

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN (IUNR)

**Optimierungsmöglichkeiten in einem Heizungssystem mit
Sole/Wasser-Wärmepumpe und PVT Kollektoren
(Simulationsstudie mit Polysun)**

Bachelorarbeit

von

Hunziker Manuel

Bachelorstudiengang: Umweltingenieurwesen

Abgabedatum: 23.08.2018

Studienrichtung: Nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energien

Fachkorrektorin:

Maike Schubert

ZHAW Life Sciences und Facility Management, Grüental, 8820 Wädenswil

Fachkorrektor:

Martin Koch

ZHAW Life Sciences und Facility Management, Grüental, 8820 Wädenswil

Zusammenfassung

Ein neues, auf einer Sole/Wasser-Wärmepumpe beruhendes und Nachteile etablierter Wärmepumpensystem (WP-System) wie Lärmemissionen oder hohe Investitionskosten vermeidendes Heizsystem ist L-Sol. In dieser Arbeit wird, mit Blick auf eine Systemoptimierung, der Einfluss unterschiedlicher Speichergrößen und der Einsatz einer Wärmerückgewinnung (WRG) aus Abwasser untersucht, sowie das Optimierungspotenzial von PCM abgeschätzt.

Neben dem Standardmodell des L-Sol Systems wurden zwei Alternativen ausgearbeitet. Während die eine auf dem originären Zwei-Speicher-Prinzip für Brauchwarmwasser (BWW) und Heizwarmwasser (HWW) beruht, wird bei der zweiten ein Kombispeicher eingesetzt. Beide Alternativen sind mit einer Frischwasserstation versehen. Für die Einbindung einer WRG aus dem Abwasser wurden je zwei Lösungen zur Einbindung in die Produktions- und Bezugsseite verwendet. Auf der Bezugsseite diente die passive Rückgewinnung in beiden Fällen der Vorwärmung des BWW. Produktionsseitig dient in einem Fall eine passive WRG der Erwärmung des Kaltwasserspeichers (KW-Speicher) und im anderen eine aktive als zweite Energiequelle für die WP. Zur Prüfung der Realisierbarkeit bei Gebäudesanierungen, welche einen höheren Heizungsenergieverbrauch aufweisen dürfen als Neubauten, wurden sämtliche Simulationen zunächst mit den energetischen Randbedingungen einer Gebäudesanierung durchgeführt. Weil neben dem Baustandard (Saniert vs. Neubau; Lüftung mit vs. ohne Wärmerückgewinnung) auch der Standort resp. die Klimazone die SJAZ massgeblich beeinflussen, erfolgte eine Sensitivitätsanalyse dieser Parameter.

Das L-Sol System lässt sich durch die Verwendung einer Frischwasserstation und der damit einhergehenden Reduktion der BWW-Temperatur deutlich optimieren ($SJAZ > 4$). Während sich die Systemeffizienz durch die Vergrößerung des KW-Speichers steigern lässt (um bis zu 0.5 Einheiten), ist der Einfluss der BWW- und HWW-Speichergrößen vergleichsweise gering, deren Kombination jedoch durchaus relevant (Unterschiede von bis zu 0.2 Einheiten). Dabei zeigt sich der Einsatz eines Kombispeichers anstelle einer Zwei-Speicher-Lösung für die Bereitstellung der Wärme für BWW und HWW in jedem Fall als überlegen oder zumindest ebenbürtig. Mit einer WRG aus dem Abwasser, welche unbedingt geprüft und bei vorhandener baulicher Machbarkeit umgesetzt werden sollte, lassen sich in Kombination mit einer Frischwasserstation SJAZ über 4.2 (ohne WRG um 4.1) realisieren.

Das L-Sol System kann bei optimaler Speicherkonfiguration mit oder ohne WRG aus dem Abwasser in Punkto Effizienz mit marktüblichen Erdsondensystemen mithalten und Luft/Wasser (LW)-WP Systeme klar distanzieren. Dies gilt sowohl für sanierte Gebäude und Neubauten im Schweizer Mittelland und der Alpensüdseite, als auch, mit erforderlichen Modifikationen, für den Alpennordhang.

Abstract

L-Sol is a new heat pump system based on a brine/water heat pump without the disadvantages of established heat pump systems such as noise emissions or high investment costs. In this work, the influence of different storage sizes and the use of heat recovery from waste water is investigated with a view to system optimization. Further the optimization potential of PCM is estimated.

In addition to the standard model of the L-Sol system, two alternatives have been developed. While one is based on the original dual storage principle for domestic and heating hot water, the second uses a combined storage tank. Both alternatives are equipped with a fresh water station. For the integration of an energy recovery unit from the wastewater, two solutions were used for integration into the supply and two for the demand side. On the demand side, passive recovery served to pre-heat the domestic hot water in both cases. On the supply side, passive heat recovery unit is used to heat the cold water storage tank in one case and in the other case an active recovery is used as additional source of energy for the heat pump. To test the feasibility in a renovated building, which may have a higher heat demand than new buildings, all simulations were initially carried out with the energetic boundary conditions of a renovated building. Because, in addition to the construction standard (refurbished vs. new construction; ventilation with vs. without heat recovery), the location and the climate zone also have a significant influence on the SJAZ, a sensitivity analysis of these parameters was carried out.

The L-Sol system can be significantly optimized by using a fresh water station and the associated reduction of the domestic hot water temperature ($SJAZ > 4$). While the system efficiency can be increased by increasing the KW memory (by up to 0.5 units), the influence of the storage size of the domestic hot water and heating hot water tank is comparatively small, but their combination is quite relevant (differences of up to 0.2 units). The use of a combined storage instead of a two-storage solution for the provision of heat for domestic and heating hot water proves to be superior or at least equal in every case. With heat recovery from the wastewater, which must be checked and implemented if constructional feasibility allows it, and in combination with a fresh water station SJAZ above 4.2 (without heat recovery unit around 4.1) is reachable.

With an optimal storage configuration and with or without heat recovery from the wastewater, the L-Sol system can keep up with commercially available geothermal systems in terms of efficiency and clearly distance air/water heat pump systems. This applies both to renovated buildings and new buildings in the Swiss Plateau, the southern side of the Alps and, with the necessary modifications, to the northern slope of the Alps.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	II
ABSTRACT	III
LISTE DER ABKÜRZUNGEN	VI
1 EINLEITUNG	1
1.1 ZIEL DER ARBEIT	2
1.2 AUFBAU DER ARBEIT	2
2 GRUNDLAGEN	3
2.1 DAS L-SOL SYSTEM	3
2.2 EINBETTUNG IN DEN KONTEXT	4
2.2.1 MARKTÜBLICHE WÄRMEPUMPENSYSTEME	4
2.2.2 SOLARTHERMISCHE WP-SYSTEME	5
2.2.3 PVT-MODULE	8
2.3 OPTIMIERUNGSMÖGLICHKEITEN	8
2.3.1 SPEICHERART	8
2.3.2 SPEICHERGRÖSSEN	9
2.3.3 PHASE CHANGING MATERIALS	11
2.3.4 WÄRMERÜCKGEWINNUNG AUS ABWASSER UND ABLUFT	11
2.3.5 WETTER- RESP. SENKUNG DER HEIZAKTIVIERUNGSTEMPERATUR	14
2.4 FORSCHUNGSFRAGEN	14
3 METHODIK	15
3.1 BRAUCHWARMWASSER	15
3.1.1 WASSER- UND ENERGIEBEDARF	15
3.1.2 LEGIONELLENVORBEUGUNG	16
3.1.3 ZAPFPROFIL	16
3.2 HEIZUNGSWÄRME	17
3.2.1 HEIZUNGSWÄRMEBEDARF	17
3.2.2 GEBÄUDE	18
3.2.3 STANDORT	18
3.2.4 HEIZSYSTEM, VORLAUFTEMPERATUR UND SOLL-RAUMTEMPERATUR	18
3.3 SYSTEMKOMPONENTEN	19
3.3.1 PVT-MODULFELD	19
3.3.2 WÄRMEPUMPE	19
	IV

3.3.3	SPEICHER	19
3.3.4	FLUIDE	22
3.3.5	WÄRMERÜCKGEWINNUNG	22
3.4	SIMULATIONSMODELLE	23
3.4.1	VARIANTE A	23
3.4.2	VARIANTE B	25
3.4.3	VARIANTE C	26
3.4.4	WÄRMERÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSER	26
3.4.5	WÄRMERÜCKGEWINNUNG AUS DER LUFT	30
3.5	VORGEHEN	30
3.5.1	DEFINITION DER SIMULATIONSVARIABLEN UND DER PRÜFWERTE	30
3.5.2	SPEICHERGRÖSSEN	30
3.5.3	EINSCHALTTEMPERATUR DER SPEICHERBELADUNG UND TEMPERATURPROGNOSE	31
3.5.4	WÄRMERÜCKGEWINNUNG AUS DEM ABWASSER	31
3.5.5	SENSITIVITÄTEN	31
4	ERGEBNISSE	33
4.1	KALTWASSERSPEICHER	33
4.2	KOMBI-, BRAUCH- UND HEIZWARMWASSERSPEICHER	36
4.3	EINSCHALTTEMPERATUR DER SPEICHERBELADUNG UND TEMPERATURPROGNOSE	37
4.4	ABWASSERWÄRMERÜCKGEWINNUNG	37
4.5	SENSITIVITÄTEN	39
4.5.1	LÜFTUNG MIT WÄRMERÜCKGEWINNUNG	39
4.5.2	NEUBAU	40
4.5.3	STANDORT	41
4.6	PHASE CHANGING MATERIALS	42
5	DISKUSSION	45
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	47
	LITERATURVERZEICHNIS	48
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	54
	TABELLENVERZEICHNIS	56
	ANHANG	57
	POSTER (A4)	60

Liste der Abkürzungen

BWW	Brauchwasser
COP	Leistungskoeffizient
EFH	Einfamilienhaus
H/B	Höhe/Breite
HWW	Heizwarmwasser
KW	Kaltwasser
LW	Luft-Wasser
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
PCM	Phase Change Material
PVT-Module	Photovoltaik (PV) und Solarthermie (T) kombiniert in einem Modul
(S)JAZ	(System)Jahresarbeitszahl
SW	Sole-Wasser
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung

1 Einleitung

Angesichts des Klimawandels ist es unerlässlich fossile durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen und gleichzeitig den Energieverbrauch zu senken. Der Brenn- und Treibstoffverbrauch von Gebäuden macht dabei mehr als 40% des inländischen Energieverbrauches aus (Kemmler u. a., 2016) und hat damit einen bedeutenden Anteil am schweizerischen Treibhausgasausstoss. Das Einsparpotential im Bereich der Gebäude liegt gemäss Jakob u. a. (2016) bei über 50 %. Besonders gross ist das Einsparpotential dabei bei der Wärmeproduktion für die Raumheizung und das Brauchwasser, welche zusammen ca. 90% des Gebäudeenergieverbrauches verursachen. Um diese Senkung des Energieverbrauches und die Umstellung auf erneuerbare Energien zu erreichen, baut die Energiestrategie 2050 in erster Linie auf Effizienz- und Konsistenzstrategien (Der Bundesrat, 2013). D.h. neben der Effizienzsteigerung fördert er naturverträgliche Technologien, welche Leistungen der Ökosysteme nutzen ohne sie zu zerstören.

So konnten sich sowohl Wärmepumpen- (WP), Holzpellet- und Solarthermiesysteme als auch Kombinationen aus diesen, bereits am Markt etablieren. Zwar liefern diese Systeme erneuerbare Energie und schonen die Umwelt, doch weisen sie relativierende Nachteile auf. So ist die Ökobilanz einer Holzpellettheizung zwar besser als jene einer Ölheizung, doch nicht in jedem Fall auch besser als die einer Erdgasheizung (Hasler, Nussbaumer, & Bürli, 2001). Werden beispielsweise konventionell hergestellte Holzpellets verwendet, ist eine Erdgasheizung die umweltschonendere Möglichkeit. Rein solarthermische Systeme zur Bereitstellung von Brauchwarmwasser (BWW) und Heizwarmwasser (HWW) erfordern riesige saisonale Speicher und werden darum nur selten als Heizungsersatz verwendet. Auch WP-Systeme weisen je nach Art unterschiedliche Nachteile auf. So ist z.B. der Betrieb einer Luft/Wasser (LW)-WP mit Lärmemissionen verbunden und bei kalten Aussentemperaturen nur wenig effizienter als reine Elektroheizungen. Erdsondenheizungen weisen hohe Anschaffungskosten auf und können aufgrund des Grundwasserschutzes nicht überall installiert werden.

Aus den genannten Gründen wird in die Entwicklung neuer Systeme investiert, welche effizienter und/oder umweltschonender sind. Eines davon sind z.B. WP-Systeme, welche einen Eisspeicher kombiniert mit Solarkollektoren als Wärmequelle nutzen. Dabei dient die Sonne einerseits und andererseits das Erdreich als Wärmequelle. Bezüglich Umweltbelastung sind sie vergleichbar wie Erdsondensysteme. Sollte jedoch eine Installation im Erdreich nicht möglich sein und eine gebäudeinterne Lösung installiert werden, ist die Umweltbelastung deutlich höher als bei anderen WP-Systemen (Minder, Heft, Ettl, & Weisskopf, 2016). In Bestandsbauten ist eine interne Installation zudem nicht möglich.

Ein ebenfalls neues System, welches auch bei Bestandsbauten eingesetzt werden kann, keine Lärmemissionen verursacht und niedrigere Investitionskosten aufweisen dürfte als Erdsondensysteme, ist L-Sol. Im Gegensatz zu anderen solarthermischen resp. solarthermisch unterstützten Systemen dienen PVT-Module, welche Photovoltaik (PV) und Solarthermie (T) in einer Baueinheit kombinieren, der Bereitstellung der Wärmeenergie. Über einen Pufferspeicher wird durch eine Sole/Wasser-WP das für das BWW und die HWW benötigte Temperaturniveau bereitgestellt.

1.1 Ziel der Arbeit

Mit Blick auf eine Systemoptimierung soll einerseits der Einfluss unterschiedlicher Speichergrößen und einer Wärmerückgewinnung (WRG) aus dem Abwasser und der Luft untersucht und andererseits, weil sanierte Gebäude einen deutlich höheren Energieverbrauch aufweisen können als vergleichbare Neubauten, die Realisierbarkeit des L-Sol Systems für Gebäudesanierungen geprüft werden. Zudem erfolgt eine Potenzialabschätzung für die Verwendung von Phase Changing Materials (PCM) in den Speichern.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 soll das L-Sol System zunächst vorgestellt (2.1) und eine effizienzbezogene Einbettung in den Kontext der Konkurrenzsysteme (2.2) vorgenommen werden. Darauf folgend werden Optimierungsmöglichkeiten anhand aktueller Forschungsarbeiten aufgezeigt (2.3), diskutiert und die daraus resultierenden Forschungsfragen aufgezeigt (2.4). Im Kapitel 3 wird das methodische Vorgehen detailliert beschrieben. Das Vorgehen bei der Bestimmung des Energiebedarfes für BWW und HWW (3.1 und 3.2), der Wahl und Konfiguration der Systemkomponenten (3.3) und die simulierten Modelle (3.4) sowie das Vorgehen bei der Simulation werden referiert. Nach dem Bericht der Simulationsergebnisse in Kapitel 4 erfolgt in Kapitel 5 und 6 deren vergleichende Bewertung und eine Diskussion der allfälligen Implikationen für die weitere Entwicklungsarbeit des L-Sol Systems und Folgestudien.

2 Grundlagen

2.1 Das L-Sol System

L-Sol ist ein Heizungssystem welches sowohl die solare Einstrahlung als auch die Umgebungswärme als Energiequelle nutzt (Abbildung 1). Durch die Verwendung von PVT-Modulen anstelle von Flach- oder Röhrenkollektoren wird zudem elektrische Energie produziert, welche teilweise direkt selbst verbraucht und so nicht über das Stromnetz bezogen wird.

Über eine WP wird sowohl warmes BWW als auch HWW bereitgestellt. Ein grosser, über die PVT-Module gespeisener Kaltwasserspeicher (KW-Speicher) dient der WP dabei als einzige Energiequelle. Aufgrund der unterschiedlichen Wasserqualität ist der Heiz- vom Frischwasserkreislauf durch die Verwendung von je einem Speicher für das BWW und das HWW getrennt. Sie dienen einerseits als Puffer- als auch als Zwischenspeicher beim Beladen des jeweils anderen Speichers.

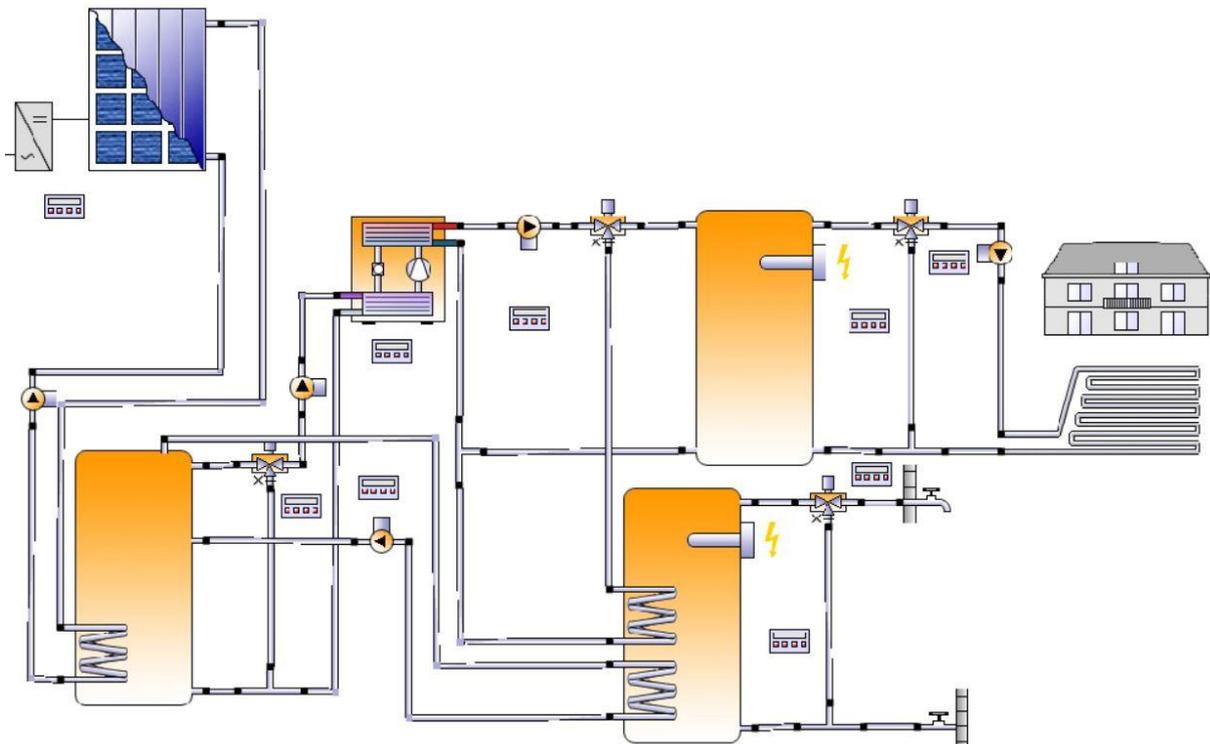


Abbildung 1 Systembild des L-Sol Systems mit dem KW-Speicher (l.) und den Speichern für BWW (r.u.) und HWW (r.o.).

Während Wasser sowohl im Trinkwassersystem als auch im Heizkreislauf als Wärmeträgermedium dient, wird kollektorseitig ein Glykol/Wasser-Gemisch eingesetzt. Dies dient der Verhinderung des Einfrierens des Fluides. Je höher dabei der Glykolanteil im Gemisch ist, desto

tiefer kann die Speichertemperatur gesenkt werden. Die Beimischung von Glykolen senkt neben dem Gefrierpunkt jedoch auch die thermische Kapazität des Gemisches (Verein Deutscher Ingenieure, 2013). Der Glykolanteil am Fluidgemisch sollte aus energetischer Sicht also so tief wie möglich gehalten werden. Eine Propylenglykol-Wassermischung von 35/65 verhindert das Stocken des Fluides bis ca. -20 °C und bietet sich im Fall von L-Sol als Speichermedium an. So lässt sich die Temperatur im KW-Speicher bis auf -17 °C senken, was besonders während den Wintermonaten den Betrieb der WP ermöglicht.

Sowohl der BWW- als auch der HWW-Speicher sind mit einer elektrischen Zusatzheizung (3 kW resp. 6 kW) versehen. Steht der WP nicht genug Wärmeenergie zur Verfügung springen sie ein und garantieren einerseits die Wärmeproduktion und andererseits genügend hohe Temperaturen im BWW-Speicher um das Legionellenwachstum zu unterbinden. Die diesbezügliche Empfehlung des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) beinhaltet eine tägliche Erhitzung des verbrauchten Warmwasservolumens auf 60 °C (Graf u. a., 2009). Temperaturen zwischen 20 und 45 °C sollten gänzlich vermieden werden, da die Vermehrungsrate der Legionellen in diesem Bereich am grössten ist.

Der BWW-Speicher ist zudem mit einem Wendelwärmeübertrager ausgestattet, welcher eine direkte Beladung aus dem KW-Speicher ermöglicht. Dies steigert insbesondere während strahlungsintensiver Monate die Systemeffizienz, da für die Wärmebereitstellung neben dem Stromverbrauch der Pumpen keine weitere Energie verbraucht wird.

2.2 Einbettung in den Kontext

Das L-Sol soll in Konkurrenz zu handelsüblichen WP-Systemen treten. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über solche Systeme und deren Effizienz gegeben, um eine Einordnung der Simulationsergebnisse zu ermöglichen.

2.2.1 Marktübliche Wärmepumpensysteme

Für den Betrieb in Wohngebäuden haben sich in erster Linie LW- und Sole/Wasser (SW)-WP etabliert. Die Effizienz von WP-Systemen wird hauptsächlich vom Temperaturniveau des Vorlaufes, der Temperatur der Wärmequelle und/oder der Quelltemperatur des Frischwassers bestimmt. Sie bestimmen den notwendigen Temperaturhub, welcher eine WP erbringen muss. Je höher dieser ist, desto niedriger ist die Effizienz (Staffell, Brett, Brandon, & Hawkes, 2012). Moderne LWWP-Systeme sind zwar auch bei Aussentemperaturen von -15 bis -20 °C noch in der Lage, die Heizleistung aufrecht zu erhalten, jedoch häufig verbunden mit niedrigem COP

und sinkendem Temperaturhub. Ermöglicht wird der Betrieb bei so tiefen Temperaturen durch den Einsatz eines zweiten Kompressorkreislaufes in der WP (Chua, Chou, & Yang, 2010). Dadurch wird der notwendige Temperaturhub pro Kreislauf reduziert, was die Effizienz fördert. Besonders in kalten Regionen lässt sich die Effizienz so um bis zu 20 % steigern (Wang u. a., 2005). Auf dem Markt sind solche WP jedoch selten und finden entsprechend auch kaum Anwendung im Wohnungsbau.

