

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

**EINFLUSS EINER NÄCHTLICHEN BELADUNGSSPERRE DES HEIZ-
PUFFERSPEICHERS AUF DIE EFFIZIENZ VON VERSCHIEDENEN
HEIZSYSTEMEN**

von
Sebastian Funk

Masterstudiengang Umwelt und Natürliche Ressourcen 2018
Abgabedatum: 02.07.2020
Studienrichtung Erneuerbare Energien

Fachkorrektoren:

Prof. Jürg Rohrer
Leitung Forschungsgruppe Erneuerbare Energien
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, 8820 Wädenswil

David Sauter
Forschungsgruppe Erneuerbare Energien
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, 8820 Wädenswil

Zusammenfassung

Mit der Energiestrategie 2050 der Schweiz wird unter anderem der Ausbau von erneuerbaren Energien forciert. Dies soll im Sektor Haushalt zu grossen Teilen durch Heizsysteme gelingen, die ihre Energie aus erneuerbaren Quellen beziehen. Vor diesem Hintergrund lässt sich beobachten, dass die Absatzzahlen von Heizsystemen mit Wärmepumpen steigen.

Mit dieser Arbeit wurde das Ziel verfolgt, durch die Einführung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers eine einfach umsetzbare Regelstrategie zu untersuchen, mit welcher die Effizienz bei eben diesen Heizsystemen mit Wärmepumpen gesteigert werden soll. Durch die Einführung der Beladungssperre wird beabsichtigt, ein Teil der Last der Wärmepumpen in den Tag zu verschieben. Dadurch soll erreicht werden, dass die Wärmepumpen vermehrt dann betrieben werden, wenn die Wärmequellen eine durchschnittlich höhere Temperatur aufweisen.

Hierfür wurden Heizsysteme betrachtet mit Luft/Wasser-Wärmepumpe, Luft/Wasser-Wärmepumpe und solarthermischer Heizungsunterstützung sowie einem System mit Sole/Wasser-Wärmepumpe, welches einen von PVT-Modulen gespeisten Kaltspeicher als alleinige Wärmequelle nutzt. In der ersten von zwei Simulationsreihen wurde die Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei den Heizsystemen für ein neugebautes Einfamilienhaus implementiert und optimiert. Anschliessend wurden in einer zweiten Simulationsreihe die Heizsysteme mit Beladungssperre für die Anwendungen saniertes Einfamilienhaus, neugebautes Mehrfamilienhaus und saniertes Mehrfamilienhaus getestet.

Durch die gezielte Lastverschiebung gelang es, die Wärmepumpen nachweislich bei einer höheren durchschnittlichen Quelltemperatur zu betreiben. Ein fail-safe-mechanismus verhinderte dabei das ungewollte Absinken der Gebäudetemperatur. Bei einem fixen Endzeitpunkt der Sperre um 09:00 Uhr morgens konnten die höchsten Effizienzsteigerungen beobachtet werden. Ein fester Startzeitpunkt konnte nicht ausgemacht werden, da je nach Anwendungsfall und Heizsystem eine unterschiedlich lange Beladungssperre zu den besten Ergebnissen führte.

Mit einer jährlichen Stromersparnis von über 7 % konnte bei allen drei Heizsystemen die höchste Effizienzsteigerung für die Anwendung saniertes Einfamilienhaus erreicht werden. Die jährliche Stromersparnis fiel hingegen bei den Neubau-Anwendungen mit rund 1.5 % bis 4.5 % niedriger aus. Es zeigte sich, dass der Effekt der Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei einer Erhöhung der Heizungsvorlauftemperatur deutlicher ausfiel. Eine Kombination der Beladungssperre mit einer Nachtabenkung oder einer Überhitzung des Heizpufferspeichers wiesen dagegen keine oder keine zusätzliche Effizienzsteigerung auf.

Abstract

With Switzerland's Energy Strategy 2050 and the associated aim of promoting the expansion of renewable energies, which in the household sector should be largely achieved by heating systems that obtain their energy from renewable sources, sales of heating systems with heat pumps are increasing.

The aim of this thesis was to investigate the possibility of increasing the efficiency of these heating systems with heat pumps by introducing a nocturnal load barrier on the heating buffer tank. The introduction of the load barrier is intended to shift part of electrical load of the heat pump into daytime. This is intended to ensure that the heat pumps are increasingly operated when the heat sources have a higher average temperature.

For this purpose, heating systems with an air/water heat pump, an air/water heat pump supported by solar thermal heating as well as a system with a brine/water heat pump, which uses a buffer tank loaded by PVT-modules as sole heat source, were considered. In the first of two simulations series, the load barrier of the heater buffer storage could be implemented and optimized in the heating system for a newly built single-family house. Tested were subsequently, in a second series of simulations, heating systems with load barriers for the installation situations of refurbished single-family houses, newly built multi-family houses and refurbished multi-family houses.

By shifting the electrical load, the heat pumps could be operated at a higher average source temperature. A fail-safe mechanism prevented the unwanted drop in building temperature. With a fixed end time of the lock at 09:00 o'clock, the highest increases in efficiency were observed. A fixed start time could not be determined because a load barrier of varying length, depending on the application and heating system, led to the best results.

With an annual power saving of more than 7 %, all three heating systems achieved the highest increase in efficiency for the application of a refurbished multi-family house. In contrast, the annual power savings for new-build applications were lower at around 1.5 % to 4.5 %. It was shown that the effect of the load barrier of the heating buffer storage tank was more pronounced when the heating flow temperature was increased. In contrast, a combination of the load barrier with a night setback or overheating of the heating buffer storage tank showed no or no additional increase in efficiency.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	II
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund der Arbeit	1
1.2 Funktionsweise von Wärmepumpen.....	2
1.3 Speichersysteme.....	3
1.3.1 Standard-Pufferspeicher	4
1.3.2 Schichtspeicher.....	4
1.3.3 Kombispeicher	5
1.3.4 Bivalente Speicher	5
1.4 Ziel der Arbeit.....	7
2 Material und Methoden.....	11
2.1 Betrachtete Heizsysteme.....	12
2.1.1 Heizsystem mit Sole/Wasser-Wärmepumpe (L-Sol).....	12
2.1.2 Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe (LWWP)	14
2.1.3 Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und Solarthermie (LWWP_ST)	15
2.2 Effizienzmessung der Heizsysteme.....	17
2.3 Simulationsvorhaben.....	19
2.3.1 Variation des Sperrzeitraums der nächtlichen Beladungssperre.....	20
2.3.2 Variation der Heizungsvor- / Rücklauftemperatur	20
2.3.3 Variation der Wärmeübertragungsfläche	20
2.3.4 Variation des Gebäudestandards	21
2.3.5 Variation des Heizpufferspeichervolumens.....	21
2.3.6 Kombination Beladungssperre mit Überhitzung des Heizpufferspeichers	21
2.3.7 Kombination Beladungssperre mit Nachtabenkung	22

2.3.8	Wetterdaten für den Simulationsstandort.....	23
2.3.9	Simulationsmodell	24
2.4	Gebäudemodelle	24
2.4.1	Heizwärmebedarf (Gebäudestandard)	25
2.4.2	Energieverluste durch Transmission und Lüftung.....	26
2.4.3	Wärmebedarf Brauchwarmwasser	27
2.4.4	Auslegung der Wärmepumpen.....	27
2.4.5	Heizpufferspeicher	29
2.4.6	Brauchwarmwasserspeicher	30
2.4.7	Kaltwasserspeicher L-Sol.....	30
2.4.8	Kollektorflächen.....	30
3	Ergebnisse Simulationsreihe 1	32
3.1	Fixer Endzeitpunkt der nächtlichen Beladungssperre	32
3.2	Nächtliche Beladungssperre mit Übersteuerung zur Einhaltung der Komfortkriterien	35
3.3	Fixer Startzeitpunkt der nächtlichen Beladungssperre.....	49
3.4	Fixer Sperrzeitraum mit variablem Start- und Endzeitpunkt.....	50
3.5	Verlegung des Sperrzeitraums in den Tag	52
3.6	Prüfung von Sensitivitäten der nächtlichen Beladungssperre durch Variation einzelner Variablen der Heizsysteme.....	53
3.6.1	Variation der Heizungsvor- / Rücklauftemperatur	53
3.6.2	Variation der Wärmeübertragungsfläche	56
3.6.3	Variation des Gebäudestandards	61
3.6.4	Variation des Heizpufferspeichervolumens.....	64
3.6.5	Kombination Beladungssperre mit Überhitzung des Heizpufferspeichers	66
3.6.6	Kombination Beladungssperre mit einer Nachtabenkung	71
4	Ergebnisse Simulationsreihe 2	72

4.1	Einfamilienhaus saniert	72
4.2	Mehrfamilienhaus Neubau.....	74
4.3	Mehrfamilienhaus saniert	76
4.4	Ergebnisübersicht	79
5	Diskussion.....	81
6	Literaturverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis.....	90
	Tabellenverzeichnis.....	98
	Anhang.....	100

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Arbeit

Angetrieben durch die Reaktorkatastrophe 2011 in Fukushima und dem zunehmenden Verständnis des anthropozänen Klimawandels, begann in den letzten Jahren ein Umdenken in der Gesellschaft, Wirtschaft und Politik (Schmid & Pröll, 2020). So hat die Schweizer Politik reagiert und ihre Energiegesetze überarbeitet und die Energiestrategie 2050 auf den Weg gebracht. Neben der Steigerung der Energieeffizienz und dem Atomausstieg ist eine weitere Stossrichtung dieser Strategie, den Ausbau erneuerbarer Energien zu fördern (BFE, 2020). Darüber hinaus hat sich die Schweiz mit der Ratifizierung des Pariser Klimaabkommens am 6. Oktober 2017 dazu bekannt, ihre Treibhausgasemission sukzessive zu reduzieren (BAFU, 2018; United Nations, 2020a). Gemeinsam mit den Staaten der Vereinigten Nationen, die das Abkommen ebenfalls unterzeichnet haben, soll so der globale Temperaturanstieg auf möglichst 1.5 °C aber maximal 2 °C beschränkt werden (United Nations, 2020b). Aus diesem Grund hat die Schweiz beschlossen, bis zum Jahr 2030 ihre Treibhausgasemissionen zu halbieren (30% im Inland, 20% Kompensation im Ausland) im Vergleich zum Jahr 1990. Ferner hat der Schweizer Bundesrat am 28. August 2019 entschieden, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 auf Netto-Null zu reduzieren (BAFU, 2019b; BFE, 2020). Vor diesem Hintergrund wird derzeit das CO₂-Gesetz der Schweiz für die Zeit nach 2020 grundsätzlich revidiert (BAFU, 2019c).

Die Treibhausgasemissionen der Schweiz lassen sich im Jahr 2017 etwa zu gleichen Teilen auf die Emissionen durch Treibstoffe und Brennstoffe zurückführen. Hervorzuheben ist, dass rund die Hälfte aller Brennstoffe auf den Sektor «Haushalt» entfallen, welche wiederum zu grossen Teilen zur Deckung des Heizbedarfs für Raumwärme verwandt werden. Gemäss dem Bundesamt für Umwelt sind im Jahr 2017 rund 18 % der insgesamt 47.24 Millionen Tonnen CO_{2eq} der Treibhausgasemissionen der Schweiz im Sektor «Haushalte» zu verorten (BAFU, 2019a). Darüber hinaus entfielen 2018 über 28 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Schweiz auf diesen Sektor (BFE, 2019).

Um die ambitionierten Ziele der Bundesregierung zu erreichen und dem Pariser Klimaabkommen gerecht zu werden, ist es daher selbsterklärend, dass der Sektor «Haushalte» betreffend Endenergieverbrauch und Treibhausgasausstoss ein hohes Einsparpotenzial birgt. Um die energetische Bilanz zu verbessern, wurden bereits eine Kombination verschiedener Massnahmen beschlossen und dafür unterschiedliche Anreize sowie eine gesetzliche Grundlage geschaffen. Neben der Erhöhung des Gebäudestandards und der Verbesserung der Energieeffizienz von Technik, die in Haushalten Anwendung findet, ist die Nutzung erneuerbarer Energien bereits mit der Energiestrategie 2050 zum Ziel erklärt worden. Im Jahr 2018 konnten etwa

zwei Drittel der benötigten Energie der Haushalte (40.3 TWh) auf die Raumerwärmung zurückgeführt werden (Kemmler & Spillmann, 2019). Daher möchte man unter anderem in den Gebäuden weg von Heizsystemen, die durch fossile Energieträger betrieben werden, hin zu Heizsystemen, die ihre Energien aus erneuerbaren Quellen beziehen (BFE, 2018).

Bei den Heizsystemen in den Privathaushalten konnte im Zeitraum von 2000 bis 2018 das grösste prozentuale Wachstum, bezogen auf die Energiebezugsfläche (EBF), bei den elektrischen Wärmepumpen und der Solarthermie beobachtet werden. Bei Wärmepumpen liegt der Anteil mit 17.3 % bereits fast bei einem Fünftel des Marktanteils (Kemmler & Spillmann, 2019). Wie die Statistik 2019 der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS) aufzeigt, sind mit 71 % Luft/Wasser-Wärmepumpen die meist verkauften Wärmepumpen, gefolgt mit 28 % von Sole/Wasser-Wärmepumpen (FWS, 2020). Vor diesem Hintergrund richtet sich der Fokus dieser Arbeit auf Heizsysteme mit Wärmepumpen. Bereits 2018 gab es in der Schweiz eine erneuerbare Wärmenutzung von 57'221 TJ. Den grössten Anteil stellten dabei Feuerungsanlagen bereit, die mit Holz betrieben werden (27'747 TJ), gefolgt von 307'255 Elektromotorwärmepumpen (16'352 TJ), die Umweltwärme und Geothermie als Energieträger nutzen, und thermisch genutzter Sonnenenergie (2'565 TJ) (BAFU, 2019a; BFE, 2019).

1.2 Funktionsweise von Wärmepumpen

Vereinfacht kann gesagt werden, dass eine Wärmepumpe aus einer Niedertemperaturquelle mithilfe einer elektrisch angetriebenen Pumpe Heizwärme zur Erwärmung von Brauch- und/oder Heizwasser erzeugt. Die Niedertemperaturquelle kann dabei variieren. Die häufigsten Quellen sind Luft, Erde oder Wasser (Quaschnig, 2015). In dieser Arbeit werden Heizsysteme mit Luft/Wasser-Wärmepumpen sowie Sole/Wasser-Wärmepumpen betrachtet. Luft/Wasser-Wärmepumpen entziehen der Umgebungsluft Energie in Form von Wärme. Die Quelle für Sole/Wasser-Wärmepumpen ist i.d.R. das Erdreich. Die Wärme wird mittels Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch erschlossen und zur Wärmepumpe transportiert. In der Wärmepumpe wird ein Kältemittel, heute meist FKW, mithilfe der Wärme aus der Umgebungsluft bzw. dem Erdreich verdampft (Quaschnig, 2015). Dies wird aufgrund der tiefen Siedepunkte der eingesetzten Kältemittel möglich, die bei gängigen FKW-Kältemittel zwischen -28 °C und -51 °C liegen (Quaschnig, 2015). So lässt sich z.B. bei Minustemperaturen sogar noch Energie aus der Umgebungsluft entziehen. Das dampfförmige Kältemittel wird anschliessend im Verdichter, meist mittels Elektromotor angetrieben, komprimiert. Durch diesen Vorgang erwärmt sich das immer noch dampfförmige Kältemittel stark und lässt sich z.B. für die Trinkwassererwärmung und Raumheizung einsetzen. Dieser Vorgang findet im Verflüssiger statt. Durch die Wärmeabgabe an ein Trägermedium wie z.B. Wasser ändert sich der Aggregatzustand des Kältemittels. Das nun flüssige Kältemittel wird durch ein Expansionsventil entspannt und abge-

kühlt. Nun wird es erneut in den Verdampfer eingeleitet. Für alle Wärmepumpen gilt gleichermaßen: Je höher die Temperatur der Wärmequelle und je geringer die benötigte Heiztemperatur, desto weniger elektrische Energie muss der Wärmepumpe zugeführt werden (Quaschnig, 2015). Die Zusammenhänge können in der nachstehenden Formel zusammengefasst werden.

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_{zu} + P \quad (1)$$

\dot{Q}_{ab} : Abgeführter Wärmestrom [W]

\dot{Q}_{zu} : Zugeführter Wärmestrom [W]

P: Zugeführte Leistung (elektrisch) [W]

Da die Quelltemperatur nicht immer konstant ist und beispielsweise bei Luft/Wasser-Wärmepumpen über den Tag stark variieren kann, werden Wärmepumpen häufig mit Speichern kombiniert.

1.3 Speichersysteme

Mit der vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien wird der Energiespeicherung eine immer bedeutungsvollere Rolle zuteil (Quaschnig, 2015). Der Grund dafür ist, dass es durch die Speicherung von Energie möglich wird, das Energieangebot vom Energieverbrauch zu entkoppeln. So kann beispielsweise die durch Solarthermie am Tag gesammelte Wärme eingespeist und gespeichert werden, bis die Wärme in der Nacht ausgespeichert und genutzt werden kann. Energiespeicher zeichnen sich durch die drei Prozesse «einspeichern», «speichern» und «ausspeichern» aus (Sternier & Stadler, 2014). Sie lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien unterteilen. Die wohl häufigste Unterteilung ist die physikalisch-energetische Klassifizierung in elektrisch (elektromagnetisch), elektrochemisch/chemisch, mechanisch sowie thermisch (Schlossig & Haussmann, 2011).

Bei den im Rahmen der Masterthesis betrachteten Heizpufferspeichern handelt es sich um sensible thermische Speicher, die in den Heizkreis eingebunden werden. Anders als bei latenten Wärmespeichern wird Energie nicht im Phasenübergang eines sogenannten Phase Change Materials (PCM) gespeichert, sondern die Energiespeicherung erfolgt über eine spürbare Temperaturerhöhung bzw. -absenkung eines festen oder flüssigen Speichermediums (Sternier & Stadler, 2014). In Heizsystemen wird vorwiegend Wasser als Speichermedium eingesetzt. Einerseits ist es kostengünstig sowie unbedenklich für die Umwelt und andererseits weist Wasser eine hohe Wärmekapazität auf (Verein Deutscher Ingenieure & VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013). Durch die Verwendung von Wasser als Speichermedium kommen allerdings ausschliesslich Niedertemperaturanwendungen in Betracht. Sensible thermische Speicher als Heizpufferspeicher sind heute Stand der Technik.

Dies liegt nicht zuletzt daran, dass sie im Vergleich zu anderen Speichertechnologien nur einen Bruchteil kosten, was sich auch auf die eher simple Konstruktion zurückführen lässt (Sternner & Stadler, 2014). Die Speicherdauer ist neben der Isolation und dem Temperaturgradienten zwischen innen und aussen massgeblich vom Speichervolumen abhängig. Als Wärmedämmmaterial kommen Mineralwolle, Weichschaum oder Polyurethan zum Einsatz, die in einer Materialstärke von 8 cm bis 15 cm um den Speicher angebracht und mit Kunststoff oder verzinktem Stahlblech verkleidet werden. Die Speicher selbst werden je nach hygienischer Anforderung aus Stahl, Edelstahl oder emailliertem Stahl gefertigt (Recknagel et al., 2018a). Auf dem Markt werden verschiedene Ausführungen von Pufferspeichern angeboten. Sie unterscheiden sich durch Bauart und Anwendungsfall. Die häufigsten Pufferspeicher sind Standardspeicher, Schichtspeicher, Kombispeicher sowie Bivalente Speicher (Recknagel et al., 2018a), auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

1.3.1 Standard-Pufferspeicher

Beim Standard-Pufferspeicher handelt es sich um einen isolierten Druckbehälter, in dem ein Speichermedium Wärme aufnimmt und zeitverzögert an das Heizsystem wieder abgibt, wenn diese benötigt wird. Die Wärme wird i.d.R. im oberen Bereich des Speichers eingebracht und für den Heizungsvorlauf auch wieder oben entnommen. Der Heizungsrücklauf wird im unteren Bereich des Speichers zurückgeführt. Durch seine eher simple Konstruktion können beim Beladen Verwirbelungen im Inneren des Speichers entstehen, die dazu führen, dass sich ein ähnliches Temperaturniveau über den gesamten Speicher einstellt. Im Gegensatz zu Speicher, die das Trinkwasser bevorraten, entfallen die Hygieneanforderungen, was neben der einfachen Bauart dazu führt, dass Standard-Pufferspeicher verhältnismässig kostengünstig sind (Oberzig, 2014; Recknagel et al., 2018a).

1.3.2 Schichtspeicher

Anders als bei Standard-Pufferspeichern wird bei Schichtspeichern durch einen gezielten, strömungsarmen Wärmeeintrag ein vertikaler Temperaturgradient im Speicher erzeugt. In diesem Fall wird sich zunutze gemacht, dass wärmeres Wasser aufgrund seiner niedrigeren Dichte aufsteigt und umgekehrt. Dadurch ist es möglich, bei einem gleichen Wärmeeintrag höhere Temperaturen im oberen Bereich des Speichers zu erreichen, im Vergleich zu einem Standard-Pufferspeicher. Darüber hinaus wird eine gezielte Entnahme von unterschiedlichen Temperaturen möglich. Da im unteren Teil des Speichers stets die niedrigste Temperatur herrscht, sind Heizpufferspeicher besonders gut für die Kombination mit Solarthermie geeignet. Durch die niedrigeren Temperaturen im unteren Speicherteil können die Solarerträge gesteigert werden gegenüber einem Standard-Pufferspeicher (Oberzig, 2014).

1.3.3 Kombispeicher

Wie der Name schon vermuten lässt, handelt es sich bei einem Kombispeicher um eine Kombination eines Heizpufferspeichers mit einem Trinkwasserspeicher. I.d.R. ist die Konstruktion so angelegt, dass innerhalb eines Heizpufferspeichers ein Trinkwasserspeicher eingebracht ist. Man spricht daher auch von einem «Tank im Tank-System». Eine weitere Ausführung ist ein Kombispeicher mit Rohrwärmetauscher. Bei dieser Konstruktion wird das Brauchwarmwasser in Form eines Rohrwärmetauschers durch den Heizwasserspeicher geführt. Auch die Ausführung mit einem ausserhalb des Heizpufferspeichers liegenden Plattenwärmetauscher für den Wärmeübertrag an das Brauchwarmwasser wird als Kombispeicher bezeichnet. Um bei den genannten Bauformen das Trinkwasser nicht mit Heizwasser zu kontaminieren, sind Brauchwarmwasser und Heizwasser hydraulisch voneinander getrennt. Es gibt also keinen Medien austausch zwischen beiden Kreisläufen. Bedingt durch die Konstruktion benötigt ein Kombispeicher einen geringen Platzbedarf und die Wärmeverluste fallen niedriger aus, im Vergleich zu zwei getrennten Speichern. Allerdings steigen die hygienischen Anforderungen an den Speicher mit der Kombination von Brauchwasser und Heizwasser in einem Speicher. Mit dem Brauchwarmwasser muss zusätzlich die Bildung von Legionellen berücksichtigt werden (Oberzig, 2014; Recknagel et al., 2018a).

1.3.4 Bivalente Speicher

In bivalenten Speichern wird die Wärme von zwei unterschiedlichen Quellen eingebracht. I.d.R. wird über zwei Wärmetauscher, die von zwei verschiedenen Wärmeerzeugern gespeist werden, Wärme in den Speicher übertragen. Üblicher Anwendungsfall ist die Kombination von Solarthermie mit z.B. Holzheizung, Wärmepumpe oder Heizkessel. Bivalente Speicher werden meist in Brauchwarmwasserkreisläufe integriert. Dadurch ist sichergestellt, dass die Solarwärme ganzjährig genutzt werden kann. Aber auch in Heizkreisen in Verbindung mit Solarthermie und z.B. Holzheizung finden die bivalenten Speicher Anwendung. Durch die Solarwärme wird das Heizwasser vorerwärmt und bei Bedarf findet eine Nacherwärmung durch den zweiten Wärmeerzeuger statt. Wenn durch drei Wärmeerzeuger Wärme in einen Speicher eingebracht wird, spricht man von trivalenten Speichern (Oberzig, 2014; Sauer & Bauernhansl, 2016).

In der Praxis kommt es häufig zu einer Verbindung der Speichereigenschaften der zuvor genannten Speicher. So kann beispielsweise ein Kombispeicher bivalent betrieben werden und der Wärmeeintrag gemäss eines Schichtspeichers erfolgen. Daraus lässt sich ableiten, dass verschiedene Kombinationen der Speichertypen anzutreffen sind.

Aufgrund der einfachen Regelbarkeit von gas- und ölbefeuerten Heizsystemen werden i.d.R. bei diesen Heizsystemen keine Heizpufferspeicher verbaut. Die Einbindung eines Heizpufferspeichers würde in Verbindung mit diesen Wärmeerzeugern zu unnötigen Wärmeverlusten führen. Bei Heizsystemen mit erneuerbaren Energiequellen kann hingegen die Einbindung eines Heizpufferspeichers sinnvoll sein. Durch die Einbindung von Heizpufferspeichern in Systeme mit Wärmepumpe wird eine Reduktion der Schaltzyklen der Wärmepumpe erreicht und Sperrzeiten der Netzbetreiber können überbrückt werden (Recknagel et al., 2018a; Röhrenbeck, 2019). Auch eine Glättung von Lastspitzen kann durch die Einbindung eines Heizpufferspeichers erreicht werden (Benthin et al., 2020). Ferner können durch die Kombination von Wärmepumpen und Heizpufferspeichern Betriebskosten gesenkt werden, da die Wärmepumpe vermehrt dann betrieben werden kann, wenn ein kostengünstigerer Stromtarif vom Stromversorger angeboten wird (Schmidt et al., 2010). Ob und wie sich diese Vorteile auswirken, ist unter anderem abhängig von der Regelstrategie. Aber auch bei anderen Heizsystemen kommen Heizpufferspeicher zur Anwendung. Beispielsweise bei Heizsystemen mit Festbrennstoffen (z.B. Scheitholzkessel), die ihren höchsten Wirkungsgrad im Vollastbetrieb haben. Durch einen Heizpufferspeicher wird ein längerer Betrieb unter Vollast möglich und die Restwärme des Kessels wird nutzbar gemacht, im Gegensatz zu Hydrauliken mit Festbrennkessel, die über keinen Heizpufferspeicher verfügen. Zusätzlich werden ebenfalls die Ein- und Ausschaltzyklen reduziert, was sich positiv auf die Abgaswerte auswirkt (Kunze, 2016; Recknagel et al., 2018b; Sauer & Bauernhansl, 2016). Auch bei Solarthermieanlagen, die zur Heizungsunterstützung verwendet werden, kommen bivalente Kombispeicher zum Einsatz. Die über die Solarthermieanlage gesammelte Wärme wird dabei meist im unteren Bereich des Speichers eingebracht. Wenn die abgegebene Wärme der Solarthermie zu gering ausfällt, bringt ein zweiter Wärmeerzeuger im oberen Bereich des Speichers die nötige Wärme ein, um die Solltemperatur für Heizung und/oder Brauchwarmwasser zu erreichen (Kunze, 2016; Oberzig, 2014; Recknagel et al., 2018a). In Verbindung mit Photovoltaik-Modulen kann ein Heizpufferspeicher dazu dienen, überschüssigen PV-Strom in Form von Wärme durch ein Elektroheizelement in den Heizpufferspeicher einzuspeichern. So kann der Eigenverbrauch des PV-Stroms gesteigert werden. Neben der Möglichkeit, durch die Speicherung der Wärme eine erhöhte Nutzung der regenerativen Energieträger zu erreichen, bringt der Einsatz von Heizpufferspeichern weitere Vorteile mit sich, gerade in Kombination mit Wärmepumpen. Durch die Lastverschiebung von Wärmepumpen werden verschiedene Regelstrategien möglich.

Die bei Wärmepumpen am häufigsten angewendete Regelstrategie ist die wärme- bzw. temperaturgeführte Betriebsweise. Hierbei wird die Heizungsvorlauftemperatur anhand der Aussen- und Raumtemperatur sowie der Speichertemperatur bzw. der Heizungsrücklauftemperatur geregelt (Röhrenbeck, 2019). Sie erfordert nicht zwingend die Einbindung eines Heizpufferspeichers. Diese Regelungsart wurde von Öl- und Gasheizungen übernommen. Sie ist für

Wärmepumpen nur bedingt geeignet. Durch diese Regelungsart kommt es zu häufigen Schaltzyklen bei Wärmepumpen. Um dieses Problem zu umgehen, werden Speicher in die Hydrauliken integriert sowie Mindestlaufzeiten und Stillstandzeiten bestimmt (Röhrenbeck, 2019). Durch die Einbindung eines Heizpufferspeichers und der damit einhergehenden Möglichkeit der Lastverschiebung werden aber auch andere Regelstrategien ermöglicht, die nachfolgend näher erläutert werden.

Strompreisorientierte Betriebsweise

Bei der strompreisorientierten Betriebsweise wird die Wärmepumpe vorzugsweise dann betrieben, wenn ein niedriger Stromtarif vom Stromlieferanten angeboten wird (Röhrenbeck, 2019). Diese Regelstrategie wird bei Nachtspeicherheizungen bereits seit geraumer Zeit verwendet. Dabei wird eine Lastverschiebung vorgenommen, die allerdings nicht dafür verwendet wird, die Effizienz des Heizsystems an sich zu verbessern. Es geht vielmehr darum, das Heizsystem dann zu betreiben, wenn ein niedriger Stromtarif angeboten wird, um Energiekosten zu sparen.

Netzdienliche Betriebsweise

Eine weitere Regelstrategie ist die netzdienliche Betriebsweise (Spitalny et al., 2013). Dabei wird der Betrieb der Wärmepumpen mehrmals täglich gesperrt, immer dann, wenn mit Spitzenlasten im Stromnetz zu rechnen ist (Röhrenbeck, 2019). Bei dieser Lastverschiebung steht die Entlastung des Stromnetzes im Vordergrund.

Netzgeführter Betrieb

Eine Erweiterung der netzdienlichen Betriebsweise ist der netzgeführte Betrieb von «SG-Ready» fähigen Wärmepumpen, die über vier anstatt zwei Betriebszustände verfügen. So wird es möglich, die Regelung nach thermischen Grössen fremdgesteuert über ein «Smart Grid» zu übersteuern und erlaubt beispielsweise eine externe Abschaltung oder eine Einschaltung der Wärmepumpe, um die Netzfrequenz zu stabilisieren. Aus diesem Grund spricht man von netzgeführten Steuerungen (Bundesverband Wärmepumpen e.V., 2018; Spitalny et al., 2013).

1.4 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers auf die Effizienz von verschiedenen Heizsystemen zu testen und beurteilen. Die nächtliche Beladungssperre wird erst durch die Einbindung eines Pufferspeichers im Heizsystem möglich, da Wärmezeugung und Verbrauch zeitlich verschoben werden können. Die nächtliche Beladungssperre kann als Teil einer Regelstrategie angesehen bzw. mit einer bestehenden Regelstrategie kombiniert werden. Sie ist nicht mit einer Nachtabsenkung zu verwechseln, bei der die Soll-Raumtemperatur bzw. die Heizungsvorlauftemperatur über die Nacht gesenkt

wird und es so zu einem reduzierten Heizbetrieb kommt (Heße, 2020). Durch die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers soll der Betrieb des Wärmepumpen gezielt in den Tag verschoben werden, ohne dass die Soll-Gebäudetemperatur unterschritten wird. Durch die Auswahl von Heizsystemen, die als Wärmequelle die Umgebungsluft bzw. die Solarstrahlung verwenden, wird durch die Lastverschiebung in den Tag erwartet, dass die Quelle eine höhere Temperatur aufweist und aufgrund der höheren Quelltemperatur sollte die Effizienz steigen, was zu einem verringerten Netzbezug führt. Darüber hinaus wird durch die Lastverschiebung erwartet, dass sich der Eigenverbrauch bei Systemen mit PV-Modulen erhöht. Dieser Vorgang ist in der nachfolgenden Abbildung 1 vereinfacht veranschaulicht.

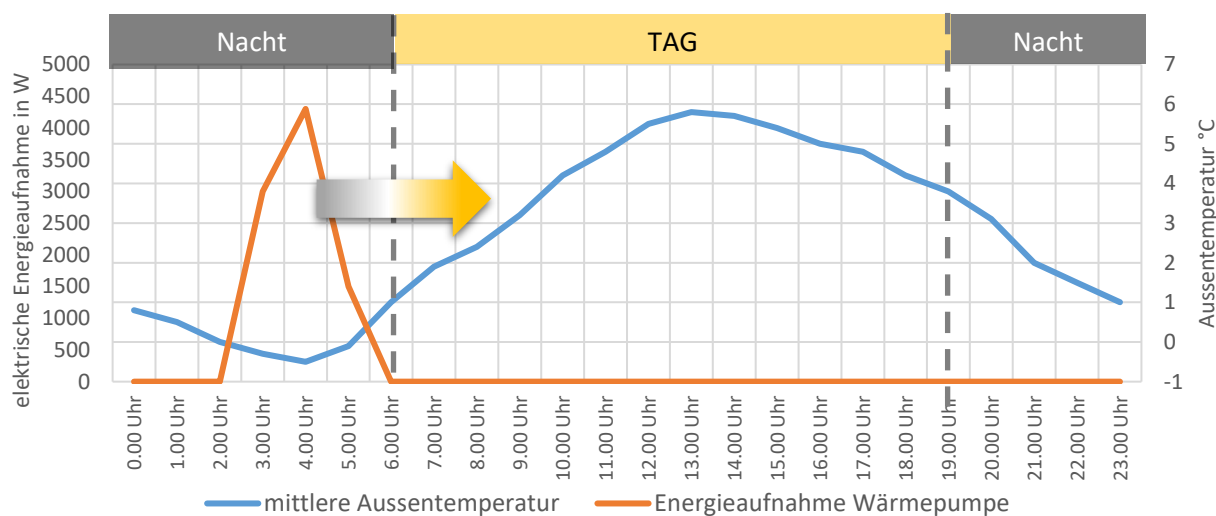


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lastverschiebung durch das Implementieren einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers.

Ein Projekt des Instituts für Gebäude Energetik der Universität Stuttgart beschäftigte sich Ende 2010 mit Regelstrategien, die zu einer Verbesserung der Jahresarbeitszahl (JAZ) von Luft/Wasser-Wärmepumpen führen sollten. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Regelungsansätze für eine Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus (EFH) miteinander verglichen. Unter anderem wurde die Betriebszeit der Wärmepumpe nur während des Tagestarifs (6:00 Uhr – 20:00 Uhr) an verschiedenen Standorten zugelassen, was als eine nächtliche Beladungssperre angesehen werden kann. Die Ergebnisse wurden mit einer ausschliesslich wärmegeführten Wärmepumpe hinsichtlich der JAZ verglichen, welche unabhängig von Uhrzeit an- bzw. ausgeschaltet wurde, sobald die definierte Grenztemperatur im Heizpufferspeicher unter- bzw. überschritten wurde. Durch den Vergleich konnten geringe Verbesserung der JAZ verzeichnet werden. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass bei einer restriktiveren Laufzeitbeschränkung (Laufzeitfenster von 12:00 Uhr bis 16:00 Uhr) und einem ausreichend grossem dimensionierten Pufferspeicher sowie der Erhöhung der Wärmepumpenleistung eine Steigerung der JAZ von rund 7 % und ein reduzierter Stromverbrauch bis zu 12 % gegenüber der

herkömmlichen Regelung erreicht werden konnte. Darüber hinaus war es möglich aufzuzeigen, dass die durchschnittliche Aussentemperatur bei Wärmepumpenbetrieb durch die Sperre angehoben werden konnte. (Schmidt et al., 2010). Es bleibt allerdings offen, in wieweit die Komfortkriterien der Gebäudetemperatur eingehalten wurden.

Im Rahmen des Projekts «L-Sol: Heizsystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe» der Forschungsgruppe «Erneuerbare Energien» der ZHAW wurde durch eine nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers in einem L-Sol Heizsystem, ebenfalls für ein EFH, eine Möglichkeit zur Erhöhung des Eigenverbrauchs sowie eine Reduktion des Netzbezugs prognostiziert. Das L-Sol Heizsystem zeichnet sich dadurch aus, dass PVT-Module als alleinige Wärmequelle für eine Sole/Wasser-Wärmepumpe dienen. Eine genauere Beschreibung des L-Sol ist im Kapitel Heizsystem mit Sole/Wasser-Wärmepumpe (L-Sol) zu finden. Durch die Verschiebung des Betriebs der Wärmepumpe in den Tag, an dem die Solarstrahlung und Lufttemperaturen erwartungsgemäss höher ausfallen, konnte eine Wärmepumpe effizienter betrieben werden als in der Nacht bzw. den frühen Morgenstunden (Sauter et al., 2019). Im Bericht der Forschungsgruppe stand die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers allerdings nicht im Fokus der Untersuchung, weshalb die Zusammenhänge nicht näher beleuchtet wurden.

Durch eine Literaturrecherche konnte kein Anwendungsfall ausgemacht werden, bei welchem die nächtliche Beladungssperre eines Heizpufferspeichers in der Praxis Anwendung findet. Im Bereich der Forschung gibt es derzeit zahlreiche Beispiele für Lastverschiebungen von Wärmepumpen, wobei die nächtliche Beladungssperre eines Heizpufferspeichers nie im Fokus der Untersuchungen steht, sondern vielmehr ein Nebeneffekt einer anderen Regelstrategie darstellt.

Vor diesem Hintergrund und aufgrund der Beobachtungen aus den zuvor genannten Projekten wurde das Thema für diese Masterarbeit definiert und es wurden folgende Forschungsfragen abgeleitet:

- Kann durch die gezielte Lastverschiebung erwirkt werden, dass Heizsysteme mit erneuerbaren Energiequellen (Sonnenstrahlung, Umgebungsluft) bei höherem Temperaturniveau der Quelle betrieben werden im Vergleich zu Heizsystemen ohne Lastverschiebung?
- Kann eine Beladungssperre eines Heizpufferspeichers implementiert werden, ohne dass die Soll-Gebäudetemperatur unterschritten wird?
- Wie beeinflussen Veränderungen der Hydraulik (Speichervolumen, Wärmeübertragungsflächen, Heizungsvorlauftemperatur) ein Heizsystem mit Beladungssperre des Heizpufferspeichers?

- Ist es möglich, die Steuerung der Beladungssperre in der Simulationsumgebung so anzulegen, dass eine Effizienzsteigerung für verschiedene Gebäude- und Anlagenkonzepte möglich wird?
- Was muss bei der praktischen Umsetzung der nächtlichen Beladungssperre beachtet werden, sofern mit der nächtlichen Beladungssperre tatsächlich eine Effizienzsteigerung des jeweiligen Heizsystems erreicht werden kann?

Aus den vorausgegangenen Ausführungen und den formulierten Forschungsfragen wurden die nachstehenden Hypothesen abgeleitet.

Hypothesen: Durch die Implementierung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei einem L-Sol Heizsystem kann die Systemjahresarbeitszahl erhöht werden.

Durch die Implementierung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei einem Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe kann die Systemjahresarbeitszahl erhöht werden.

Durch die Implementierung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei einem Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und Solarthermie kann die Systemjahresarbeitszahl erhöht werden.

Für jede der oben formulierten Hypothesen gilt die folgenden Nullhypothese.

Nullhypothese: Durch die Implementierung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers kann die Systemjahresarbeitszahl **nicht** erhöht werden.

2 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird das Simulationsdesign erläutert und beschrieben, anhand welcher Grösse die Effizienz gemessen und verglichen wird. Darüber hinaus wird aufgeklärt, welche Heizsysteme an welchem Standort für die Untersuchung gewählt werden, um den Einfluss einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers auf die Effizienz von verschiedenen Heizsystemen zu betrachten. Die Bestimmung der Gebäudestandards für die Gebäudemodelle ist ebenfalls Bestandteil dieses Kapitels, wie auch die Auswahl und Dimensionierung der Hydraulikhauptkomponenten der betrachteten Heizsysteme.

Für die Untersuchung werden drei Heizsysteme mit Wärmepumpen gewählt. Für die Auswahl der Heizsysteme wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt. Einerseits ist die sinnvolle Einbindung eines Heizpufferspeichers eine Prämisse. Andererseits stellt die Wärmequelle ein weiteres Auswahlkriterium dar. Da durch die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers erwartet wird, dass der Wärmeerzeuger vornehmlich am Tag betrieben wird, wenn die Umgebungstemperatur sowie die solare Strahlung über den Tagesverlauf betrachtet i.d.R. am höchsten ausfallen, wurden Wärmepumpen gewählt, die eben aus diesen Quellen ihre Wärme beziehen. Als erstes Heizsystem wird das L-Sol bezüglich des Einsatzes einer nächtlichen Beladungssperre untersucht, welches bereits durch die Forschungsgruppe «Erneuerbare Energien» der ZHAW hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnis untersucht wurde und wobei erste positive Beobachtungen im Hinblick auf den Einsatz einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers festgestellt werden konnten. Auch die Verbreitung der Wärmepumpen spielt bei der Auswahl eine Rolle. Da wie im vorgängigen Kapitel erwähnt, elektrische Luft/Wasser-Wärmepumpen die meist verkauften Wärmepumpen in der Schweiz sind, wird ein Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpen ausgewählt, nachfolgend LWWP genannt. Als ein weiteres Heizsystem wird eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Solarthermie untersucht, nachfolgend LWWP_ST genannt. Bei diesem Heizsystem wird die Wärme, welche über Solarthermie-Kollektoren gesammelt wird, direkt in einen Kombispeicher eingebracht, in welchem das Brauchwarmwasser sowie das Heizwasser erwärmt werden. Sofern die Wärme aus den Kollektoren nicht ausreicht, um die definierten Soll-Temperaturen zu erreichen, so wird eine Luft/Wasser-Wärmepumpe zugeschaltet. Mit der Wahl dieses Systems soll Aufschluss darüber erlangt werden, wie sich die zusätzliche Heizungsunterstützung der thermischen Solar Kollektoren in Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre auswirkt. Darüber hinaus steigt, wie in der Einleitung beschrieben, der Anteil der Solarthermie an den genutzten erneuerbaren Energien in der Schweiz an, was die Berücksichtigung einer Solarthermie zusätzlich relevant macht.

