarer-deckungsgrad/> abgerufen
- Frigoteam. (2019). *Thermische Energiespeicher mit PCM-Latentspeichertechnologie*.
- Fumey, B. (2015). *Langzeitlösung Chemische Speicher*. EMPA.
- Fürst, B. (2018). *Das eTank-System -Energie neu denken*. Von <https://docplayer.org/70756156-Das-etank-system-energie-neu-denken.html> abgerufen
- FWS. (2019). *Statistik 2019*.
- Gaegauf, C., Sattler, M., Dorer, V., Orehounig, K., Zweifel, G., Bless, C., . . . Duce, A. D. (2016). *SPEQUA – Thermische und elektrische Speicher in Gebäuden und Quartieren*. BFE.

- Gasser, B. (23. März 2021). Befüllfrequenz von Heizöltanks in Mehrfamilienhäusern. (M. Rosso, Interviewer)
- Gasser, L. (2019). *Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Bestand*. AHB Zürich.
- Haller, M., & Ruesch, F. (2019). *Fokusstudie "Saisonale Wärmespeicher - Stand der Technik und Ausblick"*. Forum Energiespeicher Schweiz.
- Hartmann, C., & Jakob, M. (2016). *Methodik zur Berechnung der kantonalen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudebereich auf Basis des Gebäude- und Wohnungsregisters (GWR)*. BAFU.
- Hauer, A. (2002). *Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen*. Berlin.
- HM Heizkörper. (2017). *Die Thermobatterie - Wärmemit Zukunft*. Von <https://hm-heizkoerper.de/die-thermobatterie/> abgerufen
- Huang, L., Pollerberg, C., Noeres, P., Doetsch, C., & Sengespeik, A. (2009). *Deutschland Patentnr. EP2127737A2*.
- Humm, O. (2017). *Sonnenenergie, Solaranlagen im Minergie-Gebäude*. Minergie Schweiz, Swissolar.
- IKZ-FACHPLANER. (2007). *Langfristige Wärmespeicherung*.
- Jenni Energietechnik. (2020). *Energiespeicher Swiss Solartank*. Von <https://www.jenni.ch/swiss-solartank.html> abgerufen
- Kanton Luzern. (2021). *Planungs- und Baugesetz (PBG)*.
- Kaufmann, J., & Winnefeld, F. (2019). Seasonal heat storage in calcium sulfoaluminate based hardened cement pastes – experiences with different prototypes. *Journal of Energy Storage*.
- Kaumann, J., & Winnefeld, F. (2011). *Schweiz Patentnr. WO/2011/147748*.
- KKA. (2017). *Kälte Klima Aktuell - Eisspeicher und Wärmepumpen*.
- Klingler, G., Ott, W., & Rom, N. (2011). *Die Zukunft leitungsgebundener Energieversorgungssysteme*. BFE.
- Lane, G. A. (1986). *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*.
- Loistl, F., Timo, K., & Schweigler, C. (2017). *Latentwärmespeicher für Luft/Luft-Wärmepumpen*.
- Marten, N. (Juni 2012). Solar heizen und kühlen - ganzjährig! *green building*, S. 47 - 49.
- Minder, S., Hefti, R., Ettl, N., & Weisskopf, T. (2016). *Eisspeicher-Wärmepumpenanlagen mit Sonnenkollektoren*. energie schweiz.
- Minder, S., Wagner, R., Mühlebach, M., & Weisskopf, T. (2014). *Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren*. energie schweiz.
- Morhart, A. (2008). Alternativen zum Stahltank. *Sonne Wind & Wärme*.
- Nagel, M. (30. März 2021). Informationen zum eTank. (M. Rosso, Interviewer)
- Rosso, M. (2021). *Simulation eTank (unveröffentlicht)*. Wädenswil.
- Rubitherm. (April 2021). *PCM RT-Serie*. Von <https://www.rubitherm.eu/produktkategorien.html> abgerufen