In Neubauten oder sanierten Gebäuden kann bei WP-Anlagen für Heizung und Warmwasser mit einer JAZ von 2.7 - 3.2 für LW-WP resp. 3.3 - 5.8 für SW-WP gerechnet werden (Arpagaus, Berthold, & Eschmann, 2017). Während dem Heizbetrieb laufen die Anlagen effizienter (JAZ 2.7 - 3.7 resp. 3.5 - 6.5) als bei der Trinkwasser-Erwärmung (JAZ 2.8 - 2.9 resp. 3.0 - 3.8), was auf den genannten Temperaturhub zurückzuführen ist.

2.2.2 Solarthermische WP-Systeme

Solarthermische WP-Systeme sind in erster Linie als Ergänzung konventioneller WP-Systeme gedacht. Durch die zusätzliche solarthermische Energie während den Übergangs- und Sommermonaten wird die Betriebsdauer der WP-Anlagen reduziert und entsprechend elektrische Energie eingespart. Dabei gibt es unzählige Integrationsmöglichkeiten. Folgend sollen drei Modelle vorgestellt werden, welche entweder Gemeinsamkeiten mit dem oder Optimierungsmöglichkeiten für das L-Sol System aufweisen. Die solarthermische Energie dient dem einen als Wärmequelle für die WP und dem anderen als Ergänzung zur eingesetzten WP.

Dass solarthermische WP-Systeme den Wärmebedarf eines Wohngebäudes verlässlich decken können ist nachgewiesen (Haberl, Haller, Reber, & Frank, 2014; Jonas, Frey, & Theis, 2017). Haberl u. a. (2014) verwenden eine Kombination aus 10 m² Flachkollektoren und einer 8.2 kW Erdsonden-WP, welche gemeinsam einen 0.9 m³ Kombitank mit Frischwasserstation mit thermischer Energie versorgen (Abbildung 2). Bei einem jährlichen Energiebedarf von 15'500 kWh für die Heizung und 2'900 kWh für Warmwasser weist das getestete System eine JAZ von 4.5 auf. Die Autoren sehen insbesondere im häufigen An- und Ausschalten der WP Optimierungspotenzial. In Bezug auf das L-Sol System könnte dies bedeuten, dass die Speicher eine ausreichende Grösse aufweisen müssen, um ein zu häufiges Einschalten der WP zu vermeiden.

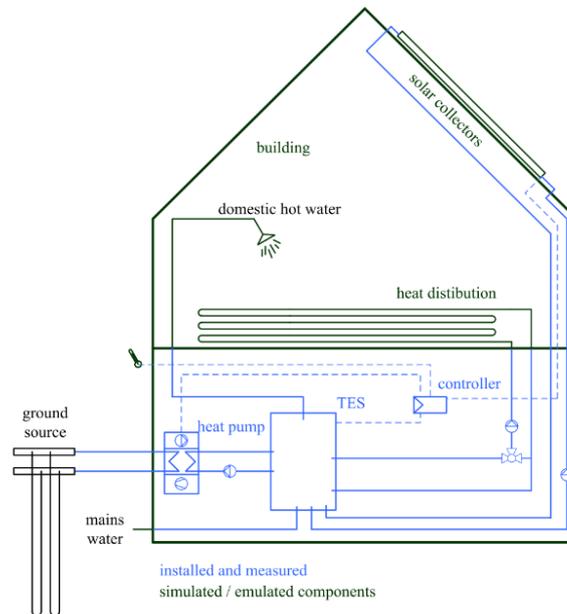


Abbildung 2 Systembild des von Haberl u. a. (2014) getesteten Erdsondensystems mit solar-thermischer Unterstützung.

Für ein vergleichbares Gebäude mit Erdsonden-WP (14'000 kWh/a resp. 2076 kWh/a) in Strassburg zeigen Jonas, Frey, & Theis (2017) in einer Simulationsstudie ähnliche Resultate. Bei einer Kollektorfläche von 10 m² und einem Speichertank von 1 m³ zeigen sie eine JAZ von 4.3. Ohne solarthermische Unterstützung und mit einem kleineren 0.7 m³ Tank bei ansonsten identischen Bedingungen ergibt sich eine JAZ von 3.6. Eine Verdoppelung der Kollektorfläche und des Speichervolumens resultiert in einer JAZ von 4.7. Dabei gilt zu beachten, dass die Steigerung der JAZ durch die Vergrößerung der Kollektorfläche und entsprechend auch des Pufferspeichers nicht linear ist. Analoges kann folglich auch für das L-Sol erwartet werden. Eine Bestimmung der optimalen Kombination der Speichergrößen ist besonders auch im Hinblick der beschränkten Platzverhältnisse bei sanierten Gebäuden oder allgemein bei Einfamilienhäusern (EFH) entscheidend. Für das L-Sol System interessant ist der Kombispeicher, welcher einerseits dank der Trinkwasserstation einen niedrigeren Temperaturhub ermöglicht und andererseits weniger Platz in Anspruch nimmt.

Ein System mit Eisspeicher (jedoch keinem Kombi- resp. HWW-Speicher), welcher mitunter direkt mit solarthermischer Wärme beladen wird, wurde von Winteler, Dott, Afjei, & Hafner (2014) untersucht. Neben der solarthermischen Energie bezieht dieses System über die Aussenwände des Eisspeichers Umgebungswärme vom Erdreich resp. gibt sie an dieses wieder ab (Abbildung 3). Zwischen November und Februar tendiert der Anteil solarthermischer Energie gegen null und der Bezug der zur Verhinderung des kompletten Zufrierens benötigten Wärme geschieht über das den Speicher umgebende Erdreich. Die JAZ für Gebäude mit einer Heizlast zwischen 7.5 und 9.5 kW liegt bei 4.1 und 4.5. Im Vergleich zum L-Sol System weist

das Erdreich eine konstantere und während den kalten Monaten auch höhere Temperatur und damit ein höheres Energiepotenzial auf, als die Umgebungsluft. Auf Grund dessen sind für das L-Sol System tiefere Systemjahresarbeitszahl (SJAZ) zu erwarten.

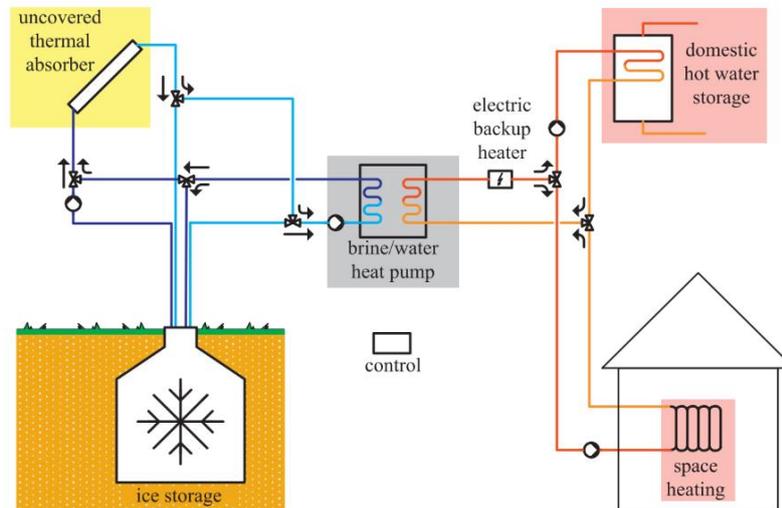


Abbildung 3 Systembild des von Winteler u. a. (2014) getesteten Eis-speichersystems.

Die Solarenergie als primäre Energiequelle verwenden Bakirci & Yuksel (2011) zur Beheizung eines mit Radiatoren bestückten Gebäudes in Erzurum (1869 m.ü.M) mit einem Wärmebedarf von 18'900 kWh/a. Über 19.68 m² Flachkollektoren wird die solarthermische Energie durch ein Glykol-Wassergemisch zu je 50 % Volumenanteil direkt zur WP oder in einen 2 m³ grossen Speicher geführt. Dieser dient der WP insbesondere während der Nacht als Wärmequelle. Die Radiatoren werden direkt von der WP mit durchschnittlich ca. 43 °C warmem Heizwasser beschickt. Der durchschnittliche COP des Systems während sechs Monaten (Januar bis Juni) wird mit 2.7 berichtet. Das Klima in Erzurum ist deutlich kühler als im Schweizer Mittelland. Die Durchschnittsaussentemperatur in Erzurum beträgt gemäss den Autoren rund 4.7 °C. Gleichzeitig liegt die durchschnittliche globale Einstrahlung aufgrund des höher gelegenen Standortes intensiver. Die von den Autoren geschilderten Bedingungen entsprechen in etwa jenen eines EFH in den Schweizer Voralpen. Es scheint also auch möglich zu sein, ein EFH unter für WP suboptimalen Bedingungen (z.B. nicht konstanter Wärmequelle, tiefe Aussentemperaturen) effizient heizen zu können.

2.2.3 PVT-Module

In den bisher genannten Studien werden ausschliesslich konventionelle Flachkollektoren eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit, werden jedoch PVT-Module verwendet. Diese wandeln die solare Einstrahlungsenergie sowohl in Elektrizität als auch in Wärme um. Während die elektrischen Wirkungsgrade im Vergleich zu reinen PV-Modulen vergleichbar sind, liegen sie bei der thermischen Nutzung rund 10 – 20 Prozentpunkte unter jenen von Flachkollektoren mit rund 79 % (Lämmle, Oliva, Hermann, Kramer, & Kramer, 2017). Die Spannweite variiert je nach eingesetzter Technologie und dem vorherrschenden Klima erheblich. So berichten Al-Waeli, Sopian, Kazem, & Chaichan (2017) von maximalen thermischen und elektrischen Wirkungsgraden im Bereich von 30 – 70 % resp. 8 – 20 % bei wasserbasierten Systemen, wobei die höheren thermischen Effizienzen in heissen Gebieten gemessen wurden.

Neben der geringeren thermischen Effizienz weisen PVT-Module folglich auch eine geringere Austrittstemperatur des Fluides auf (Moss u. a., 2018). Die Differenz beträgt ca. 20 %. Dies kann dazu führen, dass besonders in den Übergangs- und Wintermonaten die solarthermische Energie nicht ausreicht, um das Frischwasser auf Gebrauchstemperatur zu bringen oder Gebäude zu heizen. PVT-Module können jedoch auch als LW-Wärmeübertrager eingesetzt werden um die Umgebungswärme als Energiequelle zu nutzen. Wenn die Fluidtemperatur unter der Umgebungstemperatur liegt, kann so auch während den Wintermonaten mit häufig bedeckter Witterung und weniger täglichen Sonnenstunden die Umgebungswärme genutzt werden.

2.3 Optimierungsmöglichkeiten

Dass solarthermische WP-Systeme in Wohngebäuden ausreichend thermische Energie für die Raumheizung und die Bereitstellung von Warmwasser bereitstellen können, wurde gezeigt. Weil das L-Sol System in Konkurrenz zu LW-WP Systemen treten und als Ersatz für alte Öl- oder Gasheizungen dienen soll, ist es essentiell eine möglichst effiziente Kombination bei möglichst geringen Speichervolumen zu finden. Das L-Sol System soll nämlich auch im Keller eines bestehenden Gebäudes Platz finden können und sollte entsprechend nicht wesentlich mehr Platz als das ehemalige Heizsystem in Anspruch nehmen.

2.3.1 Speicherart

Eine Alternative zum Zwei-Speicher-Modell des in Kapitel 2.1 beschriebenen L-Sol Systems für BWW und HWW sind Kombispeicher. Es handelt sich dabei um Speicher, welche sowohl

für die Pufferung der Heizenergie als auch für die Erwärmung des BWW genutzt werden können. Dies geschieht entweder über einen zweiten kleineren Speicher, welcher in den Speicher eingelassene ist oder über eine Frischwasserstation. Bei ersterer Ausführung strömt das angeforderte Frischwasser von unten durch den kleineren Speicher nach oben und erwärmt sich bedarfsgerecht entlang der Temperaturschichten. Im Fall einer Frischwasserstation erfolgt die Wärmeübertragung vom Speicher zum Frischwasser mittels externem Wärmeübertragers. Eine solche Frischwasserstation liesse sich auch im bestehenden Zwei-Speicher-Modell integrieren.

Der entscheidende Vorteil dieser Speicherart ist, dass erwärmtes Frischwasser nicht mehr auf hohem Temperaturniveau auf Vorrat gespeichert werden muss. Gemäss der SIA 285/1 gelten die in Kapitel 2.1 genannten Empfehlungen des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) nicht für solche Durchflusserwärmer resp. Frischwasserstationen, wenn das Warmwasser nicht länger als 24 Stunden bei 25 °C bis 50 °C verbleibt (Suter, Nipkow, & Mathez, 2010). Das tiefere Temperaturniveau eröffnet entsprechend Energieeinsparpotenzial.

Einerseits ist der Temperaturhub geringer und die Wärmebereitstellung mit einer WP somit effizienter, andererseits werden die Abstrahlungsverluste, welche sich proportional zur vierten Potenz der Speichertemperatur verhält, reduziert. Wird ein Kombispeicher verwendet, ist zudem die abstrahlende Oberfläche geringer als im Zwei-Speicher-Modell.

2.3.2 Speichergrossen

Mögliches Optimierungspotenzial bietet, wie bereits erwähnt, die Vergrösserung des Speichervolumens des KW-Speichers. So führt die Vergrösserung des Speichervolumens bei einem ähnlichen System von Heinz, Lerch, Bredler, Fink, & Wagner (2013) zu einer Effizienzsteigerung. Im getesteten System wird ein Pufferspeicher über Solarkollektoren und einen Abwasserwärmeübertrager beladen, welcher einer Frischwasserstation und einer WP als Wärmequelle dient. In einer Sensitivitätsanalyse zeigen die Autoren einen Anstieg um rund 11 % der JAZ bei einem um 50 % vergrösserten Speichervolumen. Ausgangspunkt dieser linearen Beziehung ist ein 3 m³ Tank mit einem 30 m² grossen Flachkollektorfeld.

Bei der Betrachtung der Speichergrossen ist neben dem Volumen auch das Höhe-Breiteverhältnis des Speichers von Bedeutung. So zeigen zum Beispiel Hesaraki, Halilovic, & Holmberg (2015) anhand einer Simulationsstudie mitunter den Einfluss der Speichergrosse und -geometrie auf die Effizienz einer WP, welche ein Gebäude in Stockholm aus einem saisonalen Speicher heizt. Bei konstanter Kollektorfläche führt eine Vergrösserung des Speichers zu einer Effizienzsteigerung der WP. Die Autoren führen dies auf die erhöhte Stabilität und das höhere Temperaturniveau in der obersten Schicht des Speichers zurück. Zudem wird der

Solaranteil leicht gesteigert, indem die Kollektoreffizienz dank konstanteren Fluidtemperaturen verbessert wird. Unabhängig von der verwendeten Kollektorflächen- oder Speichergrösse führt ein Höhe/Breite-Verhältnis (H/B-Verhältnis) von zwei stets zu den höchsten und ein Verhältnis von eins zu den niedrigsten COP-Werten.

Für BWW-Speicher resp. WP-Boiler haben sich aufgrund der besseren thermischen Stratifizierung höhere Höhe-Breiten-Verhältnisse eingebürgert. Marktübliche Speicher weisen ein entsprechendes Verhältnis um 2.5 auf. Vergleichbare Werte werden von Furbo & Shah (2005), für die Nutzung solarthermischer Energie, berichtet. Für Speicher mit Wendelwärmeübertrager oder im Tank-in-Tank Design liegt die höchste Nutzungseffizienz, wie Abbildung 4 zeigt, bei einem Höhen-Breitenverhältnis von 2 bis 3. Ab diesem Verhältnis scheint die verbesserte Stratifizierung die durch die Oberflächenvergrößerung verursachten thermischen Verluste auszugleichen. Wird eine maximale Stratifizierung angestrebt so scheint ein Höhen-Breitenverhältnis von 3.5 als optimal (Yaïci, Ghorab, Entchev, & Hayden, 2013).

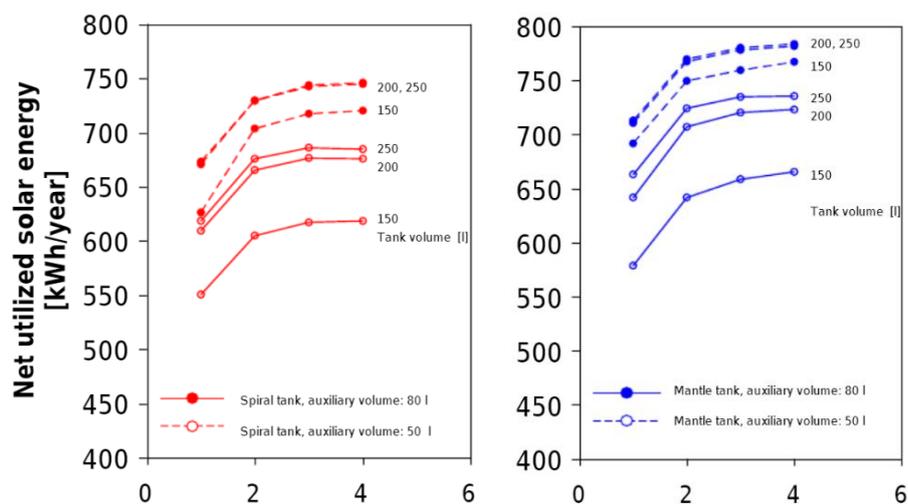


Abbildung 4 Jährlich nutzbare solarthermische Energie in Abhängigkeit des H/B-Verhältnisses (Furbo & Shah, 2005).

Die berichteten Ergebnisse lassen sich nicht uneingeschränkt auf das L-Sol System übertragen. So ist denn auch noch unklar, welche Speichergrößen und Kombinationen optimal wären. Während für den BWW-Speicher ebenfalls eine hohe Stratifizierung und damit auch ein hohes Höhe-Breite-Verhältnis anzustreben ist, zeigt sich die Situation beim KW-Speicher etwas komplexer. So ist beispielsweise keine saisonale Speicherung der solarthermischen Energie vorgesehen und die vorgesehenen Temperaturen im KW-Speicher deutlich tiefer. Zu grosse Speicher könnten zwar mehr Energie speichern, doch können sie auch dazu führen, dass die in den kalten Monaten vorhandene solarthermische Energie zu keiner merklichen Temperatursteigerung im Speicher führt und entsprechend die Effizienz der WP nicht

gesteigert werden kann. Eine hohe Stratifizierung auf der anderen Seite kann zu ungenutztem Wärmepotenzial im Speicher führen, weil die WP aufgrund zu niedriger Temperaturen in den unteren Speicherschichten ausgeschaltet wird, obwohl die Temperaturen im oberen Bereich noch deutlich höher sind.

2.3.3 Phase Changing Materials

Neben den Speichern für sensible Wärme bieten Latentwärmespeicher eine Reihe von Vorteilen an. Im Gegensatz zur Speicherung sensibler Wärme, welche über die kontinuierliche Temperaturerhöhung des Speichermediums erfolgt, wird bei der Speicherung latenter Wärme der Phasenübergang des Speichermediums von flüssig zu fest genutzt. So kann viel Wärmeenergie in weniger Masse und in einem kleinen Temperaturbereich gespeichert werden. Dieser Umstand wird auch bei Eisspeichersystemen ausgenutzt. Beim Phasenübergang vom flüssigen Wasser zum festen Eis bei 0 °C kann pro Volumeneinheit so viel Wärme (Schmelzenthalpie 334 kJ/kg) entzogen werden, wie zur Erwärmung von 0 auf 80 °C (spezifische Wärmekapazität 4,18 kJ/kg·K), benötigt würde.

PCM können in unterschiedlicher Form in ein Speichersystem eingebracht werden. Als Granulat, pumpfähiges Fluid oder verkapselt in Form von Kugeln, Linsen oder ähnlichem. Wichtig für die Performanz ist dabei die Übertragungsfläche (Cabeza, Castell, Barreneche, de Gracia, & Fernández, 2011), welche möglichst gross ausfallen sollte.

2.3.4 Wärmerückgewinnung aus Abwasser und Abluft

Trotz dem erneuerbaren Charakters der vorgestellten Energieproduktionsmöglichkeit, wird Energie in Form von elektrischem Strom verbraucht. Es ist daher zentral, dass das System so effizient wie möglich gestaltet wird. Neben der Bestimmung der optimalen Speicherarten und -größen lässt sich die Effizienz auch durch die Erschliessung einer zusätzlichen Wärmequelle erreichen. Die Rückgewinnung von Wärme aus dem Abwasser oder der Abluft bietet sich grundsätzlich an. In beiden Fällen lässt sich die Temperatur im KW-Speicher besonders während den Wintermonaten und damit die Effizienz erhöhen.

Abwasser: Gemäss Müller & Schmid (2005) lässt sich die Nutzung von Abwasserwärme in drei Kategorien unterteilen. Erstens kann eine Rückgewinnung aus gereinigtem Abwasser nach der Kläranlage erfolgen. Zweitens ist die Rückgewinnung aus Rohabwasser in der Kanalisation und drittens im Gebäude möglich. Sowohl die Rückgewinnung nach der Kläranlage und aus der Kanalisation eignen sich für das vorliegende Heizsystem L-Sol in erster Linie

aufgrund der Zuständigkeit und Besitzverhältnisse nicht. Die Rückgewinnung im Gebäude eignet sich jedoch grundsätzlich zur Kombination mit dem L-Sol System. Dank der unmittelbaren Nähe der WRG zur Wärmeproduktion und -speicherung sind die Leitungslänge und die damit verbundenen Energieverluste und Investitionskosten klein. Aufgrund dieser Nähe und der nicht vorhandenen Durchmischung mit anderem Ab- und Regenwasser, ist zudem das Temperaturniveau des Abwassers höher als bei den anderen Varianten.

Typischerweise fällt das Abwasser in einem Wohngebäude nicht kontinuierlich, sondern je nach Nutzverhalten intervallmässig an. Grosse Abwassermengen dürften in den Morgen- und Abendstunden anfallen, wenn die Nassräume und Geschirrspüler oder Waschmaschinen genutzt werden. Ein Wärmeübertrager muss in diesem Falle für den diskontinuierlichen Anfall von Warmwasser geeignet sein. Beispiele dafür sind Abwasserspeicher mit aktiver WRG oder passive Fallrohr-Filmstrom-Wärmeübertrager.

Der Vorteil solcher Systeme liegt darin, dass auch warmes Abwasser aus Spülbecken, Toiletten und im Falle eines Abwasserspeichers auch von Abwasch-/Waschmaschinen genutzt werden kann. Nachteilig wirkt sich die Verschmutzung durch die Ablagerung von Feststoffen und der Bildung einer Faulungsschicht, welche die Wärmeübertragungsfähigkeit senken, auf die Effizienz aus. Besonders Schwarzwasser von Küchen und den Sanitäreinrichtungen sind deutlich stärker mit Feststoffen und Fetten belastet als das Grauwasser aus Duschen oder Lavabos. Für die Performanz ist daher entscheidend, ob im Gebäude eine getrennte Abwasserführung für das Grauwasser und Schwarzwasser vorhanden ist oder nicht. Eine gemeinsame Abführung von Grau- und Schwarzwasser über eine Leitung ist dabei wohl die üblichere Lösung.