Alle drei Heizsysteme werden so ausgelegt, dass neben der Bereitstellung der Raumwärme die Brauchwarmwassererwärmung mitberücksichtigt wird, um ein ganzheitliches Heizsystem abzubilden. Darüber hinaus soll so sichergestellt werden, dass die solare Wärme über das ganze Jahr nutzbar gemacht wird, welche durch die PVT-Kollektoren bzw. Solarthermie-Kollektoren generiert wird. Nachfolgend wird der Aufbau der drei Heizsysteme näher erläutert.

2.1 Betrachtete Heizsysteme

In diesem Abschnitt werden die prinzipiellen Funktionsweisen sowie die wichtigsten Komponenten der drei Heizsysteme beschrieben. Für alle Heizsysteme kann festgehalten werden, dass sämtliche Speicher als Schichtspeicher ausgeführt werden, welche über je 12 Schichten verfügen. Die Speicher haben alle eine Polyurethan-Hartschaum Dämmung mit denselben Dämmstärken (Wand: 10 cm, Deckel: 10 cm, Boden: 8 cm). Die Speicher selbst sind aus Edelstahl mit einer Wandstärke von 0.2 cm. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Hauptkomponenten kann dem Anhang entnommen werden. Sollten Steuerungsdetails, Komponenten sowie Konfigurationen nicht explizit erwähnt sein, so wurden die Standardeinstellungen von Polysun genutzt. Abgesehen vom jeweiligen Heizsystem werden keine zusätzlichen elektrischen Verbraucher hinzugefügt. Der elektrische Energieverbrauch sowie die Eigenverbrauchswerte beziehen sich daher ausschliesslich auf die Heizsysteme selbst. Die Zapfprofile für des Brauchwarmwasser (BWW) orientieren sich an den Gebäudemodellen und können dem Abschnitt Wärmebedarf Brauchwarmwasser entnommen werden. Die Erwärmung des BWW wird bei allen Heizsystemen prioritär und damit vor der Heizwassererwärmung angesteuert und wird im Verlauf der Arbeit nicht verändert, da der Fokus der Untersuchung auf dem Heizkreis liegt. Die Heizperiode wird gleichermassen für alle Heizsysteme für die Monate September bis Mai festgelegt. Die BWW-Versorgung ist davon nicht betroffen und somit für das gesamte simulierte Jahr aktiv.

2.1.1 Heizsystem mit Sole/Wasser-Wärmepumpe (L-Sol)

Bei dem L-Sol Heizsystem handelt es sich um ein neuartiges Heizsystem dessen Anwendung sich auf einzelne Pionieranlagen in der Schweiz beschränkt (Dr. Zenhäusern et al., 2017). Der Begriff «L-Sol», welcher für die Kombination von Luft und Sonne steht, ist an den Begriff 2-Sol angelehnt, der für die Kombination von Sonne und Erde steht (Sauter et al., 2019). Die Besonderheit des L-Sol Heizsystems liegt auf der Primärseite eines Sole/Wasser-Wärmepumpensystems. Durch unabgedeckte PVT-Hybridmodule wird neben der Lufttemperatur auch die solare Einstrahlung für die Erwärmung eines Trägermediums genutzt. Die Wärme aus den Kollektoren mit Anstellwinkel 45 °, Südausrichtung (Azimut 0 °) ohne Verschattung wird in einen Kaltspeicher gespeist. Dieser Speicher dient einer Sole/Wasser-Wärmepumpe als alleinige

Wärmequelle und ist innerhalb des Gebäudes installiert. Um das System gegen Frost zu schützen, zirkuliert in dem Kreislauf zwischen den Modulen und dem Speicher ein Glykol-Wasser-Gemisch. Neben der Erwärmung des Trägermediums kann zusätzlich über die Photozellen der PVT-Module elektrischer Strom gewonnen werden. Der so gewonnene elektrische Strom wird soweit möglich zum Eigenverbrauch bzw. zur Erhöhung des Autarkiegrads eingesetzt. Auf der Sekundärseite der Sole/Wasser-Wärmepumpen befinden sich zwei Wärmespeicher, in welchen das Brauchwarmwasser (BWW) und das Heizungswasser gepuffert bzw. erwärmt werden. Es wurde entschieden, zwei separate Speicher einzusetzen, um eine klare Trennung zwischen BWW- und Heizungskreislauf zu erhalten. Aus dem Heizungspufferspeicher wird der Heizkreis gespeist, aus dem Brauchwarmwasserspeicher werden die Zapfstellen mit warmem Wasser versorgt. Um beispielsweise bei längeren Kälteperioden den Komfort sicherstellen zu können, befinden sich in den beiden Speichern Elektroheizelemente. Auf der folgenden Abbildung 2 ist die Hydraulik des L-Sol-Heizsystems dargestellt, wie sie in Polysun angelegt wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden einzelne Komponenten in ihrer Dimensionierung geändert sowie ein Wechsel der Heizelemente von Fussbodenheizung zu Radiatoren vorgenommen, ansonsten bleibt die Hydraulik im Verlauf der Arbeit unverändert.

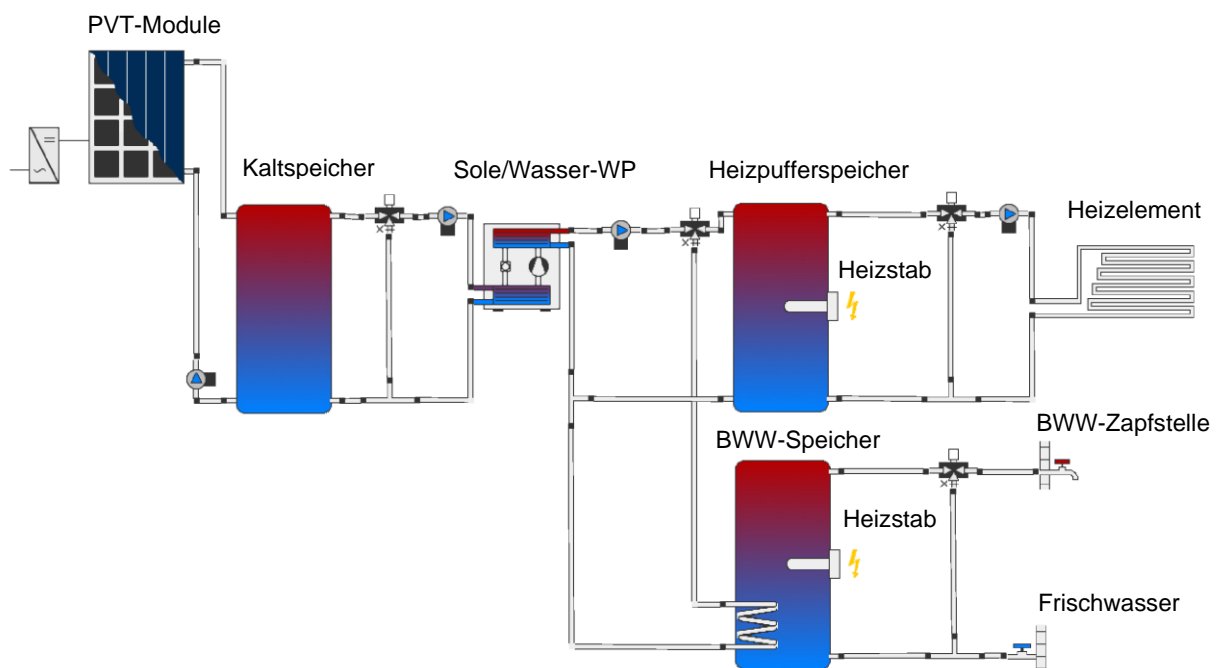


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Heizsystems L-Sol mit Kaltspeicher und Sole/Wasser-Wärmepumpe, wie es in der Software Polysun implementiert wird.

Die Steuerung des L-Sol ist so angelegt, dass der Kaltspeicher beladen wird, sobald eine Temperaturdifferenz zwischen oberster Schicht des Speichers und der Austrittstemperatur der PVT-Module von 4 K vorherrscht und die Wärmepumpe den Status «Aus» hat. Wenn die Wärmepumpe in Betrieb ist, wird die Beladung gestartet, sobald die Kollektorausstrittstemperatur grösser bzw. gleich der Temperatur in der obersten Schicht des Kaltspeichers ist. Die Zirkula-

tion im Solarkreislauf wird angehalten, wenn die Temperatur in der obersten Schicht des KaltSpeichers 60 °C erreicht hat, die Kollektorausstrittstemperatur über 100 °C steigt oder die Temperatur in der Schicht 3 die Kollektorausstrittstemperatur, mit einer Hysterese von 1.5 K, erreicht. Letzteres tritt nur ein, wenn die Wärmepumpe aus ist. Wenn die Ist-Gebäudetemperatur unter die Soll-Gebäudetemperatur fällt und die Temperatur in Schicht 11 kleiner als die Soll-Heizungsvorlaufstemperatur ist, wird der Heizstab im Heizpufferspeicher zugeschaltet. Sobald die Soll-Gebäudetemperatur erreicht ist, wird das Elektroheizelement wieder ausgeschaltet. Der Heizstab im BWW-Speicher wird zugeschaltet, wenn die Temperatur in Schicht 11 unter die Soll-Zapftemperatur fällt und wieder ausgeschaltet, wenn in Schicht 9 die Soll-Zapftemperatur erreicht wird. Wenn die Temperatur im Kaltspeicher über den -14.5 °C liegt, belädt die Wärmepumpe den Heizpufferspeicher, sobald die Temperatur in der Schicht 11, von den insgesamt 12 Schichten, unter die Soll-Heizungsvorlaufstemperatur fällt und stoppt die Beladung wieder, wenn die Soll-Heizungsvorlaufstemperatur mit einer Hysterese von 5 K sich in der Schicht 8 eingestellt hat. Die Beladung des Brauchwarmwasserspeichers wird durch die Wärmepumpe gestartet, sobald die Temperatur der Schicht 11 des Speichers 2 K unter die Soll-Zapftemperatur fällt. Die Steuerung ist so eingestellt, dass die Beladung wieder stoppt, wenn in der Schicht 8 die Soll-Zapftemperatur mit einer Hysterese von 5 K erreicht wurde. Die Entnahme aus dem BWW-Speicher erfolgt gemäss dem effektiven BWW-Verbrauch. Die Entnahme aus dem Heizungspufferspeicher erfolgt durch den anfallenden Heizwärmebedarf des Gebäudes, um die Soll-Gebäudetemperatur zu halten.

2.1.2 Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe (LWWP)

Bei dem Heizsystem LWWP wurde ebenfalls ein Analgschema verwendet, welches über zwei separate Speicher verfügt, um eine bessere Trennung zwischen BWW- und Heizkreislauf zu erhalten. Es handelt sich um eine Hydraulik, die sich in der Praxis bewährt hat (Dott et al., 2018). Das LWWP besteht aus einer Luft/Wasser-Wärmepumpe, welche zum einen den Heizpufferspeicher speist und zum anderen den BWW-Speicher, von welchem wiederum die Zapfstellen für Warmwasser versorgt werden. Zur Sicherung des Komforts sind in beiden Speichern Elektroheizelemente verbaut. Im Laufe dieser Arbeit werden einzig Komponenten in ihrer Dimensionierung geändert sowie die Heizelemente von Fussbodenheizung zu Radiatoren getauscht, ansonsten bleibt die Hydraulik im Verlauf der Arbeit unverändert. Wie die Hydraulik in der Simulationssoftware angelegt wird, kann Abbildung 3 entnommen werden.

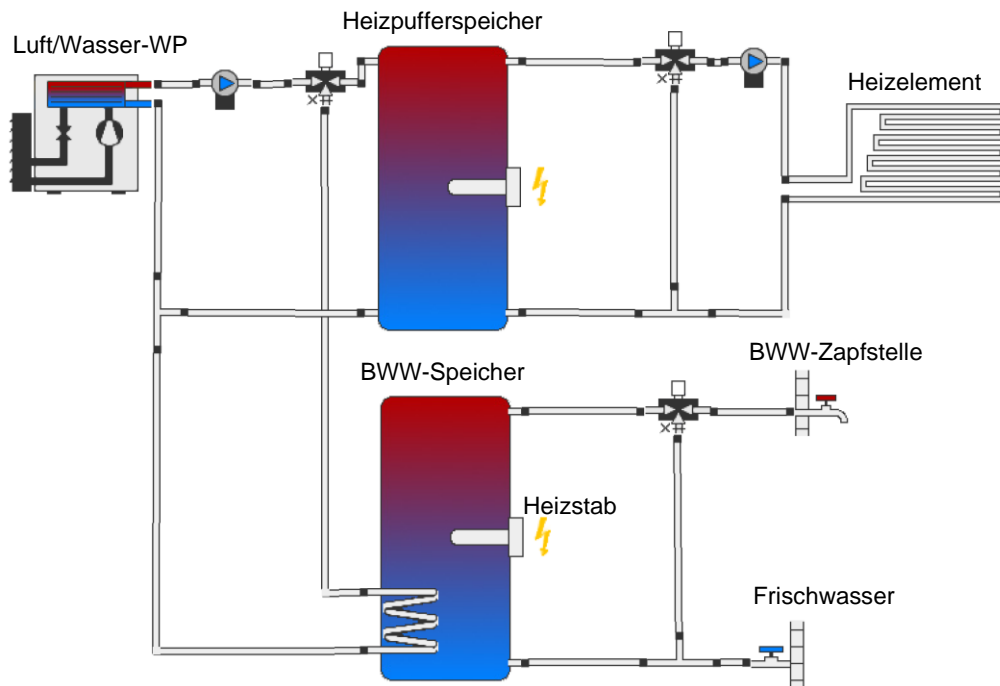


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Heizsystems LWWP mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und separaten Speichern, wie es in der Software Polysun implementiert wird.

Identisch wie beim L-Sol wird die Luft/Wasser-Wärmepumpe beim LWWP eingeschaltet, sobald die Temperatur in der Schicht 11, der insgesamt 12 Schichten des Heizpufferspeichers $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ unter die Soll-Heizungsvorlauftemperatur sinkt und wieder ausgeschaltet, wenn in der Schicht 8 die Soll-Vorlauftemperatur mit einer Ausschalthysterese von 5 K erreicht wurde. Für die Beladung des BWW-Speichers wird die Wärmepumpe eingeschaltet, sobald die Temperatur in der Schicht 11 des BWW-Speichers 2 K unter die der Soll-Zapftemperatur fällt. Ausgeschaltet wird die Wärmepumpe, wenn in der Schicht 8 die Soll-Zapftemperatur mit einer Hysterese von 5 K erreicht wurde. Um den Komfort sicherzustellen, werden die beiden Elektroheizelemente wie beim L-Sol zugeschaltet, wenn die Soll-Heizungsvorlauftemperatur oder die Soll-Zapftemperatur fällt und wieder ausgeschaltet, wenn in Schicht 11 die jeweilige Soll-Temperatur mit einer Ausschalthysterese von 5 K erreicht wurde. Die Entnahme aus dem BWW-Speicher erfolgt gemäss dem effektiven BWW-Verbrauch. Die Entnahme aus dem Heizpufferspeicher erfolgt durch den anfallenden Heizwärmebedarf des Gebäudes.

2.1.3 Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und Solarthermie (LWWP_ST)

Ebenfalls wie beim LWWP wurde eine Hydraulik gewählt, die wie in Abbildung 4 dargestellt, in der Praxis Anwendung findet (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2019). Anders als beim L-Sol und LWWP werden beim LWWP_ST keine zwei separaten Speicher, sondern ein Kombi-Speicher eingesetzt. Grund dafür sind die Vakuumröhrenkollektoren mit Anstellwinkel 35 ° , Südausrichtung (Azimut 0 °) und ohne Verschattung, die zur Heizungsunterstützung verwendet werden und über einen Wendel-Wärmetauscher direkt Wärme in den Kombi-Speicher einbringen. Eine alleinige Heizungsunterstützung in einen separaten Heizpufferspeicher, ohne die

Kombination mit BWW-Erwärmung, würde dazu führen, dass die Wärme der Vakuumröhrenkollektoren ausserhalb der Heizperiode nicht genutzt werden würde. Das Heizsystem ist so angelegt, dass eine Luft/Wasser-Wärmepumpe den Kombi-Speicher belädt, bei welchem das BWW in Form eines Rohrwärmetauschers durch den Heizwasserspeicher geführt wird. Durch den Einsatz von zwei Drei-Wege-Ventilen kann die Beladung in unterschiedlichen Schichten des Kombi-Speichers erfolgen.

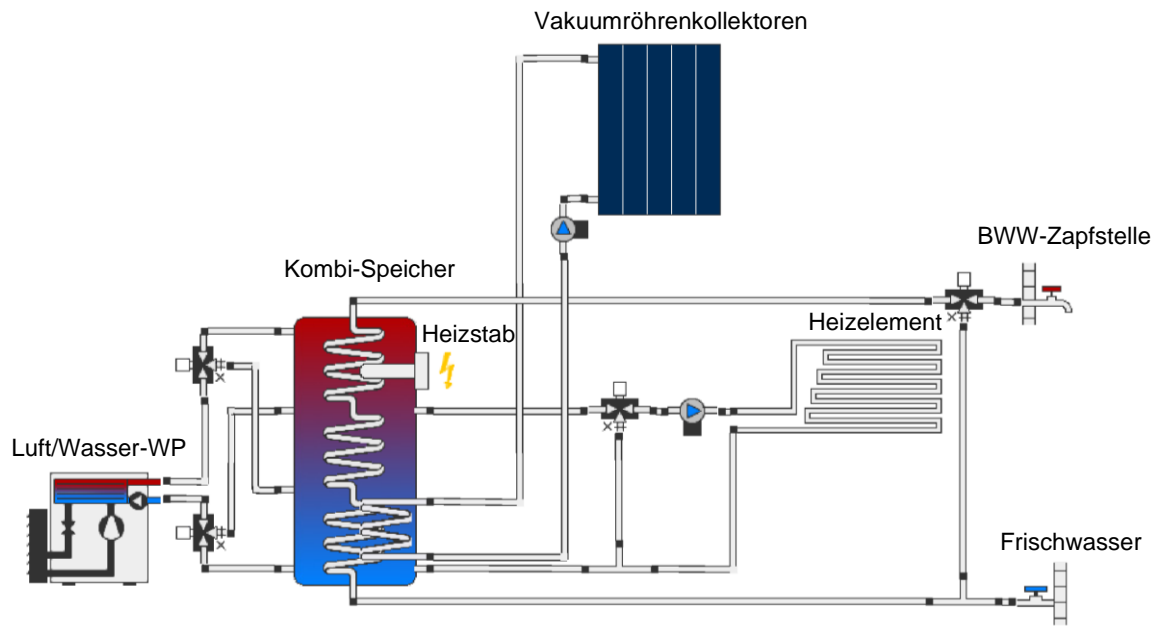


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Heizsystems LWWP_ST mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und Kombi-Speicher und direktem Wärmeeintrag durch Vakuumröhren-Kollektoren, wie es in der Software Polysun implementiert wird.

Die Luft/Wasser-Wärmepumpe wird eingeschaltet, wenn in der Schicht 11 des Kombi-Speichers die Temperatur auf Soll-Zapftemperatur fällt oder die Temperatur in Schicht 6 gleich der Soll-Heizungsvorlauftemperatur ist. Ausgeschaltet wird die Wärmepumpe wieder, wenn in Schicht 10 die Soll-Zapftemperatur mit einer Ausschalthysterese von 5 K erreicht wurde oder sich in Schicht 6 die Soll-Heizungsvorlauftemperatur ebenfalls mit einer Ausschalthysterese von 5 K eingestellt hat. Der Wärmeeintrag im unteren Teil des Kombi-Speichers findet immer dann statt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraustrittstemperatur und Wendelwärmetauscher 6 K beträgt. Die Pumpe, die das Wasser-Glykol-Gemisch im Solarthermie-Kreislauf zirkulieren lässt, wird wieder ausgeschaltet, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Kollektoraustrittstemperatur und der Temperatur im Wendelwärmetauscher 2 K beträgt. Der elektrische Heizstab wird mit einer Einschalthysterese von 5 K immer dann zugeschaltet, wenn in Schicht 10 die Soll-Zapftemperatur unter die Soll-Zapftemperatur fällt und wieder ausgeschaltet, wenn in Schicht 9 die Soll-Zapftemperatur mit einer Ausschalthysterese von 10 K erreicht wurde.

2.2 Effizienzmessung der Heizsysteme

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, wie sich die nächtliche Beladungssperre eines Heizpufferspeichers auf die Effizienz der zuvor vorgestellten Heizsysteme auswirkt. Genauer wird das Augenmerk auf die Energieeffizienz gelegt. Um die Energieeffizienz bei Wärmepumpen beurteilen zu können, wird i.d.R. die Jahresarbeitszahl (JAZ) betrachtet. Sie gibt das Verhältnis zwischen gewonnener Wärmeenergie zur aufgenommenen elektrischen Energie über ein Jahr wieder (Wosnitza & Hilgers, 2012). Um das gesamte Heizsystem bewerten zu können, wird die Systemgrenze der JAZ ausgedehnt und die Systemjahresarbeitszahl (SJAZ) gemäss IEA SHC Task 44 im Verlauf dieser Arbeit zur Beurteilung der Systemeffizienz herangezogen (AIT Austrian Institute of Technology GmbH et al., 2013). Durch die Betrachtung der SJAZ soll es gelingen, das gesamte Heizsystem besser beurteilen zu können. Während beispielsweise Heizsysteme mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und solarthermischer Heizungsunterstützung für gewöhnlich niedrigere JAZ aufweisen als Heizsysteme mit Luft/Wasser-Wärmepumpe ohne solarthermische Unterstützung, kann dieses Verhältnis durch Betrachtung der SJAZ umgedreht werden, da der Wärmeeintrag durch Solarthermie mitberücksichtigt wird. Da die JAZ bzw. die SJAZ von Wärmepumpen stark von dem Energieniveau der Wärmequelle beeinflusst wird, findet zusätzlich eine Beobachtung der durchschnittlichen Umgebungstemperatur sowie der Globalstrahlung während der Betriebszeit der Wärmepumpen statt. Mittels T-Test bzw. Welch-Test, sofern die Voraussetzungen für den T-Test nicht gegeben sind (Normalverteilung, Varianzgleichheit), wird untersucht, ob sich die erfassten Temperaturen bzw. Strahlungswerte von den Heizsystemen mit nächtlicher Beladungssperre von jenen der Referenzvarianten ohne Beladungssperre statistisch signifikant unterscheiden. Dazu wird die Umgebungstemperatur der Referenzvariante mit der Variante mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers verglichen. Analog wird mit der Globalstrahlung verfahren. Es wird der Sperrzeitraum gewählt, bei welchem der niedrigste jährliche elektrische Energieverbrauch und die höchste SJAZ erzielt werden kann. In dem Vergleich werden nur die Werte der Aussentemperatur bzw. Globalstrahlung in stündlicher Auflösung berücksichtigt, die bei Betrieb der jeweiligen Wärmepumpe (Status der Wärmepumpe > 0 %) simuliert werden. Die Ergebnisse werden als Boxplot visualisiert. Die Boxplots sind dabei in Quartile unterteilt. Innerhalb der Box liegen demnach die mittleren 50 % der Daten. Mittels Striches wird innerhalb der Box der Mittelwert (Median) angezeigt. Unterhalb sowie oberhalb der Box sind die Whisker angegeben. Sie zeigen den Wertebereich, in welchem sich die unteren bzw. oberen 25 % der Daten befinden. Sollten die Extremwerte das 1.5-fache des Interquartilsabstands (Länge der Box) übersteigen, so werden sie als Ausreisser (outliers) mit unausgefüllten Punkten dargestellt.

Neben der Globalstrahlung und der Umgebungstemperatur wird stets der gesamte Stromverbrauch (Ecs) des betrachteten Heizsystems ausgewiesen. Nachfolgend sind die betrachteten Grössen näher erläutert.

Systemjahresarbeitszahl (SJAZ):	Die SJAZ wird in der genutzten Software gemäss IEA SHC Task 44 berechnet und beschreibt das Verhältnis der Nutzenergie (von den Verbrauchern effektiv bezogene Energie) zum jährlichen Stromverbrauch sämtlicher Wärmeerzeuger im System, inklusive Hilfs- oder parasitische Energie (Pumpen) (AIT Austrian Institute of Technology GmbH et al., 2013). Davon ausgenommen sind Hilfs- oder parasitische Energie der Heizkreispumpe (Vela Solaris AG, 2019).
Gesamter Stromverbrauch (Ecs):	Der gesamte Stromverbrauch gibt die elektrische Energiemenge in kWh wieder, welche durch die Wärmeerzeuger im untersuchten Zeitraum aufgenommen wird. Zusätzlich sind Hilfsenergien beinhaltet, die z.B. durch Umwälzpumpen im Betrachtungszeitraum anfallen.
Eigenverbrauch (Eocs):	Über Photovoltaikzellen produzierte elektrische Energie in kWh, die direkt oder nach Zwischenspeicherung in einer Batterie im Heizsystem genutzt wird.
Netzbezug (Efeg):	Elektrische Energie in kWh, die aus dem externen Stromnetz für sämtliche elektrische Verbraucher bezogen wird.
Umgebungstemp. WP-Betrieb (T_{BWP}):	Gibt die durchschnittliche Umgebungstemperatur in °C während der Betriebszeit der Wärmepumpe wieder.
Globale Strahlung WP-Betrieb (G_{hBWP}):	Gibt die auf die Horizontale eintreffende Globalstrahlung während der Betriebszeit der Wärmepumpe in $\frac{W}{m^2}$ an.

2.3 Simulationsvorhaben

Für die angestrebten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulationssoftware Polysun (Version: 11.2.4.161) verwendet. Die Software erlaubt eine simulationsgestützte Planung, Auslegung sowie Optimierung von individuell anlegbaren Energiesystemen (Vela Solaris, 2020).

Die Untersuchungen, die in Form von Simulationen durchgeführt werden, gliedern sich in zwei Simulationsreihen. In der ersten Simulationsreihe wird die nächtliche Beladungssperre für das L-Sol Heizsystem sowie das LWWP-System mit und ohne Solarthermie optimiert. Ausgangslage für die Optimierung bildet die Steuerstrategie, welche durch die Forschungsgruppe im Rahmen des Projekts «L-Sol: Heizsystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe» programmiert wurde (Sauter et al., 2019). Von dieser Steuerungsstrategie ausgehend werden verschiedene Massnahmen zur Optimierung durchgeführt. Die Massnahmen werden nicht in Kombination, sondern stets in sich abgeschlossen durchgeführt.

Als zugrunde gelegter Gebäudestandard für die Optimierung wird ein Einfamilienhaus Neubau (EFH_N) gewählt, da die ersten positiven Erkenntnisse aus dem Forschungsstand auch anhand eines EFH simuliert wurden und mit einem hohen Gebäudestandard ein grösserer Effekt erwartet wird. Sofern aufgezeigt werden kann, dass sich die nächtliche Beladungssperre günstig auf die Systemeffizienz auswirkt, wird die nächtliche Beladungssperre für weitere Einbausituationen in einer zweiten Simulationsreihe über ein Jahr simuliert. Hierfür werden die Gebäudemodelle Einfamilienhaus sanierter Altbau (EFH_S), Mehrfamilienhaus Neubau (MFH_N) und Mehrfamilienhaus sanierter Altbau (MFH_S) erstellt. Die gängigsten Varianten der Wärmeübertragung bei Wohngebäuden ist über Radiatoren oder Fussbodenheizung (FBH), weshalb bei den Neubauten FBH und bei den sanierten Altbauten Radiatoren verwendet werden (Dellios et al., 2019). Für jeden Gebäudestandard wird eine Variante mit L-Sol Heizsystem, Luft/Wasser-Wärmepumpe inkl. Solarthermie-Kollektoren und eine mit Luft/Wasser-Wärmepumpe erstellt. So ergibt sich das folgende Simulationslayout.

		Nächtliche Beladungssperre			Referenz ohne nächtliche Beladungssperre		
1. Simulationsreihe (Optimierung nächtliche Beladungssperre.)	EFH Neubau (FBH)	L-Sol	LWWP	LWWP_ST	L-Sol	LWWP	LWWP_ST
	2. Simulationsreihe (Ausweitung nächtlichen Beladungssperre auf weitere Einbausituationen.)	MFH Neubau (FBH)	L-Sol	LWWP	LWWP_ST	L-Sol	LWWP
	EFH sanierter Altbau (Radiatoren)	L-Sol	LWWP	LWWP_ST	L-Sol	LWWP	LWWP_ST
	MFH sanierter Altbau (Radiatoren)	L-Sol	LWWP	LWWP_ST	L-Sol	LWWP	LWWP_ST

Tabelle 1: Simulationslayout eingeteilt in Simulationsreihe 1, welche die Optimierung der nächtlichen Beladungssperre beinhaltet und Simulationsreihe 2, in welcher die Beladungssperre auf weitere Gebäudetypen sowie Standards ausgerollt wird. Zu jedem Heizsystem mit Beladungssperre (hellgrauer Bereich) wird jeweils dasselbe Heizsystem als Referenz ohne nächtliche Beladungssperre angelegt (dunkelgrauer Bereich).

2.3.1 Variation des Sperrzeitraums der nächtlichen Beladungssperre

Da über den Tagesverlauf gesehen am frühen Morgen bis zu einer Stunde nach Sonnenaufgang mit den Tagestieftemperaturen zu rechnen ist (Deutscher Wetterdienst, 2012), wird damit begonnen, die Beladungssperre für den Zeitraum 08:00 bis 09:00 Uhr anzulegen. Anschließend wird die Sperre stets um eine Stunde in die Nacht verlängert. Der nächste Sperrzeitraum wäre von 07:00 bis 09:00 Uhr. Die nächtliche Beladungssperre wird bei den einzelnen Heizsystemen bis 19:00 Uhr ausgedehnt.

Sollte es zur Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C kommen, wird in einem zweiten Schritt eine Übersteuerung implementiert. Sie sorgt dafür, dass das Heizsystem bei einer Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur wieder in den wärmegeführten Betrieb zurückgeht.

Ergänzend wird getestet, wie sich die Effizienz der Heizsysteme verändert, wenn, anders als in den ersten Simulationen, die Beladungssperre nicht auf einen fixen Endzeitpunkt festgelegt wird, sondern einen festen Startzeitpunkt hat. Hierfür wird die Beladungssperre des Heizpufferspeichers ab 19:00 Uhr stets um eine Stunde bis 09:00 Uhr ausgedehnt.

Nachdem ein fixer Startzeitpunkt sowie ein fixer Endzeitpunkt der Beladungssperre simuliert wird, wird darüber hinaus in einer dritten Simulation eine feste Sperrlänge getestet, die einen variablen Start- und Endzeitpunkt hat. Die Länge der Sperre wird nach Abschluss der beiden ersten Simulationen definiert.

2.3.2 Variation der Heizungsvor- / Rücklaufemperatur

In einer weiteren Simulation wird untersucht, welchen Einfluss die Soll-Heizungsvorlaufemperatur auf die nächtliche Beladungssperre hat. Hierzu wird die Heizungsvorlaufemperatur bei konstanter Wärmeübertragungsfläche schrittweise erhöht bzw. abgesenkt. Ausgang bildet die jeweilige Referenz der Heizsysteme mit einer Soll-Vorlaufemperatur (VL) 40 °C und Soll-Rücklaufemperatur (RL) 35 °C für die Fussbodenheizung im jeweiligen Layout. Die Temperaturpaarungen VL 35 °C/RL 30 °C, VL 45 °C/RL 35 °C, VL 40 °C/RL 35 °C, VL 50 °C/RL 40 °C werden simuliert.

2.3.3 Variation der Wärmeübertragungsfläche

Bei der Variation der Wärmeübertragungsfläche werden für L-Sol, LWWP und LWWP_ST geprüft, ob bzw. in welchem Umfang die Effizienz in Verbindung mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers verändert wird. Dafür wird die Fläche der Fussbodenheizung, ausgehend von 22 m² in 10er-Schritten bis auf 55 m² erhöht. Dabei bleibt die VL mit 40 °C und RL mit 35 °C konstant. Wiederum dient das jeweilige Referenzsystem ohne nächtliche Beladungssperre als Vergleichssystem.

2.3.4 Variation des Gebäudestandards

Um zu testen, wie sich die nächtliche Beladungssperre bei den betrachteten Heizsystemen verhält, wenn unterschiedliche Gebäudestandards vorliegen, werden der jährliche Heizwärmebedarf ohne Brauchwarmwasser und die Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung erhöht. Der Heizwärmebedarf wird in Schritten von $10 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ erhöht. Die Wärmeverluste werden im gleichen Verhältnis (Wärmebedarf zu Wärmeverlusten) erhöht, wie sie bei der Referenzvariante im späteren Verlauf der Arbeit berechnet werden. Gemäss Polysun ist der jährliche Wärmeverlust 2- bis 8-mal so hoch wie der jährliche Wärmebedarf ohne Brauchwarmwasser (Vela Solaris AG, 2019).

2.3.5 Variation des Heizpufferspeichervolumens

In dieser Simulation wird das Volumen der Heizpufferspeicher bzw. des Kombi-Speichers vergrössert. Die Speichervolumina werden ausgehend vom berechneten Volumen um 30 % vergrössert. Abgesehen vom Volumen, welches durch Veränderung des Speicherdurchmessers variiert wird, werden die Speicher nicht verändert. Auch wird keine Anpassung der Steuerungen vorgenommen. Um sinnvolle Volumina zu erhalten, werden die berechneten Volumina entsprechend gerundet. Die Variation der Volumina der Heizpufferspeicher bzw. des Kombi-Speichers soll aufzeigen, wie die nächtliche Beladungssperre bei den einzelnen Heizsystemen reagiert. Als Vergleich dient ein wärmegeführtes Referenzsystem ohne Beladungssperre, bei welchem die Speichervolumina in gleichem Masse vergrössert werden.

2.3.6 Kombination Beladungssperre mit Überhitzung des Heizpufferspeichers

Mit der Überhitzung des Heizpufferspeichers wird das Ziel verfolgt, den Heizpufferspeicher mit mehr Wärmeenergie als bei der Ausgangssteuerung üblich zu beladen, wenn «günstige» Bedingungen erreicht sind, so dass die Beladungssperre nachts länger aufrechterhalten werden kann, ohne dass die Übersteuerung eingreifen muss und somit letztlich eine grössere Last in den Tag verschoben wird. Da es sich um unterschiedliche Heizsysteme handelt bzw. unterschiedliche Wärmequellen genutzt werden, unterscheiden sich auch die «günstigen» Bedingungen, die für die Überhitzung erfüllt werden müssen.

Beim L-Sol ist dies der Fall, wenn ein PV-Strom-Überschuss besteht und eine Netzeinspeisung stattfinden würde. Die Überhitzung wird immer dann aktiv, wenn die PV-Stromproduktion um einen Faktor höher ist als die Nennleistung der Sole/Wasser-Wärmepumpe. Ist in der Schicht 8 des Heizpufferspeichers die Temperatur von 65 °C (Normalbetrieb 45 °C) für die Überhitzung erreicht oder wird der definierte Schwellenwert für das Beenden der Überhitzung unterschritten, so stoppt die Überhitzung. Dieses Vorgehen soll zusätzlich eine Erhöhung des Eigenverbrauchs und Senkung des Netzbezugs erwirken und somit zu einer stromseitigen Optimierung führen.

Eine Überhitzung des Heizpufferspeichers des LWWP ist immer dann sinnvoll, wenn die Umgebungstemperatur möglichst hoch ist. Für die Überhitzung des Heizpufferspeichers des LWWP wird daher ein Schwellenwert für die Aussentemperatur definiert. Sobald der Schwellenwert überschritten wurde, wird der Heizpufferspeicher auf 65 °(Normalbetrieb 45 °C) überhitzt. Wenn im Speicher diese Maximaltemperatur erreicht wird oder die Aussentemperatur einen Grenzwert für die Abschaltung erreicht, stoppt die Überhitzung und die Wärmepumpe geht in den Normalbetrieb über. Da sich die mittlere Jahrestemperatur über die Monate hinweg stark unterscheidet, wären variable Grenztemperaturen, die sich monatlich ändern, sinnvoll. Da die Implementierung solcher variablen Grenztemperaturen für das Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe nicht trivial sind, werden fixe Schwellenwerte verwendet. Da in diesem Zusammenhang fixe Schwellenwerte einen Kompromiss darstellen, wird die Überhitzung auf Oktober bis Mai beschränkt. So soll vermieden werden, dass durch tiefe Schwellenwerte eine Überhitzung in den wärmeren Monaten ausgelöst wird.

Die Schwellenwerte für die Einschalt- und Ausschaltbedingung werden für das L-Sol und das LWWP iterativ-heuristisch ermittelt.

Beim LWWP_ST wird die Überhitzung mithilfe der Vakuumröhrenkollektoren realisiert. Hierfür wird die Temperaturobergrenze für die Beladung durch die Vakuumröhrenkollektoren von 80 °C auf 100 °C erhöht.

2.3.7 Kombination Beladungssperre mit Nachtabenkung

Die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers wird in Verbindung mit einer Nachtabenkung getestet. Die Steuerung der Nachtabenkung wird so angelegt, dass ab 20:00 Uhr eine Absenkung der Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C auf 18 °C erlaubt wird. Die Absenkung wird so programmiert, dass ab 05:00 Uhr morgens die Soll-Gebäudetemperatur wieder auf 20 °C angehoben wird. So soll es gelingen, den Komfort der Nutzer des EFH_N am Morgen sicherzustellen. Die nächtliche Beladungssperre wird bei den drei Heizsystemen schrittweise erhöht. Als Referenz dient das jeweilige Heizsystem mit Nachtabenkung aber ohne Beladungssperre.

Diese Optimierungsmassnahmen werden unter Berücksichtigung der Komfortkriterien durchgeführt. So wird stets darauf geachtet, dass während der Heizperiode die Raumtemperatur im definierten Temperaturband, also zwischen 18 °C und 20 °C bleibt, ebenso wie die Zapftemperatur des Brauchwarmwassers. Gegebenenfalls wird es daher nötig, das Volumen des Heizpufferspeichers in der jeweiligen Variante zu vergrössern oder die Leistung der Wärmepumpe zu erhöhen. Weitere Veränderungen der Hydraulik sind nicht vorgesehen. Als Referenz dient jeweils dasselbe Heizsystem ohne nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers.

2.3.8 Wetterdaten für den Simulationsstandort

Für die Simulationen in Polysun wird der Standort 8640 Rapperswil SG (Breitengrad: 47.2255, Längengrad 8.82228) im Schweizer Mittelland gewählt. Der Ort liegt 417 m ü.M., die Norm-Aussentemperatur beläuft sich gemäss dem in Polysun hinterlegten Meteororm-Datensatz auf -9 °C. Die Heizgradtage (HGT) wurden gemäss der SIA 381/3 (SIA, 1982) berechnet:

$$HGT_{20/12} = \sum_{j=1}^n (20 - t_{amj}) \quad (2)$$

HGT _{20/12} :	Heizgradtage bei Heizgrenze 12°C und Soll-Gebäudetemperatur 20°C	[°C · Tage]
t _{amj} :	Mittlere Tagestemperatur	[°C]
n:	Anzahl Tage pro Periode (365)	[Tage]

Mit seinen rund 3'220 Heizgradtagen bei einer Norm-Innentemperatur von 20 °C und einer Heizgrenze von 12 °C liegt Rapperswil im schweizweiten Vergleich der HGT_{20/12} in etwa im Mittel (BFE, 2019; SIA, 2015a). Mit der Standortwahl wird das Ziel verfolgt, die Ergebnisse der Simulation auf möglichst viele Standorte im Mittelland übertragen zu können. Die verwendeten Wetterdaten berücksichtigen Werte von den Jahren 1991-2010 und haben eine Auflösung von 15 Minuten über ein typisches Jahr hinweg gemäss der Meteororm-Version 7.2, welche in Polysun eingebettet ist. Sofern nicht anders erwähnt, werden sämtliche Simulationen für diesen Standort durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung (Abbildung 5) wird ersichtlich, wie viele Stunden im Jahr die Temperatur gleich oder unter der Heizgrenze liegt. Daraus lassen sich die Heiztage ableiten, die sich bei den verwendeten Wetterdaten für Rapperswil SG auf 216 Tage belaufen.