- Sauter, D., Hunziker, M., Poppel, J., Cochand, F., Hubbuch, M., Moro, N., & Rohrer, J. (2020). *SolSeasStore - Saisonale Wärmespeicherung in städtischen Quartieren mit Erdwärmesonden*.
- Sauter, D., Hunziker, M., Schubert, M., Sperr, N., Koch, M., & Rohrer, P. J. (2020). *L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe*.
- Scheffler, F. (2019). Thermische Energiespeicher – Trends, Entwicklungen und Herausforderungen. *Chemie Ingenieur Technik*.
- SHK Profi. (2019). *Wärmespeicher für mehr Effizienz*. Von [https://www.shk-profi.de/artikel/shk\\_Waermespeicher\\_fuer\\_mehr\\_Effizienz\\_3473627.html](https://www.shk-profi.de/artikel/shk_Waermespeicher_fuer_mehr_Effizienz_3473627.html) abgerufen
- Streicher, W. (2007). *Fortschrittliche Wärmespeicher*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Swissolar. (2016). *Wärme und Strom mit der Kraft der Sonne*.
- Swissolar. (28. März 2018). *Immer beliebter: Wärme und Strom vom selben Dach*. Von <https://www.swissolar.ch/services/medien/news/detail/n-n/immer-beliebter-waerme-und-strom-vom-selben-dach/> abgerufen
- ub.de Fachwissen GmbH. (2020). *Solarer Deckungsgrad*. Von <https://www.solarthermie.net/wissen/solarer-deckungsgrad> abgerufen
- Varga, M., Meier, N., Sitzmann, B., Tornay, C., & Wanner, A. (2018). *Heizungersatz durch Luft-Wasser-Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern*. energie schweiz.
- VDI-Gesellschaft. (2013). *VDI-Wärmeatlas*. Berlin: Springer-Verlag.
- Vela Solaris & ZHAW. (2016). *Internationale Konferenz zur Simulation gebäudetechnischer Energiesysteme*. Winterthur.
- Vela Solaris AG. (2019). *Polysun Simulation Software: Benutzerhandbuch*.
- Viessmann. (2019). *Planungsanleitung - Vitofriocal Eisspeichersystem*.
- Viessmann. (2020). *Datenblatt Vitocal 300-G / 350-G*.
- VSG. (2018). *Kostenvergleich Heizsysteme*. Von [https://www.aen.ch/upload/rm/heizkostenvergleich-2018.pdf?\\_=1601550978000](https://www.aen.ch/upload/rm/heizkostenvergleich-2018.pdf?_=1601550978000) abgerufen
- Wagner, W., & Jähmig, D. (2006). *Modularer Energiespeicher nach dem Sorptionsprinzip mit hoher Energiedichte (MODESTORE)*.

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines kombinierten Heiz- und Kühlsystems mit PVT-Kollektoren als Energiequelle, einer Wärmepumpe (WP) als Wärmeerzeuger und einem Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Die PVT-Module und der Pufferspeicher dienen zusätzlich als Wärmesenke für die Kühlung des Gebäudes.	2
Abbildung 2: Qualitativer Verlauf des Wärmebedarfs zur Gebäudeheizung und Warmwassererzeugung eines Gebäudes und des Solarstrahlungsangebotes für einen exemplarischen Mittellandstandort in der Schweiz über ein Jahr (Haller & Ruesch, 2019).	7
Abbildung 3: Anzahl Gebäude im Gebäudepark Schweiz pro Anzahl Wohnungen im jeweiligen Gebäude, Datenquelle: (BFS, 2020).	12
Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der Wohn-Gebäude im Gebäudepark Schweiz nach Wohnfläche, Datenquelle: (BFS, 2020).	12
Abbildung 5: Prozentuale Aufteilung der Wohn-Gebäude in der Schweiz nach Wohnfläche. Die senkrechten roten Linien bezeichnen die Sanierungsgebäude mit einem jährlichen Heizwärmebedarf von 20, 35 und 75 MWh.	13
Abbildung 6: Verfügbare Fläche für einen eTank neben einem der ausgewählten Gebäude aus «SolSeasStore» im Katasterplan von Zürich in GIS.	18
Abbildung 7: Beispiel einer Dimensionierungsmatrix für ein Beispiel-System eingesetzt in Sanierungsgebäuden.	23
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines eTank Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und einem eTank neben dem Gebäude als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP).	32
Abbildung 9: Hydraulischer Aufbau des eTank Systems mit der Verwendung des eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung.	32
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines 2-eTank Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und den beiden eTanks neben dem Gebäude als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP) und Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren bzw. Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung.	33
Abbildung 11: Hydraulischer Aufbau des 2-eTank-Systems mit der Verwendung der eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als primäre Wärmequelle für die S/W-WP (Solar-eTank) sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung und als sekundäre Wärmequelle für die S/W-WP (Kühl-eTank).	34
Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Eisspeicher Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und dem im Erdreich eingelassenen Eisspeicher neben dem Gebäude als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung.	35
Abbildung 13: Hydraulischer Aufbau des Eisspeicher Systems mit der Verwendung des Eisspeichers als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung.	36
Abbildung 14: Schematische Darstellung eines Paraffin-Speicher Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und dem im Erdreich eingelassenen Paraffin-Speicher neben dem Gebäude als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmesenke für die passive und aktive Kühlung.	37
Abbildung 15: Hydraulischer Aufbau des Paraffin-Speicher Systems mit der Verwendung des Paraffin-Speichers als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive und die passive Kühlung.	38

Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Paraffin-Speicher + eTank Systems inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und dem eTank neben dem Gebäude bzw. dem Paraffin-Speicher im Untergeschoss des Gebäudes als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und Wärmesenke für die passive Kühlung.	41
Abbildung 17: Hydraulischer Aufbau des Paraffin-Speicher + eTank Systems (Variante «Speicherkapazität im Winter erhöhen») mit der Verwendung des eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren, als primäre Wärmequelle für die S/W-WP sowie als Wärmesenke für die aktive Kühlung über die WP. Der Paraffin-Speicher wird neben den PVT-Kollektoren als Wärmesenke für die passive Kühlung sowie als sekundäre Wärmequelle für die S/W-WP verwendet und kann ebenfalls über die PVT-Kollektoren geladen werden.	42
Abbildung 18: Hydraulischer Aufbau des Paraffin-Speicher + eTank Systems (Variante «Speicherkapazität bei aktiver Kühlung erhöhen») mit der Verwendung des eTanks als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren sowie als primäre Wärmequelle für die S/W-WP. Der Paraffin-Speicher wird neben den PVT-Kollektoren als Wärmesenke für die passive Kühlung, als Wärmesenke für die aktive Kühlung über die WP sowie als sekundäre Wärmequelle für die S/W-WP verwendet.	43
Abbildung 19: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das eTank System (siehe Abbildung 8) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.	46
Abbildung 20: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das eTank System (siehe Abbildung 8) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.	47
Abbildung 21: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das 2-eTank System (siehe Abbildung 10) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.	48
Abbildung 22: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das 2-eTank System (siehe Abbildung 10) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.	49
Abbildung 23: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das Eisspeicher System (siehe Abbildung 12) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.	50
Abbildung 24: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das Eisspeicher System (siehe Abbildung 12) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.	51
Abbildung 25: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher System (siehe Abbildung 14) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.	51
Abbildung 26: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher System (siehe Abbildung 14) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.	52
Abbildung 27: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher + eTank System (siehe Abbildung 16) in Sanierungsgebäuden und Neubauten mit Fussbodenheizungen.	53
Abbildung 28: Simulationsresultate und Dimensionierungsmatrix für das Paraffin-Speicher + eTank System (siehe Abbildung 16) in Sanierungsgebäuden mit Radiatorheizungen.	54
Abbildung 29: Eignung der jeweiligen Systeme für die 6 betrachteten Gebäudekategorien mit Fussbodenheizungen bei der solaren Einstrahlungskategorie von 1'050 kWh/ m <sup>2</sup> a inkl. jeweiligem Komponentenaufwand und erreichter SJAZ.	54
Abbildung 30: Eignung der jeweiligen Systeme für die 3 betrachteten Sanierungsgebäude mit Radiatorheizungen bei der solaren Einstrahlungskategorie von 1'050 kWh/ m <sup>2</sup> a inkl. jeweiligem Komponentenaufwand und erreichter SJAZ.	56
Abbildung 31: Vergleich des eTank Systems, des 2-eTank Systems und des Paraffin-Speicher + eTank Systems anhand dem jährlichen, gesamten Stromverbrauch, dem jährlichen Netzbezug an elektrischer Energie sowie der SJAZ.	58
Abbildung 32: Schematische Darstellung des 2SOL Systems (links) inkl. passiver Kühlung über die PVT-Kollektoren und einer Erdwärmesonde (EWS) neben dem Gebäude als Pufferspeicher für die Wärme aus den PVT-Kollektoren und als Wärmequelle und Wärmesenke für eine Wärmepumpe (WP). Auf der rechten Seite ist das L/W-WP System dargestellt inkl. aktiver Kühlung über den	

Rückkühler auf dem Dach und Verdampfeinheit der Wärmepumpe (WP) neben dem Gebäude zur Nutzung der Luft als Wärmequelle.	59
Abbildung 33: Monatliche Aufteilung des Netzbezuges an elektrischer Energie der 5 in dieser Arbeit betrachteten Systeme und der 2 Vergleichssysteme (L/W-WP System und 2SOL System).	61
Abbildung 34: Solarer Deckungsgrad pro Monat der 5 in dieser Arbeit untersuchten Systeme und des 2SOL Systems.	62
Abbildung 35: Dimensionierungsmatrix des eTank Systems für Sanierungsgebäude mit Fussbodenheizungen im Falle einer erlaubten Unterschreitung der Minimaltemperatur von 1°C im eTank.	69