Bei Heinz, Lerch, Bredler, Fink, & Wagner (2013) ist die Verwendung eines Abwasserspeichers, als alternative Energiequelle für die WP, die effizientere Methode als die Verwendung eines Fallrohr-Film-Wärmeübertragers. Der Vergleich des Systems mit einer BWV-Vorerwärmung mittels Fallrohr-Filmstrom-Wärmeübertragers und jenem der aktiven WRG mittels WP zeigt zwar, dass im ersten Fall insgesamt rund 60 bis 75 % mehr Energie zurückgewonnen werden kann, dies jedoch vorwiegend im Sommer. Weil da bei den anderen Varianten die Kollektoren bereits ausreichend Energie liefern, wird die Systemeffizienz wenig beeinflusst. Während den Wintermonaten steht bei den Varianten mit den unteren Schichten des Pufferspeichers jedoch eine kältere Wärmesenke zur Verfügung wodurch vergleichsweise mehr Energie zurückgewonnen und die Systemeffizienz stärker beeinflusst wird. Die vereinfachte Simulation der Rückgewinnungsrate auf der Grundlage der auftretenden Temperaturdifferenzen im Wärmeübertrager ergab eine Rückgewinnung von rund 50 % der zur Erwärmung des Warmwassers benötigten Energie. Es steht genügend Zeit zur Verfügung um das Abwasser aktiv bis auf die gesetzlich erlaubte Mindesttemperatur zu senken. Im Falle eines Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauschers zur passiven Frischwassererwärmung liegt das Einsparpotential

bei rund 30 %. Dabei ist die Bildung eines Biofilms aufgrund von Faulungsprozessen, welcher den Wärmeübertragungskoeffizient des Übertragers senkt, nicht berücksichtigt. Bereits 2 mm reduzieren die übertragene Wärmemenge um 40 % (Philippen u. a., 2015).

Eine Trennung des Abwasserstroms in zwei separate Systeme würde die Bildung einer solchen Faulschicht reduzieren, die Effizienz erhalten und damit auch einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Letzterer Punkt ist im Fall von aktiven Systemen mit Schwarzwasserspeicher besonders bei kleineren Wohneinheiten wie bei Einfamilienhäusern der Grund, warum kaum resp. keine Anlagen mehr installiert werden (van Velsen, Benz, & 3 - Plan Haustechnik AG, 2013). Beim Einsatz eines Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauschers nur mit Grauwasser aus Duschanlagen liegt das Einsparpotential bei vergleichbaren 33 % (Ip & She, 2016). Ähnliche Ergebnisse berichten Deng, Mol, & Van Der Hoek (2016). Dabei werden die höchsten Rückgewinnungsraten beim Einsatz von wassersparenden Duschen mit entsprechend geringerem Massenstrom (5.2 vs. 6.8 l/min) berichtet.

Abluft: Das Nachrüsten oder die Installation einer automatischen Lüftung mit WRG kann den Wärmebedarf senken. Die zu erwartenden Einsparungen im Vergleich ohne solche, beläuft sich gemäss Herstellerangaben von handelsüblichen Systemen auf rund 80 - 90 %.

Feldmessungen von Merzkirch, Maas, Scholzen, & Waldmann (2016) zeigen jedoch bei rund der Hälfte der zentralen und praktisch bei allen dezentralen Anlagen Abweichungen von mehr als 10 % der jeweiligen nominalen Effizienzen. Die reale Effizienz liegt für die zentralen Anlagen zwischen 70 und 80 % und für dezentrale Einheiten zwischen 68 und 76 %. Für dezentrale Anlagen weisen die Autoren auf die hohe Drucksensitivität der Anlagen als Grund dafür hin, welche je nach Windsituation zu Einbussen führen können. Allgemein nennen sie auch Planungs- und Installationsfehler als Hauptgrund für die tieferen Werte. Flourentzou & Pantet (2015) zeigen, dass diese Abweichungen durchaus noch grösser sein können. Von den theoretisch zu erwartenden Einsparungen von 84 % durch die Installation eines bidirektionalen und bedarfsgesteuerten Lüftungssystems mit WRG, waren es real gemessen lediglich 44 %. Für rund die Hälfte der Zielverfehlung ist das Benutzerverhalten verantwortlich. Einerseits sind es trotz der automatisierten Lüftung geöffnete Fenster und andererseits zu hoch eingestellte Raumtemperaturen, welche ungefähr zu gleichen Teilen zur Verfehlung beitragen. Für die restlichen 20 % sind unbekannte Gründe verantwortlich. Das auch bei einem nicht bewohnten Gebäude eine Effizienz von rund 77 % gemessen wird (Fan, Kameishi, Onishi, & Ito, 2014), deutet darauf hin, dass bei der Simulation solcher Lüftungssysteme die Verwendung der nominalen Effizienz zu einer Überschätzung der Einspareffekte führen dürfte.

2.3.5 Wetter- resp. Senkung der Heizaktivierungstemperatur

Handelsübliche Produkte zur Optimierung der Heizungssteuerung versprechen eine Senkung des Heizungsenergieverbrauches um 10 bis 20 % indem sie durch Verwendung einer Wetterprognose der Trägheit herkömmlicher Heizungssysteme Rechnung tragen. Beim L-Sol System wird diese Trägheit durch die Verwendung eines HWW-Speichers entgegengewirkt. Die in dieser Arbeit verwendete Regelung sieht zudem vor, dass die Speichertemperatur während den Heizmonaten konstant im Zieltemperaturbereich gehalten und die erforderlichen Heizwassertemperaturen bedarfsgerecht gemischt werden. Die WP ist also nicht direkt durch den Heizwärmebedarf und die Aussentemperatur gesteuert, weshalb durch die Verwendung der Wetterprognose keine Effizienzsteigerung zu erwarten ist.

Eine für das L-Sol allenfalls spannende Möglichkeit ist die Senkung der Aktivierungstemperatur, ab welcher der HWW-Speicher beladen wird. So hat (Mühlemann, 2018) für den Standort Wädenswil den Grenzwert der mittleren Aussentemperatur (24 h) bestimmt, bei dem der Heizwärmebedarf auf unter 0.5 % sinkt. Dieser liegt bei 9.17 °C. Entsprechend könnte die Einschalttemperatur auf rund 10 °C festgelegt werden.

2.4 Forschungsfragen

In dieser Arbeit soll das aufgezeigte Optimierungspotenzial für das L-Sol System untersucht werden. Es muss sich zeigen, ob effizienzsteigernde Massnahmen anderer Systeme auch auf L-Sol übertragbar sind und ähnliche Effekte haben. Dazu sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche Kombination von Speichergrössen (unter drei Kubikmeter) führen beim L-Sol In System zur höchsten Effizienz SJAZ?
- Welches Einsparungs- und Effizienzsteigerungspotential ergibt sich durch die Ergänzung des Systems mit einer Frischwasserstation und dem Einsatz eines Kombispeichers mit Frischwasserstation anstelle eines separaten BWW-Speichers?
- Welches zusätzliche Einsparungs- und Effizienzsteigerungspotential bietet die WRG aus Abwasser und Abluft?
- Welche Vorteile bringt ein Speicher mit PCM Materialien im L-Sol System?

3 Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfragen dienen einerseits Simulationen des L-Sol Systems mit Polysun (Version: 10.2.3.26190) von Vela Solaris AG und Berechnungen (PCM) andererseits. Simuliert wurden drei verschiedene L-Sol Varianten mit jeweils eigens entwickelten Regelungen. Die Forschungsfrage vier wird anhand einer Literaturrecherche qualitativ beantwortet. In den nachfolgenden Kapiteln wird das Vorgehen bei der Bestimmung des Energiebedarfes, die in den Modellen verwendeten Systemkomponenten, sowie die Darstellung der simulierten Modelle und das Vorgehen bei den Simulationsexperimenten beschrieben.

3.1 Brauchwarmwasser

Die Erwärmung des BWW wird sowohl über die WP, als auch direkt über den KW-Speicher ermöglicht. Dazu wird ein separater Speicher mit elektrischem Heizregister und alternativ ein Kombispeicher mit Frischwasserstation verwendet.

3.1.1 Wasser- und Energiebedarf

In 50 % der Fälle leben mindestens vier Personen in einem EFH (Bundesamt für Statistik (BFS), 2016). Von drei Personen werden 18 % und von zwei Personen rund 25 % der EFH bewohnt. Lediglich in ca. 7 % der Fälle lebt nur eine Person im Gebäude. Aufgrund der zur Verfügung stehenden prozentualen Daten ist eine Mittelwertbildung nicht möglich. Als Alternative wird der Median herangezogen, welcher bei einer Belegung von vier Personen liegt.

Gemäss der SIA 385/2:2015 ist bei einfachem Standard von einem Spitzenbedarf pro Person und Tag von 50 l auszugehen. Dabei handelt es sich um Normliter resp. Wasser mit einer Temperatur von 60 °C. Entsprechend müssen täglich 200 l Frischwasser von beispielsweise 10 auf 60 °C aufgewärmt werden, was einem Energiebedarf von 11.6 kWh entspricht. Auf ein Jahr hochgerechnet ergibt sich ein Energiebedarf für das BWW von 4'238 kWh. Wird der Durchschnittsbedarf angewandt, so müssen lediglich 40 l pro Person und Tag auf 60 °C aufgeheizt werden. Der Jahresenergiebedarf beträgt in diesem Fall rund 3'390 kWh. Nach einer gemäss SIA 385/2:2015 maximal zulässigen Reduktion von 5 °C im Verteilnetz können so rund 180 l der minimal geforderten Austrittstemperatur von 50 °C bereitgestellt werden. Wird auf der Grundlage des Spitzenbedarfes gerechnet, so stehen rund 225 l mit 50 °C an der Zapfstelle zur Verfügung. Da nicht davon ausgegangen werden muss, dass alle Bewohner gleichentags einen Spitzenbedarf aufweisen, wird für die Simulation vom Mittelwert von täglich benötigten 45 l Warmwasser bei 60 °C ausgegangen. Dies entspricht einem

Warmwasserbezug von 200 l mit 50 °C oder 267 l bei 40 °C an den Zapfstellen. Letzterer wird aufgrund der Realitätsnähe (für die Simulation von WRG aus dem Abwasser wichtig) in allen Modellen verwendet.

3.1.2 Legionellenvorbeugung

Aufgrund des erhöhten Legionellenwachstums in stehendem Wasser mit 20 bis 45 °C wird eine tägliche Erhitzung des BWW auf 60 °C empfohlen (Graf u. a., 2009). Ab 55 °C beginnen die Bakterien abzusterben. Bei der Verwendung eines separaten BWW-Tanks mit direkter Nutzung des Wassers werden die oberen 50 % des Speichers täglich auf mindestens 55 °C und die obersten rund 30 % auf 60 °C erhitzt.

Der Einsatz eines Kombispeichers mit Frischwasserstation ermöglicht durch das Trennen des Heizwassers vom Frischwasser eine Absenkung der Speichertemperatur. Welches Niveau benötigt wird, um die Frischwassertemperatur zu gewährleisten wird experimentell bei der Modellbildung bestimmt.

3.1.3 Zapfprofil

Das in Polysun implementierte Tagesprofil «Tagesspitzen» wird so angepasst, dass es den Warmwasserverbrauch durch Duschen am Morgen und am Abend besser abbildet. Dazu wurden die zwei Tagesspitzen am Morgen und Abend ausgebaut und jene über den Mittag reduziert. Abbildung 5 zeigt das verwendete Tagesprofil. Abwesenheiten oder Änderungen im Verbrauchsverhalten an den Wochenenden sind nicht berücksichtigt.

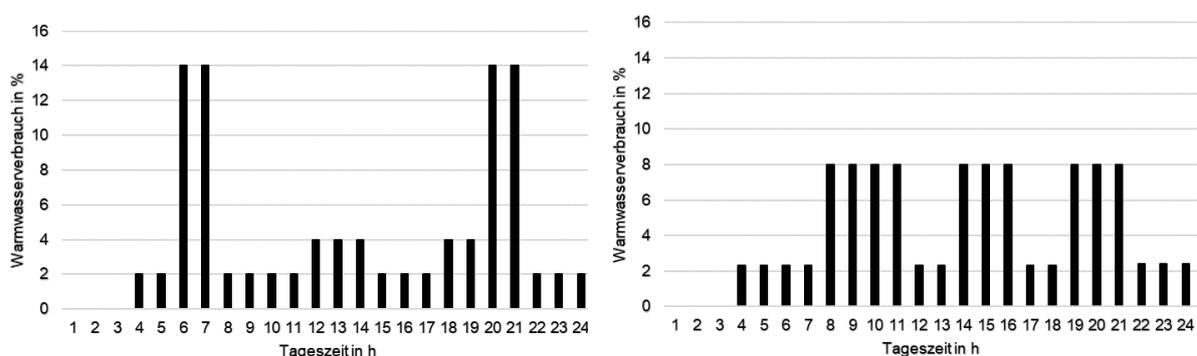


Abbildung 5 Für die Simulation erstelltes und verwendetes Zapfprofil (l.) und das als Grundlage verwendete Tagesprofil (r.).

3.2 Heizungswärme

Das L-Sol Heizsystem kommt in erster Linie für drei Gebäudetypen in Frage. Für energieeffiziente Neubauten, energetisch sanierte Altbauten und für Bauten aus den 90er Jahren bei denen aufgrund des Betriebsalters ein Heizungsersatz anstehen dürfte. Weil im Verlauf der 90er Jahre die Fassaden zunehmend gedämmt wurden, steht für die meisten dieser Bauten wohl noch keine energetische Sanierung der Gebäudehülle an.

3.2.1 Heizungswärmebedarf

Gemäss dem Bundesamt für Statistik (BFS) (2016) beträgt die durchschnittliche Wohnfläche eines EFH mit Baujahr 1946 – 1980 rund 131 m², 152 m² in der Bauperiode 1981 – 2000 und 168 m² nach dem Jahr 2000. Für die Simulation wird entsprechend ein durchschnittliches EFH mit einer Wohnfläche von 150 m² verwendet.

Für Neubauten oder neu sanierte Gebäude wird angenommen, dass sie die in den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) 2014 beschriebenen Grenzwerte einhalten. Der Grenzwert für den Heizwärmebedarf ($Q_{h,li}$) wird in diesem Fall bei einer Jahresmitteltemperatur von 8.5°C gemäss SIA 380/1 berechnet:

$$Q_{h,li} = Q_{h,li0} + \Delta Q_{h,li} * (A_{th}/A_E)$$

$Q_{h,li}$	Grenzwert Heizwärmebedarf
$Q_{h,li0}$	Basiswert für Heizwärmebedarf (in kWh/m ²)
$\Delta Q_{h,li}$	Steigungsfaktor Grenzwert Heizwärmebedarf (in kWh/m ²)
(A_{th}/A_E)	Gebäudehüllzahl

Die Gebäudehüllzahl liegt bei EFH zwischen 1.4 und 2.8 (Huber, Sibold, Flückiger, Roth, & Pfirter, 2013). Zur Vereinfachung wird an dieser Stelle der Mittelwert von 2.1 verwendet. Sowohl der Basiswert als auch der Steigungsfaktor liegt gemäss den MuKE n 2014 für Neubauten bei 16 kWh/m². Entsprechend gilt ein Grenzwert von 49.6 kWh/m², was einem jährlichen Heizwärmebedarf von 7'440 kWh bei einer maximalen spezifischen Heizleistung von 25W/m² (3.75 kW insgesamt) entspricht. Für Umbauten resp. Sanierungen älterer Gebäude liegt der Grenzwert bei 76.8 kWh/m² resp. 37.5 W/m² (5.63 kW insgesamt) was einem Jahresenergieverbrauch von 11'520 kWh entspricht.

3.2.2 Gebäude

Für die Simulationen diente ein bereits in Polysun vorhandenes Modell eines zweistöckigen Einfamilienhauses als Grundlage. Der Glasanteil an den Fassadenflächen beträgt 25 % im Süden und Osten, sowie 13 % im Norden und 6 % im Westen. Als Gebäudemasse werden 10.715 m in der Länge und 7 m in der Breite (150 m²) verwendet.

Zur Simulation eines Neubaus und eines sanierten Gebäudes nach MuKE n 2014 wird neben dem spezifischen Heizwärmebedarf- und der Heizleistung pro Quadratmeter auch der Gebäude U-Wert variiert. Auf eine Berechnung des genauen U-Wertes wird an dieser Stelle verzichtet. Stattdessen findet ein durchschnittlicher U-Wert des Gebäudes von 0.272 und 0.400 Verwendung. Der gesamte Energiebedarf für Heizung (7'453 resp. 11'713 kWh) und BWW (3660 kWh) beläuft sich demnach auf rund 10'900 und 15'200 kWh pro Jahr.

3.2.3 Standort

Als Gebäudestandort wird das voreingestellte Rapperswil gewählt. Es befindet sich im nordöstlichen Mittelland und weist gemäss MeteoSchweiz (2018) eine mittlere Jahrestemperatur über 30 Jahre (1981-2010) von 9.5 °C auf.

3.2.4 Heizsystem, Vorlauftemperatur und Soll-Raumtemperatur

Als Heizsystem wird auf die Simulation von Radiatoren verzichtet, da diese aufgrund der hohen Vorlauftemperaturen für den Einsatz einer WP ungeeignet sind. Eingesetzt wird eine Fussbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C. Zwar können für Neubauten oder gut sanierte Gebäude nach MuKE n 2014 Vorlauftemperaturen unter 30 °C aufweisen, doch dürften sie noch einen kleinen Anteil am Gebäudebestand ausmachen. Die Verwendung von 35 °C trägt entsprechend dem Anteil älterer Gebäude Rechnung.

Ein Heizelement der Bodenheizung weist eine Heizleistung von einem Kilowatt auf. Deren Anzahl wird von Polysun automatisch aus der maximalen Heizleistung des Gebäudetyps bestimmt. Die Soll-Raumtemperatur wird tagsüber auf 20 °C und nachts auf 18°C festgelegt. Eine Aktivierung des Heizkreises erfolgt bei Unterschreiten einer mittleren Aussentemperatur von 16 °C.

3.3 Systemkomponenten

Das zu untersuchende L-Sol System nutzt die Sonnenenergie als Hauptenergiequelle und ist mit elektrischen Notheizungen ausgestattet. Über einen Kaltwasserspeicher wird die solarthermische Energie von einer SW-WP auf das jeweils benötigte Temperaturniveau gebracht.

3.3.1 PVT-Modulfeld

Ein PVT-Modulfeld bestehend aus 30 unverglasten Modulen (Meyer Burger Hybrid 270/900) mit Roll-Bond Aluminiumwärmeübertrager, welche nach Süden (0°) ausgerichtet und mit einem Anstellwinkel von 45° installiert sind, dienen der Energiegewinnung. Die Aperaturfläche resp. auch die Absorberfläche pro Modul beträgt 1.64 m^2 . Gemäss Meyer Burger AG (2017) liegt der thermische Modulwirkungsgrad bei 60. Die thermische Nennleistung wird mit 900 W und die Stillstandtemperatur mit 80°C angegeben. Entsprechend ist eine maximale thermische Leistung von 27.0 kW zu erwarten. Die zulässige Tiefsttemperatur beträgt -20°C . Die monokristalline PV-Moduloberseite weist eine Nennleistung von 270 Wp auf. Insgesamt ergeben sich auf dem 49.2 m^2 grossen Modulfeld 8.1 kWp Nennleistung.

3.3.2 Wärmepumpe

Die eingesetzte WP stammt von Viessmann. Das Modell «Vitocal 300-G BW(S) 301.B13» mit einer Wärme-Nennleistung von 12.99 kW bei B0W35 und 11.94 kW bei B0W35. Die maximal erreichbare Vorlauftemperatur beträgt 65°C (Viessmann, 2016). Den Solekreislauf betreffend kann die gewählte WP Temperaturen Sole-Vorlauftemperaturen von bis zu 25°C nutzen. Die Zieltemperatur des Solevorlaufes wird für alle Varianten auf 22°C festgelegt. Dazu wird ein Dreiwegventil eingesetzt und programmiert, welches je nach Speichertemperatur Fluid aus der obersten Speicherschicht mit jenem des Sole-Rücklaufes mischt.

3.3.3 Speicher

Als KW-Speicher dient ein marktüblicher Pufferspeicher mit einem Wendel zur Einbindung des Solarkreislaufes im unteren Drittel. Die darin sich befindende Sole wird in der obersten Schicht abgezogen und in der untersten wieder eingelassen. Für den Fall von hohen Speichertemperaturen besteht die Möglichkeit, über den Deckel Sole zur Übertragung an den BWW-Speicher aus- und in der achten Schicht wieder einzuleiten (Abbildung 6).

Abbildung 6 zeigt weiter, dass sich sämtliche Anschlüsse zur HWW-Führung im HWW-Speicher entweder in der obersten oder untersten Speicherschicht befinden. Dies gilt zumindest für die Frischwasserführung auch im Fall des BWW-Speichers. Die WP wird über einen Wendel im mittleren und der KW-Speicher im unteren Drittel des Speichers eingebunden. Beide Speicher verfügen im obersten Bereich über einen elektrischen Heizeinsatz mit einer Leistung von 6 kW resp. 3 kW.

Für die Kombination von HWW- und BWW-Speicher wird ein Kombispeicher mit einem externen Wärmetauscher als Frischwasserstation gewählt (Abbildung 6). Die Entnahme des Heizwassers erfolgt in der neunten Speicherschicht während die Rückleitung in der vierten geschieht. Die Einleitung des aufgeheizten Heizwassers erfolgt sowohl in der Obersten (Brauchwassererwärmung) als auch in der Neunten (Heizung). Zur WP wird das Heizwasser aus der untersten Speicherschicht geführt. Der Wendel für die direkte Zuführung von solarthermischer Wärme befindet sich im unteren Drittel des Speichers.