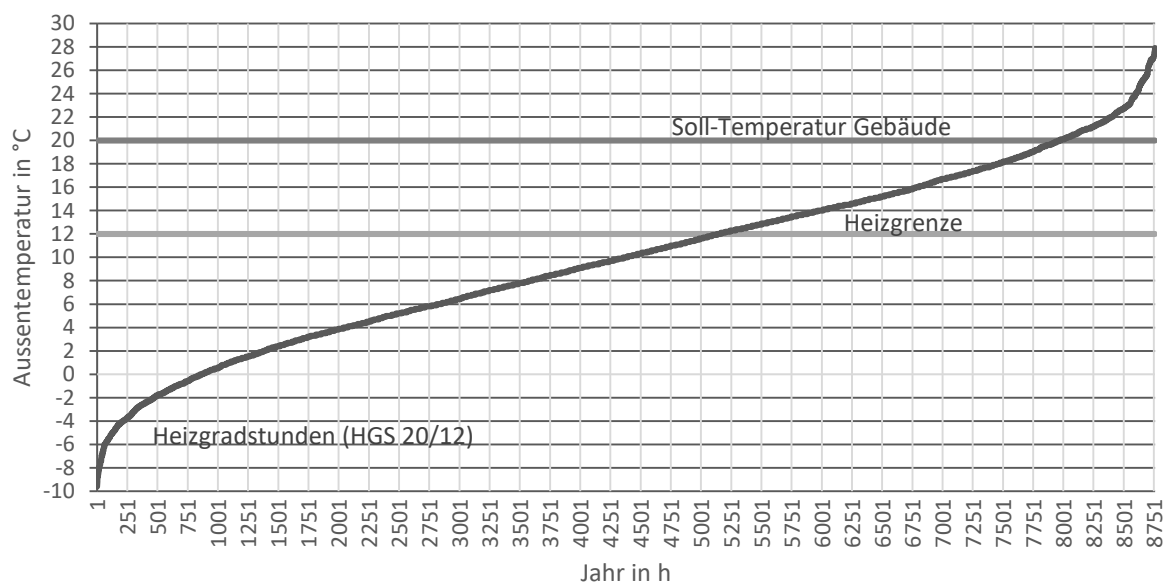


Abbildung 5: Auf der x-Achse sind die Stunden eines Jahres aufgeführt. Die y-Achse zeigt die Aussentemperatur. Die Kurve der Heizgradstunden (schwarz) zeigt den aufsteigenden Verlauf der stündlichen, mittleren Aussentemperatur eines typischen Jahres in Rapperswil SG und der Soll-Raumtemperatur (20 °C).

Die Summe der mittleren stündlichen Leistung der Globalstrahlung, welche aus Polysun exportiert und in absteigender Form geordnet wird (VDE et al., 1987), ergibt die in Abbildung 6 dargestellte Jahresdauerlinie der Globalstrahlung. Der Jahreswert der Globalstrahlung in die Horizontale für Rapperswil SG beträgt für die Simulationen $1'170 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$.

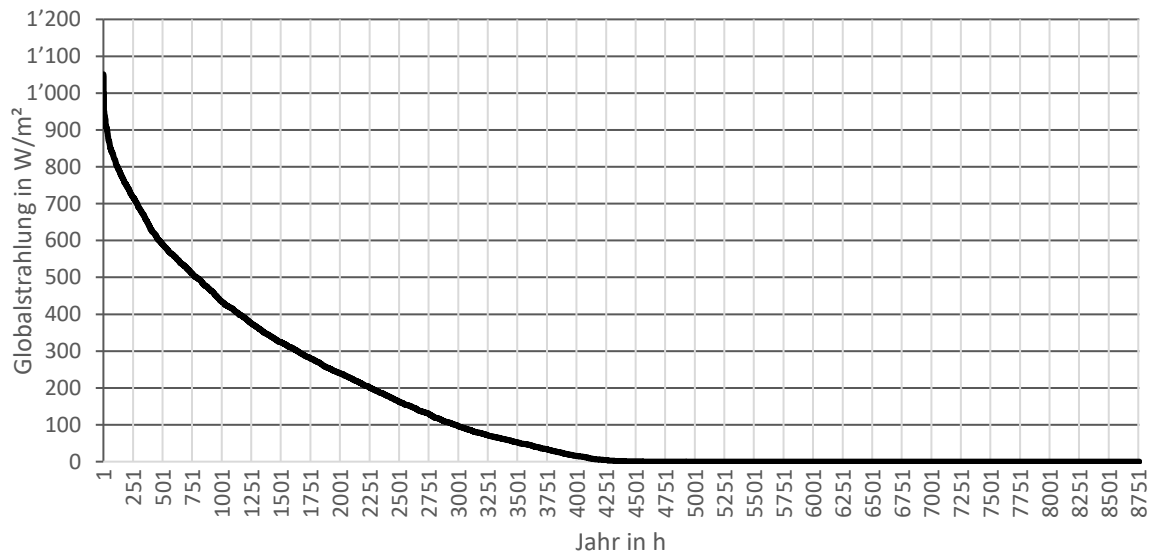


Abbildung 6: Auf der x-Achse sind die Stunden eines Jahres aufgeführt. Die y-Achse zeigt das stündliche Mittel der Globalstrahlung auf die Horizontale. Die Jahresdauerlinie zeigt die Globalstrahlungswerte am Standort Rapperswil SG für das betrachtete typische Jahr.

2.3.9 Simulationsmodell

Für die Simulationen wird das Rechenmodell «Quasi-dynamische» in Polysun gewählt. Es erlaubt bei statischen Verbrauchswerten eine dynamische Berechnung der Gebäudeeigenschaften (Vela Solaris AG, 2019). Für die dynamische Berechnung werden für das jeweilige Gebäudemodell die Werte für Heizwärmebedarf, Energieverluste durch Transmission und Lüftung, Energiebezugsfläche sowie die Soll-Raumtemperatur erfasst. Darüber hinaus wird für die Brauchwarmwasserversorgung die Soll-Zapftemperatur, das Zapfprofil und die tägliche Zapfmenge hinterlegt. Diese Werte in Verbindung mit den Wetterdaten aus der Meteororm-Datenbank, welche neben den Lufttemperaturen und den Einstrahlungswerten auch die Kaltwassertemperaturen vom Institut für Solartechnik enthalten, machen eine dynamische Berechnung möglich.

2.4 Gebäudemodelle

Für die Flächenbestimmung wird der Schweizer Immobilienbestand zugrunde gelegt. Hierzu wird die durchschnittliche Flächennutzung pro Person (EFH: 54 m^2 , MFH: 43 m^2) mit der Belegungsdichte (EFH: 2.7, MFH: 2.1) multipliziert (BFS, 2019). Somit ergibt sich für beide Gebäudemodelle des EFH eine Fläche von je 145.8 m^2 , die grosszügig auf 150 m^2 gerundet wird. Bei durchschnittlich fünf Wohnungen pro MFH ergibt sich eine Fläche von 451.5 m^2 welche

auf 450 m² abgerundet wird. Bei den angegebenen Flächen handelt es sich um die bewohnbare Fläche, welche mit der Energiebezugsfläche gleichgesetzt wird. Aus der folgenden Tabelle 2 können die daraus abgeleiteten Gebäudeabmessungen entnommen werden.

Gebäudemodell	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]	EBF [m ²]	Gebäudehülle (A _{th}) [m ²]
EFH_N, EFH_S	8.33	9	6	150	358
MFH_N, MFH_S	10	15	9	450	750

Tabelle 2: Übersicht Abmessungen und Flächen der Gebäudemodelle

Jedes Gebäudemodell wird in Polysun als Ein-Zonen-Modell angelegt. Für die angestrebten Simulationen werden der Heizwärmebedarf, Brauchwarmwasserverbrauch sowie die Energieverluste durch Transmission, Lüftung und Infiltration für die Gebäudemodelle auf Grundlage des SIA Merkblattes 2024:2015, SIA 384/2 und SIA 380/1 definiert (SIA, 2009, 2015b, 2017). Das SIA Merkblatt, welches auf verschiedenen SIA-Normen sowie SWKI-Richtlinien gründet, vereinheitlicht für unterschiedliche Raumtypen bzw. Gebäudekategorien Standard-Raumnutzungsbedingungen. Für jede Raumnutzung wird zwischen Bestands-, Standard- und Zielwert unterschieden. Bei dem Bestandwert handelt es sich um Angaben von Bestandsgebäuden, welche nach dem Jahr 1980 nicht energetisch saniert wurden. Der Standardwert gibt den Planungswert an, welcher derzeit für umfangreiche Gesamterneuerungen und Neubauten veranschlagt wird. Der Zielwert stellt den optimalen Planungswert dar, welcher bei Neubauten im Rahmen der Möglichkeiten veranschlagt werden sollte (SIA, 2015b).

2.4.1 Heizwärmebedarf (Gebäudestandard)

Um möglichst realistische und zugleich zukunftsgerichtete Simulationsbedingungen zu erhalten, wird für das Einfamilienhaus Neubau (EFH_N) sowie für das Mehrfamilienhaus Neubau (MFH_N) ein jährlicher spezifischer Heizwärmebedarf zwischen Standardwerten und Zielwert gewählt (EFH_N: 20 $\frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$, MFH_N: 15 $\frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$). Für das Einfamilienhaus sanierter Altbau (EFH_S) und das Mehrfamilienhaus sanierter Altbau (MFH_S) wird hingegen jeweils ein jährlicher spezifischer Heizwärmebedarf zwischen Bestands- und Standardwerten zugrunde gelegt (EFH_S: 67 $\frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$, MFH_S: 55 $\frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$). Somit ergeben sich die entsprechenden Werte in der nachfolgenden Tabelle 3.

Gebäudemodell	spezifischer Heizwärmebedarf $[\frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}]$	jährlicher Heizwärmebedarf (Q _h) $[\frac{\text{kWh}}{\text{a}}]$
EFH_N	20	3'000
MFH_N	15	6'750
EFH_S	67	10'000
MFH_S	55	24'750

Tabelle 3: Übersicht der Werte des jährlichen Heizwärmebedarfs (Q_h) für die Gebäudemodelle, die auf Grundlage des spezifischen Heizwärmebedarfs aus dem SIA Merkblatt 2024 stammen, multipliziert mit der Energiebezugsfläche.

2.4.2 Energieverluste durch Transmission und Lüftung

Energieverluste, welche durch Transmission durch die Gebäudehülle zur Aussenluft, dem Erdreich und gegenüber unbeheizten Räumen entstehen, sowie Energieverluste, die durch Lüftung und Wärmebrücken verursacht werden, sind im SIA Merkblatt als Wärmetransferkoeffizient (H_H) zusammengefasst. Um die Energieverluste für die Gebäudemodelle anzupassen, werden die U-Werte der opaken Bauteile (U_{op}) und die der Fenster (U_w) aus dem Merkblatt nach dem Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast von Gebäuden nach SIA 380/1 (SIA, 2009) berechnet. Bei den U-Werten wird ebenfalls zwischen Bestands-, Standard- und Zielwert differenziert. Analog wie bei der Bestimmung des Heizwärmebedarfs werden U-Werte für das EFH_N und MFH_N zwischen den Standardwerten und Zielwerten gewählt. Für das EFH_S sowie das MFH_S werden hingegen jeweils U-Werte zwischen Bestands- und Standardwerten festgelegt. Die Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und der Norm-Innentemperatur von 20 °C wurde mit der stündlichen mittleren Aussentemperatur des Metonorm-Datensatzes für den Standort Rapperswil gebildet und die Energieverluste für jede Stunde gemäss den nachstehenden Formeln (SIA, 2009) berechnet. Die Werte für die Berechnung sind im Anhang ersichtlich.

$$Q_T = \sum \frac{(\theta_{oc} - \theta_e) \cdot (A_k \cdot U_k) \cdot t_C \cdot 86400s/Tag}{A_E \cdot 10^6} \quad (3)$$

Q_T :	Transmissionswärmeverlust	$\left[\frac{MJ}{m^2}\right]$
θ_{oc} :	Raumtemperatur	$[^\circ C]$
θ_e :	Aussentemperatur	$[^\circ C]$
A_i :	Bauteilfläche	$[m^2]$
U_i :	Wärmedurchgangskoeffizient Bauteil	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
t_C :	Länge der Berechnungsperiode	$[d]$
A_E :	Energiebezugsfläche	$[m^2]$

$$Q_V = \frac{(\theta_{oc} - \theta_e) \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A_E}\right) \cdot t_C \cdot (\rho_a \cdot c_a) \cdot 24}{10^6} \quad (4)$$

Q_V :	Lüftungswärmeverlust	$\left[\frac{MJ}{m^2}\right]$
θ_{oc} :	Raumtemperatur (ohne Regelzuschlag)	$[^\circ C]$
θ_e :	Aussentemperatur	$[^\circ C]$
$\frac{\dot{V}}{A_E}$:	Aussenluftvolumenstrom flächenbezogen	$\left[\frac{m^3}{h \cdot m^2}\right]$
t_C :	Länge der Berechnungsperiode	$[d]$
$(\rho_a \cdot c_a)$:	spez. Wärmespeicherfähigkeit der Luft	$\left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$

Aufgrund der durchgeführten Berechnungen konnten, die in Tabelle 4 aufgeführten Gesamtverluste, ermittelt werden.

Gebäudemodell	Gesamtwärmeverluste (Q_{ot}), ($Q_T + Q_V$) [kWh/a]
EFH_N	11'565
MFH_N	22'839
EFH_S	26'726
MFH_S	50'408

Tabelle 4: Jährliche Energieverluste pro Gebäudemodell, die durch Transmission und Lüftung verursacht werden.

2.4.3 Wärmebedarf Brauchwarmwasser

Der Wärmebedarf wird ebenfalls auf Grundlage der Standard-Raumnutzungsbedingungen des SIA Merkblatts 2024:2015 definiert. Für die Erwärmung von Brauchwarmwasser von 10 °C auf 60 °C wird ein spezifischer Wärmebedarf für MFH von $19.8 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ und $13.5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ für EFH angegeben (SIA, 2015b). Unterschiedliche Angaben für Bestands-, Standard- und Zielwert gibt es nicht. Es wird stets derselbe Wärmebedarf zugrunde gelegt. Bezogen auf die Flächen der Gebäudemodelle ergibt sich ein jährlicher Wärmebedarf für die Brauchwarmwassererwärmung für jedes der beiden MFH von $8'910 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$ und für die beiden EFH von $2'025 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$. In Polysun muss neben der Soll-Zapftemperatur auch die tägliche Zapfmenge in Liter hinterlegt werden. Hierzu wird nach SIA 380.1 (SIA, 2009) das Volumen berechnet.

$$Q_{WW} = \rho_W \cdot c_W \cdot V_{WW} \cdot (\theta_{WW} - \theta_{WW0}) \quad (5)$$

Q_{WW} :	Wärmebedarf für Wassererwärmung	[MJ]
$(\rho_W \cdot c_W)$:	spez. Wärmespeicherfähigkeit Wasser	$\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$
V_{WW} :	Volumen der Zapfmenge	[m ³]
θ_{WW} :	Soll-Zapftemperatur	[°C]
(θ_{WW0}) :	mittlere Kaltwassertemperatur	[°C]

So ergibt sich eine gerundete Brauchwarmwasserzapfmenge je MFH von 420 l/Tag und 100 l/Tag pro EFH. Für das EFH_N und EFH_S wird in Polysun das Zapfprofil «Abendspitzen» gewählt. Für das MFH_N und das MFH_S wird das Zapfprofil «Mehrfamilienhaus» hinterlegt. Für die Berechnung der Kaltwassertemperatur wird in Polysun die «Automatische»-Berechnungsmethode verwendet, bei welcher die Kaltwassertemperatur in Abhängigkeit der Wetterdaten für den gewählten Simulationsstandort berechnet wird. Für den Standort Rapperswil SG beträgt die jährliche durchschnittliche Kaltwassertemperatur 10 °C (Vela Solaris AG, 2019).

2.4.4 Auslegung der Wärmepumpen

Die wesentliche Grösse, die zur Auslegung einer Wärmepumpe herangezogen wird, ist die Norm-Heizlast. Sie gibt an, wie hoch der Wärmestrom sein muss, um die Norm-Innentemperatur bei einer Norm-Aussentemperatur beizubehalten (SIA, 2017). Um die Norm-Heizlast der jeweiligen Gebäude zu berechnen, wird auf ein vereinfachtes Verfahren gemässe SIA 384/201

zurückgegriffen (SIA, 2017). Die zur Berechnung notwendigen U-Werte entsprechen wiederum dem SIA Merkblatt 2024 (SIA, 2015a). Die zugrunde gelegten Werte für die Berechnungen können dem Anhang entnommen werden.

$$\Phi_{HL,build} = \Phi_{T,build} + \Phi_{V,build} \quad (6)$$

$\Phi_{HL,build}$:	Norm-Heizlast	[W]
$\Phi_{T,build}$:	Norm-Transmissionswärmeverlust Gebäude	[W]
$\Phi_{V,build}$:	Norm-Lüftungswärmeverlust	[W]

$$\Phi_{T,build} = \sum_k \Phi_{T,k} = \sum_k (A_K \cdot (U_K + \Delta U_{TB}) \cdot f_{x,k}) \cdot (\theta_{int,build} - \theta_e) \quad (7)$$

$\Phi_{T,build}$:	Norm-Transmissionswärmeverlust Gebäude	[W]
$\Phi_{T,k}$:	Transmissionswärmeverlust Bauteil	[W]
A_K :	Bauteilfläche	[m ²]
U_K :	Wärmedurchgangskoeffizient Bauteil	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
ΔU_{TB} :	pauschale Zusatzwärmeleistung für Wärmebrücken	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
$f_{x,k}$:	Temperaturanpassungsfaktor	[-]
$\theta_{int,build}$:	Norm-Innentemperatur Gebäude	[°C]
θ_e :	Norm Aussentemperatur	[°C]

$$\Phi_{V,build} = V_{build} \cdot n_{build} \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} (\theta_{int,build} - \theta_e) \quad (8)$$

$\Phi_{V,build}$:	Norm-Lüftungswärmeverlust	[W]
V_{build} :	beheiztes Gebäudevolumen	[m ³]
n_{build} :	Luftwechselrate	[h ⁻¹]
$\rho_a \cdot c_{p,a}$:	Stoffkonstante der Luft (0.34)	$[\frac{Wh}{m^3 \cdot K}]$
$\theta_{int,build}$:	Norm-Innentemperatur Gebäude	[°C]
θ_e :	Norm Aussentemperatur	[°C]

Auf die errechnete Norm-Heizlast wurde ein Aufschlag von 15 % für die Brauchwarmwassererwärmung und das Aufheizen der Wärmeverteilung addiert, um so die erforderliche Heizleistung der Wärmepumpen zu erhalten (BFE, 2000). Die stets in kW-Schritten aufgerundeten Heizleistungen sind in der nachstehenden Tabelle 5 pro Gebäudemodell ersichtlich.

Gebäudemodell	erforderliche Heizleistung der Wärmepumpe [kW]
EFH_N	6
MFH_N	12
EFH_S	10
MFH_S	23

Tabelle 5: Bei der erforderlichen Heizleistung handelt es sich um die Leistung, über die der Wärmeerzeuger verfügen sollte, um die Soll-Raumtemperatur von 20°C zu halten.

2.4.5 Heizpufferspeicher

Um das Speichervolumen zu berechnen, wird ein Richtwert von 12 l bis 35 l pro kW Maximalleistung der Wärmepumpe empfohlen (SIA, 2007). Möchte man allerdings Sperrzeiten überbrücken, so erhöht sich das Volumen entsprechend. Bei einer Sperrzeit von zwei Stunden pro Tag, hat sich, ohne Berücksichtigung der eigenen Speicherkapazität des Heizsystems selbst, ein Volumen von 60 l pro kW Wärmepumpenleistung bewährt (Viessmann Deutschland GmbH, 2011). Bei einem Kombispeicher, in welchem neben der Pufferung von Wärme für den Heizkreis auch das Brauchwarmwasser bevorratet wird, erhöht sich das Volumen entsprechend. Um festhalten zu können, ob die nächtliche Beladungssperre bei bestehenden Wärmepumpensystemen sinnvoll Anwendung finden kann, wird bei dem L-Sol und LWWP mit einem Wert von $60 \frac{l}{kW}$ gerechnet. In der Grundvariante für die Simulationen wird somit von einem gängigen Pufferspeichervolumen ausgegangen, das für eine Überbrückungszeit von zwei Stunden ausgelegt ist. Da bei dem LWWP_ST ein Kombispeicher in die Hydraulik eingebunden ist, wird 150 l pro kW Maximalleistung der Wärmepumpe angenommen (Oberzig, 2014). Das Heizpufferspeichervolumen des jeweiligen Heizsystems wird dementsprechend wie folgt berechnet (Viessmann Deutschland GmbH, 2011).

$$V_{HP} = Q_{WP} \cdot V_{HP \min} \quad (9)$$

- V_{HP} : Volumen des Speichers [l]
- Q_{WP} : Nennwärmeleistung der Wärmepumpe absolut [kW]
- $V_{HP \min}$: Empfohlenes Mindestvolumen bei statischen Heizflächen [$\frac{l}{kW}$]

Die Volumina wurden so gerundet, um Volumen zu erhalten, die im Handel gängig sind. In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die berechneten Pufferspeichervolumen ersichtlich.

Gebäudemodell	L-Sol	LWWP	LWWP_ST
EFH_N	360 l	360 l	900 l
MFH_N	750 l	750 l	1'800 l
EFH_S	600 l	600 l	1'500 l
MFH_S	1'400 l	1'400 l	3'450 l

Tabelle 6: Volumen der Heizpufferspeicher (L-Sol, LWWP) und des Kombi-Speichers (LWWP_ST) pro Gebäudemodell

2.4.6 Brauchwarmwasserspeicher

Die erforderlichen Volumina für die BWW-Speicher des jeweiligen Heizsystems wurden mit Hilfe der folgenden Methode berechnet (Viessmann Deutschland GmbH, 2011).

$$V_{Sp\ min} = V_{DP} \cdot 1.15 \quad (10)$$

$V_{Sp\ min}$: Mindest-Speichervolumen [l]

V_{DP} : erforderliche Trinkwarmwassermenge während einer Bezugsperiode [l]

1.15: 15 %: Durchmischungsverlust [-]

Als Bezugsperiode wurde die BWW-Menge zugrunde gelegt, die während 24 Stunden anfällt. Da sich die Zapfmenge nicht mit dem Gebäudestandard verändert, sind die Volumina für die beiden EFH und für die beiden MFH jeweils identisch. Die Werte wurden von 115 l für EFH und 483 l für MFH auf die folgenden Werte aufgerundet.

Gebäudemodell	L-Sol	LWWP	LWWP_ST
EFH_N, EFH_S	120 l	120 l	-
MFH_N, MFH_S	500 l	500 l	-

Tabelle 7: Volumen der Brauchwarmwasserspeicher (L-Sol, LWWP) und des Komi-Speichers (LWWP_ST) pro Gebäudemodell

2.4.7 Kaltwasserspeicher L-Sol

Zur Bestimmung der Kaltwasserspeichervolumina der L-Sol-Systeme wurde sich an L-Sol-Dimensionierungsmatrizen orientiert (Sauter et al., 2019). Anschliessend wurden die Werte mit Hilfe der Funktion Loggen und Parametrisieren interaktiv überprüft und sofern nötig angepasst. So wurde beispielsweise bei dem EFH_N das Volumen des Kaltspeichers gemeinsam mit der Anzahl der PVT-Module in der Software Polysun von 800 l bis 2000 l variiert. Dies ergab, dass ein Kaltspeicher mit einem Volumen von 1'000 l eine deutlich höhere Anzahl an PVT-Kollektoren benötigt, um dieselben SJAZ zu erreichen als bei einem Volumen von 1'500 l. Aus diesem Grund wurde das grössere Speichervolumen gewählt. Deshalb wurde von dem empfohlenen Volumen der Dimensionierungsmatrix abgewichen. Für die beiden weiteren Gebäudekategorien wurde analog verfahren.

Gebäudemodell	L-Sol
EFH_N	1500l
MFH_N	1700l
EFH_S	1500l
MFH_S	2200l

Tabelle 8: Volumen des Kaltspeichers des L-Sol Heizsystems für das jeweilige Gebäudemodell

2.4.8 Kollektorflächen

Analog wie bei der Bestimmung des Kaltwasserspeichervolumens wurde die PVT-Fläche des L-Sol anhand der Dimensionierungsmatrizen ausgelegt (Sauter et al., 2019). Anschliessend wurde eine interaktive Anpassung vorgenommen. Für die Vakuumröhrenkollektoren des

LWWP_ST, welche zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden, wird eine Kollektorfläche von 1 m² pro 10 m² Energiebezugsfläche veranschlagt (Oberzig, 2014). In Tabelle 9 sind die Kollektorflächen ersichtlich.

Gebäudemodell	L-Sol	LWWP	LWWP_ST
EFH_N	(23 St.) 37.7 m ²	-	(5 St.) 10.0 m ²
MFH_N	(25 St.) 41.0 m ²	-	(22 St.) 44.0 m ²
EFH_S	(30 St.) 49.2 m ²	-	(7 St.) 14.0 m ²
MFH_S	(45 St.) 73.8 m ²	-	(22 St.) 44.0 m ²

Tabelle 9: Flächen der PVT-Kollektoren für das L-Sol sowie Flächen der Vakuumröhrenkollektoren des LWWP_ST für das jeweilige Gebäudemodell

3 Ergebnisse Simulationsreihe 1

3.1 Fixer Endzeitpunkt der nächtlichen Beladungssperre

In der ersten Simulationsreihe wird für die drei Heizsysteme eine nächtliche Beladungssperre der Heizpufferspeicher implementiert. Bei den in Abbildung 7 veranschaulichten Simulationen wurde keine Übersteuerung der Beladungssperre eingesetzt. Das heisst, im angegebenen Sperrzeitraum wurde die jeweilige Wärmepumpe nicht in Betrieb genommen, um die Soll-Gebäudetemperatur zu halten. So soll in einem ersten Schritt sichtbar werden, ob bzw. in welchem Umfang die Soll-Gebäudetemperatur unterschritten wird. Unabhängig vom Heizkreis wurde die Brauchwarmwasserversorgung nicht eingeschränkt, da sich die Brauchwarmwassernutzung in Wohngebäuden nur schwer eingrenzen lässt. Sie ist daher unter der Beladungssperre regulär wärmegeführt, unabhängig ob es sich um einen separaten Brauchwarmwasserspeicher oder einen Kombi-Speicher handelt, der diese Regelung durch seine Schichtung erlaubt. Der Wärmeeintrag durch die Vakuumröhrenkollektoren beim LWWP_ST wird nicht zeitlich eingeschränkt. Da, wie in der Methodik angegeben, davon auszugehen ist, dass mit der kältesten Zeit des Tages für gewöhnlich bis zu einer Stunde nach Sonnenaufgang zu rechnen ist, wurde der Sperrzeitraum von 09:00 Uhr in Stundenschritten in die Nacht ausgedehnt. Wie sich die Variation der Beladungssperre auf den jährlichen elektrischen Energieverbrauch und die SJAZ der Heizsysteme auswirkt, wird beim Betrachten der nachstehenden Abbildung 7 deutlich.

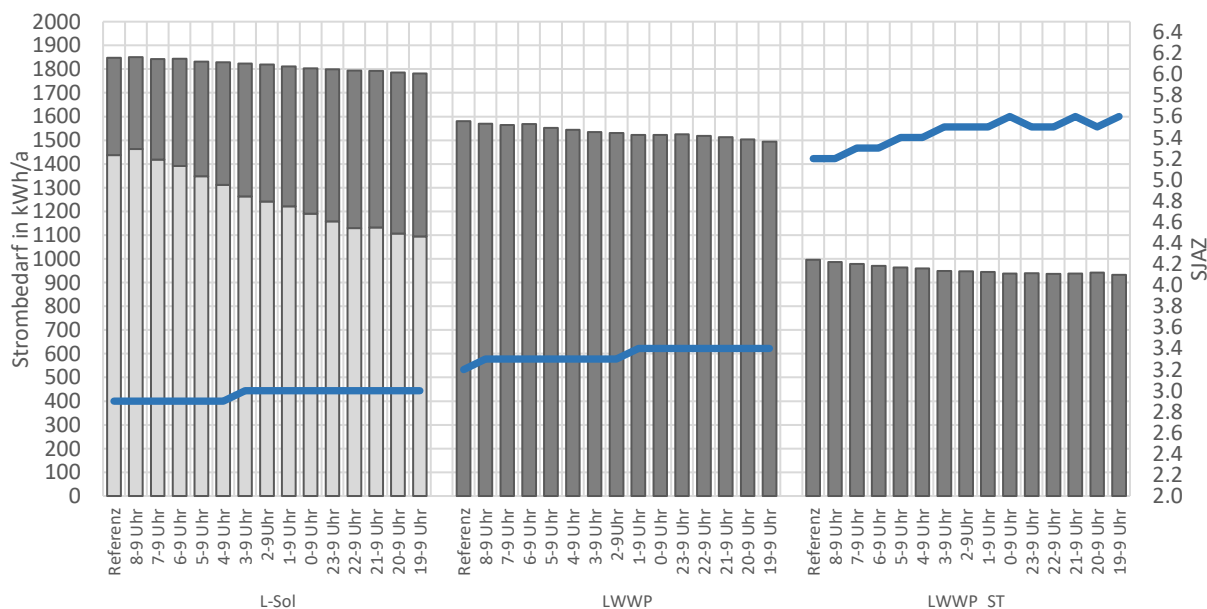


Abbildung 7: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass sich die drei Heizsysteme hinsichtlich ihrer jährlichen Stromaufnahme unterscheiden. Diese Unterschiede entstehen durch die verschiedenen Systemeigenschaften und Funktionsweisen. Jedoch ist es ungewöhnlich, dass das L-Sol einen höheren Strombedarf als das LWWP aufweist, da in einer vorangegangenen Untersuchung aufgezeigt werden konnte, dass mit einem L-Sol ein geringerer Stromverbrauch im Vergleich zu einem LWWP benötigt wird. Da es sich beim L-Sol um ein neuartiges Heizsystem handelt, fehlen jedoch fundierte Erfahrungen, weshalb es sein kann, dass die Komponenten nicht optimal dimensioniert wurden. Auf die Unterschiede zwischen den Systemen wird im Weiteren nicht im Einzelnen eingegangen, da der Effekt der Beladungssperre im Fokus der Beobachtung steht. Es ist zu erkennen, dass mit einer Verlängerung des Sperrzeitraums bei allen Heizsystemen tendenziell auch eine Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs einhergeht. Die Reduktionen gegenüber dem Referenzsystem ohne Beladungssperre und dem längsten Sperrzeitraum von 19:00 - 09:00 Uhr fallen beim LWWP in absoluten Zahlen mit 86 kWh/a (5.4 %) am höchsten aus. Gefolgt vom L-Sol mit 67 kWh/a (3.6 %) und dem LWWP_ST mit 64 kWh/a (6.4 %). Stärker als der gesamte Stromverbrauch sinkt beim L-Sol der Netzbezug durch die Erhöhung des Eigenverbrauchs. Die Elektroheizelemente in den Speichern wurden in dem simulierten Jahr zu keinem Zeitpunkt zugeschaltet.

Wie man weiter sieht, steigt die SJAZ der Heizsysteme mit zunehmender Sperrdauer an. Wie die Erhöhung der SJAZ ausfällt, wird durch den Vergleich des jeweiligen Referenzsystems mit der längsten simulierten Sperrdauer veranschaulicht. Die SJAZ steigt beim L-Sol um 0.1 von 2.9 auf 3.0. Beim LWWP erhöht sich die SJAZ von 3.2 auf 3.4 und beim LWWP_ST steigt der ohnehin hohe Wert, bedingt durch den direkten Wärmeeintrag in den Kombi-Speicher aus Vakuumröhrenkollektoren, von 5.2 auf 5.6.

Um die augenscheinliche Effizienzsteigerung beurteilen zu können, muss betrachtet werden, wie sich die Beladungssperre auf das Komfortkriterium der Raum- bzw. Gebäudetemperatur auswirkt. In keiner der abgebildeten Simulationen wurden die Komfort-Kriterien von Polysun verletzt. Dies ist in Polysun der Fall, wenn in einer Vielzahl von Zeitschritten die Nutzenergie niedriger als der Gesamtenergiebedarf ist (Vela Solaris AG, 2019). Da es bei diesem Simulationdurchgang keine Übersteuerung der Beladungssperre gibt, ist es trotzdem möglich, dass die Erhöhung der SJAZ und der sinkende elektrische Energieverbrauch der Heizsysteme auf die Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur zurückzuführen sind. Dies würde bedeuten, dass es sich um keine Effizienzsteigerung handelt, sondern, dass aufgrund der Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur der jährliche Energiebedarf herabgesetzt wurde und es sich daher um keine Verbesserung der Heizsysteme handelt. Um dies zu prüfen, wurden zwei Grössen ausgewertet und in der Abbildung 8 veranschaulicht. Zum einen die Zeit in Stunden, in welcher die Soll-Gebäudetemperatur unterschritten wurde, zum anderen das im simulierten Jahr erreichte Gebäudetemperatur-Minimum.

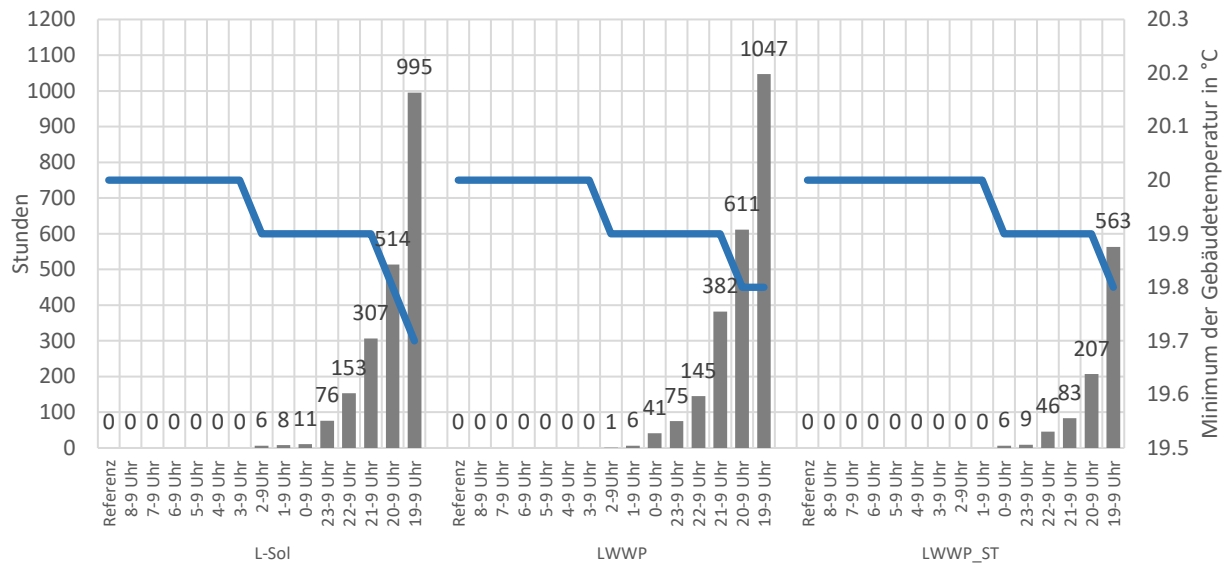


Abbildung 8: Die anthrazitfarbenen Balken geben die Anzahl Stunden im Jahr an, in welchen die Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C unterschritten wurde. Die blaue Linie gibt die niedrigste verzeichnete Gebäudetemperatur im Jahr wieder.

Die Grafik zeigt, dass die Heizsysteme unterschiedlich empfindlich, aber ähnlich auf die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers reagieren. Den kürzesten Sperrzeitraum, ohne die Soll-Gebäudetemperatur von 20°C zu unterschreiten, lassen das L-Sol sowie das LWWP zu. Beim LWWP_ST kann die Beladungssperre eine Stunde länger ausgedehnt werden, ohne dass die Soll-Gebäudetemperatur unterschritten wird. Es ist ersichtlich, dass das LWWP_ST am trägsten auf die Sperrung reagiert und die Soll-Gebäudetemperatur am längsten halten kann. Zudem steigt die Anzahl Stunden, in welchen die 20 °C unterschritten werden, weniger schnell an, als bei den beiden anderen Systemen. Dies kann auf den Kombi-Speicher zurückgeführt werden. Er hat mit 900 l ein deutlich grösseres Volumen im Vergleich zu den Heizpufferspeichern im L-Sol und LWWP, deren Volumen sich auf 360 l beläuft. Der Stutzen für den Heizungsvorlauf befindet sich im oberen Drittel des Kombi-Speichers. Somit ist das Heizwasservolumen im Kobi-Speicher des LWWP_ST um etwa 200 l grösser und es kann daher länger eine höhere Heizungsvorlaufstemperatur aufrechterhalten werden.

Unter Berücksichtigung der Soll-Gebäudetemperatur kann in dem getesteten Setup eine mögliche Effizienzsteigerung der Heizsysteme nur für den Zeitraum der Beladungssperre ausgewiesen werden, in welchem es zu keiner Zeit zur Unterschreitung ebendieser Soll-Temperatur kam, da dies ansonsten das Resultat verfälschen würde. Für das L-Sol ist dies bis zu einem Sperrzeitraum von 03:00 - 09:00 Uhr der Fall. Die Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs durch die Sperre gegenüber dem Referenzsystem ohne nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers kann auf 27 kWh/a bzw. 1.5 % beziffert werden. Dass diese relativ geringe Stromeinsparung ausreicht, um die SJAZ um 0.1 zu verbessern, kann auf die Rundung von Polysun zurückgeführt werden, welches den Wert der SJAZ nur auf Zehntel genau aus-

weist. Beim LWWP kann ebenso im Zeitraum von 03:00 - 09:00 Uhr die Solltemperatur sichergestellt werden. Für die Beladungssperre wird eine Reduktion der elektrischen Energie von 46 kWh bzw. 2.9 % erreicht. Die SJAZ verbessert sich für dieselbe Sperrzeitspanne um 0.1 auf 3.3. Da die beiden Hydrauliken mit den identischen Heizpufferspeichern ausgestattet sind und auch die Ein- und Ausschaltbedingungen gleich gewählt wurden, erklärt sich der gleiche Trend bei beiden Heizsystemen mit ähnlicher SJAZ. Beim LWWP_ST kommt es zu keiner Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur bis zu einer Sperrzeit von 01.00 - 09:00 Uhr. Die sich daraus ergebende elektrische Energieersparnis beläuft sich für diese Sperrdauer auf 51 kWh/a bzw. 5.1 %. Die SJAZ kann von 5.2 auf 5.5 verbessert werden. Diese Verbesserung kann darauf zurückgeführt werden, dass an sonnigen Morgen durch die solarthermischen Kollektoren eine Vorerwärmung des Heizwassers stattfindet, was zu einer verkürzten Laufzeit der Wärmepumpe führt und somit zu einem geringeren Stromverbrauch.

3.2 Nächtliche Beladungssperre mit Übersteuerung zur Einhaltung der Komfortkriterien

In einer weiteren Simulationsreihe wurde eine Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre implementiert. Dieser fail-safe-mechanismus wird aktiv, wenn die Ist-Gebäudetemperatur kleiner bzw. gleich 19.99 °C ist. Es wurde eine fixe Temperatur gewählt, weil es bei der Aktivierung der Übersteuerung durch die logische Funktion «Ist-Gebäudetemperatur < Soll-Gebäudetemperatur» zu einer Erhöhung der Schaltzahlen der Wärmepumpe über 1'000 pro Jahr kam, die sich mittels Einschalt- bzw. Ausschaltverzögerung nicht adäquat senken liessen. Es wird vermutet, dass durch die Beladungssperre vereinzelt minimale Unterschreitungen der Soll-Gebäudetemperatur im tausendstel-Bereich vorkommen, bevor die Heizkreispumpe aktiv wird. Dies hat zur Folge, dass die Wärmepumpe aktiv wird. Neben der Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur bei beispielsweise länger anhaltenden Kälteperioden oder sehr tiefen Temperaturabfällen in der Nacht soll mit der Übersteuerung getestet werden, ob sich eine weitere Ausdehnung über die Zeitpanne hinaus, in welcher die Soll-Gebäudetemperatur gerade noch gehalten werden kann (Abbildung 8), positiv auf die SJAZ und den jährlichen Stromverbrauch auswirkt. Dies könnte gerade für die Sperrzeiträume aus den vorangegangenen Simulationen zutreffen, bei welchen nur für wenige Stunden im Jahr die Soll-Temperatur für das Gebäude unterschritten wurde, da so der Sperrzeitraum um ein oder zwei Stunden verlängert werden könnte, sodass eine Übersteuerung nur an vereinzelt Tagen im Jahr notwendig wird. Darüber hinaus wurde bei den drei Heizsystemen die Heizkreispumpe so geregelt, dass sie ausschält, sobald die Heizungsvorlauftemperatur unter 25 °C sinkt, um zu verhindern, dass durch die Zirkulation des abgekühlten Fluids ein unnötiger Stromverbrauch anfällt.

L-Sol

In den nachstehenden Abbildungen ist der elektrische Energieverbrauch sowie die SJAZ des Heizsystems L-Sol für jeden Sperrzeitraum des Heizpufferspeichers abgebildet und dem Verbrauch und der SJAZ ohne die Übersteuerung gegenübergestellt.