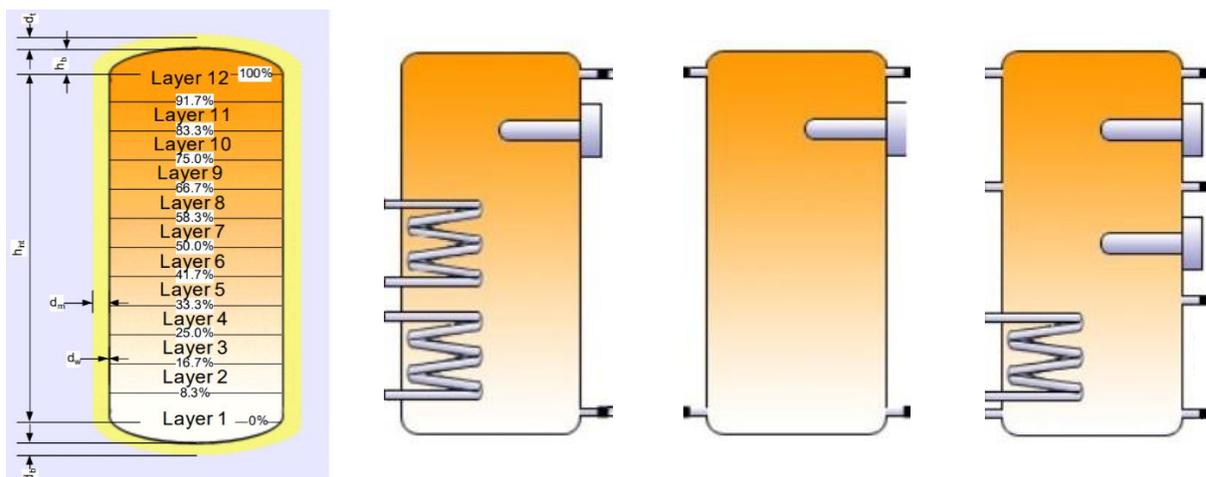


Abbildung 6 Schicht- und Volumeneinteilung des Speichergrundmodells und die in den Modellvarianten eingesetzten Speicher BWW-, HWW- und Kombispeicher (v.l.n.r.).

Die Dämmstärke (Material: PU hart) sämtlicher Speicher beträgt in jedem Fall 0.1 m an den Seiten und auf dem Deckel, sowie 0.08 m am Boden. Auch wenn Pufferspeicher mit zunehmendem Speichervolumen stärker gedämmt werden (0.13-0.16 m), wird zur besseren Vergleichbarkeit des Volumeneinflusses auf die Systemeffizienz eine einheitliche Dämmung verwendet. Im Falle zunehmender Speichergrösse führt dieses Vorgehen zu konservativen Ergebnissen, was in diesem Zusammenhang als vertretbar erachtet wird.

Sämtliche Stutzen, mit Ausnahme der untersten, sind siphoniert. Dadurch reduziert sich der durch rohrinterne Zirkulationsströme verursachte Wärmeverlust. Die eingesetzten Wendelwärmeübertrager weisen eine Bauhöhe von 0.5 m auf. Die wärmeübertragende Oberfläche beläuft sich auf 3.6 m².

Die Speicherhöhen variieren in Abhängigkeit des Speichervolumens. Tabelle A1 im Anhang zeigt die unterschiedlichen Bauhöhen der verwendeten Speicher und das entsprechende H/B-Verhältnis. Die Höhe der Ausbauchungen wird für sämtliche Speicher auf 0.1 m festgelegt. Die Variation der Zylinderhöhe erfolgt anhand der in Kapitel 9 geschilderten Überlegungen in Bezug auf das anzustrebende H/B-Verhältnis je nach Funktion des Speichers. Beim BWW-Speicher wird aufgrund des hohen Temperaturniveaus ein hohes H/B-Verhältnis von 3.5 angestrebt. Aufgrund der Einbauhöhe des Wendelwärmeübertragers muss bei einem Speichervolumen von 0.2 m³ davon abgewichen und ein höheres Verhältnis verwendet werden. Im Falle der HWW-Speicher ist ebenfalls eine hohe thermische Stratifizierung anzustreben. Diese muss aufgrund des tieferen Temperaturniveaus nicht gleich ausgeprägt sein. An handelsübliche Speicher angelehnt, wird 2.9 als Zielwert definiert. Weil die Speicher auch in bestehenden Bauten installiert werden sollen, wird die maximale Speicherhöhe ohne Dämmung auf 2.1 m festgelegt. Die 0.1 m Dämmung kann nachträglich aufgebracht werden. Dies führt bei grossen Speichern dazu, dass das H/B-Verhältnis mit zunehmendem Volumen kleiner wird. Die Berechnung der passenden Speicherbreite erfolgt anhand der folgenden Formeln:

$$V_S = V_Z + 2 * V_A + V_W = \pi * h_Z * \left(\frac{d_S}{2}\right)^2 + 2 * \frac{\pi * h_A}{6} * \left(3 * \left(\frac{d_S}{2}\right)^2 + h_A^2\right) + n * \frac{\left(\frac{d_W}{2}\right) * M_W}{2}$$

$$d_S = 2 * \sqrt{\left((V_S - n * \frac{\left(\frac{d_W}{2}\right) * M_W}{2} - \frac{\pi * h_A}{3}\right) / \pi * (h_Z - h_A))}$$

V_S	Effektives Speichervolumen
V_Z	Volumen Speicherzylinder
V_A	Volumen Speicher Ausbauchung
V_W	Volumen des Wendels
h_Z	Höhe des Speicherzylinders
h_A	Höhe der Speicherausbauchung
d_S	Speicherdurchmesser
d_W	Durchmesser des Wendelrohres
M_W	Mantelfläche des Wendelrohres
n	Anzahl Wendel

Der Volumenbedarf von elektrischen Heizstäben oder Speicherwänden von internen Speichern ist bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Die entsprechenden Volumen sind vernachlässigbar. Die so berechneten Speichergrössen liegen im Bereich der auf dem Markt erhältlichen Speichermasse.

3.3.4 Fluide

Mit Ausnahme vom KW-Speicher und des Solarkreislaufes wird Wasser als Fluid in den Kreisläufen verwendet. Im Schweizer Mittelland beträgt die mittlere Tiefsttemperatur gemäss MeteoSchweiz (2018b) zwischen -2 bis -3 °C, tiefere Tagestiefsttemperaturen sind jedoch keine Seltenheit. Ein 1,2-Propylenglykolanteil von ca. 35 %, welcher den Gefrierpunkt auf rund -20 °C senkt, böte sich demnach an. Propylenglykol hat den Vorteil, dass die spezifische Wärmekapazität höher liegt. Es ist bis ca. - 17 °C frostsicher und beginnt ab dann zu stocken (pro Kühlsole GmbH, 2007; Verein Deutscher Ingenieure, 2013). Der Gefrierpunkt liegt bei ca. - 21 °C. Im Vergleich zu Eis, weist das Glykol/Wasser-Gemische unterhalb von 0 °C zudem eine deutlich höhere spezifische Wärmekapazität auf (2.2 vs. 3.6 kJ/kg*K). Dadurch lässt sich in diesem Temperaturbereich mehr Wärme speichern als mit reinem Wasser.

Die Minimaltemperatur des KW-Speichers im untersten Bereich ist entsprechend mit - 17 °C definiert. In sämtlichen Modellen wird die WP beim Unterschreiten dieser Temperatur ausgeschaltet. Eine Einschaltung erfolgt erst beim Überschreiten von - 16 °C, um die Einschalthäufigkeit der WP zu reduzieren.

3.3.5 Wärmerückgewinnung

Zur Simulation der WRG aus dem Abwasser wurde eine Energiequelle implementiert. Im Fall der passiven WRG aus dem Grauwasser soll sie das Grauwasser nachbilden. Weil in den verwendeten Modellen eine fixe Zapftemperatur verwendet wird, sind im Zapfprofil folglich auch keine Temperaturunterschiede im Grauwasser vorhanden. Die mittlere Abwassertemperatur für Wärmeübertrager im Keller wird in Anlehnung an Heinz u. a. (2013) auf 34 °C festgelegt. Dadurch wird eine Temperatursenkung von 4 °C von der Zapfstelle zum Eintritt in das Abwasserrohr (analog Power-Pipe Energy Systems Ltd (2015)) und weitere 2 °C bis zum Wärmeübertrager berücksichtigt.

Die Wärme des derart nachgebildeten Grauwasserflusses wird über einen externen Wärmeübertrager an das System übertragen (Abbildung 10, 11 und 12) in Kapitel 3.4.4 zeigen die Implementierung in die Modelle. Der eingesetzte Wärmetauscher basiert auf der Vorlage eines kleinen Plattenwärmeübertragers aus Polysun und wurde so angepasst, dass der Übertragungswirkungsgrad bei 8 °C Frischwasser- und 36 °C Abwassertemperatur jenem des Fallrohr-Filmstrom-Wärmeübertragermodells R4-42 von Power-Pipe Energy Systems Ltd (2015) entspricht. Die entsprechende WRG-Effizienz dieses Wärmeübertragers liegt im Bereich von 46.6 % (Power-Pipe Energy Systems Ltd, 2015) resp. 43.7 % (Natural resources Canada (NRCan), 2018). Die Übertragungsleistung beim genannten Betriebspunkt beträgt 8.12 kW.

Die Übertragungsfläche wurde anhand der Rohrhöhe von 1.07 m und dem Rohrdurchmesser von 0.1 m näherungsweise bestimmt und liegt bei rund 0.34 m². Als überschlägiger Wärmeleitkoeffizient wird 1400 W/m²K für einen Doppelrohrwärmeübertrager (Verein Deutscher Ingenieure, 2013) bei der Nachbildung verwendet.

Zur Simulation der aktiven WRG aus dem Abwasser wird ein 0.2 m³ Speicher verwendet, in dem sich das anfallende Grauwasser sammelt (Abbildung 13 in Kapitel 3.4.4). Über einen kleinen Wendelwärmeübertrager im obersten Speicherbereich ist die WP angeschlossen. In Abhängigkeit der Temperaturniveaus des KW- und ABW-Speichers erfolgt eine Umschaltung der Wärmequelle. Gemäss van Velsen u. a. (2013) wird oft eine Grenztemperatur von 5 °C angewendet. Jede ARA kann jedoch für ihr Einzugsgebiet eigene Grenzwerte festlegen, welche abgeklärt werden müssen. Im Schweizer Mittelland sind die meisten Abwasserreinigungsanlagen für eine minimale Temperatur von 10 °C dimensioniert (Wanner, 2004). Die Autoren zeigen, dass die Temperaturänderung im Kanalisationssystem bei Abwassertemperaturen um 8 °C, unabhängig von der Fließdistanz, am kleinsten sind. Daher wird an dieser Stelle ein, möglicherweise etwas konservativerer, Grenzwert zur aktiven Abkühlung des Abwassers von 8 °C verwendet. Entsprechend ist die minimale Speichertemperatur in der untersten Schicht gesetzt. Wird sie unterschritten, erfolgt die Umschaltung auf den KW-Speicher.

Zur Simulation der WRG aus der Abluft einer automatischen Lüftung kann in Polysun dem Gebäude eine mechanische Lüftung zugewiesen und die Rückgewinnungsrate bestimmt werden. Aufgrund der in Kapitel 2.3.4 geschilderten Realitäten wird eine Rate von 70 % verwendet.

3.4 Simulationsmodelle

3.4.1 Variante A

Abbildung 7 zeigt die Variante A, bestehend aus einem KW-, einem HWW- und einem BWW-Speicher. Die Temperaturdifferenz der WP-Hysterese bei der Bereitstellung der notwendigen BWW-Temperatur liegt, ausgehend von der Solltemperatur an der Zapfstelle, bei 5 °C. Damit wird die empfohlene tägliche Erhitzung des oberen Speicherdrittels auf 55 bis 60 °C gewährleistet. Im Fall der Heizwassererwärmung wird die WP beim Unterschreiten einer mittleren Aussentemperatur von 16 °C zugeschaltet. Die Hysterese ist so gestaltet, dass die Soll-Vorlauftemperatur im Heizspeicher möglichst nicht unterschritten wird. Entsprechend wird die WP beim Unterschreiten der Soll-Vorlauftemperatur plus 3 °C in der obersten und dem Unterschreiten der Soll-Vorlauftemperatur in der sechsten Schicht des HWW-Speichers eingeschaltet. Nach der Erwärmung der obersten Speicherschicht um 6 °C und dem Erreichen der Soll-

Vorlauftemperatur in der sechsten Speicherschicht erfolgt die Ausschaltung. Zur Verhinderung einer Eisbildung im KW-Speicher wird die WP bei Erreichen von -17 °C in der untersten KW-Speicherschicht ausgeschaltet. Eine Einschaltung ist erst wieder bei Erreichen von -16 °C möglich.

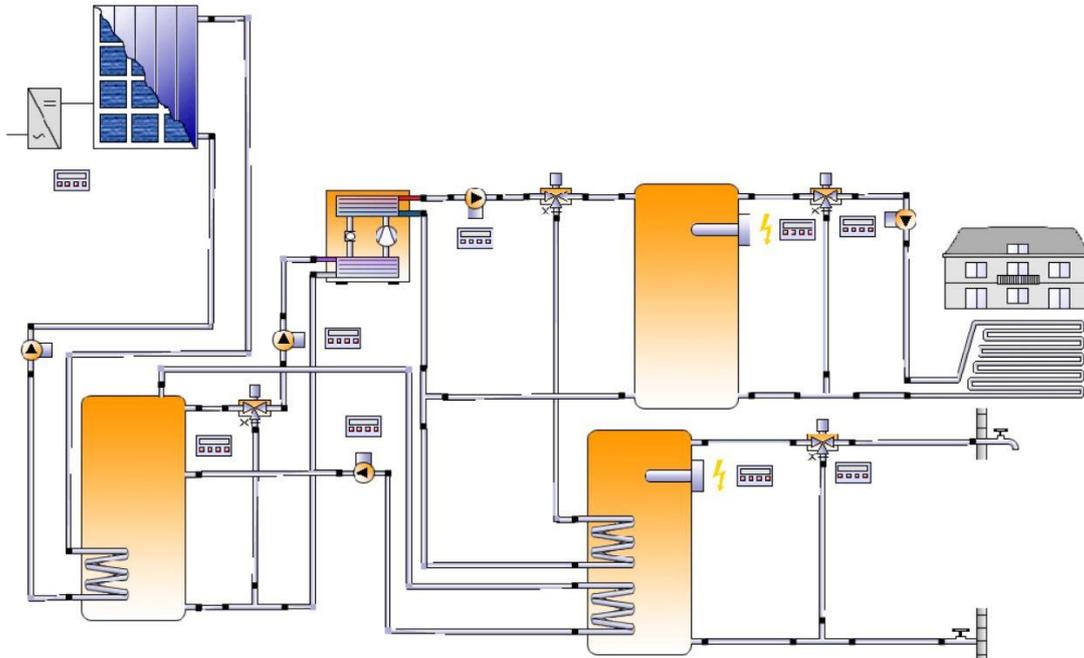


Abbildung 7 Systembild der Variante A mit den im L-Sol System vorgesehenen drei Speichern.

Die elektrischen Heizelemente werden zugeschaltet, wenn die KW-Temperatur im untersten Bereich auf -16 °C resp. -17 °C absinkt und die Temperatur in der Speicherschicht des jeweiligen Entnahmestutzens den Sollwert unterschreitet. Im Falle des BWW-Speichers schaltet die Zusatzheizung zudem beim Unterschreiten von 53 °C ein. Dies verhindert das zu starke Absinken des Temperaturniveaus im Fall eines hohen und gleichzeitigen Heizenergiebedarfes. Nach dem Erreichen der jeweiligen Zieltemperatur (entsprechende Soll-Temperaturen plus ein Grad) oder einer KW-Speichertemperatur von über -16 °C , erfolgt die jeweilige Ausschaltung.

Falls die Temperatur der obersten Schicht des KW-Speichers grösser als 25 °C und 3 °C über der Temperatur der vierten Schicht des BWW-Speichers ist, erfolgt eine Wärmeübertragung mittels Wendel aus dem KW-Speicher. Entsprechend kann die Einschalthäufigkeit der WP und der Energieverbrauch reduziert werden. Sinkt die Temperatur der obersten KW-Speicherschicht unter 24 °C oder unter 2 °C jene der vierten Schicht des BWW-Speichers, wird die direkte Beladung aus dem KW-Speicher gestoppt.

3.4.2 Variante B

Anstelle der zwei verwendeten Speicher der Variante A wird ein einziger Speicher mit externem Wärmeübertrager als Frischwasserstation eingesetzt (Abbildung 8). Dies ermöglicht die Reduktion der oberen Ziel-Speichertemperatur auf 48 °C (ab Schicht 10). Die WP wird im Fall der BWW-Bereitstellung beim Unterschreiten von 46 °C in der obersten Speicherschicht und die elektrische Hilfsheizung bei 44 °C bei gleichzeitiger KW-Speichertemperatur in der untersten Schicht von unter -17 °C resp. allgemein beim Unterschreiten von 43 °C in der obersten BWW-Speicherschicht zugeschaltet. Die Ausschaltung der Hilfsheizung erfolgt beim Überschreiten von 46 °C in der Schicht 10 oder -16°C im KW-Speicher. Im letzteren Fall kann die WP die Speicher nämlich wieder beladen. Die Regelung der HWW-Bereitstellung ist analog zu jener aus Variante A, mit Ausnahme einer um ein Grad Celsius höheren Zieltemperatur.

Die Zuführung des Heizwassers erfolgt in der obersten Speicherschicht für das BWW und in der neunten Schicht (bei 70 % des Speichervolumens). Während der Heizungsrücklauf zwischen Schicht drei und vier (25 % des Speichervolumens) erfolgt, geschieht dies für den Rücklauf aus der Frischwasserstation in der untersten. Auf der Höhe von 60 und 90 % des Speichervolumens verfügt der Kombispeicher über zwei interne Heizelemente mit 3 resp. 6 kW Leistung.

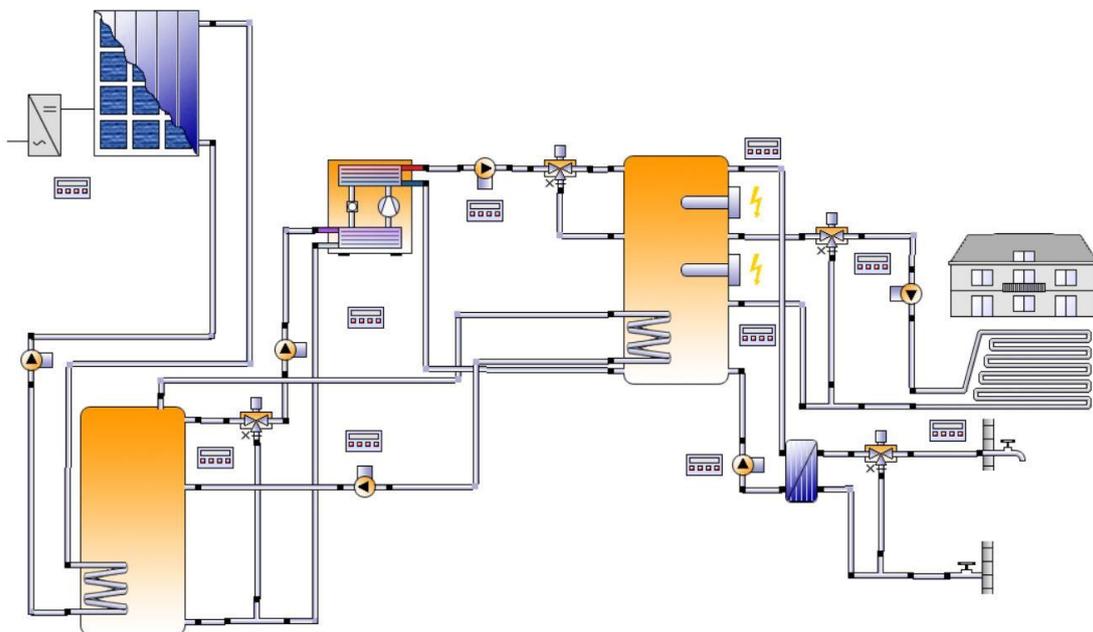


Abbildung 8 Systembild der Variante B des L-Sol Systems mit einem Kombispeicher und Frischwasserstation.

Als Frischwasserstation wird ein mittlerer Plattenwärmetauscher mit einer Übertragungskapazität von 10'000 W/K eingesetzt. Dieser ist so eingestellt, dass er das Frischwasser auf 5 °C über die Solltemperatur anhebt. Dadurch können Wärmeverluste in den Steigleitungen kompensiert und genügend Wärme zur Mischung der Solltemperatur zur Verfügung gestellt werden.

3.4.3 Variante C

Für Variante C wurde Variante A mit der Trinkwasserstation aus Variante B und die Zieltemperatur für den BWW-Bereich auf 48 °C gesetzt. Ansonsten ist das in Abbildung 9 gezeigte System identisch mit jenem der Variante A.

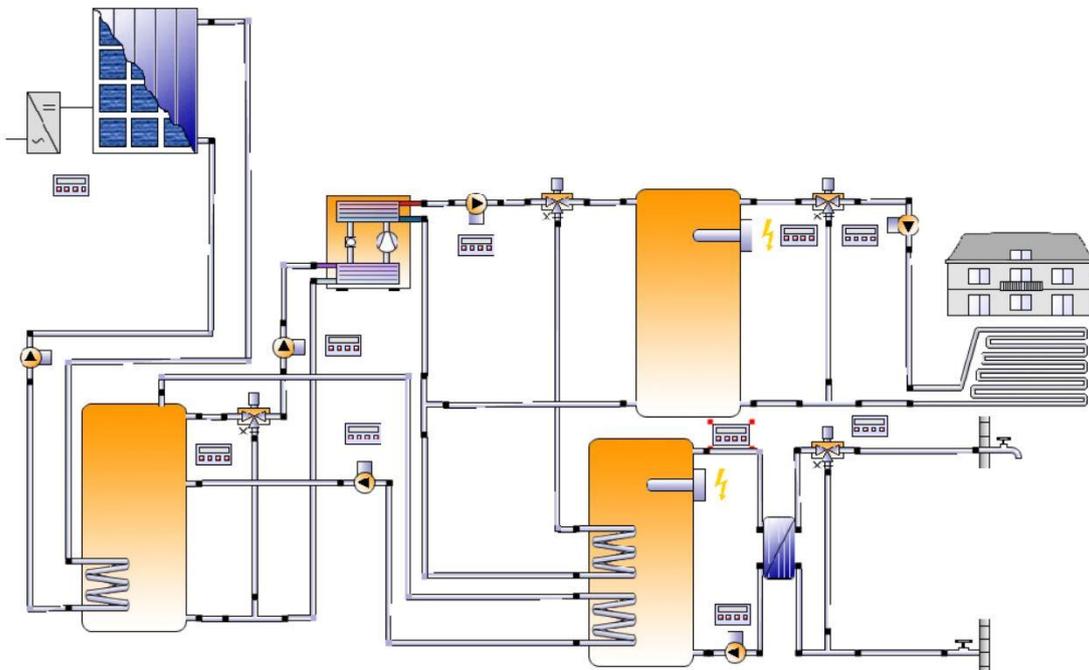


Abbildung 9 Systembild der Variante C (Variante A mit Frischwasserstation).

3.4.4 Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser

Die Möglichkeiten zur Abwasser-WRG sind für sämtliche Varianten identisch und werden folgend als einzelne Elemente vorgestellt. Es sind dies jeweils zwei Systeme für die BWW-Vorwärmung und als alternative Energiequelle für die WP.

Abw.Wrg1: Das in den BWW-Speicher nachströmende Frischwasser wird durch das abfließende Grauwasser passiv vorgewärmt (Abbildung 10). Der Wärmeübertrager ist in diesem Fall optimalerweise nahe der Speicher installiert. Zwar ist das Temperaturniveau des Abwassers etwas geringer, doch können so auch Wärmeverluste durch lange Leitungen vermieden werden.

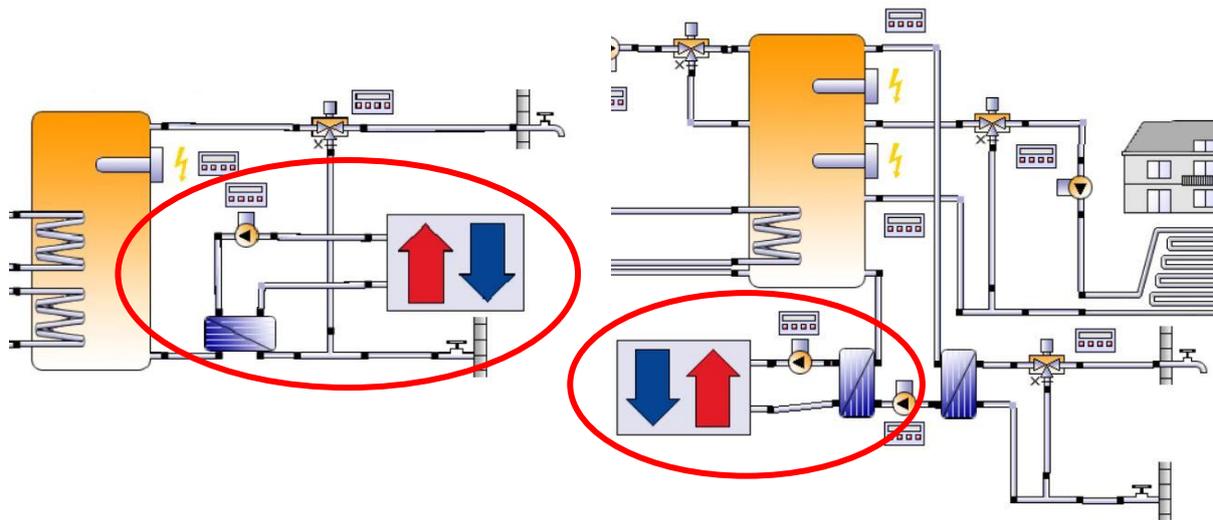


Abbildung 10 Einbindung der passiven WRG im Fall der Subvariante Abw.Wrg1 für Variante A (l.) und B (r.).

Abw.Wrg2: Während bei der Variante Abw.Wrg1 lediglich das in den BWW-Speicher nachströmende Frischwasser vorgewärmt wird, erfolgt in dieser Variante eine Vorerwärmung des gesamten Frischwassers. Dies sollte besonders bei hohen Speichertemperaturen zu einer Effizienzsteigerung gegenüber der Variante Abw.Wrg1 führen, da weniger BWW zur Mischung der Solltemperatur benötigt wird. Abbildung 11 zeigt das Simulationsmodell der Variante A mit einer Vorerwärmung beider Frischwasserströme.

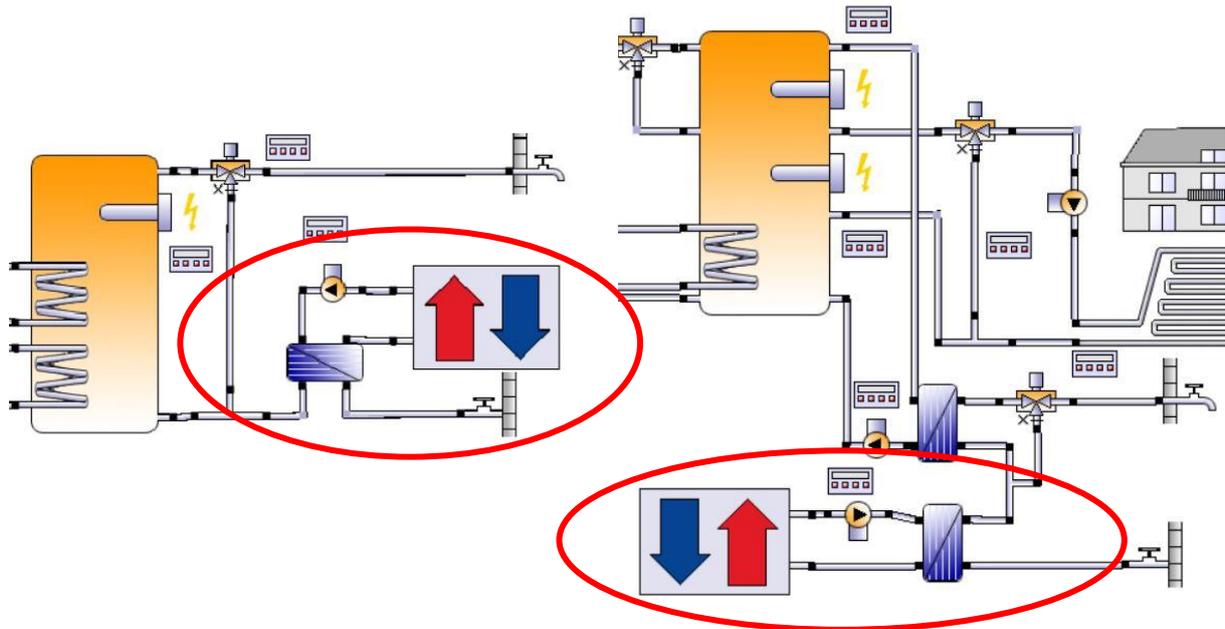


Abbildung 11 Einbindung der passiven WRG im Fall der Subvariante Abw.Wrg2 für Variante A (l.) und B (r.).

Abw.Wrg3: Analog zu Abw.Wrg_1 liesse sich auch der KW-Speicher durch das warme Grauwasser erwärmen (Abbildung 12). In diesem Fall ist eine zusätzliche Pumpe notwendig, welche das Glykol-Wassergemisch durch den Wärmetauscher pumpt.

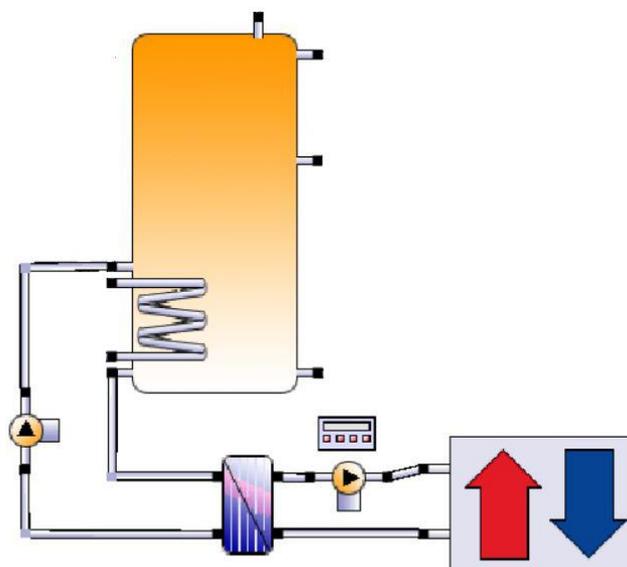


Abbildung 12 Einbindung der passiven WRG im Fall von Abw.Wrg3.

Ein möglicher Vorteil läge darin, dass eine zweite Wärmequelle zur Verfügung steht um die tiefen KW-Speichertemperaturen und damit die Effizienz der WP zu steigern. Dabei wird jedoch die Umgebungswärme als Energiequelle konkurrenziert. Dies würde zu einer geringeren

Effizienzsteigerung als bei der Vorerwärmung des Frischwassers für den BWW-Speicher führen. Im Sommer resp. auch während den Übergangsmonaten, wenn das Temperaturniveau des KW-Speichers steigt und die Temperaturdifferenz zum Grauwasser sinkt, nimmt die übertragene Wärmeenergie zunehmend ab. Bei der erwähnten Frischwasservorerwärmung wäre dies aufgrund der relativ konstanten Frischwassertemperatur nicht der Fall.

Abw.Wrg4: Die aktive WRG erfolgt über einen zusätzlichen Grauwasserspeicher mit 0.2 m³ Volumen (Abbildung 13). Die Steuerung der Wärmequelle sieht eine grundsätzliche Priorisierung des Grauwasserspeichers bis zu einer KW-Speichertemperatur von 8 °C vor, wenn dieser wärmer ist als 8 °C. Über einen Wendelwärmeübertrager wird durch die WP so lange Wärme entzogen bis die Speichertemperatur unter das Temperaturniveau des KW-Speichers oder auf 8 °C fällt.

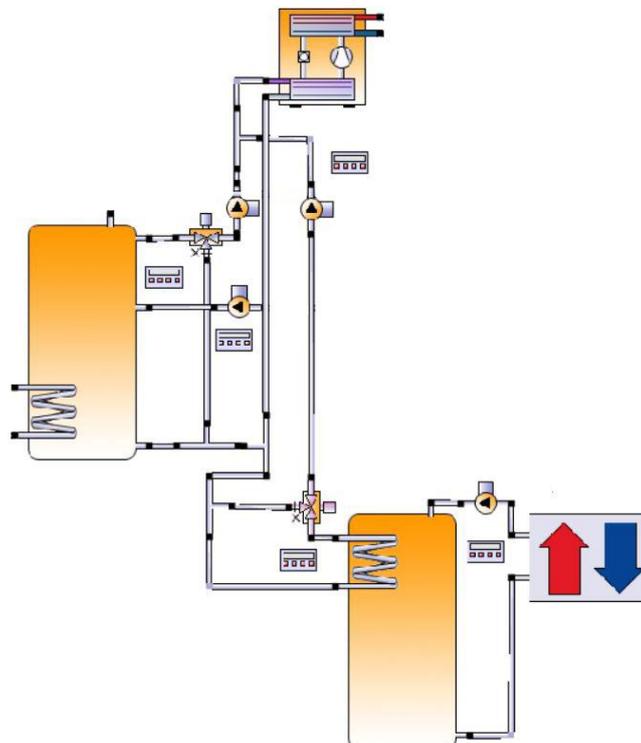


Abbildung 13 Einbindung der aktiven WRG im Fall von Abw.Wrg4, durch Einsatz eines Grauwasserspeichers.

Zwischen 8 und 26 °C wird jeweils der wärmere Speicher als Quelle zugeschaltet. Von 26 °C bis zur maximalen Grauwassertemperatur von 34 °C wird wiederum der Grauwasserspeicher bevorzugt, weil so eine Sole-Vorlauftemperatur von über 22 °C erreichbar ist. Dadurch kann der KW-Speicher bei maximalem COP der WP weiter aufgeheizt werden.

Im Vergleich zur Variante Abw.Wrg3 bietet dies einerseits den Vorteil, dass die Wärmequelle Grauwasser nicht in Konkurrenz zur Wärmequelle Umgebungswärme tritt und andererseits lässt sich durch die aktive Wärmeentnahme ein grösseres Potenzial erschliessen. So lassen sich aus 0.2 m^3 Grauwasser mit $34 \text{ }^\circ\text{C}$ z.B. rund 6 kWh zurückgewinnen. Im Fall der passiven Rückgewinnung mit der vorliegenden Übertragungseffizienz von ca. 43% und einer KW-Speichertemperatur von $8 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt das Potenzial bei lediglich 2.6 kWh . Selbst bei $-17 \text{ }^\circ\text{C}$ liessen sich passiv nur rund 5.1 kWh zurückgewinnen. Jedoch kann auch bei dieser Variante die Abwärme aus dem Brauchwasser während den wärmeren Monaten, wenn die Temperatur im KW-Speicher über jenen des Brauchwassers liegt, nicht weiter genutzt werden.

3.4.5 Wärmerückgewinnung aus der Luft

Das hydraulische System dieser Variante ist identisch mit jener der Variante A. Das Gebäude verfügt jedoch über eine mechanische Lüftungsanlage mit WRG. Die WRG-Rate wird auf 70% gesetzt.

3.5 Vorgehen

3.5.1 Definition der Simulationsvariablen und der Prüfwerte

Durch die Variation der Speichergrössen soll in erster Linie die SJAZ gesteigert werden. Während die SJAZ die Effizienz beschreibt, dient der gesamte Stromverbrauch der detaillierteren Betrachtung und ermöglicht Rückschlüsse auf den absoluten Impact der jeweiligen Modellvariationen. Dies gilt besonders bei der Überprüfung der Varianten mit WRG.

3.5.2 Speichergrössen

Zunächst erfolgt eine Variation der systemkritischen KW-Speicher aller Varianten. Die Grösse des BWW-Speichers beträgt dabei 0.3 m^3 , wodurch die Erwärmung und Speicherung des gesamten täglichen Warmwasserverbrauches möglich ist. Die gleiche Grösse wird für den HWW-Speicher gewählt. Weil keine saisonale Speicherung erfolgen soll, sind die simulierten Abstufungen des Speichervolumens um 1 m^3 kleiner (Schritte à je 0.1 m^3) als bei Volumens ab 1.5 m^3 (Schritte à je 0.5 m^3). Zeigt sich dabei ein linearer Zusammenhang, werden für die KW-Speichergrösse von 1 m^3 , 2 m^3 und 3 m^3 der Einfluss der anderen Speichergrössen ebenfalls untersucht. Ansonsten wird diese Kombinationsanalyse mit jenem KW-Speichervolumen

durchgeführt, ab welchem die energetischen Gewinne mit steigendem Speichervolumen abzufallen beginnen. Dazu erfolgt ein Vergleich aller möglichen Volumenkombinationen der BWW- und HWW-Speicher von 0.2 m³ bis und mit 0.4 m³ resp. 0.5 m³ in Schritten von 0.1 m³. Im Fall des Kombispeichers werden Volumen von 0.3 bis 0.7 m³ untersucht. Sämtliche Simulationen mit unterschiedlichen Speichergrossen werden zunächst mit dem höheren Heizwärmebedarf eines sanierten Gebäudes nach MuKE n 2014 durchgeführt. Sollten verschiedene Kombinationen ähnlich effizient sein, d.h. sich in der SJAZ nicht um mehr als 0.05 unterscheiden, wird die volumenbezogen kleinere Kombination weiterverwendet.

3.5.3 Einschalttemperatur der Speicherbeladung und Temperaturprognose

Einerseits wird bei den jeweils effizientesten Speicherkombinationen die Steuerung so angepasst, dass bereits beim Überschreiten einer mittleren Aussentemperatur von 10 °C der HWW-Speicher resp. der HWW-Bereich nicht mehr beladen wird. Um die Restwärme im Speicher nutzen zu können wird die Heizkreisaktivierung weiterhin bei 16 °C erfolgen. Andererseits soll der Einfluss der Verwendung des 24 Stundenmittels und der künftigen mittleren Umgebungstemperatur (24h im Voraus) überprüft werden. Diese sind in Polysun voreingestellt auswählbar. Sollte die Reduktion des Stromverbrauches gering, d.h. unter einem Prozent liegen, wird diese Einstellung nicht weiterverwendet.

3.5.4 Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser

Für alle drei Varianten wird der Einfluss der WRG aus dem Abwasser auf das System ebenfalls anhand der effizientesten Systemkonfiguration untersucht. Sind die Unterschiede der einzelnen Systeme gering (SJAZ unterscheidet sich weniger als um 0.05) wird in Anlehnung an die Entscheidung über die Speichergrossen die technisch einfacher zu realisierende priorisiert.

3.5.5 Sensitivitäten

Die jeweils effizientesten Varianten mit und ohne WRG-Systeme werden anschliessend unter geänderten Rahmenbedingungen getestet. Dies sind einerseits das Vorhandensein einer mechanischen Lüftung mit WRG und einem niedrigeren Heizenergiebedarf bei Neubauten und andererseits wird auch der Einfluss unterschiedlicher Klimaregionen untersucht. Dazu werden ebenfalls die Resultate der effizientesten Varianten mit und ohne WRG resp. mechanischer Lüftung für ein saniertes Gebäude mit jenen für Lugano als Vertreter der Alpensüdseite mit

einer mittleren Jahrestemperatur gemäss Meteo Schweiz (2016) von 12.4 °C und Adelboden als Vertreter des westlichen Alpennordhangs (mittlere Jahrestemperatur 5.7 °C) verglichen.

4 Ergebnisse

4.1 Kaltwasserspeicher

Bei gleichbleibenden Speichergössen für das HWW und BWW führt eine Vergrösserung des KW-Speichers zu steigender Effizienz und damit zu sinkendem Energieverbrauch (Abbildung 14). Der WP steht im KW-Speicher mehr Energie zur Verfügung, wodurch eine Effizienzsteigerung erfolgt. Bei der Betrachtung des Stromverbrauches der WP, zeigt sich denn auch eine Reduktion im Bereich von rund 5 % durch die Verwendung einer Frischwasserstation in Variante C im Vergleich zu Variante A. Bei Variante B liegt der Stromverbrauch der WP zwischen den beiden anderen Varianten. Der Grund des höheren Stromverbrauches im Vergleich zu Variante C liegt an der höheren Soll-Temperatur für den HWW-Bereich. Gleichzeitig trägt das höhere Temperaturniveau jedoch zu einer Reduktion des Stromverbrauches durch die Zusatzheizung (- 45 % im Vergleich zu A und - 25 % zu C) bei. Weil das HWW quasi als Vorwärmung des BWW dient, muss weniger Energie zu dessen Erwärmung aufgewendet und so auch die Beladungszeit verkürzt werden. Es scheint als ob dadurch das Zusatzheizelement weniger oft zugeschaltet werden muss. Dessen Stromverbrauch kann um über 80 % im Vergleich zur Variante C gesenkt werden.

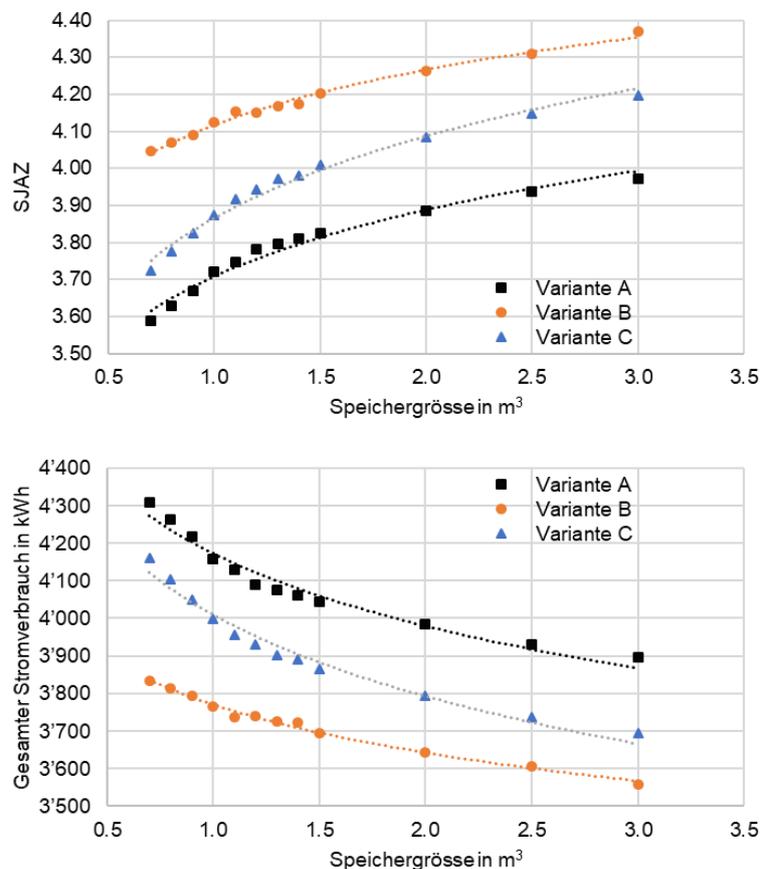


Abbildung 14 Variantenvergleich in Bezug auf die SJAZ (o.) und den gesamten Stromverbrauch (u.).

Wie aus der Abbildung 14 weiter zu erkennen ist, sinkt die Stromeinsparung pro 0.1 m^3 mit zunehmendem Volumen. Für alle drei Varianten kann ein logarithmischer Zusammenhang festgestellt werden (gepunktete Linien in Abbildung 14). D.h. im Bereich kleinerer Volumen ist die Einsparung durch eine Volumenvergrößerung am grössten, flacht ab und nähert sich einem Grenzwert. Beispielsweise führt eine Volumensteigerung von 0.7 auf 0.8 m^3 bei den Varianten A und C zu einer Stromeinsparung von rund 46 resp. 56 kW elektrischer Energie. Zwischen 1.5 und 2 m^3 sind es durchschnittlich 12 resp. 14 kWh und zwischen 2.5 und 3 m^3 noch ca. 7 resp. 9 kWh . Das Einsparungsmaximum findet sich jedoch beim Schritt von 0.9 m^3 auf 1 m^3 (59 kWh). Ein ähnlicher Zusammenhang gilt, wenn auch im Bereich tieferer Volumen (21 kWh von 0.7 auf 0.8 m^3) weniger akzentuiert, ebenfalls für Variante B. Dies dürfte an der höheren Soll-Temperatur für den HWW-Bereich liegen, wodurch während den kalten Monaten mehr Energie im BWB-Bereich gespeichert und somit die KW-Speichertemperatur stärker gesenkt wird als bei den Varianten A und C. Dadurch wird die Temperaturdifferenz zwischen KW-Speicher und Umgebung erhöht, wodurch insgesamt mehr Umgebungswärme übertragen werden kann, was in Abbildung 15 resp. bei einem Vergleich der Monatswerte in Abbildung 16 ersichtlich wird. Abbildung 15 zeigt weiter, dass dieser Effekt ab KW-Volumen von 1.5 m^3 abreißt und die Differenz zur Variante A durch die niedrigere Soll-Temperatur für die BWB-Bereitstellung erklärt werden kann.

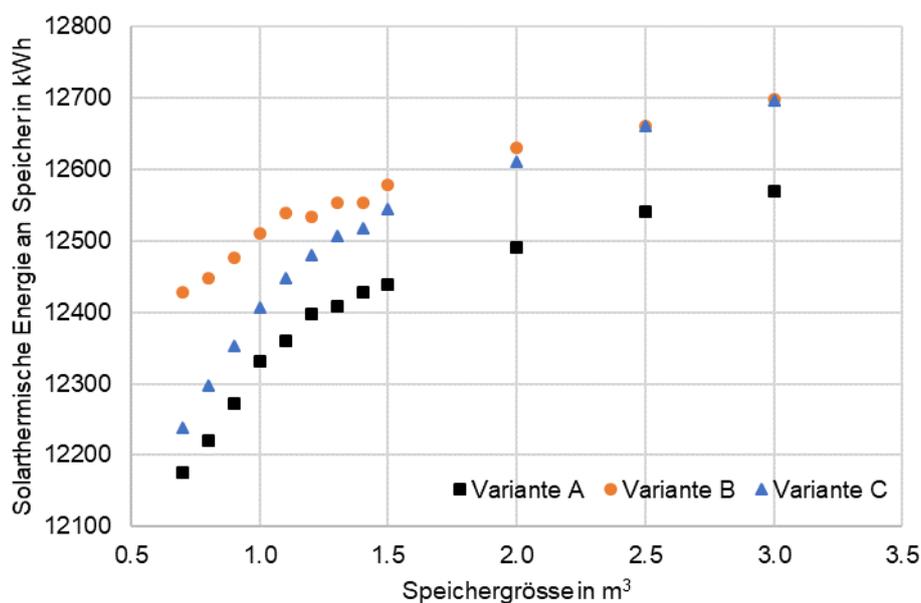


Abbildung 15 An den KW-Speicher übertragene Energie aus den PVT-Modulen.