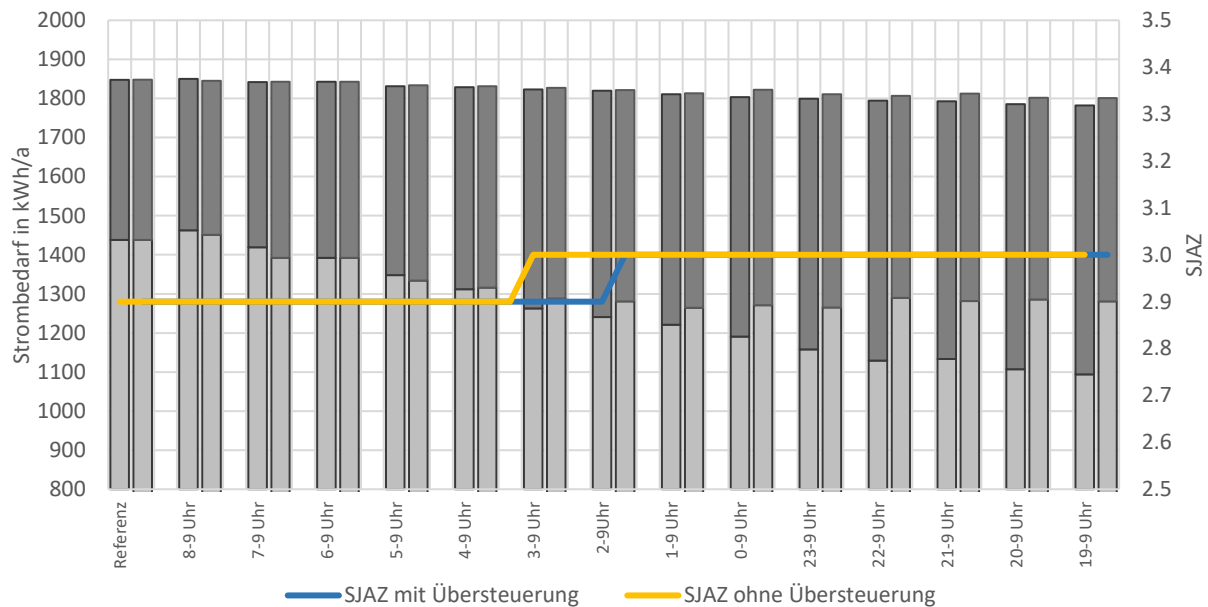


Abbildung 9: Auswertung L-Sol mit und ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre. Für jeden Sperrzeitraum, der auf der x-Achse aufgetragen ist, sind zwei gestapelte Balken angeordnet. Links ohne Übersteuerung, rechts mit Übersteuerung. Im oberen der gestapelten Balken (dunkelgrau) ist der Eigenverbrauch des PV-Stroms abzulesen. Die unteren Balken zeigen den Netzbezug.

Der gesamte Stromverbrauch des L-Sol mit und ohne Übersteuerung der Beladungssperre fällt bis zu einer Sperrdauer von 01:00 bis 09:00 Uhr fast identisch ab. Wird die Sperrdauer weiter verlängert, sinkt der Stromverbrauch des L-Sol ohne Übersteuerung der Beladungssperre des Heizpufferspeichers schneller ab. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass aufgrund der fehlenden Übersteuerung die Soll-Gebäudetemperatur nicht mehr zu jedem Zeitpunkt gehalten werden kann. Allerdings fallen diese Unterschiede gering aus. Generell bewegt sich die Reduktion der Aufnahme der elektrischen Energie auf einem geringen Niveau, was sich auch in der nur geringen Verbesserung der SJAZ von 2.9 auf 3.0 widerspiegelt. Grössere Unterschiede gibt es bei der Zusammensetzung des elektrischen Energieverbrauchs. Während der Eigenverbrauchsanteil des PV-Stroms mit der Verlängerung des Sperrzeitraums nahezu linear zunimmt, verringert sich der Netzbezug im selben Verhältnis. Sobald die Übersteuerung vermehrt eingreifen muss, was bei einer Sperrdauer von 01:00 bis 09:00 Uhr der Fall ist, stabilisieren sich die Werte und die Anteile des Netzbezugs und des PV-Eigenverbrauchs verändern sich nur noch geringfügig. Dass der Eigenverbrauch bei dem L-Sol ohne Übersteuerung immer weiter zunimmt, kann darauf zurückgeführt werden, dass das Gebäude und der Speicher in Kälteperioden immer stärker auskühlen. Um die Soll-Temperaturen wieder zu erreichen, ist es notwendig, dass die Wärmepumpe am Tag länger läuft im Vergleich zu dem L-

Sol mit Übersteuerung. So kommt es zu einer Erhöhung des Eigenverbrauchs von 157 kWh bzw. einer Verringerung des Netzbezugs um 110 kWh gegenüber der Referenzvariante.

Nachdem die Jahreswerte im Zentrum der Betrachtung standen, werden nachfolgend die Monatswerte für den Sperrzeitraum 19:00 bis 09:00 Uhr betrachtet, da bei dieser Sperrdauer die höchste Stromersparnis (48 kWh, 2.60 %) gegenüber der Referenzvariante ohne Beladungssperre erreicht werden konnte. Dies soll zeigen, ob es Monate im Jahr gibt, in denen das L-Sol ohne Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei gleichem Wärmebedarf des Gebäudes weniger Strom benötigt bzw. die SJAZ höher ausfällt als beim L-Sol mit Beladungssperre.

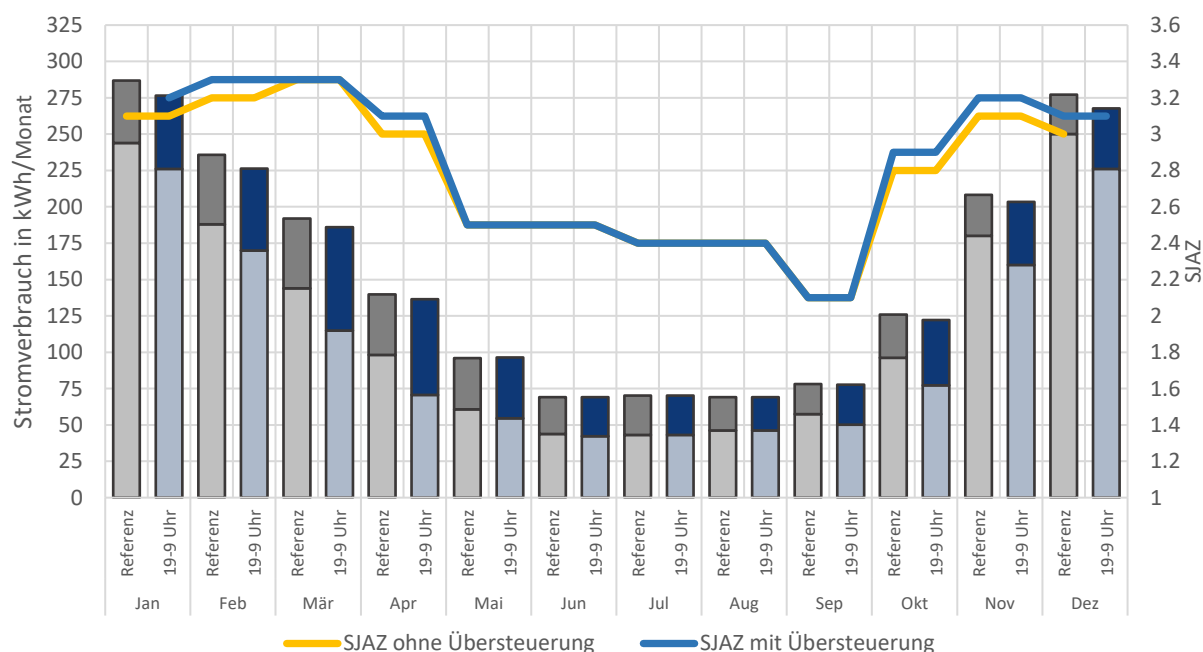


Abbildung 10: Monatliche Gegenüberstellung des L-Sol mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für eine Sperrdauer von 19-9 Uhr und der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug des jeweiligen Heizsystems wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des produzierten PV-Stroms. Die Linien geben den Verlauf der SJAZ wieder.

Wie aus der Abbildung 10 hervorgeht, gibt es keinen Monat im simulierten Jahr, in dem die Referenz-Variante ohne nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers weniger elektrische Energie benötigt im Vergleich zum L-Sol mit einer Sperrdauer von 19:00 bis 09:00 Uhr. Bei der Betrachtung des Eigenverbrauchs des PV-Stroms der PVT-Kollektoren zeigt sich ein ähnliches Bild. Stets fällt die Eigennutzung gleich oder höher beim System mit Beladungssperre aus als beim Referenzsystem. Umgekehrt verhält es sich beim Netzbezug, der durch die Beladungssperre identisch oder geringer ausfällt als bei der Referenz. Auch die SJAZ ist beim L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre höher oder beläuft sich auf denselben Wert. Somit kann festgehalten werden, dass eine Aussetzung der Beladungssperre an einzelnen Monaten für das getestete L-Sol keine Effizienzsteigerung ergibt.

Um herauszufinden, ob sich die Umgebungstemperatur und die Globalstrahlung beim Betrieb der Wärmepumpen des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre statistisch signifikant von den Werten der Referenzvariante ohne nächtlicher Beladungssperre des Heizpufferspeichers unterscheiden, wurde in der Software RStudio ein Welch-Test durchgeführt. Dazu wurde die Umgebungstemperatur der Referenzvariante mit der Variante mit der nächtlichen Beladungssperre von 19:00 bis 09:00 Uhr des Heizpufferspeichers verglichen. Analog wurde mit der Globalstrahlung verfahren. Es wurde der Sperrzeitraum gewählt, bei welchem der niedrigste jährliche elektrische Energieverbrauch und die höchste SJAZ erzielt werden konnten. Die Ergebnisse sind der nachstehenden Abbildung 11 als Boxplots visualisiert. Die detaillierte Beschreibung zu den Boxplots kann dem Abschnitt Effizienzmessung der Heizsysteme entnommen werden.

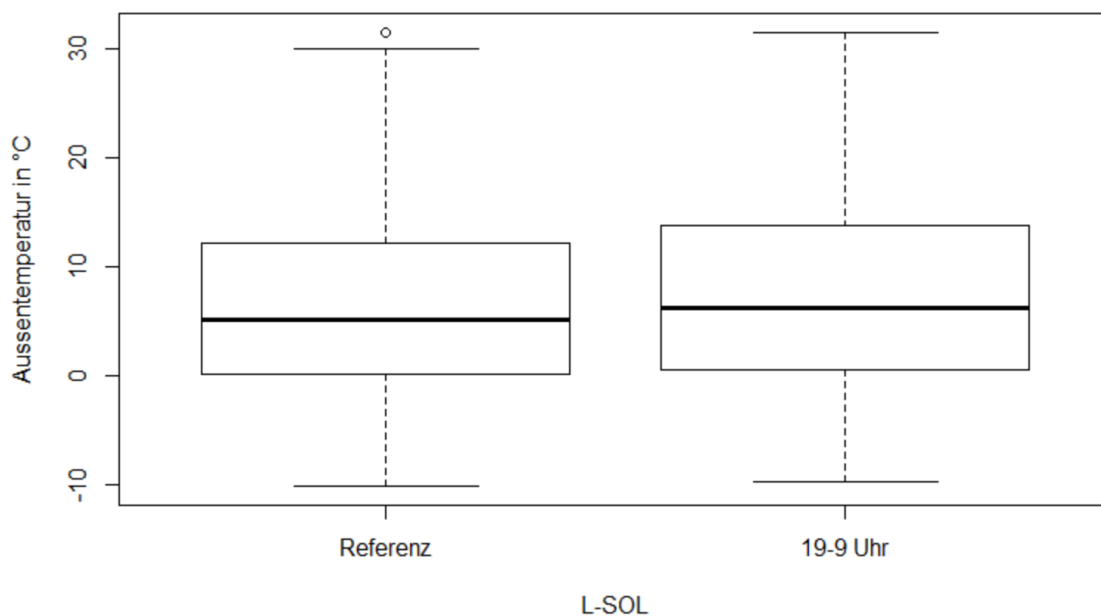


Abbildung 11: Boxplot der Umgebungstemperatur bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre von 19-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 6.44 °C, die Durchschnittstemperatur des L-Sol mit Beladungssperre beträgt 7.33 °C.

Der Vergleich mittels zweiseitigem Welch-Test ergab bei einem Konfidenzintervall von 95 %, dass bei einem p-Wert von $8.047 \cdot 10^{-4}$ ein statistisch signifikanter Unterschied der Temperaturen vorliegt.

Beim Vergleich der Globalstrahlung wurde mit den gleichen Bedingungen für den Welch-Test gerechnet wie beim vorangegangenen Temperaturvergleich, um zu prüfen, ob für das getestete Setup ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Varianten vorliegt.

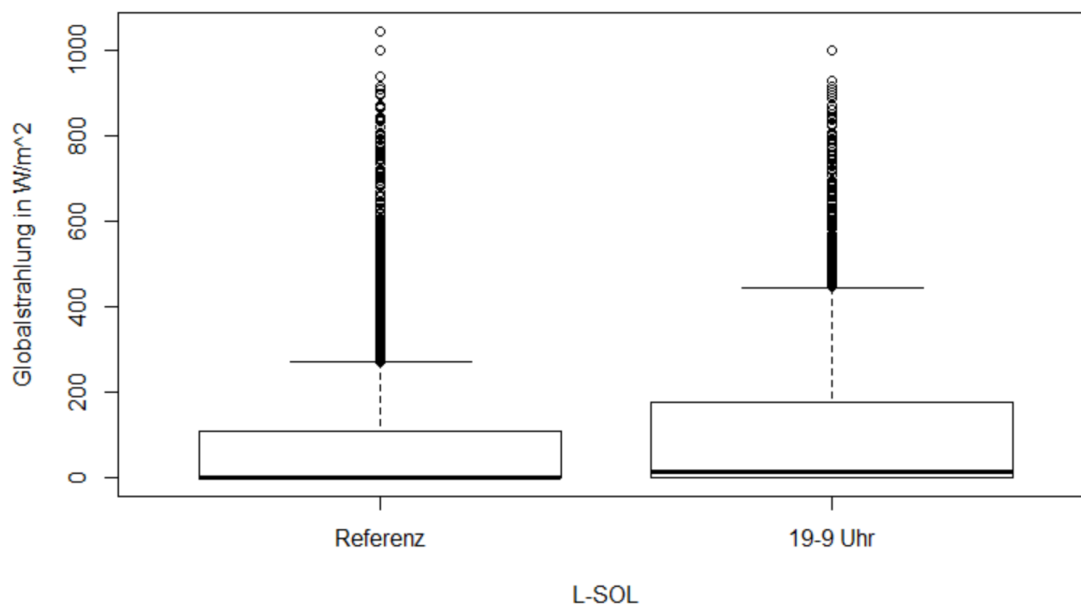


Abbildung 12: Boxplot der Globalstrahlung bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre von 19-9 Uhr abgebildet. Die durchschnittliche Globalstrahlung der Referenzvariante beträgt $100.14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, die durchschnittliche Globalstrahlung des L-Sol mit Beladungssperre beträgt $124.58 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Mit einem p-Wert von $7.885 \cdot 10^{-5}$ ist auch die Globalstrahlung bei der L-Sol Variante mit nächtlicher Beladungssperre signifikant höher als jene der Referenzvariante. Aufgrund der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass die Wärmepumpe mit Beladungssperre bei einer durchschnittlich höheren Aussentemperatur sowie Globalstrahlung für das getestete Setup betrieben wird, ohne die Soll-Gebäudetemperatur zu unterschreiten. Dies hat zur Folge, wie bereits in den vorhergegangenen Auswertungen aufgezeigt, dass der Stromverbrauch der Variante mit Beladungssperre bei gleichbleibendem Wärmebedarf niedriger ist gegenüber der Referenzvariante und somit effizienter betrieben wurde.

Da die direkte Wärmequelle der Sole/Wasser-Wärmepumpe des L-Sol der Kältspeicher ist, wurde zusätzlich ein Vergleich der Temperaturen des Kältspeichers durchgeführt. Genauer wurden die Temperaturen der Schicht 11, die bei dem Status $>0\%$ der Wärmepumpe verzeichnet wurden, der Varianten ohne Beladungssperre und mit Beladungssperre (19:00 bis 09:00 Uhr) miteinander verglichen. Die nachstehende Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse als Boxplots dargestellt.

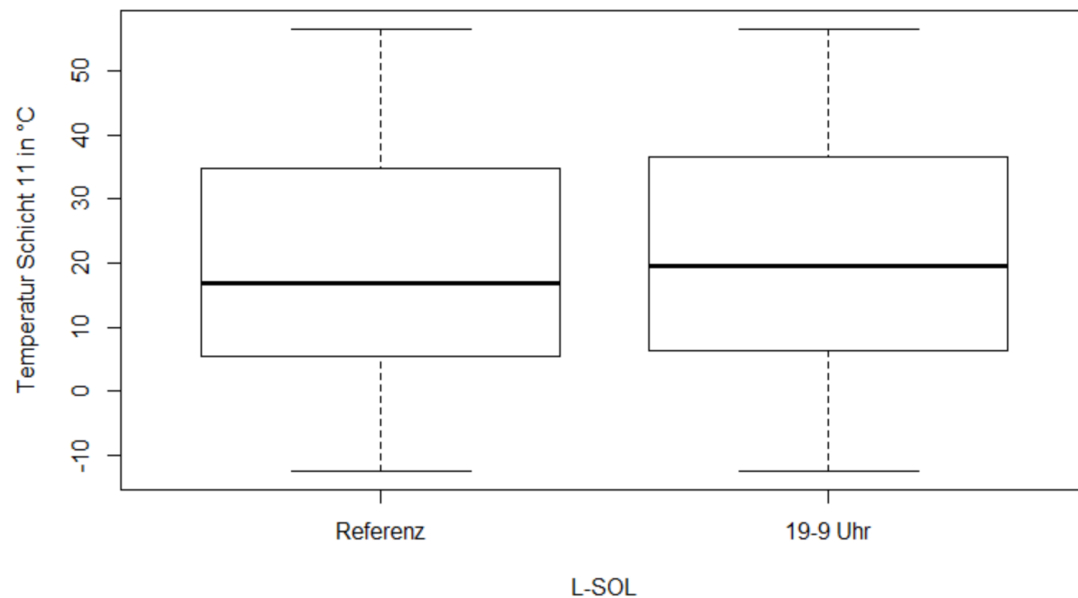


Abbildung 13: Boxplot der Kaltspeichertemperatur der Schicht 11 von 12 bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre von 19-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 19.65 °C, die Durchschnittstemperatur des L-Sol mit Beladungssperre beträgt 21.23 °C.

Durch den zweiseitigen Welch-Test konnte mit einem p-Wert von $4.732 \cdot 10^{-3}$ ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Kaltspeichertemperatur der Schicht 11 der Referenzvariante ohne Beladungssperre zur Variante mit einer nächtlichen Beladungssperre von 19:00 bis 09:00 Uhr festgestellt werden. Die Temperaturdifferenz beträgt 1.58 K. Sie fällt höher aus als die Differenz der Aussentemperatur. Dies kann auf die Eigenschaften der PVT-Module zurückgeführt werden. Sie nutzen neben der Umgebungstemperatur auch die Sonnenstrahlung zur Wärmeerzeugung.

LWWP

In der folgenden Abbildung 14 ist die Gegenüberstellung der nächtlichen Beladungssperre mit und ohne Übersteuerung für das LWWP abgebildet.

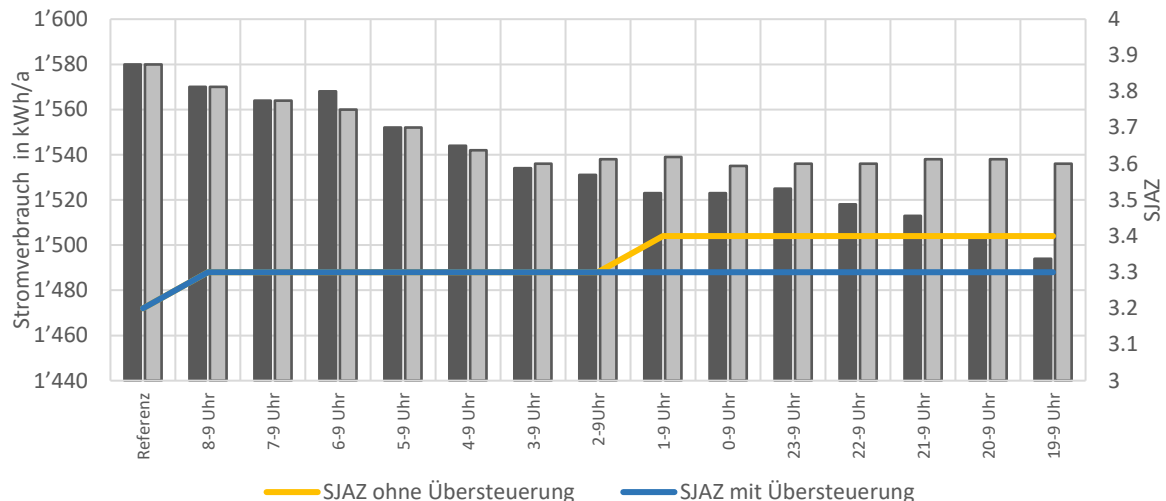


Abbildung 14: Auswertung LWWP mit und ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für jeden Sperrzeitraum. Links (dunkelgrau) ohne Übersteuerung, rechts (hellgrau) mit Übersteuerung.

Wie anhand der Abbildung 14 zu sehen ist, reagieren die beiden LWWP mit und ohne Übersteuerung gleichartig. Mit zunehmendem Sperrzeitraum verringert sich der jährliche Strombezug. Bei einer Sperrzeit von 02:00 bis 09:00 Uhr macht sich dann bemerkbar, dass das LWWP ohne Übersteuerung bzw. ohne Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur aufgrund der nicht eingehaltenen Soll-Gebäudetemperatur einen stetig sinkenden elektrischen Energieverbrauch mit Verlängerung des Sperrzeitraums hat, während sich das Heizsystem mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre auf ein konstantes Niveau nivelliert. Bei einem Sperrzeitraum von 06:00 bis 09:00 Uhr gibt es einen Anstieg des elektrischen Stromverbrauchs beim LWWP ohne Übersteuerung gegenüber jenem mit Übersteuerung. Bei genaueren Untersuchungen konnte nicht ausgemacht werden, wie der Anstieg von 8 kWh zu begründen ist. Da die jährlichen Einsparungen an elektrischer Energie in absoluten Zahlen relativ gering sind, verbessert sich die SJAZ auch nur geringfügig.

Im nächsten Abschnitt wurde geprüft, ob es im simulierten Jahr Monate gibt, in welchen das LWWP Referenzheizsystem ohne nächtliche Beladungssperre einen geringeren Energiebedarf sowie eine höhere SJAZ hat als das LWWP mit einer Beladungssperre des Heizpufferspeichers für den Zeitraum von 00:00 bis 09:00 Uhr. Wie beim L-Sol wurde der Sperrzeitraum für die Gegenüberstellung gewählt, bei welchem der niedrigste jährliche Strombezug verzeichnet werden konnte bzw. die höchste SJAZ. Bei diesem Sperrzeitraum ist der Verbrauch an elektrischer Energie um 45 kWh (2.8 %) niedriger und die SJAZ 0.1 höher als bei der Referenzvariante. In der folgenden Abbildung 14 wird ersichtlich, wie sich der elektrische Stromverbrauch und die SJAZ der beiden LWWP in den einzelnen Monaten des simulierten Jahres verhalten.

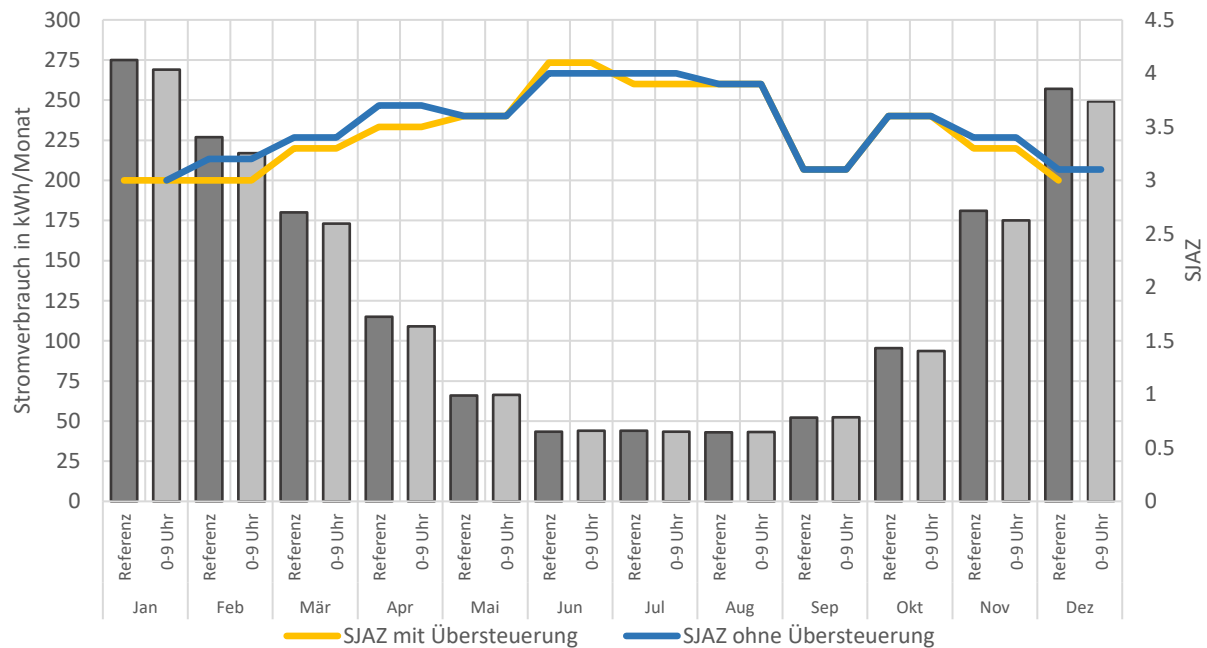


Abbildung 15: Monatliche Gegenüberstellung des LWWP mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für eine Sperrdauer von 0-9 Uhr und der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre. Die Balken geben den elektrischen Energieverbrauch an. Die Linien zeigen den Verlauf der SJAZ.

Bei Betrachtung des Schaubilds fällt auf, dass der monatliche elektrische Energieverbrauch der Referenzvariante höher ausfällt als der des LWWP mit nächtlicher Beladungssperre für den Zeitraum 00:00 bis 09:00 Uhr. Jedoch in den Monaten Mai und Juni hat die Referenzvariante einen verschwindend (je 1 kWh) geringeren Strombedarf. Dies reicht aus, die SJAZ in den beiden Monaten um 0.1 zu verbessern gegenüber dem LWWP mit nächtlicher Beladungssperre. Da der Unterschied allerdings nur so gering ausfällt, wird es nicht in Betracht gezogen, die Beladungssperre für diese Monate auszusetzen. Letztlich kann festgehalten werden, dass das LWWP mit nächtlicher Beladungssperre von 00:00 bis 09:00 Uhr in den meisten Monaten gleich oder effizienter arbeitet als jenes ohne Beladungssperre.

Um aufzuzeigen, ob sich die Umgebungstemperatur sowie die Globalstrahlung beim Betrieb der Wärmepumpen des LWWP mit nächtlicher Beladungssperre von den Werten des Referenzheizsystems ohne Beladungssperre des Heizpufferspeichers unterscheiden, wurde ein Welch-Test durchgeführt. Dazu wurde die vorherrschende Umgebungstemperatur während des Betriebs der Varianten miteinander verglichen. Es wurde der Sperrzeitraum gewählt, bei welchem der niedrigste jährliche elektrische Energieverbrauch und die höchste SJAZ erzielt werden konnte, im Vergleich zur Referenzvariante. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse veranschaulicht.

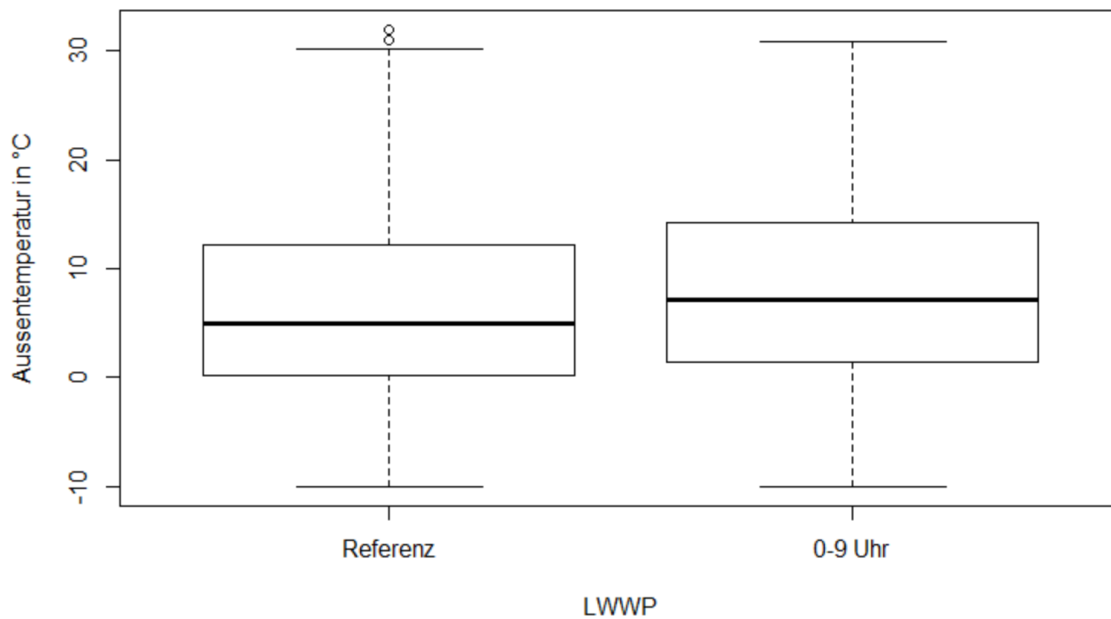


Abbildung 16: Boxplot der Umgebungstemperatur bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des LWWP mit nächtlicher Beladungssperre von 0-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 6.40 °C, die Durchschnittstemperatur des LWWP mit Beladungssperre beträgt 7.36 °C.

Die Grafik zeigt, dass es einen Unterschied der Umgebungstemperaturen gibt. Mit der Berechnung des Welch-Tests konnte aufgezeigt werden, dass dieser Unterschied mit einem p-Wert von $1.044 \cdot 10^{-8}$ für das getestete Setup statistisch signifikant ist. Da das LWWP seine für den Betrieb benötigte Energie, neben elektrischem Strom, lediglich aus der Umgebungsluft gewinnt, wurde auf die Auswertung der Globalstrahlung verzichtet.

LWWP_ST

Wie bei den beiden vorangegangenen Heizsystemen wurde auch für das LWWP_ST eine Gegenüberstellung durchgeführt, in welcher das LWWP_ST ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre mit dem LWWP_ST mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers, um die Soll-Gebäudetemperatur zu gewährleisten, verglichen wurde. In der folgenden Abbildung 17 sind die Ergebnisse grafisch veranschaulicht.

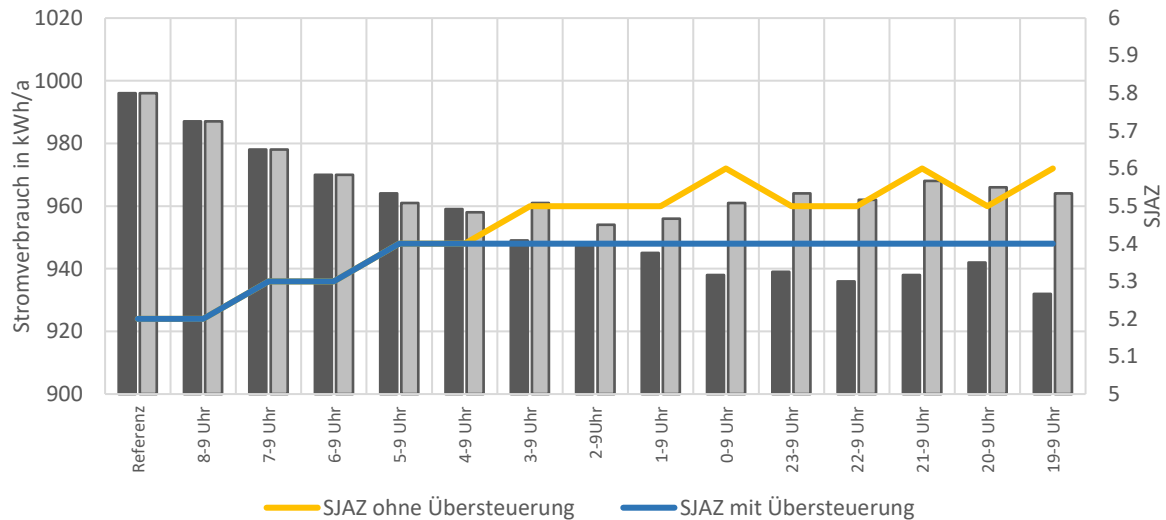


Abbildung 17: Auswertung LWWP_ST mit und ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für jeden Sperrzeitraum. Links (dunkelgrau) ohne Übersteuerung, rechts (hellgrau) mit Übersteuerung.

Das Diagramm zeigt, dass auch beim LWWP_ST die implementierte Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre funktioniert. Der jährliche elektrische Energieverbrauch sinkt beim LWWP_ST mit Übersteuerung der Beladungssperre im gleichen Masse, wie bei der Variante ohne Übersteuerung. Auch die SJAZ steigt bei beiden Varianten gleich an. Allerdings beginnt der Stromverbrauch der Variante des LWWP_ST ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre bereits ab einer Sperrdauer von 03:00 bis 09:00 Uhr stärker zu sinken als jener der Variante mit Übersteuerung. Auch die SJAZ steigt bei der Referenz ab diesem Zeitpunkt weiter an. Dieses Verhalten ist auf den ersten Blick ungewöhnlich, da gemäss der Abbildung 8 die Soll-Gebäudetemperatur erst bei einem Sperrzeitraum von 00:00 bis 09:00 Uhr nicht mehr gehalten werden kann. Bei einer detaillierteren Prüfung der «grafischen Auswertung» in Polysun konnte festgestellt werden, dass die Soll-Gebäudetemperatur in der Heizperiode beim LWWP_ST ohne Übersteuerung bereits vor dem Sperrzeitraum 00:00 bis 09:00 Uhr an zahlreichen Tagen unterschritten wurde. Allerdings bewegt sich die Unterschreitung immer über 19.95 °C, weshalb diese Temperaturunterschreitungen in den auf Zehntel gerundeten exportierten Daten nicht zu sehen sind. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur des LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre aber ohne Übersteuerung (Abbildung 18) und des LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre sowie mit Übersteuerung (Abbildung 19).

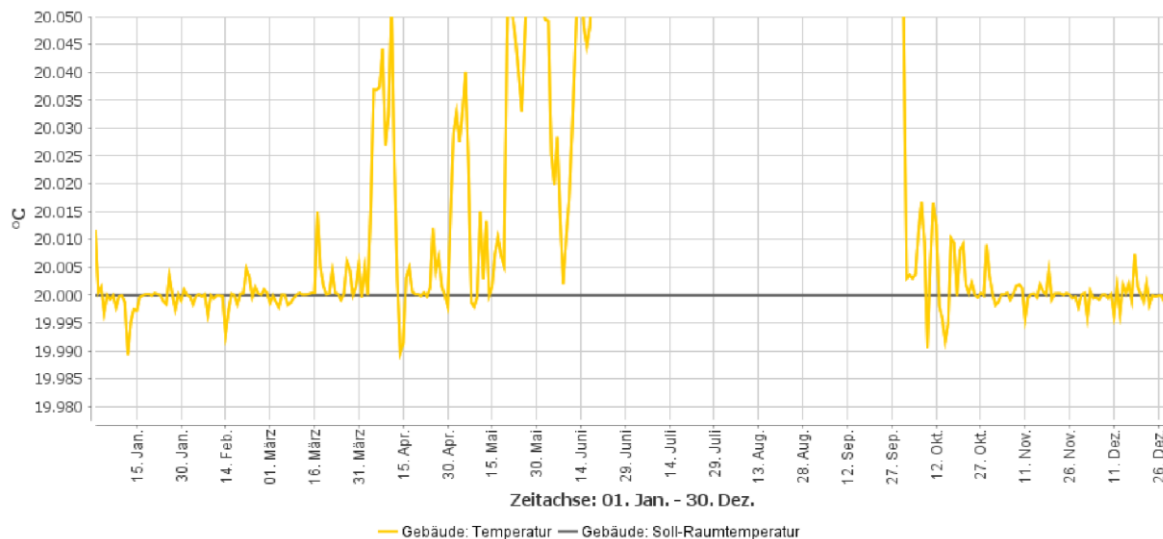


Abbildung 18: Auszug aus Polysun, der den Verlauf der Gebäudetemperatur im simulierten Jahr für das LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre von 3-9 Uhr ohne Übersteuerung zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Soll-Gebäudetemperatur an zahlreichen Tagen unterschritten wird.

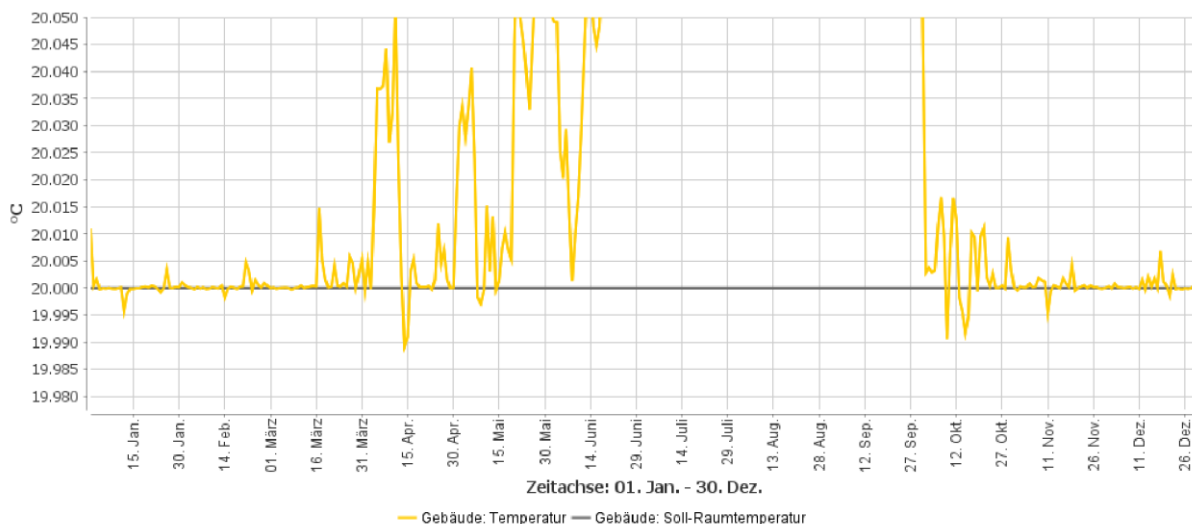


Abbildung 19: Auszug aus Polysun, der den Verlauf der Gebäudetemperatur im simulierten Jahr für das LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre und Übersteuerung zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Soll-Gebäudetemperatur weniger häufig unterschritten wird als bei der Variante mit Sperre und ohne Übersteuerung.

Diese Abweichungen von der Soll-Temperatur erscheinen marginal, doch auf das gesamte Jahr gesehen kann der Temperaturhub zurück auf Soll-Gebäudetemperatur an diesen Tagen nach der Sperrung erfolgen, wenn die Aussentemperatur höher ist. So kommt es zu den in Abbildung 17 zu sehenden Abweichungen.

Um einen genaueren Überblick über das LWWP_ST mit und ohne Übersteuerung zu erhalten, wurde auch für dieses Heizsystem eine monatliche Auswertung durchgeführt. Hierfür wurde das LWWP_ST mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre gewählt, bei welchem der jährliche elektrische Energieverbrauch im Vergleich zur Referenzvariante ohne Beladungssperre am niedrigsten bzw. die SJAZ am höchsten ist und der Referenzvariante gegenübergestellt. Dies trifft mit einer Reduktion von 42 kWh (4.2 %) bei dem Sperrzeitraum von 02:00 bis 09:00 Uhr zu.

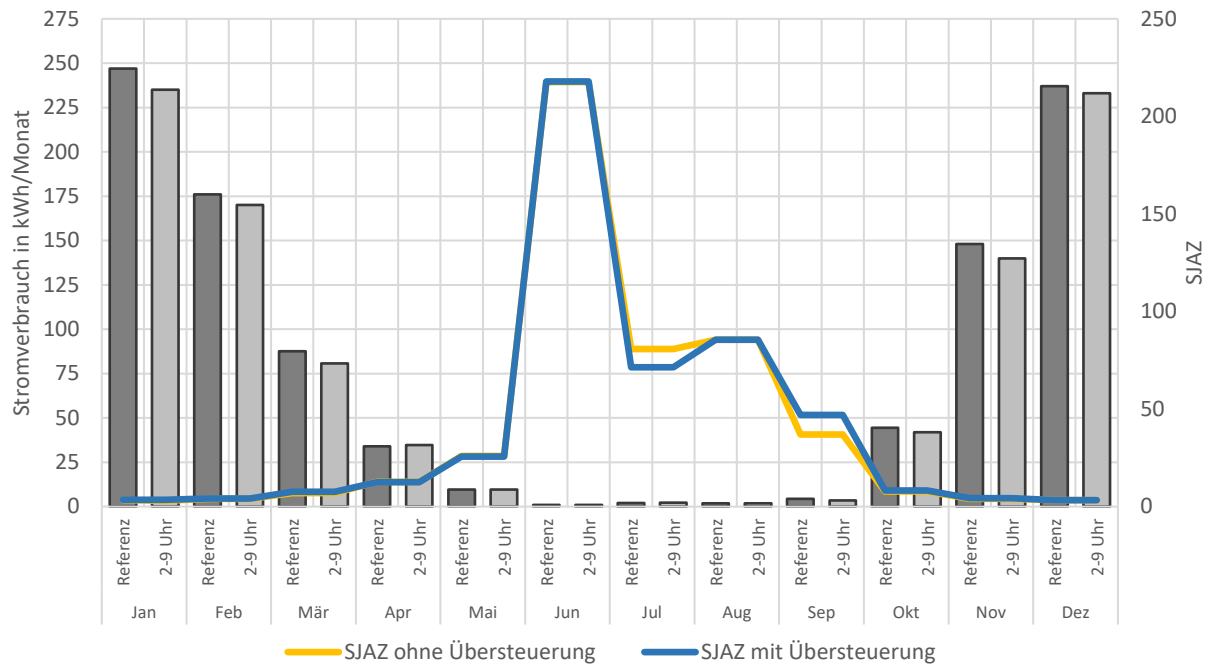


Abbildung 20: Monatliche Gegenüberstellung des LWWP_ST mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für eine Sperrdauer von 2-9 Uhr und der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre. Die Balken geben den elektrischen Energieverbrauch an. Die Linien zeigen den Verlauf der SJAZ.