Ein grösseres KW-Speichervolumen führt während allen Monaten zu einer Effizienzsteigerung des Systems. Während den warmen Monaten sind die Differenzen jedoch gering. Dies dürfte am Energieüberschuss mit gleichzeitig tiefem Energiebedarf liegen, so dass zu jeder Zeit die

maximale Solevorlauftemperatur von 22 °C überschritten wird. Es besteht also ein Energieüberangebot, welches nicht genutzt werden kann. Während den kälteren Übergangsmonaten und den Wintermonaten spielt die KW-Speichergrosse eine ausgeprägtere Rolle. So ist beispielsweise bei Variante A für den Oktober und Dezember in Abbildung 16 eine stärkere Effizienzsteigerung pro 0.1 m³ für kleinere Speichergrossen zu erkennen. Eine Steigerung von 0.7 auf 1.5 m³ führt zu einer Steigerung der SJAZ um rund 0.5, während es im Januar oder Dezember lediglich 0.2 sind. Während den strahlungsärmeren Wintermonaten dient die Umgebungswärme als Hauptenergiequelle, welche rund um die Uhr verfügbar ist. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Energie gespeichert oder im Parallelbetrieb von der WP direkt bezogen wird. Grössere Speicher helfen jedoch mehr Einstrahlungswärme zu speichern, was die saisonalen Unterschiede in der Effizienzsteigerung erklärt.

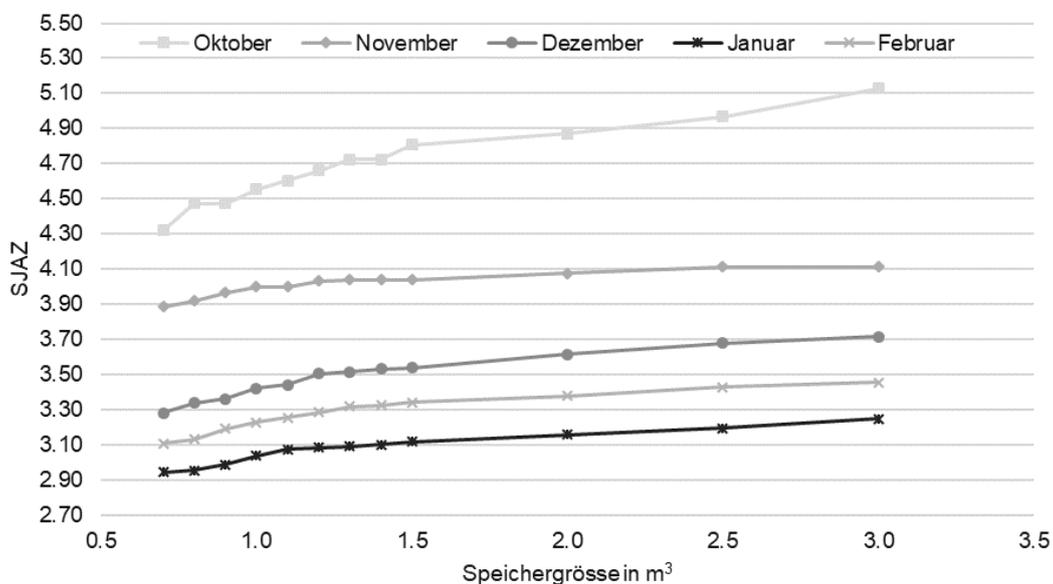


Abbildung 16 Systemeffizienz bei der Steigerung des KW-Speichervolumens von 0.7 auf 3 m³ während den kalten Monaten für die Variante A.

Für die weiteren Simulationen findet bei Variante A ein 1.2 m³ und bei C ein 1.3 m³ grosser KW-Speicher Verwendung. Für Variante B fasst dieser 1.1 m³. Ab diesen Grössen tendiert der Effekt einer Volumensteigerung gegen Null (Steigerung der SJAZ ist kleiner als 0.02 pro 0.1 m³).

4.2 Kombi-, Brauch- und Heizwarmwasserspeicher

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Variation der BWW- und HWW-Speichergrossen. Während sich die SJAZ bei Variante A und C um bis zu 0.20 steigern lässt. Dabei verzeichnen Kombinationen mit einem 0.5 m³ HWW-tendenziell die geringste Effizienz. Die Kombination eines 0.4 m³ BWW-Speichers mit einem 0.4 oder 0.5 m³ grossen HWW weist bei Variante A die höchste SJAZ von 4.02 auf. Auch mit einem kleineren BWW-Speicher wird eine ähnliche hohe Effizienz erreicht (SJAZ von 3.99). Für Variante C zeigt sich eine Kombination mit grösserem BWW-Speicher und kleinerem HWW-Speicher als die effizienteste. Es wird eine SJAZ von 4.29 erreicht. Kleinere BWW-Speichervolumen führen zu einer Reduktion der SJAZ von mindestens 0.1.

Die vergleichsweise schlechte Performanz der Kombinationen mit 0.3 m³ BWW-Speicher bei Variante C, kann durch die Kombination von gespeicherter Energiemenge und die Systemsteuerung erklärt werden. Abbildung A2 im Anhang zeigt exemplarisch am Verlauf der Ist-Vorlauftemperatur der Heizung, der Temperaturen der obersten Speicherschichten und des Einschaltverhaltens der elektrischen Zusatzheizung, dass bei Variante C offensichtlich nicht genügend Energie im BWW-Speicher gespeichert werden kann, um eine längere Heizperiode zu überbrücken und die Zusatzheizung entsprechend häufiger als bei einem 0.4 m³ und mit mehr Leistung als bei einem 0.2 m³ Speicher zugeschaltet werden muss.

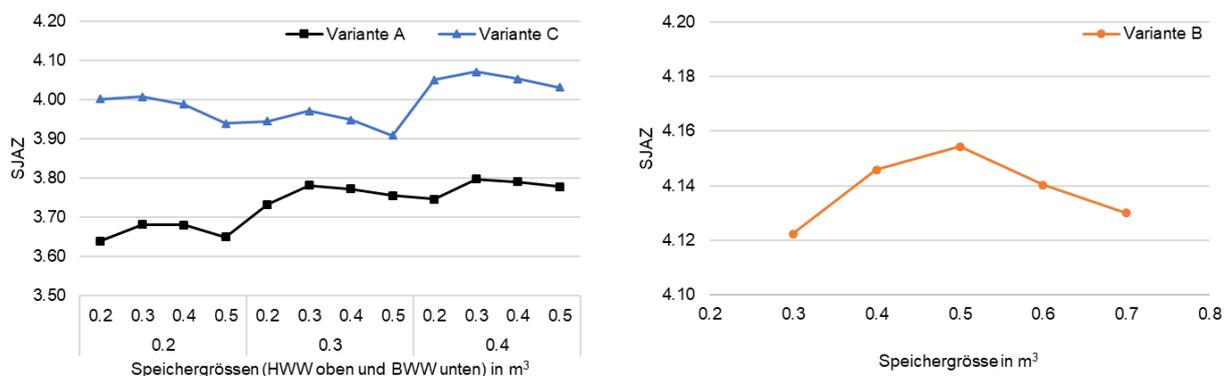


Abbildung 17 Ergebnisse der Speichergrossenvariation für H- und BWW für die SJAZ (l.) und den gesamten Stromverbrauch (r.).

Das Potenzial von grösseren Kombispeichern im Fall von Variante B ist, wie Abbildung 17 zeigt, minimal. Durch die Vereinigung von BWW- und HWW-Speicher muss bei Variante B hingegen keine Überbrückung einer Heizperiode erfolgen, wodurch die Speichergrosse in diesem Bezug eine, wenn überhaupt beschränkte Rolle spielt. Wird keine Heizenergie benötigt dient die Energie aus dem HWW-Bereich als Vorerwärmung für das BWW. Vor- und Nachteile von unterschiedlichen Speichergrossen spielen bei dieser Verwendung also kaum eine Rolle.

Aus diesem Grund wird auch ein 0.6 m³ Kombispeicher weiterverwendet, da er ein geringeres Energiedefizit (24.1 vs. 40.9 kWh) aufweist als der 0.5 m³ Speicher.

Für die weiteren Untersuchungen wird für Variante A die Kombination aus einem 1.2 m³ KW-, 0.3 m³ HWW- und 0.3 m³ BWW-Speicher, für Variante B 1.1 m³ KW- und 0.6 m³ Kombi-speicher und für Variante C 1.3 m³, 0.3 m³ und 0.4 m³ verwendet. Im Fall der Variante A wird aufgrund des geringen Unterschiedes bei der SJAZ die kleinere Kombination verwendet.

4.3 Einschalttemperatur der Speicherbeladung und Temperaturprognose

Eine Senkung der Einschalttemperatur zur Speicherbeladung von 16 auf 10 C führt bei allen Varianten zu einer Stromverbrauchsreduktion von weniger als 0.4 %. Die Verwendung der 24-stündigen Durchschnittstemperatur anstelle der aktuellen Aussentemperatur zur Steuerung der Speicherbeladung bringt kaum Effizienzsteigerung (< 0.1 %) mit sich. Auch der Einsatz der 24-stündigen Durchschnittstemperatur des Folgetages als eine Art der Prognose führt zu minimalen Änderungen in der Effizienz und des Stromverbrauches. Während bei den Varianten A und C eine Steigerung des Stromverbrauches eintritt (< 0.2 %), ist bei Variante B eine geringfügige Reduktion um ca. 0.2 % zu verzeichnen.

4.4 Abwasserwärmerückgewinnung

Bei der Betrachtung der monatlichen durch die Abwasserwärmeübertrager der Variante A übertragenen Energie in Abbildung 18 zeigt sich das erwartete saisonale Muster bei der Nutzung als Wärmequelle für den KW-Speicher resp. direkt für die WP. Dabei erweist sich die aktive WRG der passiven ganzjährig als überlegen.

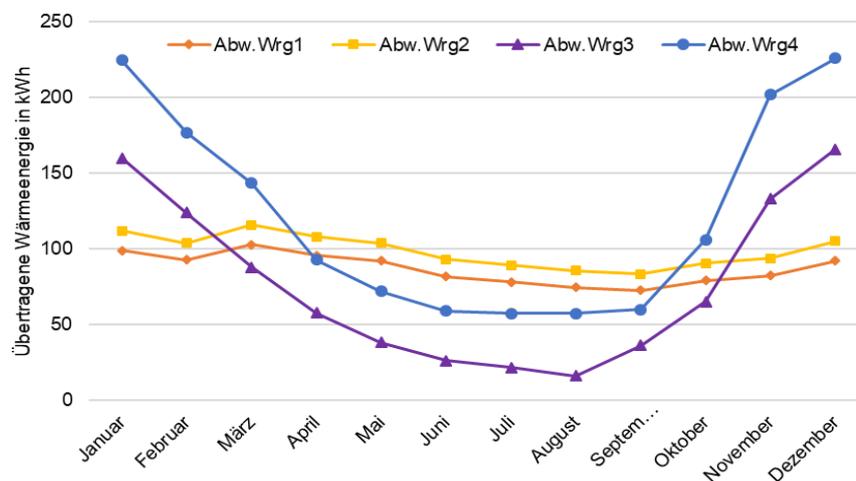


Abbildung 18 Übertragene Wärmeleistung der Wärmeübertrager in Variante A.

Obwohl bei der aktiven WRG (Abw.Wrg4) total am meisten Energie aus dem Abwasser zurückgewonnen werden kann, ist sie bei der Systembetrachtung nicht die geeignetste (Tabelle 1). Bei beiden produktionsseitig eingebundenen Lösungen steht die zurückgewonnene Energie besonders bei tiefen Aussentemperaturen in deren Konkurrenz. Im Vergleich zu den beiden Varianten der BWW-Vorerwärmung (Abw.Wrg1 und 2) können der Umgebung 531 resp. 457 kWh weniger entzogen werden. In Bezug auf die Systemeffizienz ist es denn auch unerheblich ob die Energie im KW-Speicher vom Abwasser oder der Umgebung stammt. Was in diesem Fall einen Unterschied bewirken kann, ist das Temperaturniveau durch das der COP der WP gesteigert werden kann. Da ist die aktive WRG klar im Vorteil, denn der Temperaturunterschied welcher durch die passive Einbindung im Fall der Abw.Wrg3 im KW-Speicher bewirkt wird, kann offensichtlich genauso gut durch die Umgebungswärme geschehen. Die Einbindung auf der Verbraucherseite bietet den Vorteil, dass sie ganzjährig den Energiebedarf reduziert. Der ebenfalls gesunkene solare Eintrag, wie er aus Tabelle 1 ersichtlich wird, rührt vom geringeren Energiebezug aus dem KW-Speicher, wodurch die Temperaturdifferenz zur Umgebung verkleinert und die Wärmeübertragung dadurch vermindert wird. Dem zu Folge erweist sich die passive WRG für die Vorerwärmung des gesamten Frischwassers (Abw.Wrg2) für das L-Sol System als die beste Möglichkeit.

Tabelle 1 Berechnung des effektiven Energiegewinnes bei der WRG aus dem Abwasser.

		Abw.Wrg1	Abw.Wrg2	Abw.Wrg3	Abw.Wrg4
Energie aus Abwasser	kWh	1044	1183	933	1477
Rückgewinnungsrate	%	30.8	34.9	27.5	43.6
Solarthermische Energie an KW-Speicher	kWh	-749	-833	-905	-1290
Effektiver Energiegewinn	kWh	295	350	28	187

Auch bei Variante B und C führt die Nutzung der Abwärme in jedem Fall zu einer Senkung des Stromverbrauches und damit zu einer Effizienzsteigerung (Abbildung 19). Genauso erweist sich die Abw.Wrg2 in Variante B als überlegen und in Variante C als gleichwertig. Effizienter ist diese Variante insbesondere dann, wenn die BWW-Temperatur aus dem Speicher über der Soll-Temperatur an der Zapfstelle liegt, was bei Variante A und in geringerem Masse bei Variante B der Fall ist. Obwohl bei Variante B eine Zieltemperatur von 48 °C eingestellt ist, wird die oberste Speicherschicht bei der Erwärmung des HWW-Bereichs regelmässig auf rund 50 bis 52 °C miterwärmt. Weil die Systemeffizienz jedoch gut ist, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Anpassung der Regelung verzichtet. Bei Variante C ist die Frischwassertemperatur nach der Frischwasserstation so eingestellt, dass kaum kühleres Frischwasser beigemischt werden muss. Dies dürfte auch der Grund für den fehlenden Unterschied zwischen Abw.Wrg1 und 2 sein.

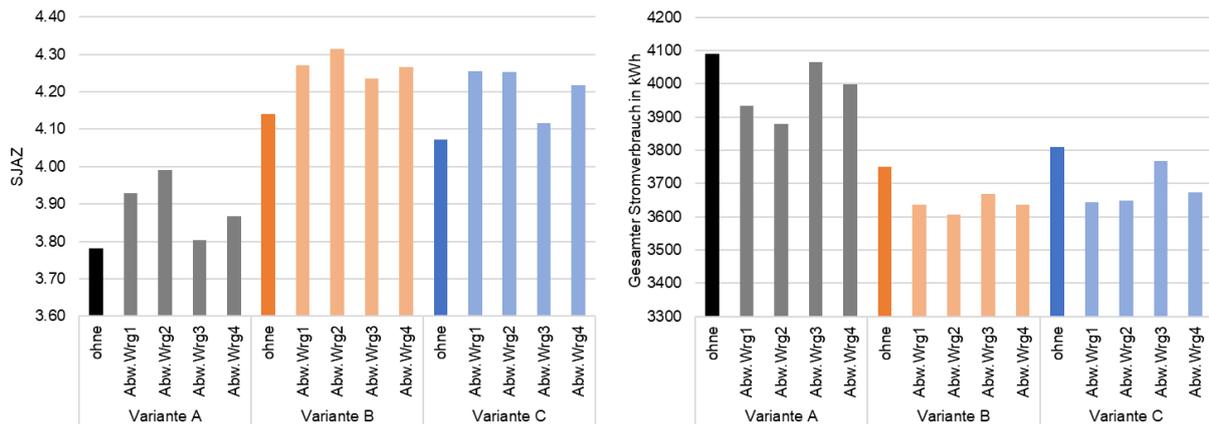


Abbildung 19 Simulationsergebnisse für die getesteten Varianten zur WRG aus Abwasser in Bezug auf die SJAZ (l.) und den gesamten Stromverbrauch (r.).

4.5 Sensitivitäten

Folgende Kapitel beschreiben die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen. Der Wärmebedarf wird durch die Änderung des Gebäudebedarfes, dem Vorhandensein einer mechanischen Lüftung mit WRG aus der Abluft und dem Standort des Gebäudes variiert.

4.5.1 Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Werden die vorgestellten Varianten des L-Sol Systems in einem Gebäude mit mechanischer Lüftung und WRG eingesetzt, wird die Effizienz des Heizsystems kaum beeinflusst (Abbildung 20). Erwartungsgemäss ist jedoch der gesamte Stromverbrauch deutlich tiefer als ohne. Den grössten Effekt auf die Systemeffizienz hat eine Lüftung mit WRG bei Variante C. Der für die BWW-Erwärmung notwendige Temperaturhub ist deutlich kleiner und damit die Effizienz grösser als beispielsweise bei Variante A. Dadurch wird die Effizienzsteigerung für die Bereitstellung des HWW bei der SJAZ besser sichtbar. In Kombination mit einer passiven WRG zur BWW-Vorerwärmung (Abw.Wrg2), bei der der Stromverbrauch auch für die BWW-Erwärmung weiter gesenkt wird, führt eine mechanische Lüftung mit WRG zu einer Steigerung der SJAZ von 0.1.

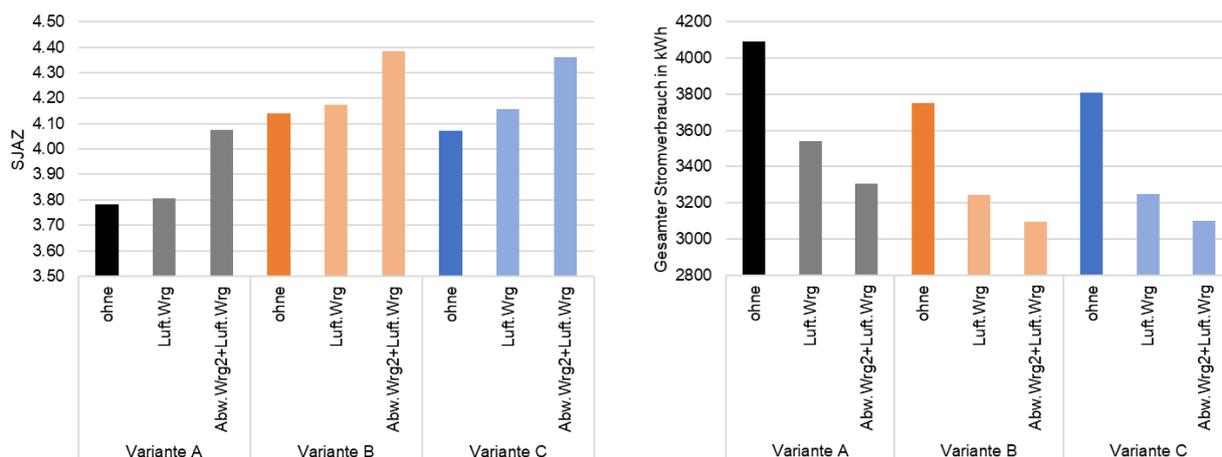


Abbildung 20 Simulationsergebnisse für die Grundvarianten mit und ohne Implementierung der effizientesten Abwasser-WRG beim Vorhandensein einer mechanischen Lüftung mit WRG (SJAZ I. und gesamter Stromverbrauch (r.).

4.5.2 Neubau

Sämtliche bisherigen Resultate wurden anhand eines nach MuKEn 2014 sanierten EFH simuliert. Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse. Weil sich das Verhältnis von HWW- zu BWB-Wärme um ein Drittel verkleinert und der gesamte Wärmebedarf gesenkt wird, ist der Effekt WRG aus dem Abwasser und der Abluft entsprechend grösser. Allgemein kann eine Steigerung der SJAZ zwischen 0.1 (Variante A) und 0.4 (Variante C mit WRG aus Abwasser und Luft), aufgrund der geringeren Abkühlung des KW-Speichers, festgestellt werden. Weil der Energieaufwand für die BWB-Bereitstellung in einem Neubau stärker ins Gewicht fällt, ist die Effizienzsteigerung durch die Abwasser-WRG bei Variante A deutlich ausgeprägter als bei einem sanierten Gebäude mit höherem Heizenergiebedarf. Analoges gilt zudem für den Effekt der WRG aus der Abluft.

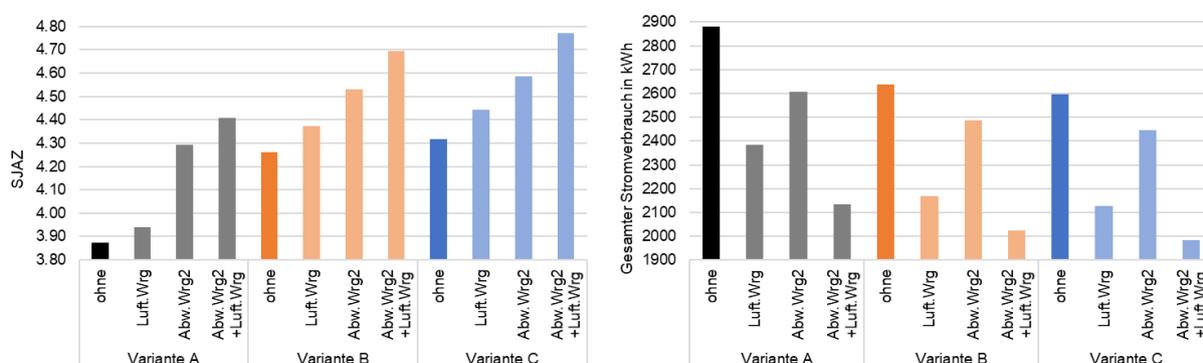


Abbildung 21 Simulationsergebnisse für die Grundvarianten mit und ohne Implementierung der effizientesten Abwasser-WRG resp. mechanischer Lüftung mit WRG für einen Neubau nach MuKEn 2014 (SJAZ I. und gesamter Stromverbrauch r.).

Der Grund, warum Variante B nicht in der gleichen Masse von der Reduktion des Heizwärmebedarfes profitieren kann wie Variante A ist noch unklar. Weder eine Reduktion der im Vergleich zu den anderen Varianten höheren Zieltemperatur im HWW-Bereich des Kombispeichers noch eine Reduktion der zu erwärmenden Speichermasse konnte eine Änderung bewirken. Möglicherweise liegen noch unentdeckte Regelungskonflikte oder noch zu identifizierende hydraulische Probleme im Speicher vor, welche für unnötigen Stromverbrauch verantwortlich sind.

4.5.3 Standort

Die getesteten Modelle des L-Sol System eignen sich ebenfalls für Standorte der Alpensüdseite. Mit den Modellen B und C mit Abwasser-WRG lässt sich eine SJAZ von 5.3 und 5.4 erreichen (Tabelle 2). Ohne WRG liegen die SJAZ bei 4.5 (Variante A), 5.0 (Variante B) und 5.1 (Variante C). Auch an dieser Stelle kann Variante B im Vergleich zu Variante C weniger vom tieferen Heizenergiebedarf profitieren.

Für den Standort Adelboden am westlichen Alpennordhang können von den getesteten Varianten lediglich jene Subvarianten der Modelle A und C mit einer WRG aus der Abluft den Wärmebedarf decken. Wie in Tabelle 2 ersichtlich wird, liegt die Systemeffizienz dabei zwischen 3.4 und 3.9.

Tabelle 2 Performanz der untersuchten Varianten an unterschiedlichen Standorten und Klimazonen.

	Variante A				Variante B				Variante C			
	ohne	Luft.Wrg	Abw.Wrg2	Abw.Wrg2 +Luft.Wrg	ohne	Luft.Wrg	Abw.Wrg2	Abw.Wrg2 +Luft.Wrg	ohne	Luft.Wrg	Abw.Wrg2	Abw.Wrg2 +Luft.Wrg
Rapperswil												
Gesamter Stromverbrauch in kWh	4090	3540	3879	3307	3751	3245	3606	3094	3809	3250	3648	3101
SJAZ	3.78	3.81	3.99	4.08	4.14	4.17	4.31	4.39	4.07	4.16	4.25	4.36
Lugano												
Gesamter Stromverbrauch in kWh	2354	1993	2129	1811	2129	1805	2030	1709	2082	1757	1979	1662
SJAZ	4.52	4.59	5.00	5.06	5.03	5.11	5.29	5.41	5.13	5.23	5.40	5.53
Adelboden												
Gesamter Stromverbrauch in kWh		4510		4170						4186	4761	3944
SJAZ		3.43		3.71						3.70		3.93
Adelboden (angepasst)												
Gesamter Stromverbrauch in kWh	5134	4280	4797	3966	4654	3922	4425	3710	4798	3951	4563	3751
SJAZ	3.53	3.62	3.78	3.91	3.90	3.96	4.11	4.20	3.78	3.93	3.98	4.14

Ohne diese WRG kann die Wärmegewinnung aus der Umgebungswärme nicht in der gleichen Masse gesteigert werden wie der Wärmebedarf des Gebäudes dies erfordern würde (bei Variante A und C rund 10 vs. 17 % und 11.4 vs. 16.5 % bei Variante B). Die Gründe, warum Variante B trotz höherem Wärmebezug aus der Umgebung nicht in der Lage ist das Gebäude mit der nötigen Wärmeenergie zu versorgen, ist möglicherweise bei der Fluidodynamik im Kombispeicher zu suchen. Im Vergleich zu den anderen Varianten sind die beiden Stutzen für den

Heizkreislauf deutlich näher beieinander, was bei hohen Durchflussraten zu einer ungewollten Durchmischung der Speicherschichten und damit zu einer Temperaturreduktion führen kann. Dadurch würde die Vorlauftemperatur gesenkt und die Zielraumtemperatur kann nicht mehr hergestellt werden. In der Folge der tieferen Differenz von Vorlauf- und Raumtemperatur steigert das System die Durchflussrate weiter, was die Durchmischung der Speicherschichten verstärkt. Die genaue Ursache bedarf jedoch weiterer Untersuchungen, welche an dieser Stelle nicht durchgeführt wurden.

Bereits durch eine Vergrößerung der KW-Speichers um jeweils 0.2 m^3 und den Einbau eines leistungsfähigeren Heizstabes (8 kW) könnte der Wärmebedarf mit allen Varianten auch in Adelboden gedeckt werden. Wird auch die Einschalthysterese des PVT-Modulfeldes so angepasst, dass bereits bei einer Temperaturdifferenz von 4 anstelle der bisherigen $6 \text{ }^\circ\text{C}$ Wärme an den KW-Speicher übertragen wird, lässt sich die SJAZ im Vergleich zu den ursprünglichen Systemkonfigurationen um 0.2 steigern und den Wärmebedarf auch mit allen Varianten decken (Tabelle 2). Im Fall von kälteren Klimazonen verkleinert sich die Temperaturdifferenz zwischen KW-Speicher und Aussentemperatur während den kalten Monaten stärker und es kann dementsprechend weniger Energie zur WP geführt werden. Durch die Anpassung der Einschalthysterese des PVT-Modulfeldes kann dem entgegengewirkt werden.

4.6 Phase Changing Materials

Der Einsatz von PCM in den Speichern des L-Sol Systems würde es erlauben, die Speichergrößen für BWW und HWW zu verkleinern. Dadurch wird das Heizungssystem auch bei beschränkten Platzverhältnissen installierbar und damit konkurrenzfähiger. Die höhere Speicherkapazität pro Masseinheit kann zudem dazu beitragen, dass mit kleinerem Volumen trotzdem mehr Wärmeenergie gespeichert werden kann. Dadurch liesse sich möglicherweise das kurzzeitige Absinken der Speicher- unter die Solltemperatur puffern und damit die Einsatzzeit der elektrischen Heizstäbe reduzieren. Weiter dürfte die konstante Speichertemperatur die Effizienz der WP durch eine Reduktion des notwendigen Temperaturhubs steigern.

Andererseits liesse sich möglicherweise die Effizienz steigern, indem PCM mit einem Schmelzpunkt im Bereich von $0 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $-17 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. So kann die gleiche oder grössere Energiemenge auf höherem Temperaturniveau gespeichert werden, wodurch der COP der WP erhöht und allenfalls der Einsatz der Zusatzheizungen umgangen wird. Zudem liesse sich dadurch mehr Umgebungswärme speichern. Während sich bei der sensiblen Speicherung die Speichertemperatur der Aussentemperatur kontinuierlich nähert, bliebe eine bestimmte Temperaturdifferenz länger bestehen, wodurch mehr Wärme übertragen werden könnte. Ein Beispiel eines solchen PCM für den Einsatz im Mittelland wäre Triethylene glycol

mit einem Gefrierpunkt um -7 °C (Oró, De Gracia, Castell, Farid, & Cabeza, 2012; The Dow Chemical Company, 2007). Für die Alpensüdseite käme beispielsweise Wasser mit einem Gefrierpunkt bei 0 °C und in Adelboden eine eutektische Lösung (Salzhydrate von Phase Change Material Products Limited (2013)) mit Gefrierpunkt um -15 °C in Frage. Tabelle 3 zeigt unter anderem die thermischen Eigenschaften dieser PCM.

Tabelle 3 Eigenschaften möglicher PCM für den Einsatz im KW-Speicher.

	Gefrierpunkt °C	Dichte kg/m ³	Schmelzenthalpie kJ/kg	spezifische Wärmekapazität	
				unter 0°C kJ/kg*K	0 - 50°C kJ/kg*K
Wasser ¹	0	1000	334	2.20	4.18
Triethylen Glykol ²	-7	1100	247	1.12	1.50
Salzhydrat (E-15) ³	-15	1060	303	3.87	3.87
Wasser/Glykol (35%) ⁴	-21	1050		3.60	3.70

Bemerkung: ¹ Für die spezifische Wärmekapazität von Eis wird der Wert bei -10 °C stellvertretend für den Bereich unter 0 °C verwendet
² The Dow Chemical Company (2007) und Oró u. a. (2012)
³ Phase Change Material Products Limited (2013) ; Annahme: Die Herstellerangabe bezüglich der spezifischen Wärmekapazität gilt für den gesamten Temperaturbereich über dem Gefrierpunkt
⁴ pro Kühlsole GmbH (2007)

Weil sich PCM noch nicht in Polysun implementieren und simulieren lassen, wurde anstelle dessen eine überschlagsmässige Berechnung des Einflusses der PCM auf die Speicherkapazität durchgeführt um eine Abschätzung deren Effekte vornehmen zu können (Tabelle 4). Dabei wurde der Einsatz von 200 kg PCM im KW-Speicher und ein konstantes Gesamtspeichervolumen vom 1 m^3 angenommen. Es zeigt sich in jedem Fall eine Steigerung der gesamten Wärmekapazität. Beim Einsatz von Triethylen Glykol, mit seiner vergleichsweise sehr niedrigen spezifischen Wärmekapazität (Tabelle 3) fällt diese jedoch deutlich niedriger aus als bei den anderen PCM. Im Temperaturbereich über 0 °C kann vergleichsweise sogar weniger Energie gespeichert werden. Deutlich wird jedoch eine Verdoppelung der Speicherkapazität im Bereich von -17 bis -7 °C , welcher durch den Phasenwechsel des Triethylen Glykols bei -7 °C begründet ist. Der Einsatz des PCM E-15 sorgt sogar beinahe zu einer Verdreifachung in demselben Bereich. Dabei kann keine Kapazitätsreduktion in den oberen Temperaturbereichen festgestellt werden. Insgesamt führt dessen Einsatz gesamthaft zu einer Kapazitätssteigerung von 25 % im KW-Speicher. Beim Einsatz von Wasser als PCM ist neben der zu erwartenden Kapazitätssteigerung im Temperaturbereich von -7.1 bis 0 °C auch eine Reduktion für Temperaturen unter -7 °C festzustellen. Dies liegt an der vergleichsweise niedrigen spezifischen Wärmekapazität von Eis.

Tabelle 4 Einfluss ausgewählter PCM auf die Speicherkapazität des KW-Speichers.

	Speichergrösse	Dichte	Masse	Speicherkapazität				
				-17 bis -7°C	-7.1 bis 0°C	über 0°C	Total	kWh
				kJ	kJ	kJ	kJ	
m ³	kg/m ³	kg						
Wasser/Glykol (35%)	1.00	1'050	1'050	37'800	26'460	194'250	258'510	72
PCM (Wasser)	1.00		1'040	34'240	90'768	197'200	322'208	90
Wasser/Glykol (35%)	0.80	1'050	840	30'240	21'168	155'400	206'808	57
Wasser	0.20	1'000	200	4'000	69'600	41'800	115'400	32
PCM (Triethylene Glykol)	1.00		1'059	82'567	23'217	173'932	279'716	78
Wasser/Glykol (35%)	0.82	1'050	859	30'927	21'649	158'932	211'508	59
Triethylene Glykol	0.18	1'100	200	51'640	1'568	15'000	68'208	19
PCM (E-15)	1.00		1'052	101'308	26'886	196'299	324'493	90
Wasser/Glykol (35%)	0.81	1'050	852	32'968	21'468	157'599	212'035	59
E-15	0.19	1'060	200	68'340	5'418	38'700	112'458	31

Aufgrund der tiefen Temperaturen im KW-Speicher und Solarkreislauf beim Einsatz von PCM ist zu verhindern, dass diese bei Temperaturen unter ihrem jeweiligen Gefrierpunkt nicht die Leitungen von und zur WP verstopfen. Das PCM muss vom restlichen Speicherfluid physikalisch durch eine Ummantelung getrennt werden. Dabei ist auf eine möglichst grosse Oberfläche zur Wärmeübertragung zu achten (Cabeza u. a., 2011). Dies hat mitunter auch den Vorteil, dass keine speziellen Speichersysteme erforderlich sind. Ummantelte PCM wie beispielsweise solche von klara energy systems & Axiotherm (2018) lassen sich in handelsüblichen Speichern einsetzen.

5 Diskussion

Die Simulationen zeigen eine stetige Effizienzsteigerung mit zunehmendem KW-Speichervolumen. Sie folgt einer logarithmischen Funktion mit gegen null tendierendem Steigerungspotenzial mit zunehmender Speichergrösse. Es ist besonders im Hinblick auf das Einsatz- und Marktfeld, welches durch L-Sol erschlossen werden soll, wichtig die Gesamtgrösse des Systems möglichst klein zu halten. Entsprechend wurden auch nicht die grössten KW-Speicher verwendet, sondern jene die noch eine Steigerung der SJAZ um mehr als 0.02 bewirkten. Bei der Grössengestaltung des Systems besteht entsprechend einen gewisser Spielraum nach unten.

Die Resultate zeigen, dass sämtliche vorgestellten Varianten auch ohne Optimierung der Speichergrössen oder der Verwendung einer WRG aus Abwasser- oder Abluft, effizienter sind als marktübliche LWWP-Systeme mit einer SJAZ gemäss Arpagaus u. a. (2017) von 2.7 - 3.2. Sogar die ineffizienteste Systemkonfiguration (Variante A mit 0.7 m³ KW-, 0.3 m³ BWW- und 0.3 m³ HWW-Speicher) weist in dieser Arbeit eine SJAZ von 3.6 auf. Nach der Optimierung (1.2 m³ KW-Speicher) steigt diese gar auf rund 3.8. Durch die Verwendung einer Frischwasserstation und der damit verbundenen Absenkung der BWW-Solltemperatur sind auch 4.14 (Variante B mit 1.1 m³ KW-, 0.6 m³ Kombispeicher) und 4.07 (Variante C mit 1.3 m³ KW-, 0.4 m³ BWW- und 0.3 m³ HWW-Speicher) möglich. Damit liegen alle Varianten im Effizienzbereich von SW-WP mit Erdwärme als Energiequelle. Dieser erstreckt sich von 3.3 bis 5.8 (Arpagaus u. a., 2017). Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei den vorliegenden Resultaten um Simulationsergebnisse unter optimalen Bedingungen handelt und nicht um Feldmessungen, wie die Werte der genannten Autoren. So sind die PVT-Module optimal nach Süden ausgerichtet, was bei Bestandsbauten selten der Fall ist. Entsprechend dürften sich die optimalen KW-Speichergrössen und evtl. auch die anderen Speichergrössen in Abhängigkeit der Gebäudeausrichtung unterscheiden. Dabei unterscheidet sich das L-Sol System nicht von anderen Heizsystemen, welche auch auf das jeweilige Gebäude ausgelegt werden müssen.

Die Varianten mit Frischwasserstation sind zudem auch bereits ohne weitere Optimierungen mit Eisspeichersystemen konkurrenzfähig. Das in Kapitel 2.2.2 vorgestellte System von Winteler u. a. (2014) mit Eisspeicher weist eine SJAZ von 4.10 auf. Durch die Integration einer WRG aus dem Grauwasser zur Vorerwärmung des BWW, durch die sich rund 35 % der für die BWW-Bereitstellung aufgewendete Energie zurückgewinnen und den Stromverbrauch zur BWW-Bereitstellung um 10 % reduzieren lassen, werden die Variante B (SJAZ 4.30) und C (SJAZ 4.25) auch mit der Effizienz der solarthermisch unterstützten Erdsondensysteme von Haberl u. a. (2014) und Jonas u. a. (2017) vergleichbar. Je nach Modellvariante lässt sich eine Reduktion des gesamten Stromverbrauches um rund 5 % (Variante A) bis 10 % (Variante B

und C) realisieren. Weiteres Potenzial liegt in der Verwendung eines grösseren Fallrohr-Filmstrom-Wärmeübertragers. Bei den vorliegenden Simulationen beträgt dessen Länge lediglich einen Meter. Dadurch ist gewährleistet, dass er mit hoher Wahrscheinlichkeit in jedem Gebäude installiert werden kann. In den allermeisten Fällen liessen sich mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auch ein doppelt so langer Übertrager einbauen und die Rückgewinnungsrate weiter steigern. Welche Grösse dabei optimal wäre, müsste in einer Folgearbeit geklärt werden. Bei der Betrachtung der genannten Resultate ist zu beachten, dass ihnen die Annahme einer getrennten Führung von Schwarz- und Grauwasser zugrunde liegt und Leistungseinbussen durch die Foulschichtbildung im Falle einer gemeinsamen Führung nicht berücksichtigt. Kann eine Trennung nicht realisiert werden, bietet sich die aktive WRG mittels Abwasserspeichertank an. Besonders in Kombination mit Variante B ist der dafür benötigte Platzbedarf nicht grösser als für die Varianten A und C.

Hinsichtlich einer Optimierung durch eine Prognose der Aussentemperaturen scheinen die hier getesteten Varianten des L-Sol Systems bereits optimal eingestellt und das weitere Potenzial minim zu sein. Dank der Verwendung des Zwischenspeichers für die Bereitstellung der Heizungswärme ist eine Entkoppelung der direkten Beziehung zwischen Heizwärmebedarf und Erzeugersteuerung herkömmlicher Heizungssystem möglich.

Während sich sämtliche getesteten Varianten in Bezug auf das Gesamtspeichervolumen (A: 1.7 m³, B: 1.7 m³, C: 1.9 m³) ähneln, unterscheiden sie sich wie gezeigt hinsichtlich ihrer Systemeffizienz teils deutlich. Wird auch die Systemeffizienz mitbetrachtet, sticht die Variante B hervor. Während sie in sanierten EFH die Effizienteste ist, liegt sie bei Neubauten und an wärmeren Standorten mit Variante C gleichauf oder leicht dahinter und dies bei insgesamt geringerem Speichervolumen und -anzahl. Damit gehen auch ökonomische Vorteile einher, welche die Attraktivität des L-Sol Systems steigern. Die Sensitivitätsanalysen zeigen anhand des Beispiels Adelboden zudem den Bedarf einer standortgerechten Anpassung der Speichergrössen und gegebenenfalls auch der Regelungen. Dabei bleibt offen, wie sich die Anpassung der Einschalthysterese des Solarkreislaufes bei geringerem Wärmebedarf auswirkt und muss noch abgeklärt werden.

Einen entscheidenden Beitrag zur weiteren Effizienzsteigerung könnte der Einsatz von PCM leisten. Aufgrund mangelnder Simulationsmöglichkeiten ist eine genaue Einschätzung dessen Einflusses an dieser Stelle jedoch nicht möglich. Die durch eine substanzielle Speicherkapazitäts- und gegebenenfalls auch Temperaturerhöhung in dem für die Effizienz entscheidenden tiefen Temperaturbereich des KW-Speichers während der Heizperiode verspricht jedoch grosses Potenzial. Welches PCM und mit welchem Ziel eingesetzt werden soll und wie es sich auf die Systemeffizienz auswirkt, muss durch eine Simulationsstudie, welche mit Polysun und entsprechend in dieser Arbeit nicht möglich war, geklärt werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das L-Sol System lässt sich durch die Verwendung einer Frischwasserstation und der damit einhergehenden Reduktion der BWW-Temperatur deutlich optimieren. Während sich die Systemeffizienz durch die Vergrößerung des KW-Speichers steigern lässt, ist der Einfluss der BWW- und HWW-Speichergrößen vergleichsweise gering, deren Kombination jedoch durchaus relevant. Dabei zeigt sich der Einsatz eines Kombispeichers anstelle einer Zwei-Speicher-Lösung für die Bereitstellung der Wärme für BWW und HWW in jedem Fall als überlegen oder zumindest ebenbürtig. Besonders im Hinblick auf das beschränkte Platzangebot in Bestandsbauten und ökonomischen Überlegungen bietet sich diese Lösung an. Mit einer WRG aus dem Abwasser, welche unbedingt geprüft und bei vorhandener baulicher Machbarkeit umgesetzt werden sollte, lassen sich in Kombination mit einer Frischwasserstation SJAZ über 4.2 (ohne WRG um 4.1) realisieren. Womit das L-Sol System in Punkto Effizienz mit marktüblichen Erdsonden-Systemen mithalten und LW-WP Systeme klar distanzieren kann. Dabei können entscheidende Nachteile der genannten Systeme, wie hohe Installationskosten durch Erdbohrungen oder erhöhte Lärmemissionen, vermieden werden.

Während der Einsatz der vorgestellten Modelle in effizienteren Gebäuden oder an wärmeren Standorten ohne Vorbehalte eingesetzt werden können, bedarf es an kälteren Standorten einer Anpassung des KW-Speichervolumens und der Einschalthysterese des Solarkreislaufes. Folgearbeiten müssen entsprechend die optimale Systemkonfiguration für kältere Standorte und gegebenenfalls auch für Bestandsbauten mit höherem Energiebedarf untersuchen.