Bei Betrachtung der Abbildung 20 fällt sofort der Peak der SJAZ im Monat Juni auf. Dieser kommt aufgrund der Tatsache zustande, dass die Luft/Wasser-Wärmepumpe des LWWP_ST nicht verwendet wird, da die benötigte Wärme komplett mit den Vakuumröhrenkollektoren gedeckt werden kann. Die Nutzenergie beträgt in diesem Monat 177 kWh und der Stromverbrauch der Pumpe für die Zirkulation des Fluids zwischen Heizpufferspeicher und Solarthermie Kollektoren beläuft sich lediglich auf 0.8 kWh, so kommt es zu der hohen SJAZ im Juni. Weiter kann dem Diagramm entnommen werden, dass das LWWP_ST mit Übersteuerung der Beladungssperre in jedem Monat der Heizperiode einen gleichen oder niedrigeren Stromverbrauch hat. Im Monat Juli hat allerdings das LWWP_ST Referenzsystem ohne Beladungssperre einen geringeren Stromverbrauch, was sich in einer besseren SJAZ zeigt. Dies hängt mit der BWW-Bereitung zusammen, da die Wärmepumpe für die Beladung des Heizpufferspeichers in den Monaten Juni, Juli und August gesperrt ist. Da die Unterschiede in absoluten Zahlen (< 1 kWh) so minimal sind, wird dieser Effekt nicht weiter untersucht. Wie bei den vorangegangenen Heizsystemen ist es also sinnvoll, die nächtliche Beladungssperre über das ganze Jahr aufrecht zu erhalten.

Ob sich die effizientere Betriebsweise bedingt durch den niedrigeren Stromverbrauch bei gleichbleibendem Wärmebedarf bei der Variante mit nächtlicher Beladungssperre auf die unterschiedliche durchschnittliche Umgebungstemperatur sowie einen höheren durchschnittlichen Globalstrahlungswert über das simulierte Jahr hinweg zurückführen lässt, wurde ebenfalls mit einem zweiseitigen Welch-Test geprüft. Die Ergebnisse des Welch-Tests mit einem Konfidenzintervall von 95 % sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 ersichtlich.

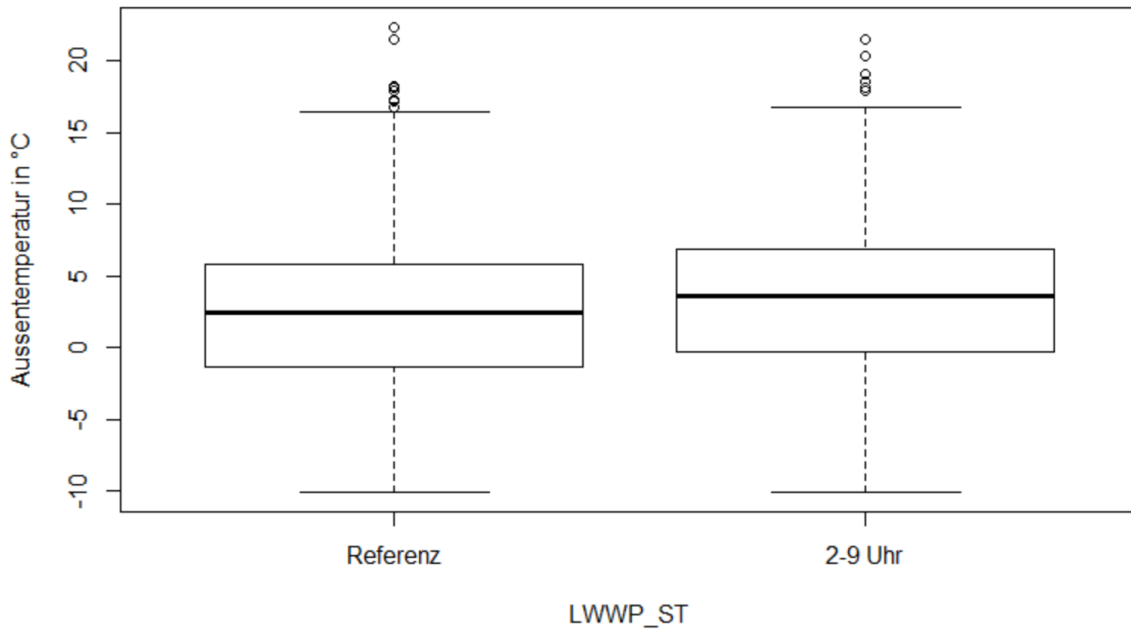


Abbildung 21: Boxplot der Umgebungstemperatur bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre von 2-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 2.60 °C, die Durchschnittstemperatur des LWWP_ST mit Beladungssperre beträgt 3.52 °C.

Aus dem Boxplot geht hervor, dass sich die Mittelwerte der jährlichen Umgebungstemperaturen unterscheiden. Der Welch-Test bestätigt, dass der Unterschied mit einem p-Wert von $2.096 \cdot 10^{-5}$ statistisch signifikant ist. Generell liegen die Durchschnittstemperaturen auf einem niedrigeren Niveau als beim L-Sol und dem LWWP. Der Grund dafür ist die Heizungsunterstützung durch die Solarthermie-Kollektoren. Durch die Heizungsunterstützung muss die Wärmepumpe erst später bzw. bei tieferen Temperaturen zugeschaltet werden, im Vergleich zu den beiden anderen Heizsystemen. Da die Vakuumröhrenkollektoren im LWWP_ST durch die Absorption von Sonnenstrahlung Wärme in den Pufferspeicher einbringen, wurde wie beim L-Sol auch ein Vergleich der Globalstrahlungswerte durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Grafik ersichtlich.

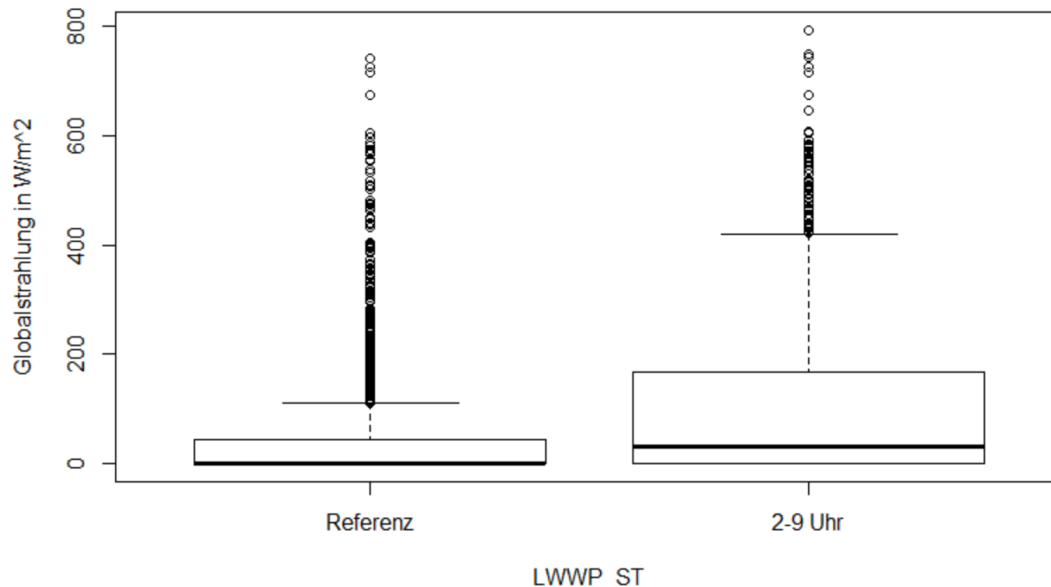


Abbildung 22: Boxplot der verzeichneten Globalstrahlung bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre von 2-9 Uhr abgebildet. Die durchschnittliche Globalstrahlung der Referenzvariante beträgt $53.98 \frac{W}{m^2}$, die durchschnittliche Globalstrahlung des LWWP_ST mit Beladungssperre beträgt $104.40 \frac{W}{m^2}$.

Der Welch-Test ergab einen p-Wert von $2.2 \cdot 10^{-16}$ für den Vergleich der Globalstrahlung beider Varianten. Somit können die Unterschiede als statistisch signifikant betrachtet werden. Die Vergleiche zeigen, dass durch die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers eine Verschiebung des Wärmepumpenbetriebs in einen Tagesteil, an welchem die Umgebungstemperatur sowie die Globalstrahlung höher sind als beim Referenzsystem, ohne die Soll-Gebäudetemperatur zu unterschreiten, gelingt. Dies führt letztlich dazu, dass das LWWP_ST effizienter als die Referenzvariante betrieben werden kann.

Die nachfolgende Tabelle 10 zeigt die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst, die aufgrund der Implementierung einer nächtlichen Beladungssperre mit Übersteuerung des Heizpufferspeichers bei den drei untersuchten Heizsystemen beobachtet werden konnten.

	L-Sol 19-9 Uhr	LWWP 0-9 Uhr	LWWP_ST 2-9 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	48	45	42
Δ el. Energie [%]	2.60	2.85	4.21
Δ SJAZ [-]	0.1	0.1	0.2
Δ Netzbezug [kWh]	-157	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	110	-	-
$\Delta \varnothing$ Umgebungstemperatur bei WP-Betrieb [K]	0.89	0.96	0.92
$\Delta \varnothing$ Globalstrahlung bei WP-Betrieb [W/m^2]	24.44	-	50.42
$\Delta \varnothing$ Kaltspeichertemperatur bei WP-Betrieb [K]	1.53	-	-

Tabelle 10: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre mit fixem Endzeitpunkt.

3.3 Fixer Startzeitpunkt der nächtlichen Beladungssperre

Nachdem die nächtliche Beladungssperre mit einem festen Ende der Sperrzeit getestet wurde, wurde ein fester Startzeitpunkt für die Beladungssperre festgelegt und der Endzeitpunkt variiert. Wie sich diese Veränderung des Sperrzeitraums auf den elektrischen Stromverbrauch der drei Heizsysteme auswirkt, zeigt die folgende Abbildung 23.

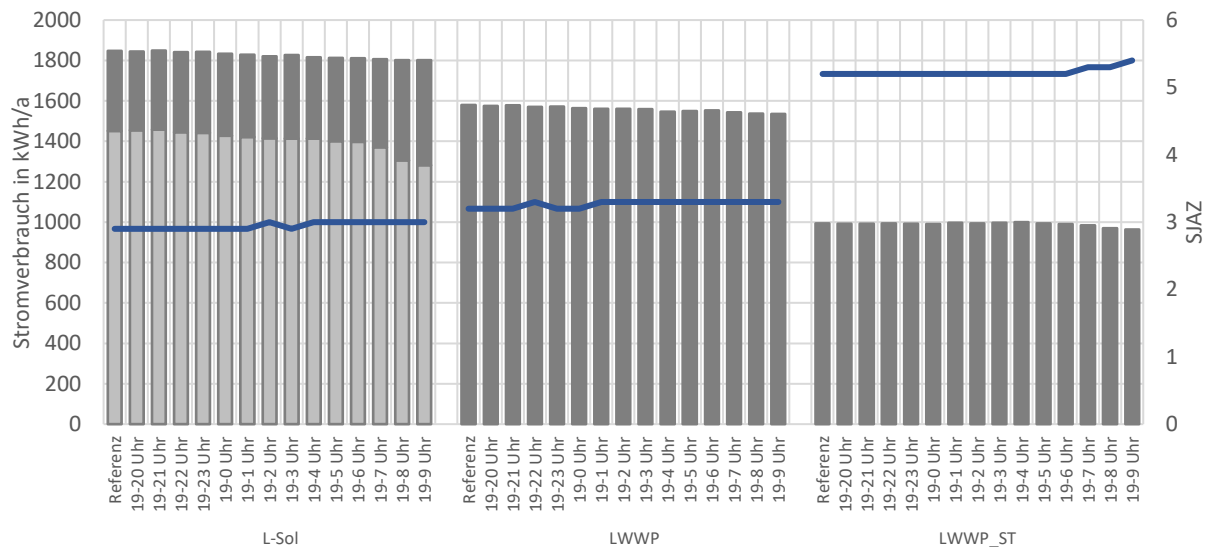


Abbildung 23: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt

Durch die Übersteuerung kommt es bei keinen der Varianten zu einer Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C. Die Beladungssperre mit fixem Startzeitpunkt führt bei allen drei Heizsystemen zu einer Effizienzsteigerung. Dabei ist bei den drei Heizsystemen jeweils der Sperrzeitraum 19:00 bis 09:00 Uhr der effizienteste. Jedoch ist nicht für jeden Sperrzeitraum eine Verringerung des elektrischen Stromverbrauchs zu verzeichnen. So kommt es beim L-Sol für den Sperrzeitraum 19:00 bis 21:00 Uhr zu einer Steigerung des jährlichen Stromverbrauchs um 1 kWh im Vergleich zur Referenz. Beim LWWP_ST kommt es sogar bei fünf Sperrzeiträumen zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs gegenüber der Referenz. Dies ist der Fall bei den Endzeiten der Sperre von 01:00 bis 05:00 Uhr. Mit 6 kWh pro Jahr fällt die Erhöhung bei dem Zeitraum 19:00 bis 04:00 Uhr am höchsten aus. Da diese «Verschlechterungen» gering ausfallen, spiegeln sie sich nicht im Verlauf der SJAZ wider.

Während sich beim L-Sol mit Ausnahme des Sperrzeitraumes 19:00 bis 21:00 Uhr und beim LWWP bereits ab einem Zeitraum von 19:00 bis 20:00 Uhr eine Verbesserung der Effizienz im Vergleich zur Referenzvariante einstellt, ist dies beim LWWP_ST erst ab einem Zeitraum von 19:00 bis 07:00 Uhr zu beobachten. Dass die Effizienz beim L-Sol und LWWP ansteigen kann,

bevor die Umgebungstemperatur sich am Morgen wieder erhöht bzw. es wieder Sonnenstrahlung gibt, liegt daran, dass während der Beladungssperre die Übersteuerung immer nur dann eingreift, wenn die Soll-Raumtemperatur absinkt und der Betrieb der Wärmepumpe wieder einstellt wird, sobald die Soll-Raumtemperatur erreicht wurde. Dies führt letztlich zu einem weniger langen Betrieb der Wärmepumpen in der Nacht, was in einer Effizienzsteigerung mündet. Darüber hinaus ist bei L-Sol gut zu erkennen, dass sich der Eigenverbrauch ab einem Sperrende von 07:00 Uhr sichtbar erhöht, was durch die Morgensonne erklärt werden kann.

Dass sich beim LWWP_ST erst so spät eine Verbesserung zeigt, liegt an der Hydraulik mit Kombi-Speicher. Gerade in den Abendstunden, bedingt durch das Zapfprofil «Abendspitzen», fällt ein hoher Heizwärmebedarf für das BWW an, was dazu führt, dass auch die Temperaturen in den Schichten des Kombi-Speichers sinken, die den Heizkreis speisen. Der Betrieb der Wärmepumpe, zur Versorgung des Heizkreises, wird durch die Beladungssperre immer weiter in die Nacht verschoben. Erst wenn die Temperaturen am Morgen wieder ansteigen und die Solarthermie die Wärmepumpe unterstützt, kann daher beim LWWP_ST die Effizienz im Vergleich zur Referenzvariante gesteigert werden. Die wichtigsten Ergebnisse für die Sperrzeiträume, bei welchen die Effizienz am höchsten ausfällt, sind in der nachfolgenden Tabelle 11 ersichtlich.

	L-Sol 19-9 Uhr	LWWP 19-9 Uhr	LWWP_ST 19-9 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	48	44	29
Δ el. Energie [%]	2.6	2.8	2.9
Δ SJAZ [-]	0.1	0.1	0.2
Δ Netzbezug [kWh]	-157	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	110	-	-

Tabelle 11: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre mit fixem Startzeitpunkt.

3.4 Fixer Sperrzeitraum mit variablem Start- und Endzeitpunkt

Vorangegangen wurde die nächtliche Beladungssperre mit dem fixen Endzeitpunkt 09:00 Uhr getestet. Hintergrund war es, wie im Abschnitt Variation des Sperrzeitraums der nächtlichen Beladungssperre erläutert, den Betrieb der Wärmepumpe möglichst während der Tagestieftemperaturen zu verhindern, die meist kurz vor Sonnenaufgang zu erwarten sind. In einer weiteren Simulation wurden für einen fixen Sperrzeitraum verschiedene Endzeitpunkte gewählt.

Es wurde für alle Heizsysteme ein Sperrzeitraum von sechs Stunden festgelegt, da bei den vorangegangenen Simulationen sich der grösste Effekt für eine Sperrdauer von 5 bis 7 Stunden ergab. Der Sperrzeitraum wurde stets um eine Stunde verschoben. Wie sich der fixe Sperrzeitraum mit variiertem Start- und Endzeitpunkt auf die Systemeffizienz auswirkt, kann der nachfolgenden Abbildung 24 entnommen werden.

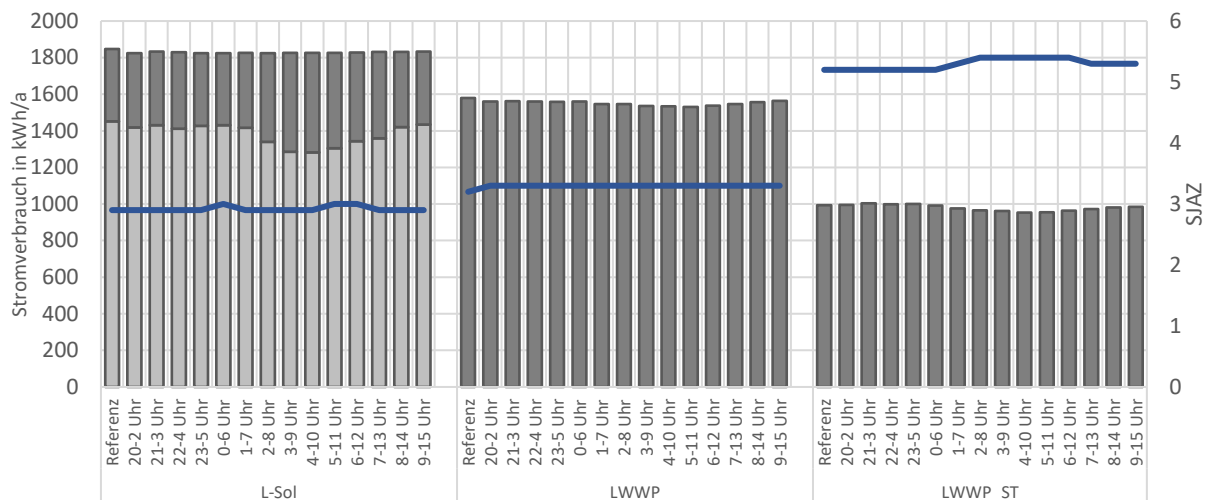


Abbildung 24: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Die Übersteuerung hat bei allen Varianten zuverlässig funktioniert. Demnach kam es bei keiner der Varianten zu einer Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur. Durch die Variation einer Beladungssperre mit fester Länge konnte bei allen drei Heizsystemen eine Reduktion des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs erreicht werden. Doch reagierten die Heizsysteme unterschiedlich auf die Sperre. Beim L-Sol kann bei dem Sperrzeitraum von 00:00 bis 06:00 Uhr ein um 24 kWh (1.30 %) geringerer jährlicher Stromverbrauch im Vergleich zur Referenz erreicht werden. Der höchste Eigenverbrauch ist hingegen bei einer Beladungssperre des Heizpufferspeichers von 04:00 bis 10:00 Uhr zu verzeichnen. Er ist dabei 148 kWh (37.37 %) höher als bei der Referenzvariante. Das LWWP ist bei einer Beladungssperre von 05:00 bis 11:00 Uhr am effizientesten. Gegenüber der Referenz kann bei diesem Sperrzeitraum die jährliche elektrische Energieaufnahme um 49 kWh (3.10 %) gesenkt werden. Mit einem fixen Sperrzeitraum kann somit beim LWWP die höchste Effizienzsteigerung erreicht werden. Doch handelt es sich um keine nächtliche Beladungssperre mehr, da die Sperre ausschliesslich am Morgen wirksam ist. Deshalb wird dieser Ansatz in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Das LWWP_ST ist bei einer Sperre von 04:00 bis 10:00 Uhr am effizientesten gegenüber der Referenz. Der jährliche Stromverbrauch senkt sich für diesen Sperrzeitraum um 40 kWh (4.03 %). Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 15 zusammengefasst:

	L-Sol 0-6 Uhr	LWWP 5-11 Uhr	LWWP_ST 4-10 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	24	49	40
Δ el. Energie [%]	1.3	3.1	4.0
Δ SJAZ [-]	0.1	0.1	0.2
Δ Netzbzug [kWh]	22	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	-2	-	-

Tabelle 12: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre mit fixem Sperrzeitraum.

3.5 Verlegung des Sperrzeitraums in den Tag

In dieser Arbeit steht eine nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers im Mittelpunkt der Untersuchung. Allerdings wurde als Exkurs zusätzlich geprüft, wie sich die nächtliche Beladungssperre auf die Effizienz der drei betrachteten Heizsysteme auswirkt, wenn die Sperre mit Übersteuerung vom erwarteten Tagestemperaturtief in den Tag ausgedehnt wird. Im Winter werden die Tagestiefsttemperaturen meist zwischen 08:00 und 09:00 Uhr erreicht (Deutscher Wetterdienst, 2012). Vor diesem Hintergrund wird 09:00 Uhr als Ausgang für die Sperrzeiträume gewählt und diese jeweils um eine Stunde verlängert.

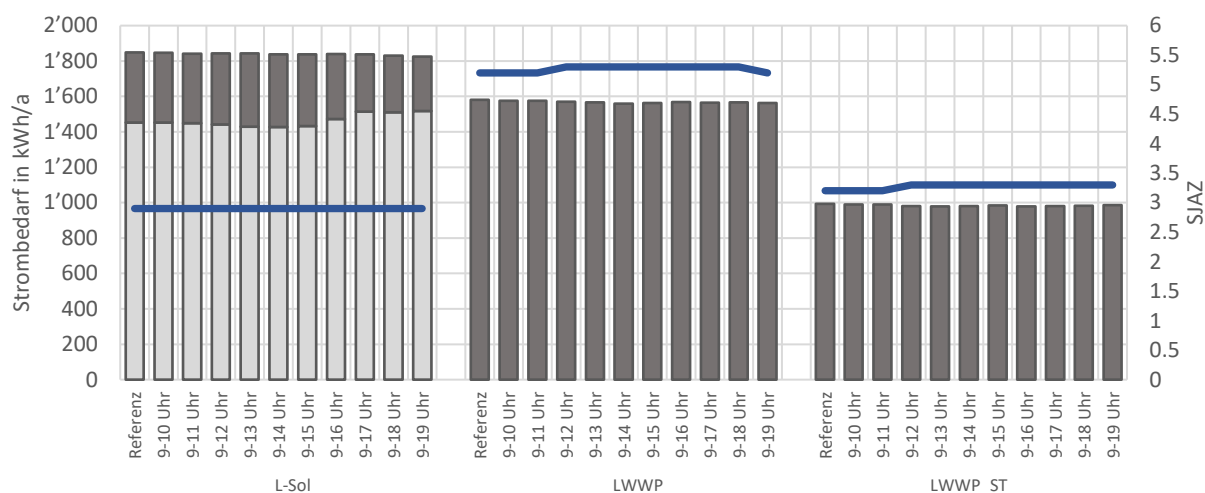


Abbildung 25: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Durch die Verlagerung der Beladungssperre des Heizpufferspeichers in den Tag kann bei den drei Heizsystemen ebenfalls eine jährliche Energieersparnis erreicht werden. Die höchste Ersparnis erzielt das L-Sol bei dem Zeitraum von 09:00 bis 19:00 Uhr mit 1.24 % (23 kWh), das LWWP bei einer Sperre von 09:00 bis 15:00 Uhr mit 1.27 % (20 kWh) und das LWWP_ST bei einer Sperre von 09:00 bis 13:00 Uhr mit 1.51 % (15 kWh) im Vergleich zur jeweiligen Referenzvariante. Durch eine Beladungssperre in der Nacht kann bei jeder Variante jährlich über das Doppelte eingespart werden. Somit kann auch die SJAZ bei der Sperrung über den Tag nicht oder nur um 0.1 verbessert werden. Neben der Tatsache, dass durch die Sperrung über den Tag im Vergleich zur nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers die Effizienz der Heizsysteme geringfügiger ansteigt, sinkt beim L-Sol mit zunehmender Sperrdauer auch der Eigenverbrauch und der Netzbezug steigt an. Dass überhaupt eine Effizienzsteigerung erreicht werden kann, liegt daran, dass in den Wintermonaten an kalten Vormittagen die Wärmepumpen weniger betrieben werden. Allerdings wird die so zustande kommende Effizienzsteigerung wieder durch den Betrieb der Wärmepumpen in der Nacht, wenn die Energieniveaus der Wärmequellen niedrig sind, verschlechtert.

	L-Sol 9-19 Uhr	LWWP 9-15 Uhr	LWWP_ST 9-13 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	23	20	15
Δ el. Energie [%]	1.2	1.3	1.5
Δ SJAZ [-]	0.0	0.1	0.1
Δ Netzbezug [kWh]	-23	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	89	-	-

Tabelle 13: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre am Tag.

3.6 Prüfung von Sensitivitäten der nächtlichen Beladungssperre durch Variation einzelner Variablen der Heizsysteme

Nachdem eruiert werden konnte, bei welchen Sperrzeiträumen die unterschiedlichen Heizsysteme am effizientesten arbeiten, werden im folgenden Abschnitt schrittweise Systemvariablen verändert, um deren Einfluss auf die nächtliche Beladungssperre zu untersuchen. Die zuvor ermittelten Sperrdauern, bei denen die jeweiligen Heizsysteme am effizientesten arbeiten, sind nachfolgend mit einem Stern (*) in den Abbildungen gekennzeichnet, um schneller zu sehen, ob die nachgängigen Massnahmen einen zusätzlichen positiven Einfluss auf die Beladungssperre haben. Die simulierte Sperrdauer wurde so gewählt, dass ein Trend klar ersichtlich wird. Um die Anzahl der Simulationen zu reduzieren, wurde davon abgesehen, für jeden Sperrzeitraum ein Ergebnis zu generieren. Es wird für die folgenden Simulationen fortan stets die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers mit Übersteuerung verwendet. Weitere Veränderungen an den Heizsystemen wurden nicht vorgenommen, sofern nicht ausdrücklich erwähnt.

3.6.1 Variation der Heizungsvor- / Rücklaufemperatur

Nachdem die Sperrdauer für den Heizpufferspeicher ermittelt wurde, bei welcher das L-Sol, LWWP und LWWP-ST am effizientesten arbeiten, wird nachfolgend getestet, wie die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers auf die Variation der Soll-Vorlaufemperatur und Soll-Rücklaufemperatur der Fussbodenheizung im jeweiligen System reagiert. Als Referenz dient das jeweilige Heizsystem ohne Beladungssperre. Für einen sinnhaften Vergleich wurden die Vor- und Rücklaufemperaturen ebenfalls bei der Referenzvariante angepasst, so dass sich die Varianten nur durch die Beladungssperre unterscheiden. Da die Steuerungen in Polysun mit Variablen und nicht mit fixen Werten programmiert wurden, konnten die Temperaturen variiert werden, ohne dass Anpassungen an den Steuerungen vorgenommen werden mussten. Für alle Simulationsdurchläufe werden zwei Fussboden-Heizelemente mit einer Fläche von je 11 m² zugrunde gelegt. In der anschliessenden Grafik sind die Ergebnisse für das L-Sol veranschaulicht.

L-Sol

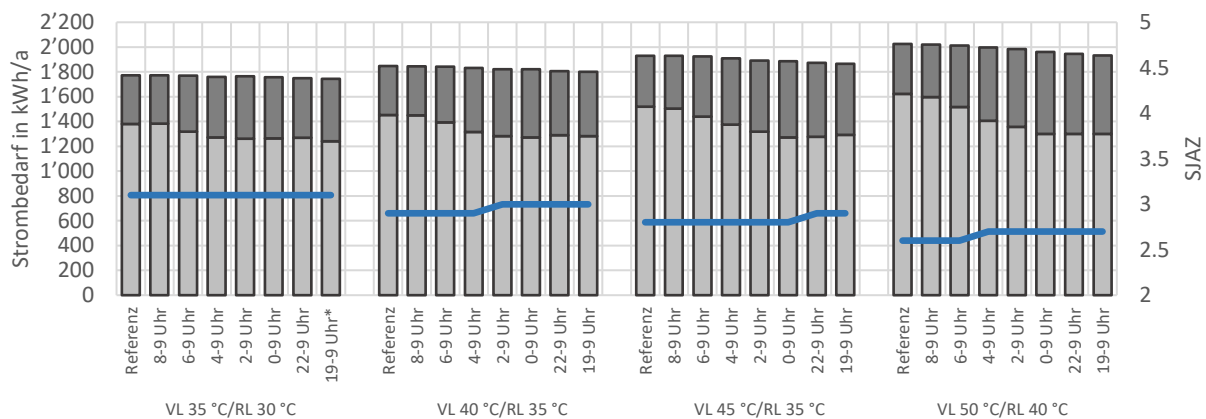


Abbildung 26: Auswirkung der Variation der VL/RL-Temperatur auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit gibt den Zeitraum wieder, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Der erste Blick auf die Abbildung 26 lässt erkennen, dass beim L-Sol mit steigender Vorlauf- respektive Rücklauftemperatur im Heizkreis auch ein höherer jährlicher elektrischer Energieverbrauch einhergeht. Der höhere Stromverbrauch kommt durch den höheren Temperaturhub zustande, der von der Primärseite zur Sekundärseite der Wärmepumpe notwendig ist. Wenn man die einzelnen Temperaturniveaus des Heizkreises separat betrachtet, fällt auf, dass bei länger andauernder Beladungssperre der elektrische Energiebedarf sinkt. Dieser Effekt wird mit steigender VL deutlicher. Der Rückgang bei VL 35 °C zwischen der Referenz und der längsten Sperrdauer von 19:00 bis 09:00 Uhr beträgt 27 kWh/a (1.52 %) bei VL 50 °C beträgt die Differenz 92 kWh/a (4.54 %). Ähnlich ist das beim Verhältnis Netzbezug zu Eigenverbrauch. Der Eigenverbrauch steigt mit Verlängerung des Sperrzeitraumes an bzw. der Netzbezug sinkt. Ebenso wie beim gesamten Stromverbrauch sind die Veränderungen bei VL 50 °C am deutlichsten. Anders ist allerdings, dass sich das Verhältnis von Eigenverbrauch zu Netzbezug ab einem gewissen Sperrzeitraum stabilisiert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ab einer gewissen Sperrdauer die Übersteuerung aktiv wird. Somit kann keine grössere Last nach 09:00 Uhr verschoben werden und nicht mehr PV-Strom genutzt werden. Umso niedriger die Temperatur des VL, desto schneller stabilisiert sich das Verhältnis, da die Soll-Temperatur im Pufferspeicher früher erreicht wird und so die Laufzeit der Wärmepumpe kürzer ist als bei einer höheren VL-Temperatur.

Die SJAZ verbessern sich bei gleicher VL-Temperatur bzw. RL-Temperatur nicht oder nur geringfügig. Festgehalten werden kann, dass das L-Sol, unabhängig von der Sperrdauer, mit steigender Temperatur im Heizkreis ineffizienter arbeitet, was auch deutlich wird, wenn man die SJAZ mit unterschiedlichem VL vergleicht.

LWWP

Wie sich die Variation der Heizungsvorlauf- bzw. Rücklauf­temperatur auf das LWWP auswirkt, kann dem folgenden Diagramm entnommen werden.

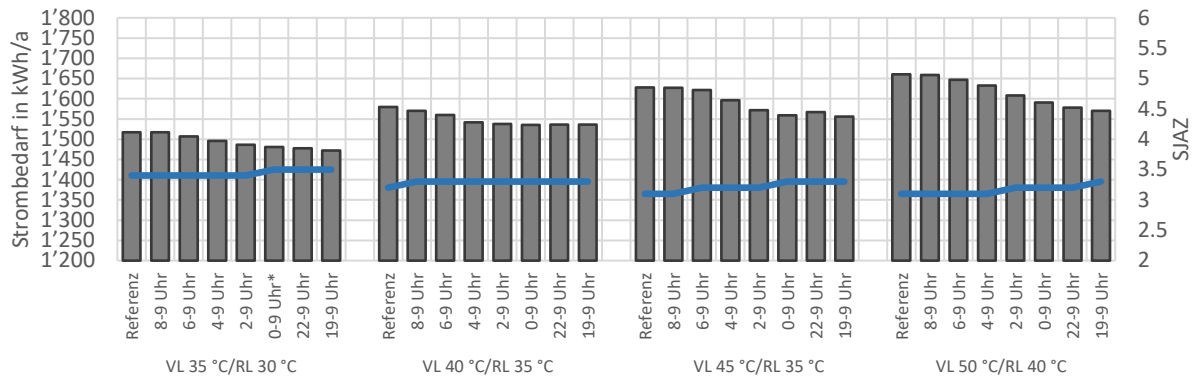


Abbildung 27: Auswirkung der Variation der VL/RL-Temperatur auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrezeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitet.

Ebenso wie beim zuvor ausgewerteten L-Sol kann man erkennen, dass mit steigender Heizungsvorlauf­temperatur der elektrische Energiebedarf des LWWP steigt. Dies kann zum einen mit dem höheren Temperaturhub der Wärmepumpe begründet werden. Zudem zeigt sich, dass mit zunehmender Beladungssperredauer auch der benötigte elektrische Energiebedarf sinkt und die SJAZ entsprechend ansteigt. Dieser Effekt verstärkt sich mit Erhöhung der Temperaturen im Heizkreis. Dies hängt damit zusammen, dass mit einer höheren Vorlauf­temperatur durchschnittlich ein höherer Energiegehalt im Heizpufferspeicher vorliegt. Somit wird die Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre weniger häufig nötig. Das hat zur Folge, dass der verfolgte Zweck der nächtlichen Beladungssperre, die Betriebszeit der Wärmepumpe in die Morgenstunden zu verschieben, vermehrt zum Tragen kommt.

LWWP_ST

Mit steigender VL/RL-Temperatur steigt auch beim LWWP_ST der elektrische Energiebedarf an, wie auf Abbildung 28 ersichtlich wird.

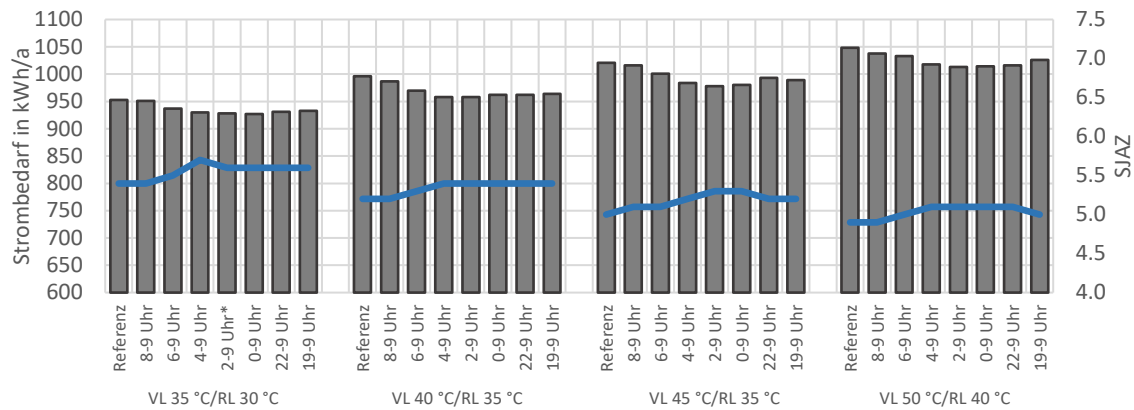


Abbildung 28: Auswirkung der Variation der VL/RL-Temperatur auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiten für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitet.

Anders als bei den zuvor betrachteten Heizsystemen, ist beim LWWP_ST eine konträre Entwicklung des jährlichen Stromverbrauchs zu beobachten. Zwar sinkt elektrische Energieverbrauch mit Verlängerung des Sperrzeitraums, doch im Unterschied zum L-Sol und LWWP steigt er ab der Sperrdauer von ca. 02:00 bis 09:00 Uhr wieder an. Dies hängt mit den Vakuumröhrenkollektoren zusammen, die in der getesteten Hydraulik Wärme direkt in den Kombi-Speicher einbringen. Wird die Beladungssperre über den Zeitraum 02:00 bis 09:00 Uhr hinaus verlängert, so muss die Übersteuerung aktiv werden, um die Raumtemperatur bei 20 °C zu halten. Dadurch steigt das Temperaturniveau im Speicher in der Nacht wieder an und es kann am Morgen weniger Wärme von den Solarthermie-Kollektoren genutzt werden. Die SJAZ sinkt mit Steigerung der VL-Temperatur, was man gut an den Referenzwerten erkennen kann. Während die SJAZ 5.4 bei einer VL-Temperatur von 35 °C beträgt, beläuft sich die SJAZ bei der Referenz mit der VL-Temperatur von 50 °C nur noch auf 4.9. Bei Betrachtung der einzelnen Kolonnen sieht man, dass sich erwartungsgemäss das Verhalten des Stromverbrauchs im Verlauf der SJAZ widerspiegelt. Mit Verlängerung des Sperrzeitraumes steigt die SJAZ, bis sie ab einem Sperrzeitraum zwischen 4 h und 6 h wieder abfällt. Ein Blick auf den Stromverbrauch zeigt, dass bei VL 35 °C/RL 30 °C und einer Sperrdauer von 02:00 bis 09:00 Uhr der Strombedarf jährlich um 2.62 % gegenüber der Referenz gesenkt werden kann. Bei VL 35 °C/RL 30 °C und einer Sperrdauer von 02:00 bis 09:00 Uhr fällt der Unterschied mit 3.34 % deutlicher aus.

3.6.2 Variation der Wärmeübertragungsfläche

Um zu testen, welchen Einfluss die Änderung der Wärmeübertragungsfläche in Kombination mit der nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers hat, wurde die Fläche der Fussbodenheizung schrittweise erhöht. Es wird erwartet, dass bei steigender Flächenzahl ein deutlicher Effekt der nächtlichen Beladungssperre auftritt, da die Fussbodenheizung als eine Art

zusätzlicher Speicher fungiert und es so möglich ist, die Soll-Gebäudetemperatur zu halten. Ausgang für die Simulation bildet die Grösse 22 m², welche Polysun für alle drei Heizsysteme «automatisch» berechnet hat. Diese Fläche setzt sich aus zwei Fussbodenheizungselementen zusammen mit je 11 m². Eine weitere Verkleinerung der Fläche wurde geprüft. Da es mit nur einem Element nicht möglich war, die Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C zu jedem Zeitpunkt im Jahr nicht zu unterschreiten, wurde die Flächen schrittweise um ein Fussbodenheizungselement erweitert. Abbildung 29 zeigt, wie die nächtliche Beladungssperre im L-Sol auf die Erweiterung der Wärmeübertragungsfläche reagiert.

L-Sol

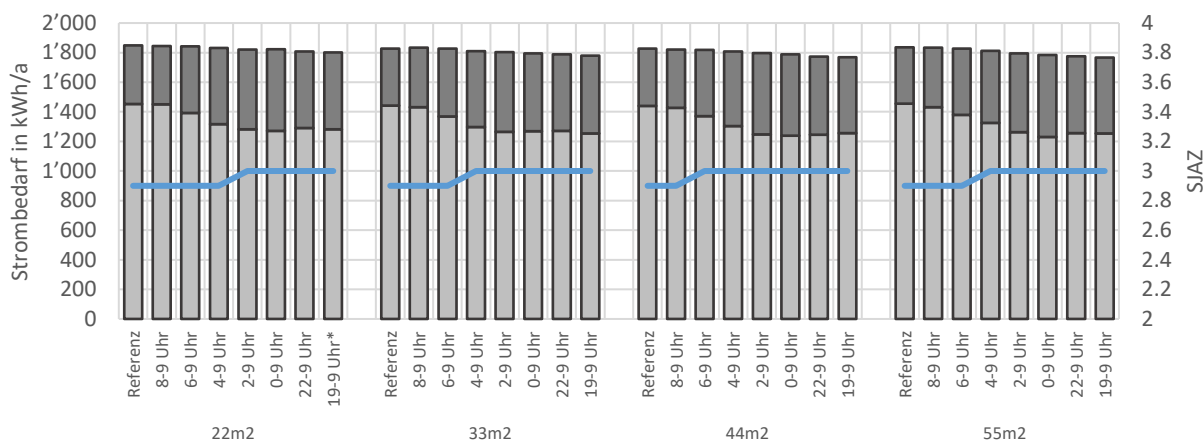


Abbildung 29: Auswirkung der Variation der Wärmeübertragungsfläche auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitet.

Es ist zu erkennen, dass eine Vergrösserung der Fussbodenheizungsfläche einen geringen Einfluss auf die nächtliche Beladungssperre hat. Dies zeigt sich daran, dass sich die einzelnen Kolonnen nahezu identisch verhalten. So sinkt der jährliche elektrische Energiebedarf mit Ausdehnung der nächtlichen Beladungssperre bei allen Flächen ab und erreicht mit der Sperrdauer 19:00 bis 09:00 Uhr den jeweils tiefsten Wert. Bei einer Fussbodenheizungsfläche von 22 m² sind das 1'801 kWh/a, was den höchsten dieser Werte widerspiegelt. Wenn man die Fussbodenheizung bei gleicher Sperrdauer auf 55 m² vergrössert, was rund ein Drittel der gesamten EBF darstellt, erhält man den tiefsten jährlichen Stromverbrauch der getesteten Varianten mit 1'766 kWh/a. Aus diesem Grund kann hervorgehoben werden, dass die Vergrösserung der Fussbodenheizung einen positiven Einfluss auf die Beladungssperre hat und gegenüber der vom System vorgegeben Fläche von 22 m² bei gleicher Sperrdauer zusätzlich 35 kWh/a eingespart werden können. Die Variante mit 44 m² bei einem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr hat einen um nur 3 kWh/a höheren elektrischen Energieverbrauch. Auch das Verhältnis Netzbezug zu Eigenverbrauch ist bei den abgebildeten Varianten ähnlich. Anders als der Stromverbrauch wird der höchste Eigenverbrauch nicht bei der Sperrdauer 19:00

bis 09:00 Uhr erzielt. Der jährliche Eigenverbrauch erreicht bei einem Sperrzeitraum zwischen 00:00 bis 09:00 Uhr bzw. 02:00 bis 09:00 Uhr sein Maximum. Dies hängt mit der Übersteuerung zusammen. Wird der Sperrzeitraum weiter ausgedehnt, so wird zunehmend die Übersteuerung aktiv und so die Wärmepumpe in den Normalbetrieb versetzt. Das hat zur Folge, dass die Temperatur im Heizpufferspeicher in der Nacht vor 09:00 Uhr wieder angehoben wird, was dazu führt, dass der Eigenverbrauch leicht sinkt. Um dies zu veranschaulichen, wurden exemplarisch zwei Beispiele für eine Fläche von 55 m² aus der Rubrik «Grafische Auswertung» von Polysun angefügt (Abbildung 30 und Abbildung 31).

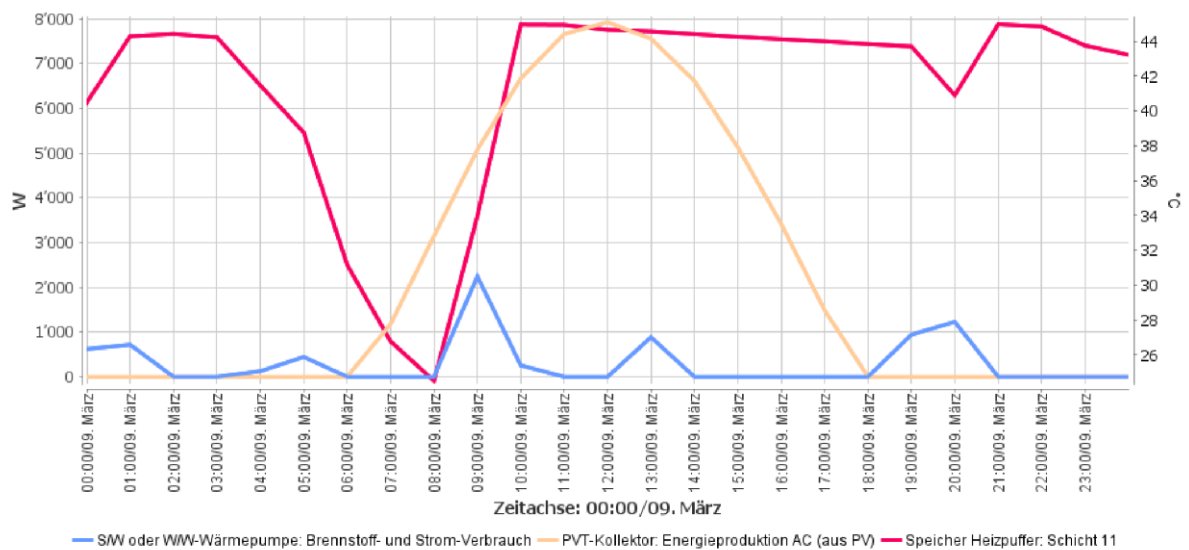


Abbildung 30: Auszug aus Polysun für den 09. März des simulierten Jahres. Er zeigt das L-Sol mit einer Wärmeübertragungsfläche von 55 m² und mit einem Sperrzeitraum von 02:00 bis 09:00 Uhr. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur in Schicht 11 von 12 des Heizpufferspeichers bis zum Ende des Sperrzeitraumes sinkt.

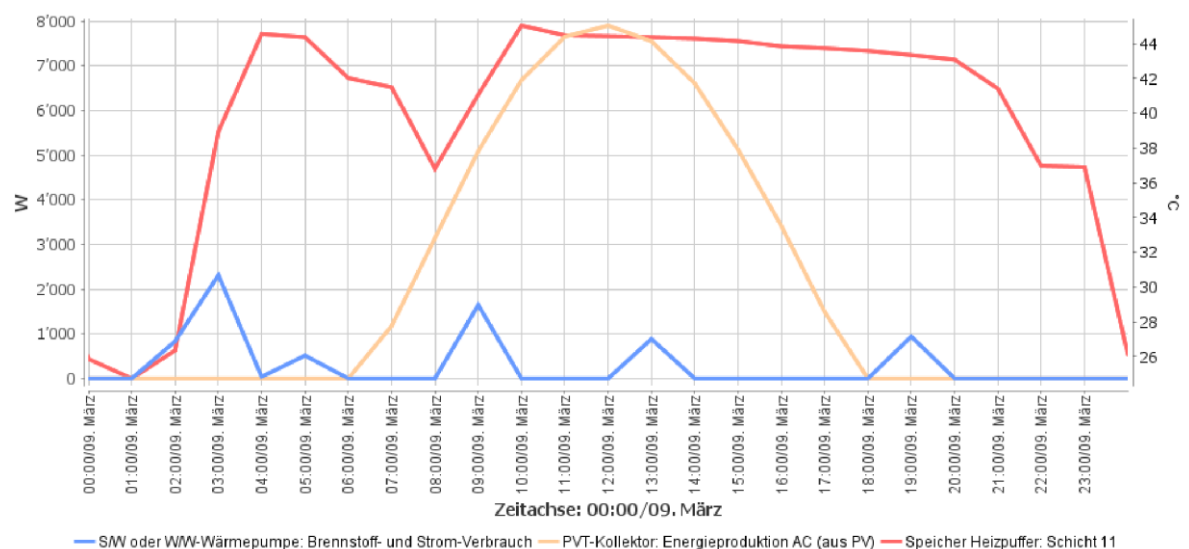


Abbildung 31: Auszug aus Polysun für den 09. März des simulierten Jahres. Er zeigt das L-Sol mit einer Wärmeübertragungsfläche von 55 m² und einem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur in Schicht 11 von 12 des Heizpufferspeichers bereits vor Ende des Sperrzeitraumes wieder angehoben wird.

Aus Abbildung 30 wird ersichtlich, dass die Übersteuerung bei einem Sperrzeitraum von 02:00 bis 09:00 Uhr nicht aktiv wird und erst um 09:00 Uhr die Temperatur im ausgekühlten Heizpufferspeicher angehoben wird. Abbildung 31 zeigt die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers von 19:00 bis 09:00 Uhr. Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits um ca. 03:00 Uhr die Übersteuerung eingreift, die Temperatur im Speicher anhebt und somit um 09:00 Uhr die Wärmepumpe weniger PV-Strom verwendet.

Die SJAZ verbessert sich um 0.1 bei den vier simulierten Flächen mit Ausdehnung der Beladungssperre. Es ist zu beobachten, dass die SJAZ bei einer Fussbodenheizungsfläche von 44 m² bereits bei dem Sperrzeitraum 06:00 bis 09:00 Uhr um 0.1 von 2.9 auf 3.0 steigt, wohingegen bei einer Fläche von 22 m² eine Verbesserung der SJAZ erst ab dem Sperrzeitraum von 02:00 bis 09:00 Uhr eintritt. Dies kann damit erklärt werden, dass der Stromverbrauch mit der Verlängerung des Sperrzeitraumes unterschiedlich schnell fällt. Da die Unterschiede so gering ausfallen, konnte kein eindeutiger Grund dafür ausgemacht werden.

LWWP

Für das LWWP wurden, wie beim L-Sol, die Flächen der Fussbodenheizung variiert und der Einfluss auf die nächtliche Beladungssperre betrachtet. In Abbildung 32 wurden die Ergebnisse visualisiert.

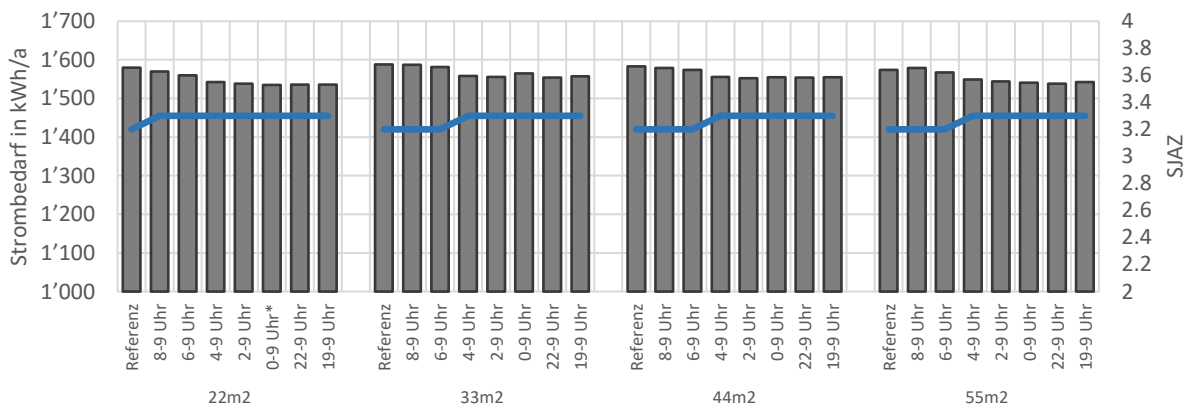


Abbildung 32: Auswirkung der Variation der Wärmeübertragungsfläche (Fussbodenheizung) auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Konträr zum L-Sol sinkt der elektrische Energieverbrauch bei Ausweitung des Sperrzeitraumes nicht mit etwa gleicher Steigung. Vielmehr sinkt der jährliche Stromverbrauch bis zu dem Sperrzeitraum 04:00 bis 09:00 Uhr stark ab, dann stabilisiert sich der Stromverbrauch und variiert nur noch um wenige kWh pro Jahr. Der geringste jährliche Stromverbrauch kann bei einer Fussbodenheizungsfläche von 22 m² und dem Sperrzeitraum 00:00 bis 09:00 Uhr mit 1'535 kWh/a hervorgehoben werden. Damit ist er 2.85 % niedriger im Vergleich zur Referenzvariante mit der gleichen Fläche. Auch die SJAZ kann mit der Flächenerweiterung nicht weiter

verbessert werden. Somit kann festgehalten werden, dass eine Vergrößerung der Fussbodenheizung keine Verbesserung der nächtlichen Beladungssperre mit sich bringt.

LWWP_ST

Wie bei den beiden vorangegangenen Heizsystemen wurde für das LWWP_ST auch die Wärmeübertragungsfläche schrittweise erhöht. In der folgenden Abbildung 33 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

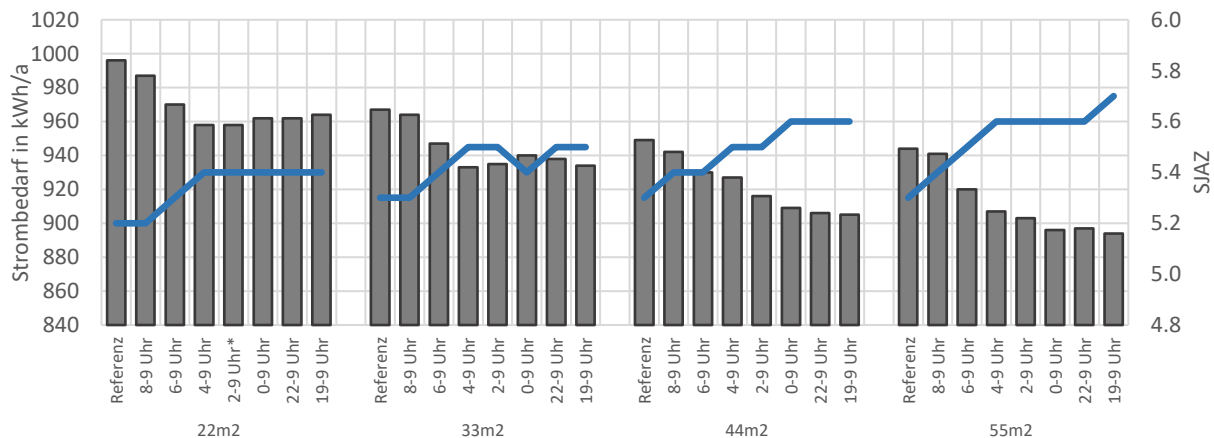


Abbildung 33: Auswirkung der Variation der Wärmeübertragungsfläche (Fussbodenheizung) auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Wie man deutlich sehen kann, wird durch die Erweiterung der Fussbodenheizungsfläche eine eindeutige Reduktion des gesamten elektrischen Energieverbrauchs erwirkt. Dies kann damit erklärt werden, dass die erweiterte Fläche als weitere Speichermasse angesehen werden kann und so mehr Wärme aus den Vakuumröhrenkollektoren im Heizsystem gespeichert wird. Dies hat zur Folge, dass weniger Wärme von der Wärmepumpe bereitgestellt werden muss, was letztlich zu einem geringeren elektrischen Stromverbrauch führt. Da bei gleichem Wärmebedarf der elektrische Energiebezug sinkt, steigt entsprechend die SJAZ an und kann deutlich verbessert werden. Während bei der durch Polysun automatisch berechneten Fussbodenheizungsfläche (22 m²) in Verbindung mit der nächtlichen Beladungssperre maximal eine SJAZ von 5.4 erreicht werden konnte, ist es möglich, bei einer Fläche von 55 m² und einem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr eine SJAZ von 5.7 zu erlangen. Somit hat die Variation der Wärmeübertragungsfläche bei dem betrachteten LWWP_ST einen positiven Einfluss auf die Systemeffizienz. Mit der nächtlichen Beladungssperre kombiniert, kann die Systemeffizienz weiter verbessert werden. Das zeigt auch ein Blick auf den Stromverbrauch. Während bei einer Fläche von 22 m² und einer Sperrdauer von 02:00 bis 09:00 Uhr der Strombedarf jährlich um 3.82 % gegenüber der Referenz gesenkt werden kann, senkt sich der jährliche Strombedarf bei Fläche von 55 m² und er Sperrdauer von 19:00 bis 09:00 Uhr um 5.30 %.

3.6.3 Variation des Gebäudestandards

Um zu testen, wie sich die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei unterschiedlichem Gebäudestandard verhält, wurde der jährliche Heizwärmebedarf (ohne BWW) in Abständen von $10 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ erhöht. Die Wärmeverluste wurden ebenfalls in einem Verhältnis von 3.86 erhöht. Dies entspricht demselben Verhältnis, das im Kapitel Gebäudemodelle berechnet wurde. Das folgende Diagramm (Abbildung 34) zeigt die schrittweise Variation des Gebäudestandards für das L-Sol.

L-Sol

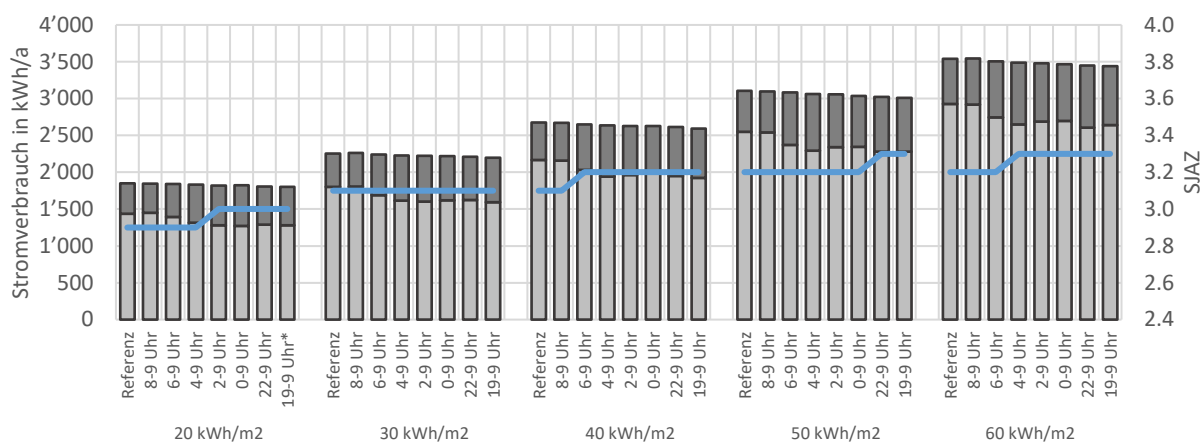


Abbildung 34: Auswirkung der Variation des Gebäudestandards auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Die Grafik zeigt das zu erwartende Bild. Mit steigendem Heizwärmebedarf und Wärmeverlusten steigt auch der jährliche elektrische Energieverbrauch. Bei einem Blick auf die SJAZ fällt auf, dass mit steigendem Heizwärmebedarf auch die SJAZ steigt. Dies ist jedoch nicht auf die Beladungssperre zurückzuführen. Als Grund dafür kann vielmehr das Verhältnis Nutzenergie zu elektrischem Energieverbrauch angeführt werden. Da durch die Erhöhung des Heizwärmebedarfs auch die Betriebszeit der Wärmepumpe ansteigt, wird diese zunehmend länger am Tag betrieben, wenn die Energie der Wärmequelle höher ist. Am stärksten macht sich dieser Effekt in den Monaten April und September bemerkbar. Bei der separaten Betrachtung der Kolonnen sieht man, dass stets bei einem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr der geringste jährliche elektrische Energieverbrauch und die höchste SJAZ verzeichnet ist. Bei einem Heizwärmebedarf von $20 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ beträgt die Ersparnis gegenüber der Referenz 2.64 % (47 kWh), wohingegen bei einem Heizwärmebedarf von $40 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ die verhältnismässig höchste Ersparnis mit 3.24 % (84 kWh) erzielt werden konnte. Deutlicher wird das Verhältnis des gesamten Stromverbrauchs zum Eigenverbrauch mit steigendem Heizwärmebedarf verändert. Während

bei einem Heizwärmebedarf von $20 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ und einem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr rund 29 % durch eigen produzierten Strom abgedeckt werden kann, sind es bei $60 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ nur noch rund 23 %. In absoluten Zahlen steigt allerdings der Eigenverbrauch mit Abnahme des Gebäudestandards.

LWWP

Ebenso wie beim L-Sol wurden beim LWWP der jährliche Heizwärmebedarf sowie die Verluste durch Transmission und Lüftung schrittweise erhöht. In der nachfolgenden Abbildung 35 wird ersichtlich, wie das LWWP auf die Variation des Gebäudestandards in Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers reagiert.

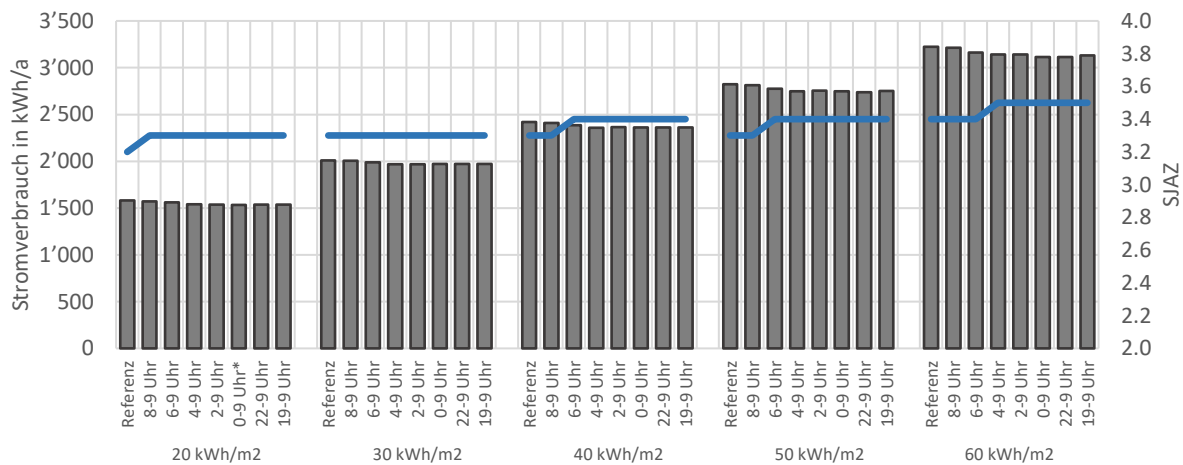


Abbildung 35: Auswirkung der Variation des Gebäudestandards auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Das LWWP reagiert ebenso wie das L-Sol mit einem erhöhten elektrischen Energieverbrauch bei Vergrößerung des Heizwärmebedarfs. Es zeichnet sich die Tendenz ab, dass mit steigendem Heizwärmebedarf und dem damit verbundenen höheren jährlichen elektrischen Energieverbrauch des LWWP ebenso die Ersparnis, die durch die Implementierung der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers erwirkt werden kann, ansteigt. Anders als beim L-Sol verändert sich der optimale Sperrzeitraum, in welchem im Verhältnis zur Referenzvariante die höchste Stromersparnis sowie SJAZ verortet werden kann, mit der Variation des Gebäudestandards. So kann bei einem Heizwärmebedarf von $20 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ und einer Sperre von 00:00 bis 09:00 Uhr der effizienteste Betriebszustand mit einer jährlichen Ersparnis von 2.85 % (45 kWh) erreicht werden. Im Gegensatz zu einem Heizwärmebedarf von $60 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$, wo der optimale Sperrzeitraum bei 22:00 bis 09:00 Uhr liegt und eine Ersparnis von 3.44 % (111 kWh) erreicht werden kann. Ebenso wie beim L-Sol ist beim LWWP zu beobachten, dass die SJAZ mit sinkendem Gebäudestandard leicht ansteigt und das ist ebenfalls wie beim L-Sol auf die

längeren Betriebsstunden der Wärmepumpe zurückzuführen. Es kann festgehalten werden, dass mit der nächtlichen Beladungssperre bei LWWP elektrische Energie eingespart werden kann. Je schlechter der Gebäudestandard, desto höher die Ersparnis. Allerdings sollte der Sperrzeitraum für jedes LWWP ermittelt werden.

LWWP_ST

Wie das LWWP_ST auf die Variation des Gebäudestandards verknüpft mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers reagiert, wird durch die Abbildung 36 deutlich.

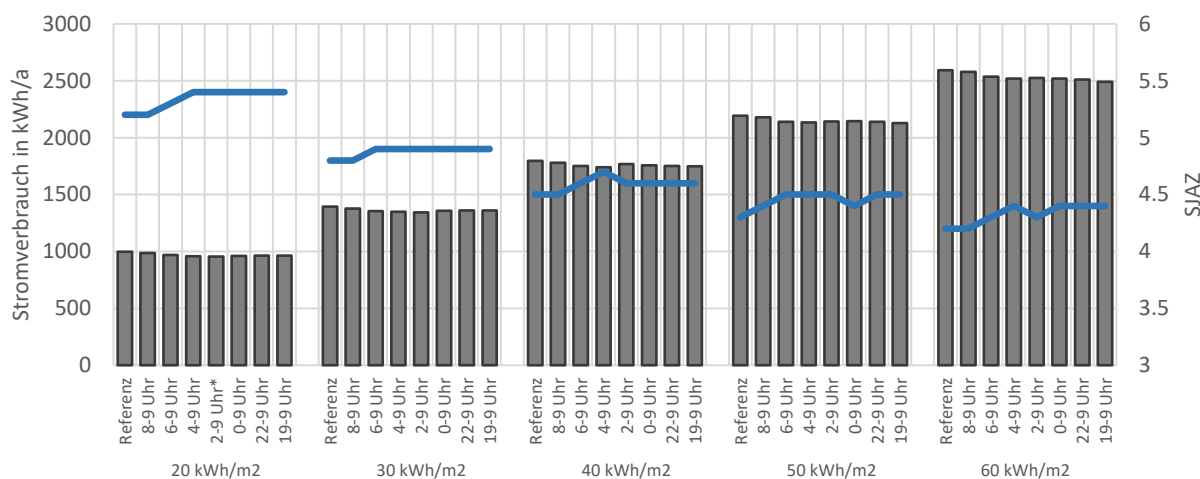


Abbildung 36: Auswirkung der Variation des Gebäudestandards auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiten für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Wie bei den beiden vorangegangenen Heizsystemen steigt der jährliche elektrische Energieverbrauch mit sinkendem Gebäudestandard. Doch konträr zum L-Sol und LWWP ist der Verlauf der SJAZ. Sie sinkt mit Zunahme des Heizwärmebedarfs. Der Grund hierfür ist, dass der Wärmeanteil, der durch die Solarthermiekollektoren direkt in den Kombi-Speicher eingebracht wird, im Verhältnis zum gesamten elektrischen Energiebedarf mit steigendem Heizwärmebedarf sinkt. Der Zeitraum der Beladungssperre, in welchem die SJAZ am höchsten ist und der jährliche Stromverbrauch am niedrigsten ausfällt, variiert mit unterschiedlichem Heizwärmebedarf. Mit sinkendem Gebäudestandard kann durch die nächtliche Beladungssperre ein immer geringerer Anteil im Verhältnis zur Referenzvariante eingespart werden. Sind es bei $20 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ und dem Sperrzeitraum 02:00 bis 09:00 Uhr noch 4.22 % (42 kWh), können bei $60 \frac{\text{kWh}}{\text{a}\cdot\text{m}^2}$ und einem Sperrzeitraum 19:00 bis 09:00 Uhr nur noch 3.93 % (102 kWh) eingespart werden, was jeweils den Sperrdauern entspricht, bei denen das LWWP_ST am effizientesten arbeitet. Trotz der Abnahme des eingesparten Anteils im Vergleich zur jeweiligen Referenzvariante steigt die absolute Anzahl an eingesparten kWh mit sinkendem Gebäudestandard.

3.6.4 Variation des Heizpufferspeichervolumens

Nachfolgend wird geprüft, ob sich eine Vergrößerung des Heizpufferspeichervolumens bzw. Kombi-Speichervolumens in den Hydrauliken der drei Heizsysteme in Verbindung mit der nächtlichen Beladungssperre positiv auf die Systemeffizienz auswirkt. Die Speicher wurden dabei vom berechneten Volumen im Abschnitt Gebäudemodelle schrittweise um jeweils rund 30 % erhöht. Die Ergebnisse sind folgend mit Schaubildern veranschaulicht.

L-Sol

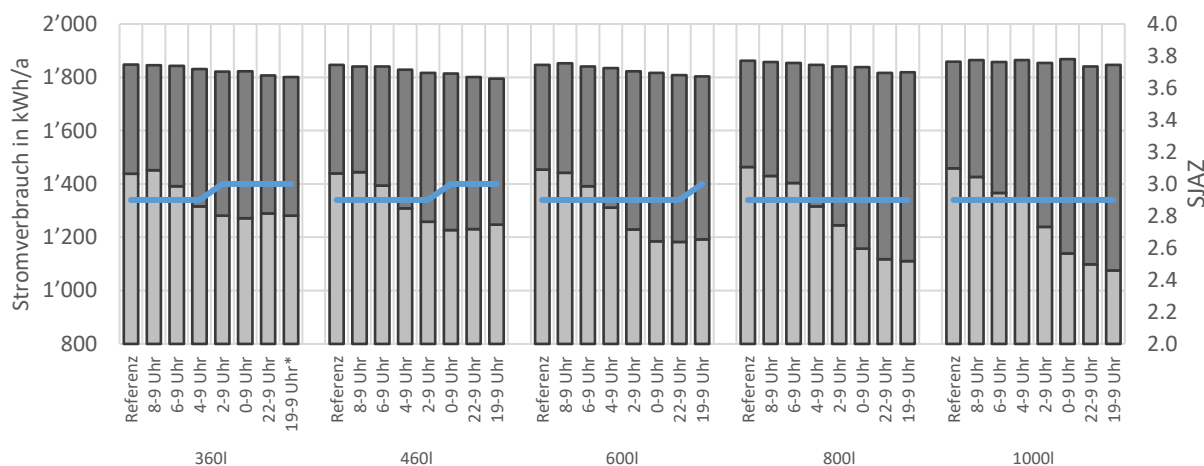


Abbildung 37: Auswirkung der Variation des Heizpufferspeichervolumens auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.

Durch die Erhöhung des Speichervolumens steigt der Heizwärmebedarf. Zwar kann mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei jeder der simulierten Speichergrossen eine Stromersparnis erzielt werden, allerdings schwächt sich dieser Effekt mit ansteigendem Speichervolumen ab, was sich auch in der SJAZ widerspiegelt. Jedoch kann mit einem grösseren Pufferspeichervolumen und dem damit einhergehenden vermehrten Betrieb der Wärmepumpe am Tag, in Verbindung mit der Beladungssperre, das Verhältnis von Netzbezug zu Eigenverbrauch verbessert werden. So beläuft sich bei einer Speichergrosse von 360 l und dem Sperrzeitraum 19:00 bis 09:00 Uhr der Netzbezug auf 1'281 kWh und der Eigenverbrauch auf 520 kWh. Wohingegen für denselben Sperrzeitraum bei einem Speichervolumen von 1'000 l ein Netzbezug von 1'076 kWh und Eigenverbrauch in Höhe von 771 kWh verzeichnet werden kann. Da durch die PVT-Kollektoren Wärme am Tag in den Kaltspeicher eingebracht wird, die wiederum der Sole/Wasser-Wärmepumpe als Quelle dient, wird vermutet, dass eine Vergrößerung des Kaltspeichers einen grösseren Einfluss auf die Stromreduktion hat als bei der Vergrößerung des Heizpufferspeichers. Daher wurde bei den Varianten mit Pufferspei-

chervolumen von 360 l sowie 1'000 l und dem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr der Kalt-speicher von 1'500 l auf 2'000 l vergrössert. Allerdings konnte dadurch keine zusätzliche Re- duktion erzielt werden, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.

LWWP

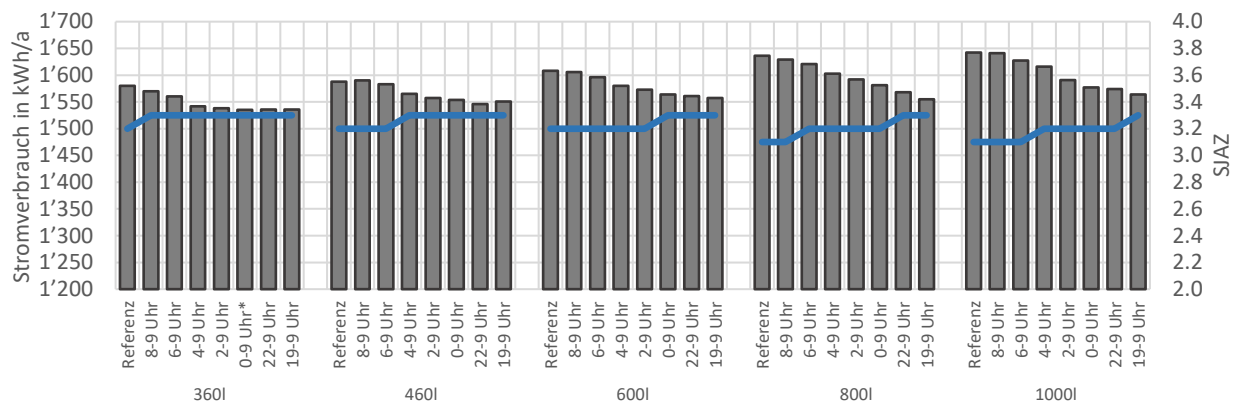


Abbildung 38: Auswirkung Variation des Heizpufferspeichervolumens auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitet.

Wie sich bereits beim L-Sol abgezeichnet hat, steigt, wie in Abbildung 38 ersichtlich, auch beim LWWP der Heizwärmebedarf mit Anhebung des Pufferspeichervolumens, was sich in einer Erhöhung des jährlichen Stromverbrauchs zeigt. Der Einfluss der nächtlichen Beladungs- sperre nimmt mit steigendem Speichervolumen zu, was auch an der steiler ansteigenden SJAZ ersichtlich wird. Dies kann damit begründet werden, dass bei grösserem Speichervolu- men die Übersteuerung zur Sicherstellung der Soll-Gebäudetemperatur weniger oft aktiv wer- den muss. So ist es letztlich möglich, eine grössere Last in den Tag zu verschieben. Der opti- male Sperrzeitraum, bei welchem das LWWP am effizientesten betrieben werden konnte, ver- längert sich somit. Bei 360 l ist dies ein Sperrzeitraum von 00:00 bis 09:00 Uhr, bei einem Volumen von 460 l liegt der bereits bei 22:00 bis 09:00 Uhr. Vergrössert man den Speicher weiter, so ist die effizienteste Betriebsweise mit dem längsten simulierten Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr möglich. In absoluten Zahlen ist der Stromverbrauch bei dem kleinsten Speichervolumen und einer Beladungssperre von 00:00 bis 09:00 Uhr am geringsten.

LWWP_ST

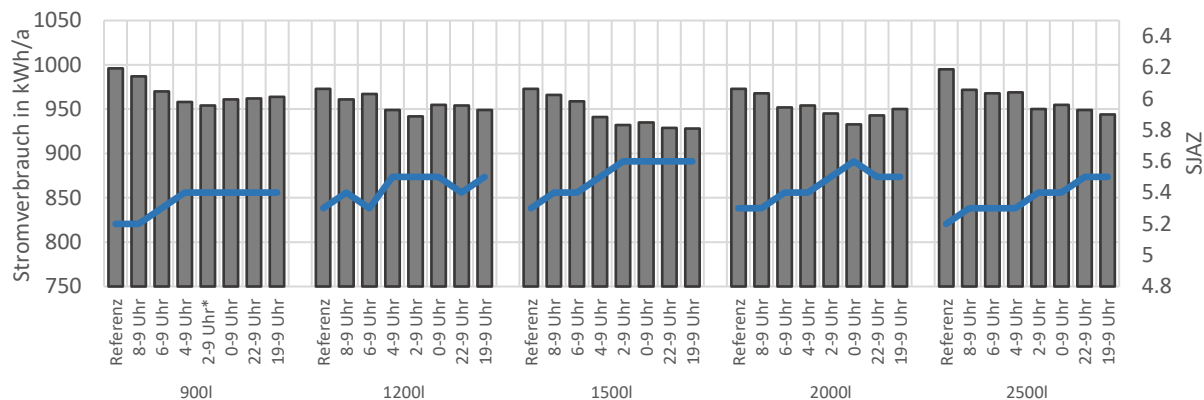


Abbildung 39: Auswirkung Variation des Heizpufferspeichervolumens auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrezeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitet.

Abbildung 39 zeigt, dass ein grösseres Kombi-Speichervolumen einen erheblichen Einfluss auf das LWWP_ST hat. Es ist klar erkennbar, dass das LWWP_ST mit einem Speichervolumen zwischen 1'200 l und 2'000 l effizienter arbeitet, als mit einem Volumen von 900 l bzw. 2'500 l, was an den Referenzsystemen gesehen werden kann. Somit kann festgehalten werden, dass das unter dem Abschnitt Gebäudemodelle berechnete Speichervolumen des Kombi-Speichers zu klein ist. Durch die Einführung einer Beladungssperre kann bei allen Speichervolumen gegenüber der Referenz ohne Beladungssperre die Effizienz des Heizsystems gesteigert werden. Am wirkungsvollsten ist die Beladungssperre bei einem Speichervolumen von 1'500 l. Bereits ab einem Sperrzeitraum von 02:00 bis 09:00 Uhr kann eine SJAZ von 5.6 erreicht werden, die um 0.3 höher ist als jene der Referenzvariante. Während das LWWP_ST ohne Beladungssperre 973 kWh im getesteten Jahr benötigt, um den Heizwärmebedarf zu decken, sind es 928 kWh mit einer Beladungssperre von 19:00 bis 09:00 Uhr und einem Speichervolumen von 1'500 l.

3.6.5 Kombination Beladungssperre mit Überhitzung des Heizpufferspeichers

Die Überhitzung des Heizpufferspeichers mit der nächtlichen Beladungssperre soll aufzeigen, ob es möglich ist, die Beladungssperre länger aufrecht zu erhalten, ohne dass die Übersteuerung aktiv wird und somit eine grössere Last in den Tag verschoben werden kann, was letztlich zu einer höheren Systemeffizienz als ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers führen soll.

L-Sol

In einem ersten Schritt wurden die Schwellenwerte für das L-Sol ermittelt, bei welchen der Netzbezug am geringsten ausfällt. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass der Eigenverbrauch möglichst hoch ausfällt. Hierfür wurden der Einschaltfaktor (EF) sowie der Ausschaltfaktor (AF) variiert. Die Abbildung 40 zeigt den Einfluss der Variation auf den Netzbezug des

L-SOL, Abbildung 41 zeigt, wie sich die Variation der Schwellenwerte für das Überhitzen auf den Eigenverbrauch auswirken.

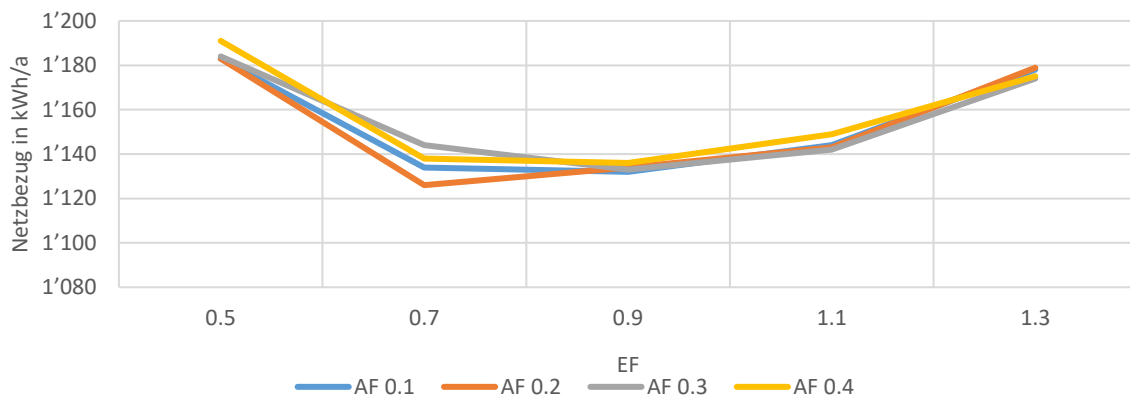


Abbildung 40: Effekt der Variation des Einschaltfaktors (EF) sowie des Ausschaltfaktors (AF) für die Überhitzung des Heizpufferspeichers auf den Netzbezug des L-Sol. Der Netzbezug ist bei dem Einschaltfaktor 0.7 am geringsten. Der Einfluss des Ausschaltfaktors auf den Netzbezug fällt gering aus.

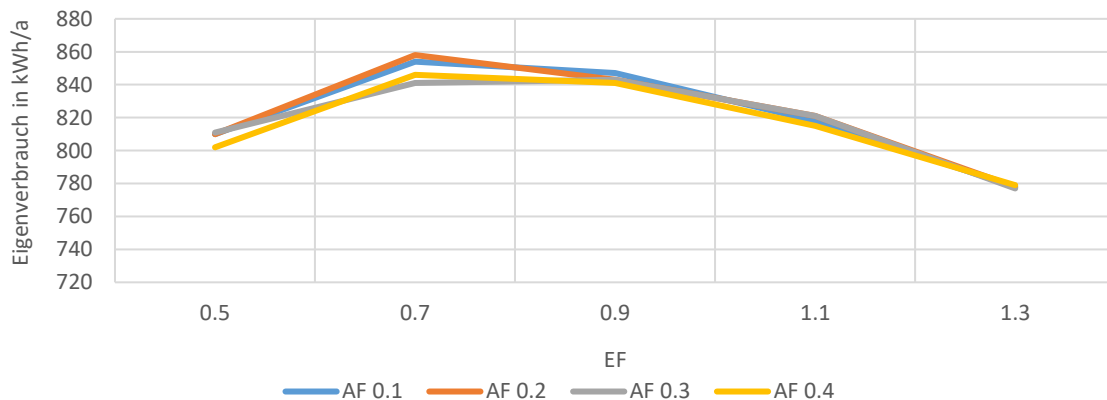


Abbildung 41: Effekt der Variation des Einschaltfaktors (EF) sowie des Ausschaltfaktors (AF) für die Überhitzung des Heizpufferspeichers auf den Eigenverbrauch des PV-Stroms des L-Sol. Der Eigenverbrauch ist bei dem Einschaltfaktor 0.7 am höchsten. Der Einfluss des Ausschaltfaktors auf den Eigenverbrauch fällt gering aus.