Unbedingt weiter zu untersuchen und zu simulieren resp. zu testen ist auch der Einsatz von PCM in den Speichern und die Anpassung der Solarkreissteuerung. In beiden Fällen sind weitere entscheidende Beiträge zur Effizienzsteigerung zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2017). Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 109–130. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.03.126>
- Arpagaus, C., Berthold, M., & Eschmann, M. (2017). *Bericht « WP-Feldmessung »*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Abgerufen von http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_100161491.pdf
- Bakirci, K., & Yuksel, B. (2011). Experimental thermal performance of a solar source heat-pump system for residential heating in cold climate region. *Applied Thermal Engineering*, 31(8–9), 1508–1518. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.01.039>
- Bundesamt für Statistik (BFS). (2016). *Bau- und Wohnungswesen 2014*. Abgerufen von <https://www.bfs.admin.ch/bfsstatic/dam/assets/350354/master>
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.018>
- Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87(12), 3611–3624. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2010.06.014>
- Deng, Z., Mol, S., & Van Der Hoek, J. P. (2016). Shower heat exchanger: reuse of energy from heated drinking water for CO 2 reduction. *Drink. Water Eng. Sci*, 9, 1–8. <https://doi.org/10.5194/dwes-9-1-2016>
- Der Bundesrat. (2013). Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 (Revision des Energierechts) und zur Volksinitiative «Für den geordneten Ausstieg aus der Atomenergie (Atomausstiegsinitiative)». *Bundesblatt*, 40, 7561–7756. Abgerufen von <https://www.admin.ch/opc/de/federal-gazette/2013/7561.pdf>
- Fan, Y., Kameishi, K., Onishi, S., & Ito, K. (2014). Field-based study on the energy-saving effects of CO2 demand controlled ventilation in an office with application of Energy recovery ventilators. *Energy and Buildings*, 68, 412–422. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.09.043>

- Flourentzou, F., & Pantet, S. (2015). Theoretical and real ventilation heat losses and energy performance in low energy buildings. In *36th AIVC - 5th TightVent - 3rd venticool Conference*. Madrid. Abgerufen von https://www.aivc.org/sites/default/files/63_0.pdf
- Furbo, S., & Shah, L. J. (2005). *How mixing during hot water draw-offs influence the thermal performance of small solar domestic hot water systems*. Bovej: Technical University of Denmark. Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/268361933_HOW_MIXING_DURING_HOT_WATER_DRAW-OFFS_INFLUENCE_THE_THERMAL_PERFORMANCE_OF_SMALL_SOLAR_DOMESTIC_HOT_WATER_SYSTEMS
- Graf, S., Boubaker, K., Helbling, P., Sa, C., Wasserfaches, G.-, Studer, P., ... Burkhardt, D. (2009). *Legionellen und Legionellose*. Bern: Bundesamt für Gesundheit (BAG). Abgerufen von <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/de/dokumente/mt/infektionskrankheiten/legionellen/bericht-legionellen-legionellose.pdf.download.pdf/bericht-legionellen-legionellose-de.pdf>
- Haberl, R., Haller, M. Y., Reber, A., & Frank, E. (2014). Combining Heat Pumps with Combistores: Detailed Measurements Reveal Demand for Optimization. *Energy Procedia*, 48, 361–369. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.02.042>
- Hasler, P., Nussbaumer, T., & Bürli, J. (2001). *Herstellung von Holzpellets*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Abgerufen von <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000007184.pdf&name=210184.pdf>
- Heinz, A., Lerch, W., Breidler, J., Fink, C., & Wagner, W. (2013). Wärmerückgewinnung aus Abwasser im Niedrigenergie-und Passivhaus: Potenzial und Konzepte in Kombination mit Solarthermie und Wärmepumpe. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, 3. Abgerufen von https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/berichte/endbericht_1303_waermerueckgewinnung_aus_abwasser.pdf
- Hesaraki, A., Halilovic, A., & Holmberg, S. (2015). Low-temperature heat emission combined with seasonal thermal storage and heat pump, 119, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.046>

- Huber, H., Sibold, C., Flückiger, B., Roth, C., & Pfirter, M. (2013). *Revisionsentwurf 2013 der Norm SIA 380 / 1 und mögliche Auswirkungen auf kantonale Vorschriften*. Muttenz. Abgerufen von https://www.endk.ch/fr/ablage_fr/documentation/bericht-sia380-1endk2013-12-12-def-1.pdf
- Ip, K., & She, K. (2016). Waste heat recovery from showers: Case study of a university sport facility in the UK. In *Water Efficiency Conference 2016*. Brighton. Abgerufen von <http://eprints.brighton.ac.uk/16079/1/Waternet - Waste heat recovery from showers.pdf>
- Jakob, M., Catenazzi, G., Melliger, M., Forster, M., Martius, G., & Ménard, M. (2016). *Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Abgerufen von <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/42510.pdf>
- Jonas, D., Frey, G., & Theis, D. (2017). Simulation and performance analysis of combined parallel solar thermal and ground or air source heat pump systems. *Solar Energy*, 150, 500–511. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.070>
- Kemmler, A., Kreidelmeyer, S., Wüthrich, P., Keller, M., Jakob, M., & Catenazzi, G. (2016). *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2015 nach Verwendungszwecken*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Abgerufen von http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_577909349.pdf
- klara energy systems, & Axiotherm. (2018). Anwendungen. Abgerufen 9. August 2018, von https://www.axiotherm.de/de/download/project/product/attachments/9/?file=Factsheet_HeatStixx_Anwendung.pdf
- Lämmle, M., Oliva, A., Hermann, M., Kramer, K., & Kramer, W. (2017). PVT collector technologies in solar thermal systems: A systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach. *Solar Energy*, 155, 867–879. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.07.015>
- Merzkirch, A., Maas, S., Scholzen, F., & Waldmann, D. (2016). Field tests of centralized and decentralized ventilation units in residential buildings – Specific fan power, heat recovery efficiency, shortcuts and volume flow unbalances. *Energy and Buildings*, 116, 376–383. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.12.008>
- Meteo Schweiz. (2016). Klimadiagramme und Normwerte pro Station. Abgerufen 4. August 2018, von <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html>

- MeteoSchweiz. (2018). *Normwerte 1981-2010: Mittlere Minimum-Temperatur 2m*. Abgerufen von http://www.meteoschweiz.admin.ch/product/input/climate-data/normwerte-pro-messgrosse/np8110/nvrep_np8110_tre2dymn_d.pdf
- Meyer Burger AG. (2017). *Hybrid*. Gwatt. Abgerufen von https://www.meyerburger.com/fileadmin/user_upload/product_downloads/03_solarsystems/Hybridkollektor_300-900_de.pdf
- Minder, S., Heft, R., Ettlin, N., & Weisskopf, T. (2016). *Eisspeicher-Wärmepumpen- Anlagen mit Sonnenkollektoren*. Zürich: EnergieSchweiz.
- Moss, R. W., Henshall, P., Arya, F., Shire, G. S. F., Hyde, T., & Eames, P. C. (2018). Performance and operational effectiveness of evacuated flat plate solar collectors compared with conventional thermal, PVT and PV panels. *Applied Energy*, 216, 588–601. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.01.001>
- Mühlemann, J. (2018). *Energiemanagement im Gebäude mit Wetterprognose*. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW.
- Müller, E. A., & Schmid, F. (2005). *Heizen und Kühlen mit Abwasser*. Bern. Abgerufen von http://www.infrawatt.ch/sites/default/files/2005_EnergieSchweiz_Heizen und Kühlen mit Abwasser_Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden.pdf
- Natural resources Canada (NRCAN). (2018). Energy Efficiency Ratings - Drain-water heat recovery. Abgerufen 4. Juli 2018, von <http://oee.nrcan.gc.ca/pml-imp/index.cfm?action=app.search-recherche&appliance=DWHR>
- Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513–533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>
- Phase Change Material Products Limited. (2013). PlusICE - Phase Change Materials. Abgerufen 14. August 2018, von <http://www.pcmproducts.net/files/PlusICE Range-2013.pdf>
- Philippen, D., Carbonell, D., Zenhäusern, D., Granzotto, M., Haller, M., & Brunold, S. (2015). *High-Ice System development for high solar thermal gains with ice storage and heat pump. Bfe Final Report*. Bern. Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/281103668_High-Ice_System_development_for_high_solar_thermal_gains_with_ice_storage_and_heat_pump

- Power-Pipe Energy Sysems Ltd. (2015). *Power-Pipe*. Liverpool. Abgerufen von <http://powerpipehr.co.uk/wp-content/uploads/2016/08/Power-Pipe-Technical-Manual-UK-v8.pdf>
- pro Kühlsole GmbH. (2007). *Pekasol L*. Alsdorf. Abgerufen von http://www.glykolundsole.de/Downloaddateien/Pekasol_L_2007_deu.pdf
- Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., & Hawkes, A. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy and Environmental Science*, 5(11), 9291–9306. <https://doi.org/10.1039/c2ee22653g>
- Suter, J.-M., Nipkow, J., & Mathez, S. A. (2010). Die neue SIA-Norm 385/1. Abgerufen 13. Juni 2018, von https://awel.zh.ch/dam/baudirektion/awel/energie_minergie_radioaktive_abfaelle/energiepraxis/referatsfolien/dokumente/energiepraxis_seminar_herbst_2010/Ref01-Warmwasser-Nipkow.pdf.spooler.download.1297072582232.pdf/Ref01-Warmwasser-Nipkow.pdf
- The Dow Chemical Company. (2007). Triethylene Glycol. Abgerufen 9. August 2018, von http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0952/0901b80380952386.pdf
- van Velsen, S., Benz, M., & 3-Plan Haustechnik AG. (2013). *Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Abgerufen von http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_224269254.pdf
- Verein Deutscher Ingenieure. (2013). *VDI-Wärmeatlas*. Imprint: Springer Vieweg.
- Viessmann. (2016). Vitocal -Planungsanleitung. Abgerufen von <https://www.loebbeshop.de/viessmann/media/docs/planung-vitocal.pdf>
- Wang, W., Ma, Z., Jiang, Y., Yang, Y., Xu, S., & Yang, Z. (2005). Field test investigation of a double-stage coupled heat pumps heating system for cold regions. *International Journal of Refrigeration*, 28(5), 672–679. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2005.01.001>
- Wanner, O. (2004). *Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen*. Bern: Bundesamt für Energie (BFE). Abgerufen von <http://www.waermepumpe.ch/fe/waermerueckausabwasser.pdf>

Winteler, C., Dott, R., Afjei, T., & Hafner, B. (2014). Seasonal Performance of a Combined Solar, Heat Pump and Latent Heat Storage System. *Energy Procedia*, 48, 689–700.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.02.080>

Yaïci, W., Ghorab, M., Entchev, E., & Hayden, S. (2013). Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design. *Applied Thermal Engineering*, 60(1–2), 152–163.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.07.001>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Systembild des L-Sol Systems mit dem KW-Speicher (l.) und den Speichern für BWW (r.u.) und HWW (r.o.). _____	3
Abbildung 2	Systembild des von Haberl u. a. (2014) getesteten Erdsondensystems mit solar-thermischer Unterstützung. _____	6
Abbildung 3	Systembild des von Winteler u. a. (2014) getesteten Eisspeichersystems. _____	7
Abbildung 4	Jährlich nutzbare solarthermische Energie in Abhängigkeit des H/B-Verhältnisses (Furbo & Shah, 2005). _____	10
Abbildung 5	Für die Simulation erstelltes und verwendetes Zapfprofil (l.) und das als Grundlage verwendete Tagesprofil (r.). _____	16
Abbildung 6	Schicht- und Volumeneinteilung des Speichergrundmodells und die in den Modellvarianten eingesetzten Speicher BWW-, HWW- und Kombispeicher (v.l.n.r.). _____	20
Abbildung 7	Systembild der Variante A mit den im L-Sol System vorgesehenen drei Speichern. _____	24
Abbildung 8	Systembild der Variante B des L-Sol Systems mit einem Kombispeicher und Frischwasserstation. _____	25
Abbildung 9	Systembild der Variante C (Variante A mit Frischwasserstation). _____	26
Abbildung 10	Einbindung der passiven WRG im Fall der Subvariante Abw.Wrg1 für Variante A (l.) und B (r.). _____	27
Abbildung 11	Einbindung der passiven WRG im Fall der Subvariante Abw.Wrg2 für Variante A (l.) und B (r.). _____	28
Abbildung 12	Einbindung der passiven WRG im Fall von Abw.Wrg3. _____	28
Abbildung 13	Einbindung der aktiven WRG im Fall von Abw.Wrg4, durch Einsatz eines Grauwasserspeichers. _____	29
Abbildung 14	Variantenvergleich in Bezug auf die SJAZ (o.) und den gesamten Stromverbrauch (u.). _____	33
Abbildung 15	An den KW-Speicher übertragene Energie aus den PVT-Modulen. _____	34
Abbildung 16	Systemeffizienz bei der Steigerung des KW-Speichervolumens von 0.7 auf 3 m ³ während den kalten Monaten für die Variante A. _____	35
Abbildung 17	Ergebnisse der Speichergrossenvariation für H- und BWW für die SJAZ (l.) und den gesamten Stromverbrauch (r.). _____	36
Abbildung 18	Übertragene Wärmeleistung der Wärmeübertrager in Variante A. _____	37

Abbildung 19	Simulationsergebnisse für die getesteten Varianten zur WRG aus Abwasser in Bezug auf die SJAZ (l.) und den gesamten Stromverbrauch (r.). _____	39
Abbildung 20	Simulationsergebnisse für die Grundvarianten mit und ohne Implementierung der effizientesten Abwasser-WRG beim Vorhandensein einer mechanischen Lüftung mit WRG (SJAZ l. und gesamter Stromverbrauch (r.). _____	40
Abbildung 21	Simulationsergebnisse für die Grundvarianten mit und ohne Implementierung der effizientesten Abwasser-WRG resp. mechanischer Lüftung mit WRG für einen Neubau nach MuKE 2014 (SJAZ l. und gesamter Stromverbrauch r.). _____	40
Abbildung A1	Systemeffizienz bei der Steigerung des KW-Speichervolumens von 0.7 auf 3 m ³ während den kalten Monaten für die Variante B (o.) und C (u.). _____	58
Abbildung A2	Vergleich der Einschalthäufigkeit und Leistung der elektrischen Zusatzheizung zwischen Variante A und C mit gleicher KW- und HWW-Speichergrosse. _____	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Berechnung des effektiven Energiegewinnes bei der WRG aus dem Abwasser. _____	38
Tabelle 2	Performanz der untersuchten Varianten an unterschiedlichen Standorten und Klimazonen. _____	41
Tabelle 3	Eigenschaften möglicher PCM für den Einsatz im KW-Speicher. _____	43
Tabelle 4	Einfluss ausgewählter PCM auf die Speicherkapazität des KW-Speichers. _____	44
Tabelle A1	Für die Simulation verwendete Speichergrössen und H/B-Verhältnisse. ____	57

Anhang

Tabelle A1 Für die Simulation verwendete Speichergrossen und H/B-Verhältnisse.

	Volumen		Anzahl Wendel	Speichermasse		H/B-Verhältnis
	Gesamt m ³			h_{Zylinder} m	$h_{\text{Ausbauchung}}$ m	
Brauchwarmwasser	0.20		2	1.67	0.10	0.42
	0.30		2	1.67	0.10	0.50
	0.40		2	1.82	0.10	0.54
Heizwarmwasser	0.20		0	1.25	0.10	0.43
	0.30		0	1.44	0.10	0.50
	0.40		0	1.59	0.10	0.55
	0.50		0	1.71	0.10	0.59
Kaltwasserspeicher	0.70		1	1.95	0.10	0.67
	0.80		1	2.10	0.10	0.69
	0.90		1	2.10	0.10	0.73
	1.00		1	2.10	0.10	0.77
	1.10		1	2.10	0.10	0.81
	1.20		1	2.10	0.10	0.84
	1.30		1	2.10	0.10	0.87
	1.40		1	2.10	0.10	0.91
	1.50		1	2.10	0.10	0.94
	2.00		1	2.10	0.10	1.08
	2.50		1	2.10	0.10	1.21
3.00		1	2.10	0.10	1.32	
						2.91
						3.05
						2.88
						2.73
						2.61
						2.50
						2.40
						2.32
						2.24
						1.94
						1.74
						1.59
Kombispeicher	0.30		0	1.67	0.10	0.46
	0.40		0	1.82	0.10	0.51
	0.50		0	1.95	0.10	0.56
	0.60		0	2.06	0.10	0.59
	0.70		0	2.10	0.10	0.64
						3.60
						3.54
						3.50
						3.47
						3.30

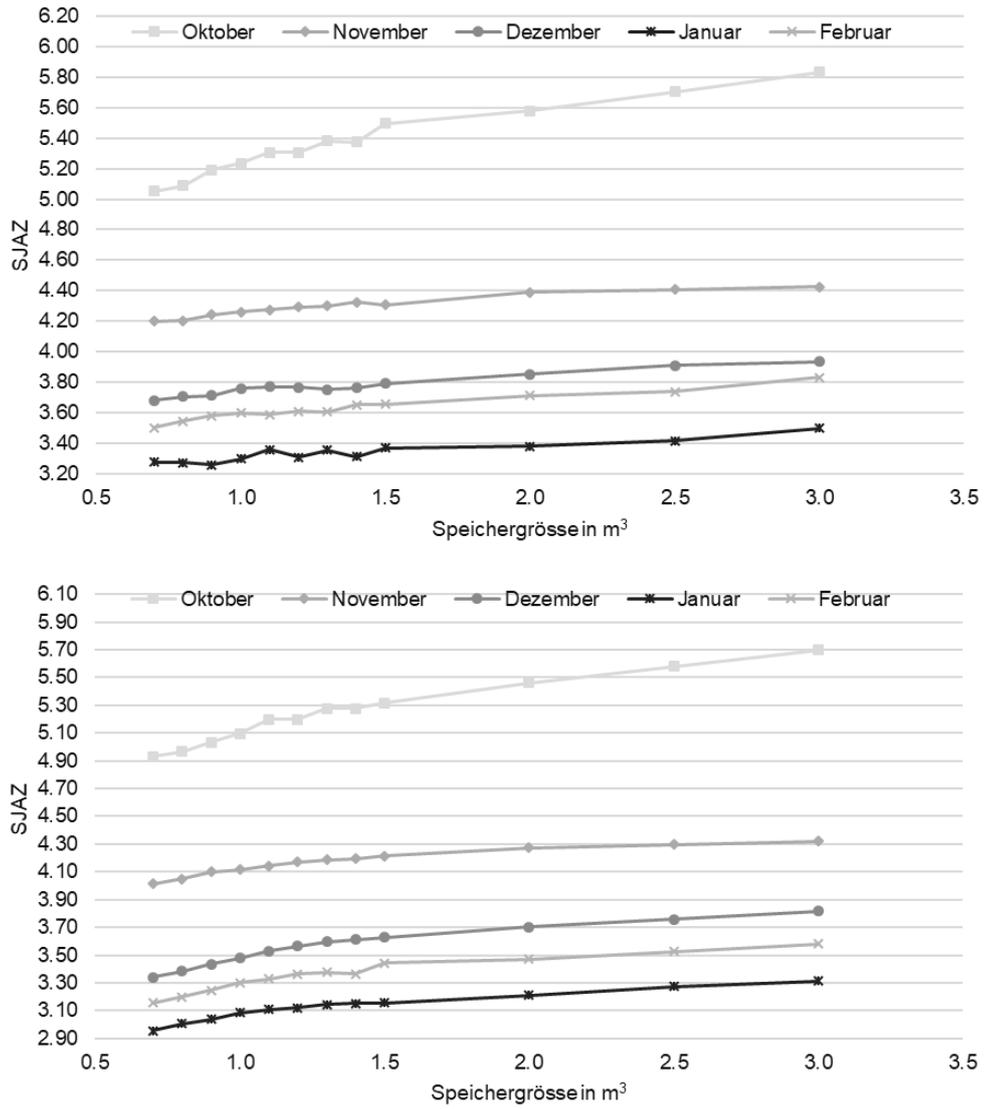


Abbildung A1 Systemeffizienz bei der Steigerung des KW-Speichervolumens von 0.7 auf 3 m³ während den kalten Monaten für die Variante B (o.) und C (u.).

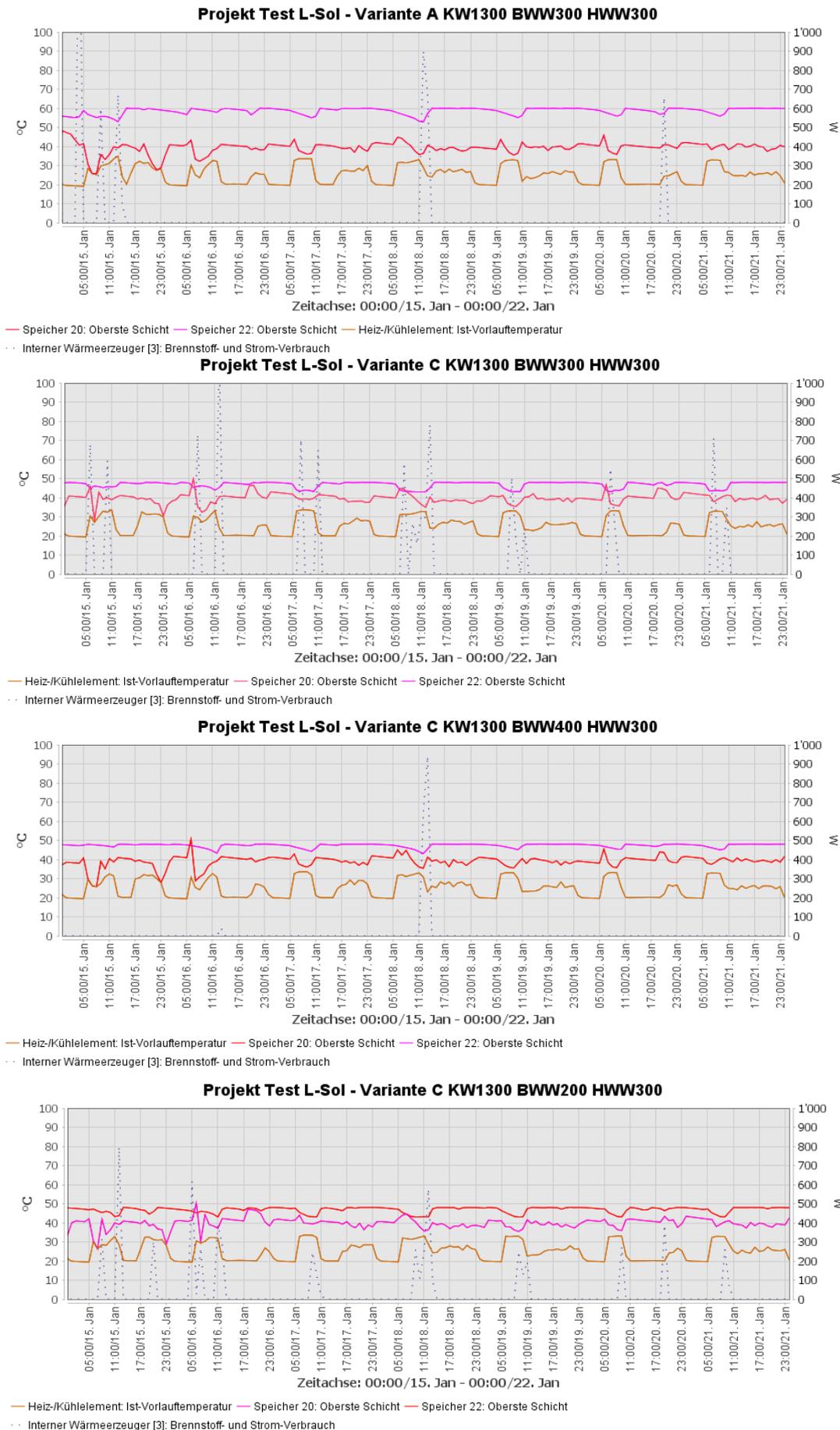


Abbildung A2 Vergleich der Einschalthäufigkeit und Leistung der elektrischen Zusatzheizung zwischen Variante A und C mit gleicher KW- und HWW-Speichergrosse.

Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

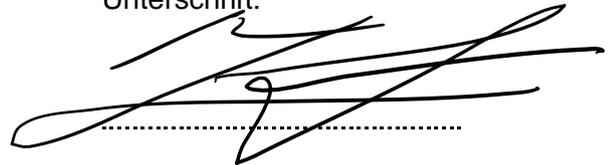
Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Kriens, 21.08.2018.....

Unterschrift:

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal dotted line.**Erklärung betreffend Einwilligung zur elektronischen Veröffentlichung einer Bachelorarbeit auf der ZHAW Digitalcollection**

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Arbeit elektronisch gespeichert und in der ZHAW Digitalcollection der ZHAW Hochschulbibliothek öffentlich zugänglich gemacht wird. Das Recht, die Arbeit an anderer Stelle zu veröffentlichen, wird durch diese Erklärung grundsätzlich nicht berührt. Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit, namentlich zum Zweck der Archivierung, in andere Dateiformate konvertiert oder anderweitig technisch verändert wird.

Ich versichere, dass der Veröffentlichung der Arbeit keine Rechte Dritter, insbesondere in Bezug auf im Werk enthaltenen Abbildungen, entgegenstehen.

Ort, Datum:

Kriens, 21.08.2018.....

Unterschrift:

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal dotted line.