Bei der Betrachtung der beiden Grafiken ist zu erkennen, dass bei einem EF von 0.7 der geringste Netzbezug sowie die höchste Eigennutzung des PV-Stroms erreicht wird. Darüber hinaus wird deutlich, dass der AF nur einen geringfügigen Einfluss auf die Resultate hat. Dies liegt daran, dass die maximale Speichertemperatur (65 °C) für das Überhitzen meist erreicht wird, bevor der Schwellenwert für das Beenden der Überhitzung unterschritten wird.

Für die Kombination der Überhitzung des Heizpufferspeichers und der nächtlichen Beladungssperre, die in der folgenden Abbildung 42 zu sehen ist, wird aufgrund der vorhergegangenen Resultate der EF von 0.7 und der AF von 0.2 gewählt.

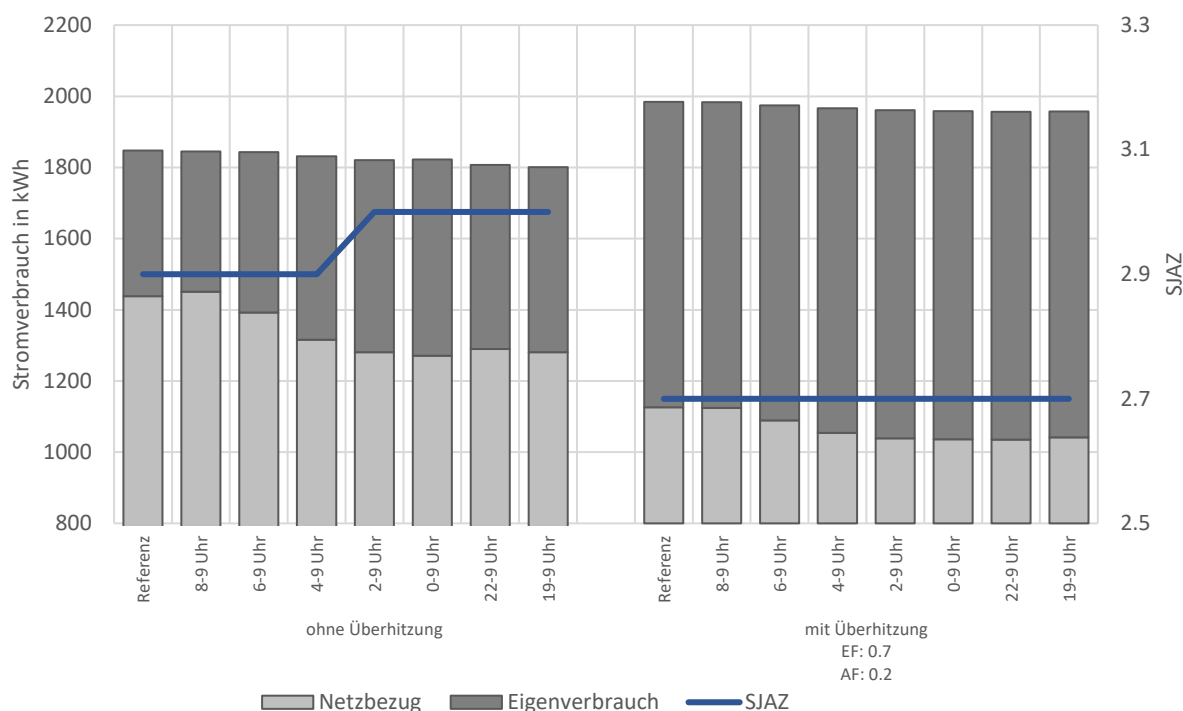


Abbildung 42: Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Beladungssperre des Heizpufferspeichers. Balken die mit «Referenz» bezeichnet sind, sind ohne Beladungssperre. Die linke Kolonne zeigt das L-Sol ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers, die rechte mit Überhitzung.

Die Kombination von Überhitzung des Heizpufferspeichers und nächtlicher Beladungssperre kann keine Effizienzsteigerung des L-Sol bewirken. Dies bedeutet, der zusätzliche elektrische Energieaufwand für die Überhitzung des Heizpufferspeichers kann nicht durch die Lastverschiebung in einen tendenziell wärmeren Tageteil kompensiert werden. Wie die Grafik zeigt, ist aber eine Verbesserung des Verhältnisses zwischen Eigenverbrauch des PV-Stroms zum Netzbezug möglich. Während bei einer Sperrdauer von 19:00 bis 09:00 Uhr bei einem jährlichen Stromverbrauch von 1'801 kWh der Eigenverbrauch bei 28.87 % liegt, liegt der Eigenverbrauch bei der Variante mit Überhitzung des Heizpufferspeichers und demselben Sperrzeitraum, bei einem jährlichen elektrischen Energieverbrauch von 1'957 kWh, bei 46.76 %.

LWWP

Beim LWWP wurde ebenfalls zuerst der Schwellenwert definiert, bei welchem die Überhitzung startet und der jährliche elektrische Energiebezug am geringsten ausfällt. Die massgebende Grösse ist dabei die Umgebungstemperatur. Hierfür wurde die Einschalttemperatur (ET) variiert. Da sich die Aussentemperatur anders als die Sonnenstrahlung, die beim L-Sol für die PV-Stromproduktion benötigt wird, über den Tagen nur langsam ändert, wurde die Ausschalttemperatur (AT) immer 1 K unter der ET gewählt. Die folgende Abbildung 43 zeigt den Einfluss der Abänderung ET bzw. AT auf den jährlichen Stromverbrauch des LWWP.

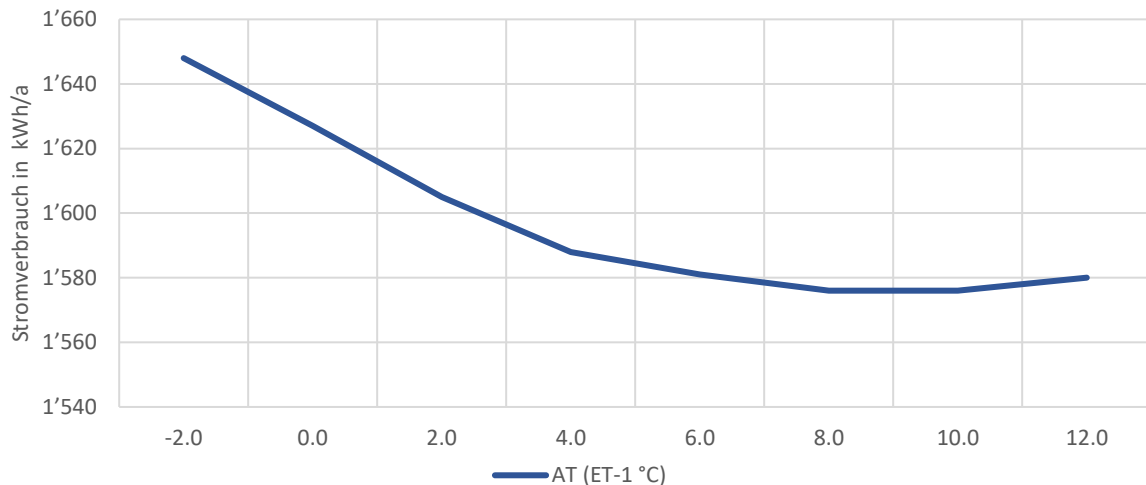


Abbildung 43: Effekt der Variation der Einschalttemperatur (ET) sowie der Ausschalttemperatur (AT) für die Überhitzung des Heizpufferspeichers auf den jährlichen Stromverbrauch des LWWP. Der Stromverbrauch ist bei einer Einschalttemperatur von 8 °C bis 10 °C am geringsten. Die Ausschalttemperatur liegt stets 1 K unter der Einschalttemperatur.

Die Kurve zeigt, dass bei einer ET von 8 °C sowie 10 °C der elektrische Stromverbrauch über das simulierte Jahr hinweg am geringsten ausfällt. Aus diesem Grund wurde für die Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers die ET 10 °C gewählt. Die nachfolgend Abbildung 44 zeigt die Überhitzung in Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers.

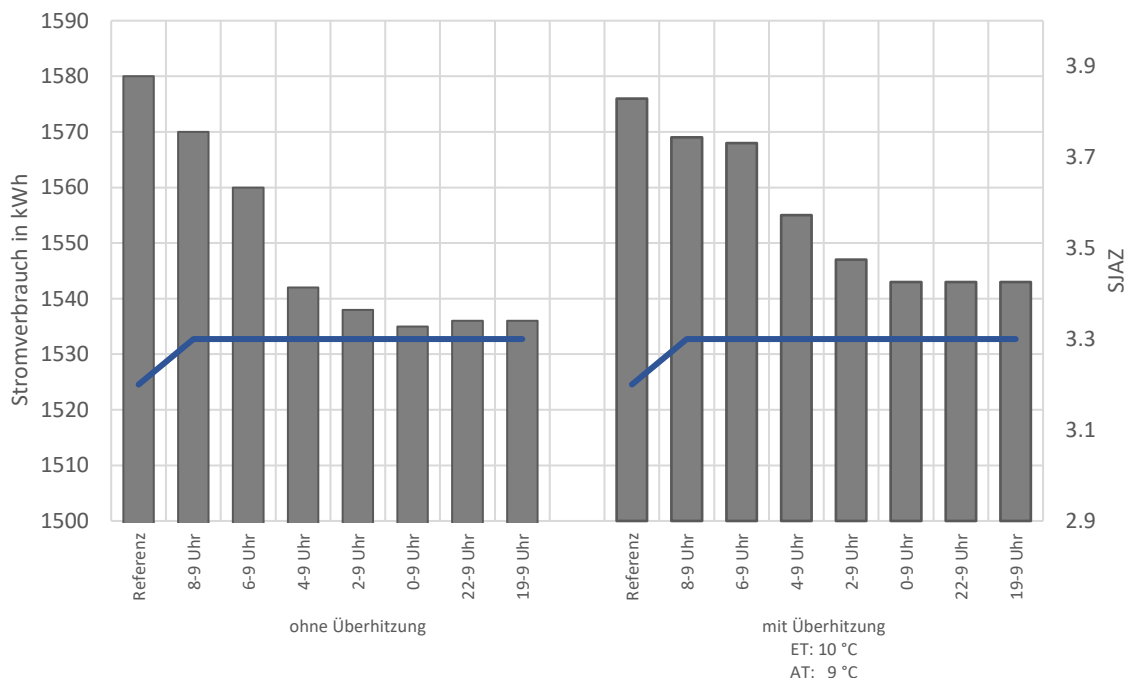


Abbildung 44: Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Beladungssperre des Heizpufferspeichers. Balken, die mit «Referenz» bezeichnet sind, sind ohne Beladungssperre. Die linke Kolonne zeigt das LWWP ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers, die rechte mit Überhitzung.

Durch die Überhitzung des Heizpufferspeichers in Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre kann keine zusätzliche Effizienzsteigerung erzielt werden gegenüber der Varianten

ohne Überhitzung. Im Gegenteil. Durch die Überhitzung ist ohne Beladungssperre eine Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs von 4 kWh zu verzeichnen. Bei dem Sperrzeitraum 08:00 bis 09:00 Uhr beträgt der Unterschied nur noch 1 kWh. Wird die Beladungssperre bei der Kolonne mit Überhitzung dann weiter verlängert, so sinkt die Effizienz gegenüber den Varianten ohne Überhitzung. Es kann somit festgehalten werden, dass eine geringe Effizienzsteigerung durch die Überhitzung des Heizpufferspeichers erreicht werden kann, doch in Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre kann diese Effizienzsteigerung nicht weiter verbessert werden, vielmehr verschlechtert die Effizienz mit zunehmender Sperrdauer.

LWWP_ST

Wie sich die Überhitzung des Kombi-Speichers durch die Solarthermie und der damit verbundenen Erhöhung der Speicher-Maximaltemperatur von 80 °C auf 100 °C in Kombination mit der nächtlichen Beladungssperre auswirkt, wird in der folgenden Abbildung 44Abbildung 45 ersichtlich.

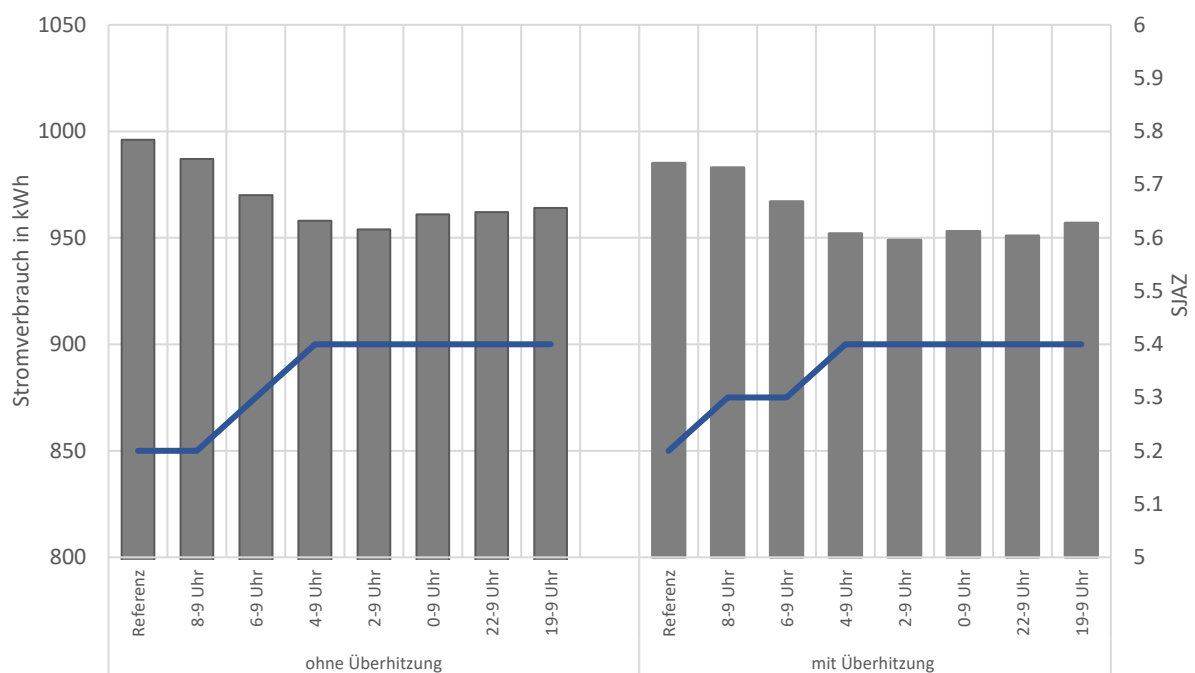


Abbildung 45: Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Beladungssperre des Kombi-Speichers. Balken die mit «Referenz» bezeichnet sind, sind ohne Beladungssperre. Die linke Kolonne zeigt das LWWP ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers, die rechte mit Überhitzung.

Bei genauer Betrachtung der Grafik fällt auf, dass der Stromverbrauch bei allen Varianten mit Überhitzung geringer ausfällt als bei jenen ohne Überhitzung. Diese Verbesserung ist allerdings unabhängig von der nächtlichen Beladungssperre. Vielmehr kann diese auf die Überhitzung des Kombi-Speichers durch die Vakuumröhrenkollektoren zurückgeführt werden. Durch die Überhitzung konnte der solare Deckungsanteil um 1.2 % der Referenz mit Überhitzung gegenüber der Referenz ohne Überhitzung gesteigert werden, was sich in einer Reduktion der jährlichen Stromaufnahme um 11 kWh (1.10 %) zeigt. Somit kann diese Überhitzung eher als

eine Systemoptimierung angesehen werden. Der gewünschte Effekt, die Beladungssperre länger aufrecht zu erhalten ohne den Eingriff der Übersteuerung, sodass eine grössere Last in den Tag verschoben werden kann, wird nicht erreicht.

3.6.6 Kombination Beladungssperre mit einer Nachtabsenkung

Durch die Verbindung einer Nachtabsenkung um 2 K mit der nächtlichen Beladungssperre wurde getestet, ob eine weitere Steigerung der Effizienz möglich ist, im Vergleich zu der Beladungssperre ohne Nachtabsenkung. Wie sich die Nachtabsenkung auf die Systemeffizienz auswirkt, wird in der folgenden Abbildung deutlich.

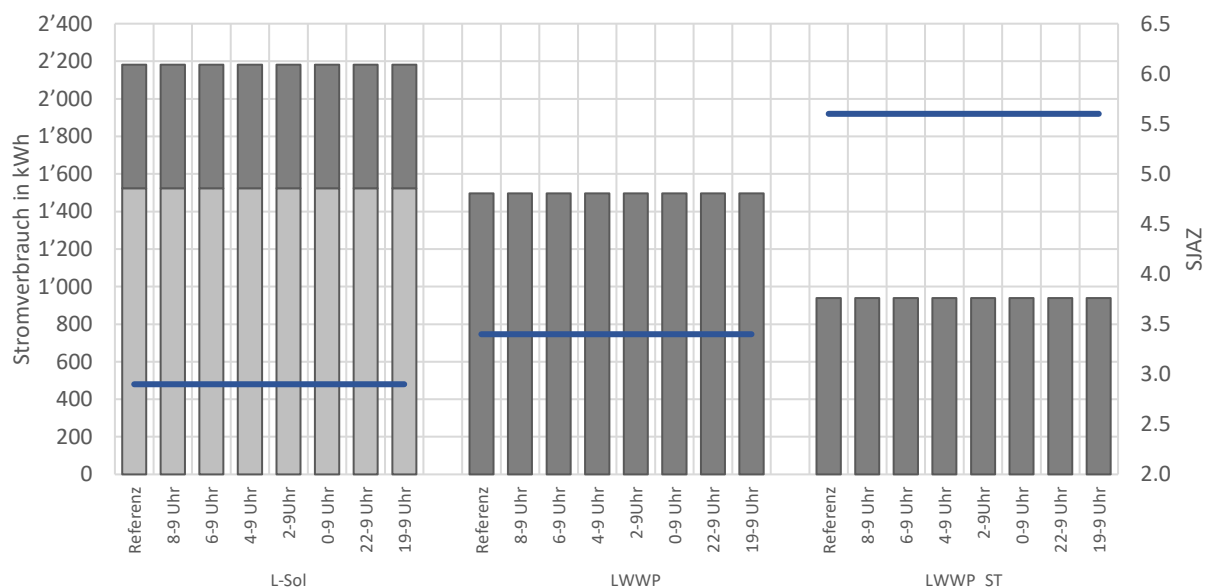


Abbildung 46: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Die Grafik zeigt, dass durch die Kombination der Nachtabsenkung mit der nächtlichen Beladungssperre keine Veränderung der Systemeffizienz eintritt. Dies liegt daran, dass durch die gezielte Temperaturreduktion über die Nacht bereits eine Lastverschiebung stattfindet und somit die Wärmepumpen für die Speisung der Heizkreise nicht aktiv werden müssen. Um 05:00 Uhr beginnt wieder die Anhebung der Gebäudetemperatur auf 20 °C bei allen Varianten gleichermassen. Somit wird der Effekt der Beladungssperre egalisiert. Da die Nachtabsenkung bei Gebäuden mit «schlechterem» Gebäudestandard i.d.R. einen grösseren Effekt zeigt, wurde der Heizwärmebedarf von 3000 kWh/a auf 9000kWh/a erhöht. Doch auch bei diesem Gebäudestandard konnte bei keinem Sperrzeitraum eine Veränderung der Effizienz beobachtet werden.

4 Ergebnisse Simulationsreihe 2

Nachdem in der ersten Simulationsreihe gezeigt werden konnte, dass mit einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei unterschiedlichen Heizsystemen in einem neu-gebauten EFH eine Effizienzsteigerung erzielt werden kann, wird in einer zweiten Simulationsreihe die nächtliche Beladungssperre auf die Einbausituationen Einfamilienhaus sanierter Altbau (EFH_S), Mehrfamilienhaus Neubau (MFH_N) und Mehrfamilienhaus sanierter Altbau (MFH_S) ausgeweitet. Dadurch soll ersichtlich werden, ob durch eine nächtliche Beladungssperre nicht nur für verschiedene Heizsysteme, sondern auch für unterschiedliche Einbausituationen eine Effizienzsteigerung erwirkt werden kann.

4.1 Einfamilienhaus saniert

Neben dem niedrigeren Gebäudestandard hat das EFH_S im Vergleich zum EFH_N Radiatoren anstelle von Fussbodenheizungselementen. Mit den kleineren Wärmeübertragungsflächen geht eine höhere VL-Temperatur einher, um den Wärmebedarf decken zu können. Die Soll-Vorlauftemperatur wurde auf 60 °C festgelegt, die Soll-Rücklauftemperatur beträgt 50 °C. Die Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre ist identisch mit jener des EFH_N. Die Abschaltung der Heizkreispumpe, um zu vermeiden, dass «kaltes» Heizwasser durch den Heizungskreislauf gepumpt wird, wurde ebenfalls bei 25 °C belassen. Es wurden verschiedene Grenztemperaturen getestet, allerdings stieg der jährliche elektrische Energiebedarf des Heizsystems an, wenn auch diese Grenztemperatur angehoben wurde. Die niedrigere Vorlauftemperatur reicht somit aus, die Soll-Gebäudetemperatur länger zu halten. Zudem kühlt der Heizpufferspeicher weiter aus und kann daher mit einer grösseren Energiemenge beladen werden, wenn die Wärmequelle der Wärmepumpe eine höhere Temperatur aufweist. Die Beladungssperre kann länger aufrechterhalten werden, ohne dass die Übersteuerung aktiv wird. Die Stromersparnis durch eine längere Sperrzeit des Heizpufferspeichers ist demnach höher als die Ersparnis, die durch die Abschaltung der Heizkreispumpe erreicht werden kann. Aus der folgenden Abbildung 47 wird ersichtlich, wie sich die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei den drei Heizsystemen im EFH_S verhält.

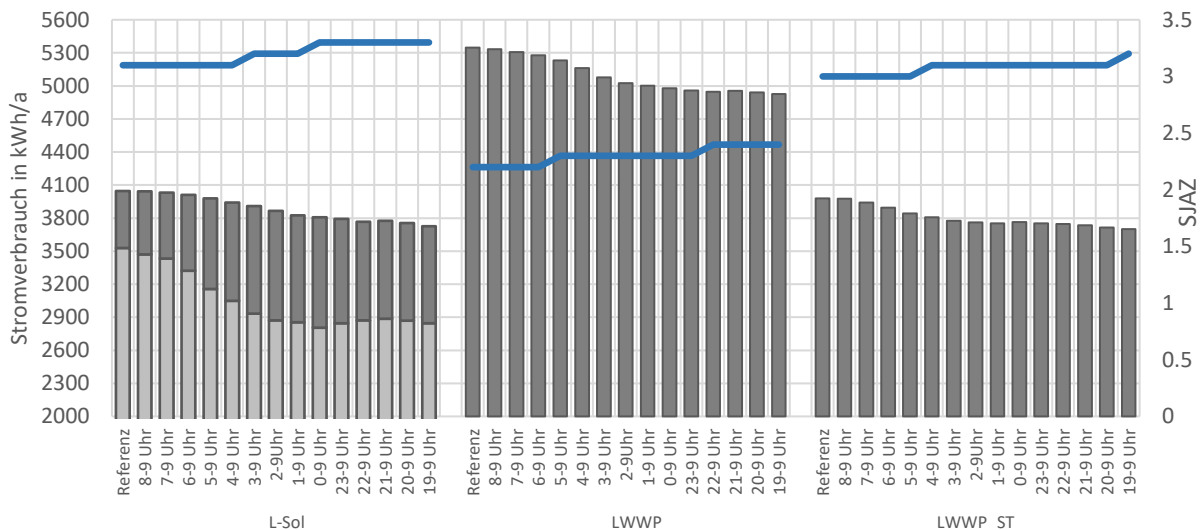


Abbildung 47: Auswertung EFH_S. Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Um zu prüfen, ob die Übersteuerung zuverlässig funktioniert, wurde getestet, ob die Soll-Gebäudetemperatur bei allen simulierten Varianten über das Jahr gehalten werden kann. Durch den niedrigeren Gebäudestandard kommt es beim L-Sol sowie bei LWWP im simulierten Jahr zu häufigen Unterschreitungen der 20 °C. Allerdings liegen diese Unterschreitungen alle im Sommer zwischen Juni und August. In diesem Zeitraum ist der Heizkreis deaktiviert und somit ist die Unterschreitung nicht auf die Beladungssperre zurückzuführen. Innerhalb der Heizperiode kann die Soll-Raumtemperatur durch jedes Heizsystem bei allen simulierten Sperrzeiträumen gewährleistet werden. Aus Abbildung 47 geht hervor, dass auch bei einem weniger gut isolierten Gebäude mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers eine Effizienzverbesserung erreicht werden kann. Wie bereits beim EFH_N ist der Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr jener, bei welchem das L-Sol die geringste jährliche elektrische Stromaufnahme aufweist. Die Einsparung gegenüber der Referenzvariante beläuft sich auf 319 kWh (7.88 %). Der jährliche Eigenverbrauch beträgt bei diesem Sperrzeitraum 881 kWh und der Netzbezug beläuft sich auf 2'846 kWh. Mit 1'008 kWh pro Jahr wird der höchste Eigenverbrauchswert allerdings bei der Sperrdauer 00:00 bis 09:00 Uhr erreicht. Dieser sinkt bei längerer Sperrdauer wieder leicht, da die Beladungssperre häufiger übersteuert werden muss. Dies kann dazu führen, dass die Wärmepumpe beispielsweise im wärmegeführten Betrieb am Abend den Pufferspeicher lädt, wenn noch Abendsonne vorhanden ist, aber dies durch die Beladungssperre verhindert wird und die Übersteuerung in der Nacht aktiv wird, wenn keine Sonne mehr vorhanden ist. Die SJAZ des L-Sol steigt mit Ausdehnung der Beladungssperre an, was auf den sinkenden Stromverbrauch zurückgeführt werden kann.

Beim LWWP ist zu beobachten, dass der Sperrzeitraum, in welchem sich die höchste elektrische Energieersparnis gegenüber der Referenzvariante ergibt, sich im Vergleich zum EFH_N

verschoben hat. Die optimale Sperrdauer mit einer Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs gegenüber der Referenzvariante von 420 kWh (7.85 %) ist beim EFH_S von 19:00 bis 09:00 Uhr. Diese Beobachtung kann auf den grösseren Heizpufferspeicher zurückgeführt werden, wodurch trotz höherem Heizwärmebedarf die Übersteuerung weniger oft eingreifen muss. Mit sinkendem elektrischem Energieverbrauch steigt die SJAZ an. Bei einer Sperre von 19:00 bis 09:00 Uhr um 0.2 gegenüber der Referenzvariante. Generell zeigt sich beim LWWP eine niedrige SJAZ, was mit dem hohen Temperaturhub zu erklären ist, der durch die höhere Heizungsvorlauftemperatur notwendig wird.

Auch beim LWWP_ST kann mit der Einführung einer Beladungssperre des Heizpufferspeichers eine Effizienzsteigerung erreicht werden. Auf Abbildung 47 ist deutlich zu erkennen, dass der jährliche Stromverbrauch mit Ausdehnung der Beladungssperre sinkt und die SJAZ ansteigt. Wie beim LWWP kann beobachtet werden, dass sich der Sperrzeitraum, in dem das LWWP_ST am effizientesten arbeitet, gegenüber dem Betrieb im EFH_N verschoben hat. Ebenfalls beim LWWP_ST ist 19:00 bis 09:00 Uhr der idealste Sperrzeitraum in Bezug auf die Systemeffizienz. Der jährliche Stromverbrauch kann dabei um 279 kWh gesenkt und die SJAZ um 0.2 gesteigert werden gegenüber der Referenzvariante. Die Verschiebung des optimalen Sperrzeitraums kann ebenfalls auf das vergrösserte Speichervolumen zurückgeführt werden.

Durchweg kann festgehalten werden, dass durch die Einführung einer nächtlichen Beladungssperre die Effizienzsteigerung bei dem EFH_S höher ausfällt als beim EFH_N, was auf die grössere Lastverschiebung zurückzuführen ist. Die wichtigsten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 14 zusammengefasst.

	L-Sol 19-9 Uhr	LWWP 19-9 Uhr	LWWP_ST 19-9 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	319	420	279
Δ el. Energie [%]	7.88	7.85	7.01
Δ SJAZ [-]	0.2	0.2	0.2
Δ Netzbezug [kWh]	364	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	-683	-	-

Tabelle 14: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre für das EFH_S.

4.2 Mehrfamilienhaus Neubau

Ebenso wie beim EFH_N und EFH_S wurde zuerst geprüft, ob die Übersteuerung zuverlässig funktioniert und somit die Ergebnisse nicht durch die Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur mit zunehmender Sperrdauer verfälscht werden. Bei der Prüfung konnte festgestellt werden, dass in keiner Stunde des simulierten Jahrs bei sämtlichen simulierten Varianten die Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C unterschritten wurde. Wie sich eine Beladungssperre für

einen Heizpufferspeicher auf die Effizienz verschiedener Heizsysteme in einem neugebauten Mehrfamilienhaus auswirkt, wird mit der folgenden Abbildung 48 veranschaulicht.

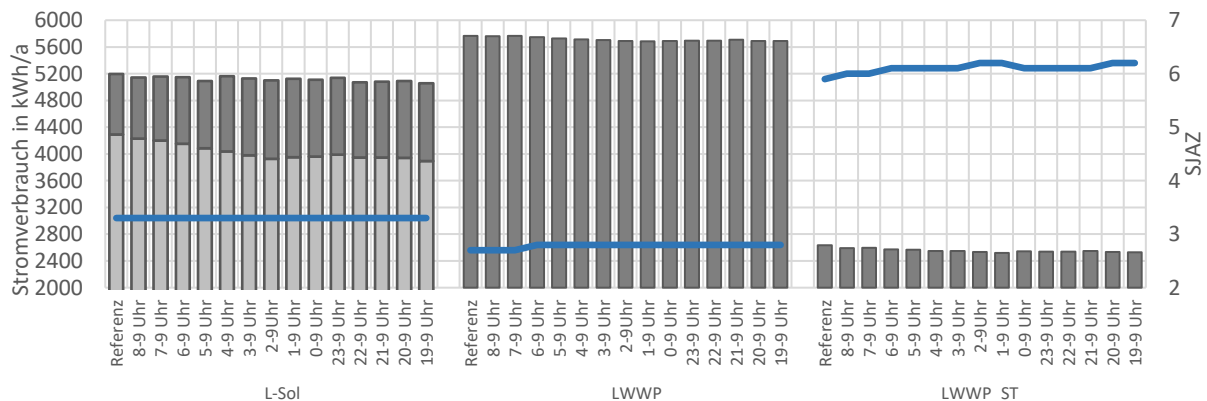


Abbildung 48: Auswertung MFH_N. Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Beim Blick auf den Verlauf der SJAZ und den jährlichen elektrischen Energieverbrauch ist nicht sofort zu erkennen, dass beim MFH_N mit dem L-Sol sowie dem LWWP durch die nächtliche Beladungssperre eine Effizienzsteigerung dieser Heizsysteme erzielt werden konnte. Beim LWWP_ST hingegen kann man eine deutliche Steigerung der SJAZ mit anwachsendem Sperrzeitraum erkennen. Bei genauerer Betrachtung fällt allerdings auf, dass beim L-Sol durch die Beladungssperre eine jährliche Reduktion des Stromverbrauchs erzielt werden kann, welche bei der Sperrdauer von 19:00 bis 09:00 Uhr mit 136 kWh (2.62 %) gegenüber der Referenz am höchsten ausfällt. Da diese Reduktion im Verhältnis zum gesamten Stromverbrauch relativ gering ausfällt, reicht es nicht aus, die SJAZ sichtlich zu verbessern. Zudem ist beim L-Sol eine Verschiebung von Netzbezug und Eigenverbrauch zu erkennen. Bei einer Beladungssperre von 19:00 bis 09:00 Uhr ist der Anteil des eigenverbrauchten PV-Stroms mit 1166 kWh (23.05 %) gemessen am gesamten jährlichen Stromverbrauch am höchsten. Bei der Referenzvariante des L-Sol können hingegen nur 904 kWh (17.04 %) des gesamten Stromverbrauchs durch eigenproduzierten PV-Strom gedeckt werden. In absoluten Zahlen kann mit 1'176 kWh bei einem Sperrzeitraum von 01:00 bis 09:00 Uhr der höchste Eigenbedarf verzeichnet werden.

01:00 bis 09:00 Uhr kann beim LWWP als der Sperrzeitraum genannt werden, bei welchem dieses Heizsystem über das simulierte Jahr am effizientesten arbeitet. Die Ersparnis des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs im Vergleich zur Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre beläuft sich auf 84 kWh (1.46 %) und die SJAZ kann bei gleichem Sperrzeitraum um 0.1 verbessert werden. Verlängert man den Sperrzeitraum weiter, so steigt der jährliche Stromverbrauch wieder leicht an, bis er sich aufgrund der Übersteuerung stabilisiert. Wie der leichte Anstieg zustande kommt, konnte nicht abschliessend ausgemacht werden.

Das LWWP_ST profitiert im MFH_N am deutlichsten von der nächtlichen Beladungssperre. Bei einer Sperrdauer von 01:00 bis 09:00 Uhr können jährlich 117 kWh (4.44 %) gegenüber der Referenzvariante eingespart werden. Dies zeigt sich auch in einer Verbesserung der SJAZ, die bei dieser Sperrdauer gegenüber der Referenz von 5.9 auf 6.3 ansteigt. Der Grund, dass das LWWP_ST gegenüber den beiden anderen Systemen eine über doppelt so hohe Ersparnis im Verhältnis zum gesamten Stromverbrauch hat, kommt aufgrund der verhältnismässig grosszügig ausgelegten Fläche der Solarthermie-Kollektoren zustande. Durch die Wärme, die mithilfe der Vakuumröhrenkollektoren gesammelte und direkt in den Kombi-Speicher eingebracht wird, gelingt es bereits vor 09:00 Uhr, den «abgekühlten» Kombispeicher zu erwärmen bzw. vorzuwärmen, sodass ein grösserer Teil der benötigten Wärme durch Solarthermie gedeckt werden kann.

Wenn man die prozentuale Stromersparnis betrachtet, die durch die Beladungssperre verursacht wird, kann für alle drei Heizsysteme im MFH_N festgehalten werden, dass der Effekt der nächtlichen Beladungssperre nicht so deutlich wie beim EFH_S ausfällt. Dies liegt an dem niedrigeren Temperaturhub und somit der geringeren Last, die durch die Sperre verschoben wird. Die wichtigsten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 15 zusammengefasst.

	L-Sol 19-9 Uhr	LWWP 1-9 Uhr	LWWP_ST 1-9 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	136	84	117
Δ el. Energie [%]	2.62	1.46	4.44
Δ SJAZ [-]	0.0	0.1	0.4
Δ Netzbezug [kWh]	-398	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	262	-	-

Tabelle 15: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre für das MFH_N.

4.3 Mehrfamilienhaus saniert

Wie bei den vorrausgegangenen Simulationen wurde auch beim MFH_S geprüft, ob die Übersteuerung für alle drei Heizsysteme zuverlässig funktioniert. Dies trifft für das LWWP und das LWWP_ST zu. Zwar wird beim LWWP die Soll-Gebäudetemperatur unterschritten, doch diese Unterschreitungen sind alle im Monat Juni zu verorten und somit ausserhalb der Heizperiode und damit nicht auf die Beladungssperre zurückzuführen. Dass es überhaupt zu Unterschreitungen kommt, ist damit zu erklären, dass das Gebäude an kühlen Nächten im Juni aufgrund des niedrigen Gebäudestandards sowie der geringeren Speicherkapazität der Radiator gegenüber einer Fussbodenheizung schneller auskühlt als beispielsweise das MFH_N. Da beim LWWP_ST im Sommer der Kombi-Speicher mit ausreichend Wärme über die Solarthermie-Kollektoren versorgt wird, kommt es im ganzen Jahr zu keiner Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur. Anders ist es beim L-Sol, hier kommt es bereits in der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers während der Heizperiode an neun

Stunden zu einer Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur um 0.1 °C. Dies liegt daran, dass im Kaltwasserspeicher die Temperatur von -14.5 °C unterschritten wird, welche als untere Grenztemperatur für den Betrieb der Sole/Wasser-Wärmepumpe definiert wurde. Bei einer Beladungssperre von 19:00 bis 09:00 Uhr steigt die Anzahl der Stunden auf 20, an welchen die Soll-Gebäudetemperatur während der Heizperiode nicht gehalten werden kann. Zwar wird das im Speicher verbaute Elektroheizelement aktiv, wenn die untere Grenztemperatur im Kalt-speicher unterschritten wird und die Gebäudetemperatur unter die Soll-Gebäudetemperatur fällt, doch dauert es aufgrund der Gebäudemasse eine gewisse Zeit, bis die Temperatur im Gebäude wieder angehoben werden kann. Durch die Beladungssperre kommt es zu einer stärkeren Auskühlung des Gebäudes, im Vergleich zur Referenz, weshalb die Soll-Gebäudetemperatur früher unterschritten wird und es auch länger dauert, bis die Soll-Gebäudetemperatur wieder erreicht wird, als bei der Referenzvariante ohne Beladungssperre. Um die Varianten dennoch vergleichen zu können, wird das entstehende Energiedefizit der Varianten mit Sperre, welches durch die längere Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur gegenüber der Referenzvariante entsteht, zum jährlichen Netzbezug addiert. Das von Polysun ausgewiesene Energiedefizit beschreibt die Differenz zwischen der von den Verbrauchern angeforderten Energie zur effektiv bezogenen Energie (Vela Solaris AG, 2019). Die Defizite, die aufgrund der Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur entstehen, bewegen sich in einer Grössenordnung unter einer kWh.

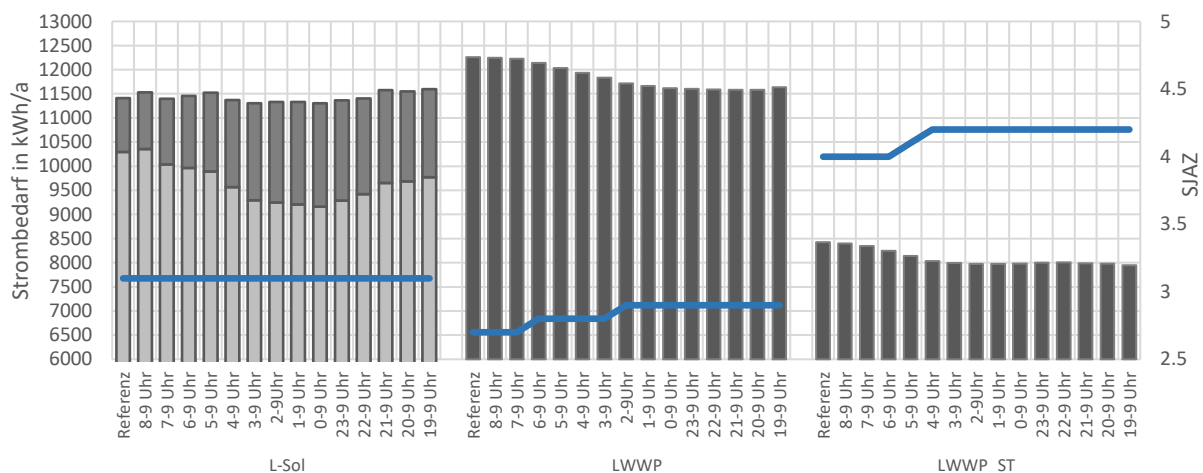


Abbildung 49: Auswertung MFH_S. Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.

Bei Betrachtung des L-Sol stellt man fest, dass der jährliche elektrische Energieverbrauch, durch Verlängerung der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers tendenziell sinkt aber gewisse Schwankungen aufweist. Besonders auffällig ist der Anstieg des jährlichen Stromverbrauchs bei einer Sperrdauer von 08:00 bis 09:00 Uhr. Bei einer detaillierten Unter-

suchung konnte nicht abschliessend geklärt werden, wie diese Schwankungen zustande kommen. Die Schwankungen fallen allerdings so gering aus, dass sich diese nicht in einer Veränderung der SJAZ auswirken. Bei dem jährlichen Netzbezug sowie dem Eigenverbrauch lässt sich hingegen ein klarer Trend erkennen. Der Netzbezug sinkt mit Ausdehnung der Beladungssperre, bis er bei einer Sperrdauer von 23:00 bis 09:00 Uhr, bedingt durch den vermehrten Eingriff der Übersteuerung, wieder beginnt zu steigen. Umgekehrt verhält es sich mit dem Eigenverbrauch. Der effizienteste Sperrzeitraum ist somit von 00:00 bis 09:00 Uhr. Der jährliche Stromverbrauch ist bei dieser Sperrzeit 105 kWh (0.92 %) geringer als bei der Referenzvariante. Der Netzbezug verringert sich bei diesem Sperrzeitraum um 1'134 kWh (9.94 %) und der Eigenverbrauch erhöht sich um 1'029 kWh (92.45 %), was fast einer Verdopplung gegenüber der Referenz entspricht. Dass die Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs eher gering ausfällt, liegt an der Dimensionierung des Kaltspeichers. Um den ausgekühlten Heizpufferspeicher wieder auf die gewünschte Soll-Temperatur anzuheben, läuft die Wärmepumpe zum Teil mehrere Stunden. Dadurch sinkt die Temperatur im Kaltspeicher stark ab und kann durch den langen Betrieb der Wärmepumpe nur langsam wieder angehoben werden. Dies macht sich vor allem bei einer langen Sperrdauer bemerkbar, da die Übersteuerung vermehrt eingreifen muss, wenn die Aussentemperatur niedrig ist. Dies führt sogar zu einem Anstieg des Stromverbrauchs gegenüber der Referenzvariante. Wird das Kaltspeichervolumen von 2200 l auf 4400 l verdoppelt, so kann beispielsweise bei einer Sperrdauer von 00:00 bis 09:00 Uhr der jährliche Stromverbrauch um 507 kWh (4.44 %) gesenkt werden, bei einer Sperrdauer von 00:00 bis 09:00 Uhr sogar um 539 kWh (4.72 %).

Beim LWWP ist zu beobachten, dass bei Ausdehnung der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers eine deutliche Reduktion des jährlichen Stromverbrauchs gegenüber der Referenzvariante einhergeht. Ab einer Sperrdauer von 02:00 bis 09:00 Uhr schwächt sich dieser Effekt ab, bis der Stromverbrauch ab einer Sperre von 20:00 bis 09:00 Uhr sogar wieder leicht ansteigt. Der Anstieg ist allerdings so gering, dass er sich nicht sichtlich auf die SJAZ auswirkt. Bei einer detaillierten Betrachtung konnte festgestellt werden, dass der Anstieg in den Monaten März und Mai zu verorten ist und damit begründet werden kann, dass in diesen Monaten die Luft/Wasser-Wärmepumpe durch die frühe Sperrung in den Abendstunden die Übersteuerung vermehrt dann aktiv wird, um den Heizpufferspeicher zu laden, wenn die Umgebungsluft die Tagestiefsttemperatur erreicht hat. Den niedrigsten jährlichen Stromverbrauch hat das LWWP bei einer Beladungssperre von 21:00 bis 09:00 Uhr. Gegenüber der Referenzvariante beträgt die Reduktion bei diesem Sperrzeitraum 677 kWh (5.52 %).

Das LWWP_ST zeigt ebenfalls eine deutliche Reduktion des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs mit Ausdehnung der Beladungssperre des Heizpufferspeichers. Bei einer Sperrdauer von 19:00 bis 09:00 Uhr fällt die Ersparnis mit 468 kWh (5.67 %) verglichen mit der Referenz am höchsten aus. Sichtbar ist, dass der stärkste Effekt bis zu einem Sperrzeitraum von

04:00 bis 09:00 Uhr zu beobachten ist. Durch vermehrten Eingriff der Übersteuerung schwächt sich dieser danach ab, was sich auch in der SJAZ widerspiegelt.

Es lässt sich festhalten, dass ähnlich wie beim EFH_S, der Einfluss der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers deutlicher an den Stromverbräuchen zu erkennen ist als beim EFH_N sowie MFH_N. In der nachfolgenden Tabelle 16 sind die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen für das MFH_S zusammengetragen.

	L-Sol 0-9 Uhr	LWWP 21-9 Uhr	LWWP_ST 19-9 Uhr
Δ el. Energie [kWh]	105	677	468
Δ el. Energie [%]	0.92	5.52	5.67
Δ SJAZ [-]	0	0.2	0.2
Δ Netzbezug [kWh]	-1'134	-	-
Δ Eigenverbrauch [kWh]	1'029	-	-

Tabelle 16: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre für das MFH_S.

4.4 Ergebnisübersicht

Wie hoch die Stromersparnis gegenüber der jeweiligen Referenzvariante bei dem ideal ermittelten Sperrzeitraum für die Gebäudemodelle ausfällt, wird in der Abbildung 50 für das L-Sol, LWWP und LWWP_ST dargestellt.

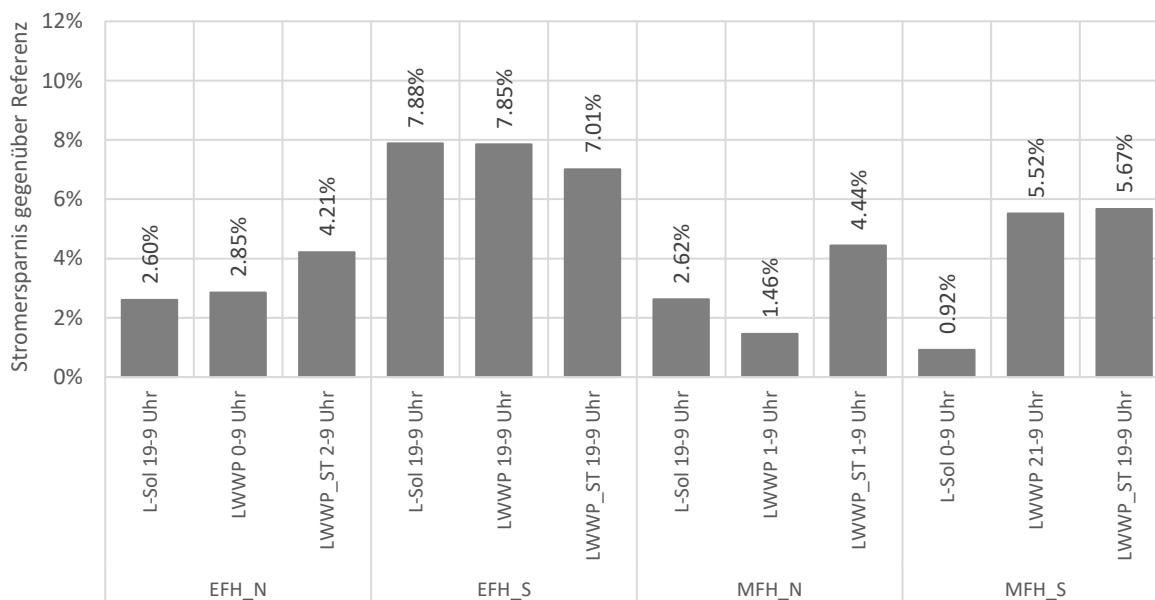


Abbildung 50: Einsparung an elektrischer Energie bei idealem Sperrzeitraum in Prozent pro Heizsystem und Gebäudekategorie gegenüber der jeweiligen Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers.

Die Grafik zeigt, dass bei jedem Heizsystem sowie den unterschiedlichen Einbausituationen eine Effizienzsteigerung durch die Einführung einer Beladungssperre erzielt werden konnte. Ferner erkennt man, dass in den sanierten Gebäuden die höchsten Einsparungen erreicht

werden konnten. Jedoch konnte keine klare Reihenfolge der Heizsysteme ausgemacht werden. Die Ergebnisse sind hierfür zu heterogen.

5 Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob durch die Einführung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers und der damit einhergehenden Lastverschiebung des Wärmeerzeugers in den Tag ein positiver Einfluss auf die Systemeffizienz erreicht werden kann, ohne den Komfort zu beeinträchtigen. Hierfür wurde die Beladungssperre an drei unterschiedlichen Heizsystemen, für vier verschiedene Einbausituationen simuliert. Durch die Simulationen konnte gezeigt werden, dass eine Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei den betrachteten Heizsystemen zu einer Effizienzsteigerung führte. Durch die statistischen Vergleiche konnte dargestellt werden, dass die Wärmequellen der drei Heizsysteme durch die nächtliche Beladungssperre durchschnittlich anstiegen, was sich letztlich in einem effizienteren Betrieb der Heizsysteme äusserte. Somit können die drei in der Einleitung aufgeführten Hypothesen verifiziert werden, in welchen eine Effizienzsteigerung durch die Einführung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers für jedes der Heizsysteme prognostiziert wurde.

Es wurden verschiedene Herangehensweisen für die Ermittlung des idealen Sperrzeitraums getestet. Dabei zeigte sich, dass ein fixer Endzeitpunkt am Morgen (09:00 Uhr) und von diesem ausgehend eine Ausdehnung in die Nacht die besten Resultate hervorbrachte. Jedoch konnte kein «idealer» Startzeitpunkt ermittelt werden, der für alle Heizsysteme sowie Einbausituationen gleichermaßen die höchste Systemverbesserungen bringt. Dies bedeutet für eine etwaige Umsetzung in der Praxis, dass der Sperrzeitraum individuell ermittelt werden muss. Ein zu langer oder kurzer Sperrzeitraum kann in Ausnahmefällen dazu führen, dass die Systemeffizienz sogar verschlechtert wird wie beispielsweise in Abbildung 49. Eine Ausnahme bildete das LWWP, welches eine leicht höhere Effizienzsteigerung (4 kWh/a) bei einem fixen Sperrzeitraum von 05:00 bis 11:00 Uhr gegenüber einem fixen Endzeitpunkt erreichte. Da die Unterschiede gering ausfielen und es sich dabei um keine nächtliche Beladungssperre im eigentlichen Sinn handelt, wurde der fixe Sperrzeitraum beim LWWP nicht weiterverfolgt. Dieser Ansatz könnte in weiterführenden Untersuchungen der Beladungssperre des Heizpufferspeichers aufgegriffen werden.

Es hat sich gezeigt, dass eine Übersteuerung der Beladungssperre, die bei Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem in den Normalbetrieb versetzt, unerlässlich ist, um die Gebäudetemperatur konstant zu halten.

Bei der Prüfung von verschiedenen Sensitivitäten der nächtlichen Beladungssperre, durch Variation einzelner Variablen der Heizsysteme, konnte festgestellt werden, dass die Heizsysteme ähnlich auf die Veränderungen reagierten. So zeigte sich bei einer Erhöhung der Heizungsvor- / Rücklauftemperatur ein steigender Stromverbrauch bei allen drei Heizsystemen. Jedoch führt

das höhere Temperaturniveau im Heizkreis zu einer Verdeutlichung des Effektes der Beladungssperre, sprich der Einfluss der Beladungssperre nimmt zu. Gleiches konnte bei einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs beobachtet werden. Dadurch kann auch begründet werden, dass die Effizienzsteigerung bei der Einbausituation eines sanierten Einfamilienhauses bei allen drei Heizsystemen am deutlichsten ausfällt, gefolgt von der Einbausituation eines sanierten Mehrfamilienhauses. Eine Ausnahme bildet das L-Sol, bei welchem die Effizienzsteigerung beim sanierten Mehrfamilienhaus aufgrund des relativ kleinen Kaltspeichers gering ausfällt. Auch für die beiden Neubauobjekte konnte durch die Einführung einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers bei den drei betrachteten Heizsystemen eine Effizienzsteigerung erreicht werden, doch fällt diese geringer aus. Somit eignen sich Bestandsgebäude für eine nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers besonders gut. Neben einem verhältnismässig niedrigen Gebäudestandard zeichnen sie sich, bedingt durch Radiatoren, durch hohe Heizungsvor- bzw. Rücklauftemperaturen aus. Bei einem Ersatz des Heizsystems könnte im gleichen Zug die nächtliche Beladungssperre programmiert werden.

Durch eine Vergrösserung des Heizpufferspeichers bzw. Kombi-Speichers konnte beim LWWP_ST eine deutliche Effizienzsteigerung in Verbindung mit der Beladungssperre erreicht werden. Beim L-Sol und LWWP konnte keine Verbesserung verzeichnet werden. Allerdings hat dies einen eher geringen Einfluss auf eine praktische Umsetzung der Beladungssperre, da das Speichervolumen bei Bestandsanlagen nur kostspielig erweiterbar ist. Bei Neuanlagen könnte dieser Punkt allerdings Berücksichtigung finden.

Eine Kombination der Beladungssperre mit einer Nachtabsenkung oder einer Überhitzung des Heizpufferspeichers zeigte bei den betrachteten Heizsystemen keine oder keine zusätzliche Effizienzsteigerung. Wie die Simulation ohne Übersteuerung (Abbildung 7) ergab, konnte die durch die Beladungssperre verursachte Effizienzsteigerung weiter gesteigert werden, wenn eine geringe Unterschreitung der Soll-Gebäudetemperatur, um rund 0.3 °C, toleriert wurde.

Im Unterschied zu einer Nachtabsenkung konnte durch die nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers die Effizienz der Heizsysteme gesteigert werden, ohne die Soll-Gebäudetemperatur in der Heizperiode abzusenken. Somit eignet sich die nächtliche Beladungssperre für Praxisanwendungen besonders gut, wo es auf konstante Temperaturen ankommt. Denkbar wäre beispielsweise die Verwendung in Bibliotheken oder Museen, die neben einer konstanten Luftfeuchtigkeit auch eine möglichst gleichbleibende Raumtemperatur benötigen.

Das Institut für Gebäude Energetik der Universität Stuttgart konnte im Rahmen seiner Arbeit «Regelstrategien zum Verbessern der Jahresarbeitszahl von Luft- und Wasser-Wärmepumpen» in einem Gebäude, welches mit dem EFH_N zu vergleichen ist, ähnliche Resultate hervorbringen. So zeigten sie, dass bei einem Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und einer Sperre von 17:00 bis 11:00 Uhr eine jährliche Stromersparnis gegenüber einer Referenz

ohne Sperre bis zu 2.78 % erreicht werden konnte. Ebenso stellten sie eine Erhöhung der durchschnittlichen Aussentemperatur während des Wärmepumpenbetriebs fest, welche zwischen 0.08 °C und 0.39 °C höher als bei der Referenz ohne Sperre ausfiel (Schmidt et al., 2010). Die Temperaturunterschiede fielen beim LWWP im EFH_N mit 0.96 °C sogar deutlich höher aus.

Auch die Ergebnisse des Berichts «L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe» der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften decken sich weitgehendst mit jenen dieser Arbeit. So zeigte der Bericht, dass bei einem L-Sol Heizungssystem in einem EFH durch die Einführung einer Beladungssperre des Heizpufferspeichers von 00:00 bis 09:00 Uhr eine jährliche Stromersparnis von rund 5 % erreicht wird. Zudem konnte der Netzbezug um 23 % gesenkt werden (Sauter et al., 2019; Schmidt et al., 2010). Zwar wurden die besten Resultate für das L-Sol in dieser Arbeit für die beiden Einfamilienhäuser bei einer längeren Sperrzeit (19:00 bis 09:00 Uhr) erreicht, doch konnten jährliche Ersparnisse des elektrischen Energieverbrauchs von 2.60 % (EFH_N) und 7.88 % (EFH_S) erreicht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ebenfalls beobachtet, dass der Netzbezug durch die Beladungssperre beim L-Sol sinkt. Im EFH_N um 10.91 % und beim EFH_S um 19.35 %.

Die durch die Beladungssperre erzielten Energieeinsparungen konnten ohne Veränderung der Hydraulik bzw. Installationen erreicht werden. Es handelt sich lediglich um Eingriffe in der Steuerung. Die in dieser Arbeit getestete Beladungssperre mit Übersteuerung bzw. fail-safe-mechanismus ist mit einer Wärmepumpe, welche über eine SG-Ready-Steuerung verfügt, unkompliziert abzubilden. Somit lässt sich die zwar relativ geringe Effizienzsteigerung einfach umsetzen.

Bei den vorgestellten Resultaten handelt es sich um Simulationen, die nicht die gesamte Komplexität einer echten Einbausituation widerspiegeln. Für die Simulationen in der vorliegenden Arbeit wurde das «Quasi-dynamische» Simulationsmodell zugrunde gelegt. Es handelt sich hierbei um ein eher träges Modell. Für weiterführende Untersuchungen empfiehlt es sich daher, weitere Simulationsmodelle oder auch andere Simulationsprogramme zu verwenden sowie letztlich Versuche an realen Einbausituationen durchzuführen.

Ausblick

Die Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche hat beim L-Sol und LWWP_ST gezeigt, dass sich eine grössere Heizungsfläche in Verbindung mit der nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers positiv auf die Energieeffizienz des Heizsystems auswirkt. Bei Gebäuden mit Aktivbauteilen oder einer hohen Eigenmasse könnten daher noch höhere Energieersparnisse erzielt werden. Vor dem Hintergrund, dass auch Heizsysteme ohne Heizpuffer in

Verbindung mit Flächenheizelementen in der Praxis zur Anwendung kommen, wäre die Wirkung einer Beladungssperre der Flächenheizungen, welche als Speicher fungieren, interessant.

Bei weiterführenden Untersuchungen der Beladungssperre könnte der Einfluss des Klimawandels auf die Sperre untersucht werden, indem beispielsweise für die Simulationen ein Standort mit höheren Durchschnittstemperaturen gewählt wird.

Durch die Erweiterung der nächtlichen Beladungssperre auf den BWW-Speicher könnte die Effizienz ggf. noch weiter gesteigert werden. Dies wäre vor allem für Immobilien vorstellbar, bei welchen aufgrund ihrer Nutzungsart der BWW-Bedarf auf den Tag eingegrenzt werden kann, wie z.B. bei Schulen, Büros, Verwaltungen oder Betrieben mit Tagesproduktion.

In Rahmen dieser Arbeit wurde der Fokus auf die Effizienzsteigerung gelegt. In einer weiterführenden Untersuchung sollte geprüft werden, ob sich die Lastverschiebung auch aus wirtschaftlicher Sicht empfiehlt, oder ob es durch die unterschiedlichen Tarife in der Nacht bzw. am Tag wirtschaftlich unattraktiv ist. Sollte sich die Beladungssperre neben der Energieersparnis auch wirtschaftlich für den Betreiber rechnen, so könnte dies als ein weiteres Argument für die Etablierung der nächtlichen Beladungssperre angeführt werden.

6 Literaturverzeichnis

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Malenkovic, I., Pärtsch, P., Institut für Solarenergieforschung Hameln GmbH, Eicher, S., Bony, J., Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Hartl, M., & AIT Austrian Institute of Technology GmbH. (2013). *Definition of Main System Boundaries and Performance Figures for Reporting on SHP Systems*. IEA Solar Heating and Cooling Programme.

<https://doi.org/10.18777/ieashc-task44-2013-0009>

BAFU. (2018, August 21). *Das Übereinkommen von Paris*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/klima--internationales/das-uebereinkommen-von-paris.html>

BAFU. (2019a). *Emissionen von Treibhausgasen nach revidiertem CO₂-Gesetz und Kyoto-Protokoll, 2. Verpflichtungsperiode (2013–2020)* (p. 23).

BAFU. (2019b, August 28). *Bundesrat will bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz*. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-76206.html>

BAFU. (2019c, August 28). *Klimaziel 2050*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/klimaziel-2050.html>

Benthin, J., Hagemeyer, A., Heyer, A., Huismann, P., Krassowski, J., Settgest, C., Wortmann, B., & Görner, K. (2020). *Integrierte Betrachtung von Strom-, Gas- und Wärmesystemen zur modellbasierten Optimierung des Energieausgleichs- und Transportbedarfs innerhalb der deutschen Energienetze* (p. 141) [Abschlussbericht].

BFE. (2000). *Merkblatt Dimensionierung von Wärmepumpen*.

BFE. (2018). *Energiestrategie 2050 nach dem Inkrafttreten des neuen Energiegesetzes*.

BFE. (2019). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018*.

- BFE. (2020, March 16). *Was ist die Energiestrategie 2050?* <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050/was-ist-die-energiestrategie-2050.html>
- BFS. (2019). *Bau- und Wohnungswesen 2017: Bau- und Wohnbaustatistik 2017; Gebäude- und Wohnungsstatistik 2017; Leerwohnungstatistik vom 1. Juni 2018.*
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2019). *Leitfaden Hydraulik. BWP.*
- Bundesverband Wärmepumpen e.V. (2018). *SG Ready-Label.* <https://www.waermpumpe.de/normen-technik/sg-ready/>
- Deutscher Wetterdienst. (2012). *Tiefsttemperaturen der Nacht. Immer der wirkliche Tiefstwert?* Wetterdienst.de. https://www.wetterdienst.de:443/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/512/tiefsttemperaturen-der-nacht-immer-der-wirkliche-tiefstwert
- Dott, R., Genkinger, A., Kobler, R., Alimpic, Z., Hubacher, P., Afjei, T., & FAKTOR Verlag AG. (2018). *Wärmepumpen Planung, Optimierung, Betrieb, Wartung.*
- Dr. Zenhäusern, D., Bamberger, E., & Baggenstos, A. (2017). *PVT Wrap-Up* [Schlussbericht].
- FWS. (2020). *FWS Statistik 2019.* Fachverband Wärmepumpen Schweiz.
- Heße, W. (2020). *Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden: Tatsächliche Versorgungsverhältnisse und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.* Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27571-6>
- Kemmler, A., & Spillmann, T. (2019). *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2018 nach Verwendungszwecken.*
- Kunze, R. (2016). *Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäudemodernisierungen: Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell auf Basis einer vollständigen Finanzplanung.* KIT Scientific Publishing.

- Oberzig, K. (2014). *Solarwärme Heizen mit der Sonne*. Stiftung Warentest. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201410122962>
- Quaschnig, V. (2015). *Regenerative Energiesysteme* (9th ed.). Carl Hanser Verlag.
- Recknagel, H., Albers, K.-J., & Sprenger, E. (Eds.). (2018a). *Band 1: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik* (79. Auflage, 2019/2020).
- Recknagel, H., Albers, K.-J., & Sprenger, E. (Eds.). (2018b). *Band 2: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik* (79. Auflage, 2019/2020).
- Röhrenbeck, S. E. A. (2019). *Wärmepumpen und Speichersysteme als Flexibilitäten im Kontext des Zellularen Ansatzes*.
- Sauer, A., & Bauernhansl, T. (Eds.). (2016). *Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie: Analyse und Empfehlungen* (2., aktualisierte Auflage). Springer Vieweg.
- Sauter, D., Hunziker, M., Schubert, M., Sperr, N., & Rohrer, J. (2019). *L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe* (p. 82) [Schlussbericht].
- Schlossig, P., & Hausmann, T. (2011). *Wärme- und Kältespeicherung-Stand der Technik und Ausblick*. LIFIS ONLINE.
- Schmid, E., & Pröll, T. (Eds.). (2020). *Umwelt- und Bioressourcenmanagement für eine nachhaltige Zukunftsgestaltung*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60435-9>
- Schmidt, M., Arold, J., & Kimke, K. (2010). *Regelstrategien zum Verbessern der Jahresarbeitszahl von Luft- und Wasser-Wärmepumpen*.
- SIA (Ed.). (1982). *SIA 381/3: Heizgradtage der Schweiz*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich.
- SIA. (2007). *SIA 384.348 Bauwesen: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich.

- SIA (Ed.). (2009). *380/1:2009 Bauwesen: Thermische Energie im Hochbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich.
- SIA (Ed.). (2015a). *2028-C1:2015 Bauwesen: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik – Korrigenda C1 zu SIA 2028:2015*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich.
- SIA (Ed.). (2015b). *SIA 2024:2015 Bauwesen: Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich.
- SIA (Ed.). (2017). *SIA 384.201 Bauwesen: Energetische Bewertung von Gebäude – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1_ Raumheizlast, Modul M3-3*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich.
- Spitalny, L., Diekerhof, M., & Myrzik, J. M. A. (2013). *Potential und Effizienzbetrachtung beim Lastmanagement von Wärmepumpen im Sektor der privaten Haushalte*.
- Sterner, M., & Stadler, I. (2014). *Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Vieweg.
- United Nations. (2020a). *United Nations Treaty Collection*. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en
- United Nations. (2020b). *What is the Paris Agreement? | UNFCCC*. <https://cop23.unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>
- VDE, VDI, & GFPE. (1987). *Zentrale und dezentrale Energieversorgung VDE/VDI/GFPE-Tagung in Schliersee am 7./8. Mai 1987*. Springer Berlin Heidelberg. <http://www.springerlink.com/content/978-3-642-52288-8>
- Vela Solaris. (2020, April 6). Polysun Software. *Vela Solaris*. <https://www.velasolaris.com/polysun/>
- Vela Solaris AG (Ed.). (2019). *Benutzerhandbuch Polysun*. Vela Solaris AG.

Verein Deutscher Ingenieure, & VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Eds.). (2013). *VDI-Wärmeatlas* (11., bearb. und erw. Aufl). Springer Vieweg.

Viessmann Deutschland GmbH. (2011). *Planungshandbuch Wärmepumpen*.

Wosnitza, F., & Hilgers, H. G. (2012). *Energieeffizienz und Energiemanagement: Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten*. Springer Spektrum.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Lastverschiebung durch das Implementieren einer nächtlichen Beladungssperre des Heizpufferspeichers.....	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Heizsystems L-Sol mit Kaltspeicher und Sole/Wasser-Wärmepumpe, wie es in der Software Polysun implementiert wird.....	13
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Heizsystems LWWP mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und separaten Speichern, wie es in der Software Polysun implementiert wird.	15
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Heizsystems LWWP_ST mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und Kombi-Speicher und direktem Wärmeeintrag durch Vakuumröhren-Kollektoren, wie es in der Software Polysun implementiert wird.	16
Abbildung 5: Auf der x-Achse sind die Stunden eines Jahrs aufgeführt. Die y-Achse zeigt die Aussentemperatur. Die Kurve der Heizgradstunden (schwarz) zeigt den aufsteigenden Verlauf der stündlichen, mittleren Aussentemperatur eines typischen Jahrs in Rapperswil SG und der Soll-Raumtemperatur (20 °C).	23
Abbildung 6: Auf der x-Achse sind die Stunden eines Jahrs aufgeführt. Die y-Achse zeigt das stündliche Mittel der Globalstrahlung auf die Horizontale. Die Jahresdauerlinie zeigt die Globalstrahlungswerte am Standort Rapperswil SG für das betrachtete typische Jahr.	24
Abbildung 7: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.....	32
Abbildung 8: Die anthrazitfarbenen Balken geben die Anzahl Stunden im Jahr an, in welchen die Soll-Gebäudetemperatur von 20 °C unterschritten wurde. Die blaue Linie gibt die niedrigste verzeichnete Gebäudetemperatur im Jahr wieder.	34
Abbildung 9: Auswertung L-Sol mit und ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre. Für jeden Sperrzeitraum, der auf der x-Achse aufgetragen ist, sind zwei gestapelte Balken angeordnet. Links ohne Übersteuerung, rechts mit Übersteuerung. Im oberen der gestapelten Balken (dunkelgrau) ist der Eigenverbrauch des PV-Stroms abzulesen. Die unteren Balken zeigen den Netzbezug.....	36

Abbildung 10: Monatliche Gegenüberstellung des L-Sol mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für eine Sperrdauer von 19-9 Uhr und der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug des jeweiligen Heizsystems wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des produzierten PV-Stroms. Die Linien geben den Verlauf der SJAZ wieder.37

Abbildung 11: Boxplot der Umgebungstemperatur bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre von 19-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 6.44 °C, die Durchschnittstemperatur des L-Sol mit Beladungssperre beträgt 7.33 °C.38

Abbildung 12: Boxplot der Globalstrahlung bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre von 19-9 Uhr abgebildet. Die durchschnittliche Globalstrahlung der Referenzvariante beträgt 100.14 Wm^2 , die durchschnittliche Globalstrahlung des L-Sol mit Beladungssperre beträgt 124.58 Wm^239

Abbildung 13: Boxplot der Kaltspeichertemperatur der Schicht 11 von 12 bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des L-Sol mit nächtlicher Beladungssperre von 19-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 19.65 °C, die Durchschnittstemperatur des L-Sol mit Beladungssperre beträgt 21.23 °C.40

Abbildung 14: Auswertung LWWP mit und ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für jeden Sperrzeitraum. Links (dunkelgrau) ohne Übersteuerung, rechts (hellgrau) mit Übersteuerung.41

Abbildung 15: Monatliche Gegenüberstellung des LWWP mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für eine Sperrdauer von 0-9 Uhr und der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre. Die Balken geben den elektrischen Energieverbrauch an. Die Linien zeigen den Verlauf der SJAZ.42

Abbildung 16: Boxplot der Umgebungstemperatur bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des LWWP mit nächtlicher Beladungssperre von 0-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 6.40 °C, die Durchschnittstemperatur des LWWP mit Beladungssperre beträgt 7.36 °C.43

Abbildung 17: Auswertung LWWP_ST mit und ohne Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für jeden Sperrzeitraum. Links (dunkelgrau) ohne Übersteuerung, rechts (hellgrau) mit Übersteuerung.44

Abbildung 18: Auszug aus Polysun, der den Verlauf der Gebäudetemperatur im simulierten Jahr für das LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre von 3-9 Uhr ohne Übersteuerung zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Soll-Gebäudetemperatur an zahlreichen Tagen unterschritten wird.45

Abbildung 19: Auszug aus Polysun, der den Verlauf der Gebäudetemperatur im simulierten Jahr für das LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre und Übersteuerung zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Soll-Gebäudetemperatur weniger häufig unterschritten wird als bei der Variante mit Sperre und ohne Übersteuerung.45

Abbildung 20: Monatliche Gegenüberstellung des LWWP_ST mit Übersteuerung der nächtlichen Beladungssperre für eine Sperrdauer von 2-9 Uhr und der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre. Die Balken geben den elektrischen Energieverbrauch an. Die Linien zeigen den Verlauf der SJAZ.46

Abbildung 21: Boxplot der Umgebungstemperatur bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre von 2-9 Uhr abgebildet. Die Durchschnittstemperatur der Referenzvariante beträgt 2.60 °C, die Durchschnittstemperatur des LWWP_ST mit Beladungssperre beträgt 3.52 °C.47

Abbildung 22: Boxplot der verzeichneten Globalstrahlung bei Wärmepumpenbetrieb. Der linke Boxplot zeigt die Werte der Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre, rechts ist der Boxplot des LWWP_ST mit nächtlicher Beladungssperre von 2-9 Uhr abgebildet. Die durchschnittliche Globalstrahlung der Referenzvariante beträgt 53.98 Wm^2 , die durchschnittliche Globalstrahlung des LWWP_ST mit Beladungssperre beträgt 104.40 Wm^248

Abbildung 23: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.49

Abbildung 24: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.....51

Abbildung 25: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.....52

Abbildung 26: Auswirkung der Variation der VL/RL-Temperatur auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit gibt den Zeitraum wieder, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.54

Abbildung 27: Auswirkung der Variation der VL/RL-Temperatur auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.55

Abbildung 28: Auswirkung der Variation der VL/RL-Temperatur auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.56

Abbildung 29: Auswirkung der Variation der Wärmeübertragungsfläche auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die

unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.57

Abbildung 30: Auszug aus Polysun für den 09. März des simulierten Jahres. Er zeigt das L-Sol mit einer Wärmeübertragungsfläche von 55 m² und mit einem Sperrzeitraum von 02:00 bis 09:00 Uhr. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur in Schicht 11 von 12 des Heizpufferspeichers bis zum Ende des Sperrzeitraumes sinkt.....58

Abbildung 31: Auszug aus Polysun für den 09. März des simulierten Jahres. Er zeigt das L-Sol mit einer Wärmeübertragungsfläche von 55 m² und einem Sperrzeitraum von 19:00 bis 09:00 Uhr. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur in Schicht 11 von 12 des Heizpufferspeichers bereits vor Ende des Sperrzeitraumes wieder angehoben wird.58

Abbildung 32: Auswirkung der Variation der Wärmeübertragungsfläche (Fussbodenheizung) auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete. .59

Abbildung 33: Auswirkung der Variation der Wärmeübertragungsfläche (Fussbodenheizung) auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.60

Abbildung 34: Auswirkung der Variation des Gebäudestandards auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.61

Abbildung 35: Auswirkung der Variation des Gebäudestandards auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder.

Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.62

Abbildung 36: Auswirkung der Variation des Gebäudestandards auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.63

Abbildung 37: Auswirkung der Variation des Heizpufferspeichervolumens auf ein L-Sol Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die unteren Balken (hellgrau) geben den Netzbezug wieder. Die oberen Balken (dunkelgrau) zeigen den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.64

Abbildung 38: Auswirkung Variation des Heizpufferspeichervolumens auf ein LWWP Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.65

Abbildung 39: Auswirkung Variation des Heizpufferspeichervolumens auf ein LWWP_ST Heizsystem mit verschiedenen Beladungssperrzeiträumen für den Heizpufferspeicher. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch wieder. Die blaue Linie gibt die SJAZ wieder. Die mit Stern (*) gekennzeichnete Sperrzeit zeigt den Zeitraum, bei welchem durch die Implementierung einer Übersteuerung zur Gewährleistung der Soll-Gebäudetemperatur das Heizsystem am effizientesten arbeitete.66

Abbildung 40: Effekt der Variation des Einschaltfaktors (EF) sowie des Ausschaltfaktors (AF) für die Überhitzung des Heizpufferspeichers auf den Netzbezug des L-Sol. Der Netzbezug ist bei dem Einschaltfaktor 0.7 am geringsten. Der Einfluss des Ausschaltfaktors auf den Netzbezug fällt gering aus.67

Abbildung 41: Effekt der Variation des Einschaltfaktors (EF) sowie des Ausschaltfaktors (AF) für die Überhitzung des Heizpufferspeichers auf den Eigenverbrauch des PV-Stroms des L-

Sol. Der Eigenverbrauch ist bei dem Einschaltfaktor 0.7 am höchsten. Der Einfluss des Ausschaltfaktors auf den Eigenverbrauch fällt gering aus.....67

Abbildung 42: Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Beladungssperre des Heizpufferspeichers. Balken die mit «Referenz» bezeichnet sind, sind ohne Beladungssperre. Die linke Kolonne zeigt das L-Sol ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers, die rechte mit Überhitzung.....68

Abbildung 43: Effekt der Variation der Einschalttemperatur (ET) sowie der Ausschalttemperatur (AT) für die Überhitzung des Heizpufferspeichers auf den jährlichen Stromverbrauch des LWWP. Der Stromverbrauch ist bei einer Einschalttemperatur von 8 °C bis 10 °C am geringsten. Die Ausschalttemperatur liegt stets 1 K unter der Einschalttemperatur.69

Abbildung 44: Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Beladungssperre des Heizpufferspeichers. Balken, die mit «Referenz» bezeichnet sind, sind ohne Beladungssperre. Die linke Kolonne zeigt das LWWP ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers, die rechte mit Überhitzung. ...69

Abbildung 45: Die x-Achse zeigt den Zeitraum der Beladungssperre des Kombi-Speichers. Balken die mit «Referenz» bezeichnet sind, sind ohne Beladungssperre. Die linke Kolonne zeigt das LWWP ohne Überhitzung des Heizpufferspeichers, die rechte mit Überhitzung. ...70

Abbildung 46: Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.....71

Abbildung 47: Auswertung EFH_S. Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischer Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.73

Abbildung 48: Auswertung MFH_N. Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischer Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken,

dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.75

Abbildung 49: Auswertung MFH_S. Auf der x-Achse ist der Sperrzeitraum aufgeführt. Bei der Bezeichnung «Referenz» ist das jeweilige System ohne Beladungssperre zu sehen. Die Achse ist darüber hinaus nach den Heizsystemen L-Sol, LWWP und LWWP_ST gegliedert. Die Balken geben den jährlichen elektrischen Energieverbrauch an. Beim L-Sol wurde der jährliche elektrische Energieverbrauch in Eigenverbrauch des PV-Stroms (obere Balken, dunkelgrau) und Netzbezug (untere Balken, hellgrau) unterteilt. In blau ist der Verlauf der SJAZ als Linie dargestellt.77

Abbildung 50: Einsparung an elektrischer Energie bei idealem Sperrzeitraum in Prozent pro Heizsystem und Gebäudekategorie gegenüber der jeweiligen Referenzvariante ohne nächtliche Beladungssperre des Heizpufferspeichers.....79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationslayout eingeteilt in Simulationsreihe 1, welche die Optimierung der nächtlichen Beladungssperre beinhaltet und Simulationsreihe 2, in welcher die Beladungssperre auf weitere Gebäudetypen sowie Standards ausgerollt wird. Zu jedem Heizsystem mit Beladungssperre (hellgrauer Bereich) wird jeweils dasselbe Heizsystem als Referenz ohne nächtliche Beladungssperre angelegt (dunkelgrauer Bereich).....	19
Tabelle 2: Übersicht Abmessungen und Flächen der Gebäudemodelle.....	25
Tabelle 3: Übersicht der Werte des jährlichen Heizwärmebedarfs (Q_h) für die Gebäudemodelle, die auf Grundlage des spezifischen Heizwärmebedarfs aus dem SIA Merkblatt 2024 stammen, multipliziert mit der Energiebezugsfläche.....	25
Tabelle 4: Jährliche Energieverluste pro Gebäudemodell, die durch Transmission und Lüftung verursacht werden.	27
Tabelle 5: Bei der erforderlichen Heizleistung handelt es sich um die Leistung, über die der Wärmeerzeuger verfügen sollte, um die Soll-Raumtemperatur von 20°C zu halten.....	29
Tabelle 6: Volumen der Heizpufferspeicher (L-Sol, LWWP) und des Komi-Speichers (LWWP_ST) pro Gebäudemodell	29
Tabelle 7: Volumen der Brauchwarmwasserspeicher (L-Sol, LWWP) und des Komi-Speichers (LWWP_ST) pro Gebäudemodell	30
Tabelle 8: Volumen des Kaltspeichers des L-Sol Heizsystems für das jeweilige Gebäudemodell.....	30
Tabelle 9: Flächen der PVT-Kollektoren für das L-Sol sowie Flächen der Vakuumröhrenkollektoren des LWWP_ST für das jeweilige Gebäudemodell	31
Tabelle 10: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre mit fixem Endzeitpunkt.	48
Tabelle 11: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre mit fixem Startzeitpunkt.	50
Tabelle 12: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre mit fixem Sperrzeitraum.....	51
Tabelle 13: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre am Tag.....	53

Tabelle 14: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre für das EFH_S.....74

Tabelle 15: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre für das MFH_N.76

Tabelle 16: Die Werte zeigen die Differenz des jeweiligen Referenzsystems zum Heizsystem mit der optimal ermittelten nächtlichen Beladungssperre für das MFH_S.79

Anhang

Anhang 1: Plagiatserklärung



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

Mit der Abgabe dieser Masterarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbstständig 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 Masterarbeit 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:

Unterschrift:

Zürich, 01.07.2020

S.R.

Das Original dieses Formulars ist bei allen abgegebenen Masterarbeiten im Anhang mit Original Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.

Anhang 1: Auszug aus der Berechnung der Verluste durch Transmission und Lüftung

Datum	Uhrzeit	Mittlere Aussentemp. Rapperswil [°C]	Boc-0e [K]	Soll-Temperatur Gebäude	U-Wert Opak Neubau [W/m²*K]	Fenster Neubau [W/m²*K]	U-Wert Opak Saniert [W/m²*K]	U-Wert Fenster Saniert [W/m²*K]	Hüllfläche EFH_N, EFH_S [m²]	Fensterfläche EFH_N, EFH_S [m²]	Hüllfläche MFH_N, MFH_S [m²]	Fensterfläche MFH_N, MFH_S [m²]	QTo EFH_N [kWh]	QTo EFH_S [kWh]	QTo MFH_N [kWh]	QTo MFH_S [kWh]	QTF EFH_N [kWh]	QTF EFH_S [kWh]	QTF MFH_N [kWh]	QTF MFH_S [kWh]	pa-cc [1/m³*K]	V/AE [m³/K*]	QV EFH_N [kWh]	QV EFH_S [kWh]	QV MFH_N [kWh]	QV MFH_S [kWh]	QV+QT EFH_N [kWh/a]	QV+QT EFH_S [kWh/a]	QV+QT MFH_N [kWh/a]	QV+QT MFH_S [kWh/a]
01.05.	23:00	5.1	77355	20	0.2	1.0	0.6	1.4	294.7	62.3	615.0	135.0	451.7	1070.7	9939	28534	4819	6777	10443	14620	1070.18	0.7	2451	2451	2451	2451	11565	27833	27833	27833
01.09.	5:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
03.09.	7:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
05.04.	12:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
05.04.	13:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
05.05.	21:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
07.04.	7:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
09.10.	10:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
11.05.	8:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
11.06.	19:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
13.02.	10:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
15.07.	20:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
16.04.	1:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
16.07.	2:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
16.07.	5:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
16.10.	0:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
17.09.	5:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
17.10.	7:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
19.07.	2:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
19.08.	3:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
19.10.	13:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
19.10.	16:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
20.04.	16:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
20.05.	10:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
20.07.	6:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
21.09.	8:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
21.09.	22:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
22.09.	23:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
23.05.	23:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
23.09.	22:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
25.03.	17:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
26.03.	18:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
28.07.	2:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
28.07.	6:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
28.10.	12:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
30.07.	5:00	12	8	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.447944	1.41456	0.9348	2.952	0.4984	0.69776	1.08	1.512	1070.18	0.7	2.497076	2.497076	7.491228	7.491228	1.9605	2.36203	2.76392	5.21312
01.10.	1:00	11.9	8.1	20	0.19	1	0.6	1.4	294.7	62.3	615	135	0.4535433	1.432242	0.946485	2.989	0.50463	0.706482	1.0935	1.5309	1070.18	0.7	2.528289	2.528289	7.584868	7.584868	1.21100	2.39155	2.79847	5.27829

Anhang 2: Rechenwerte für Gebäudemodelle

Beschreibung	Wert	Einheit	Quelle
Auslegungstemperaturen			
Norm-Innentemperatur ($\theta_{int,i}$)	20.0	°C	SIA 384/2
Norm-Aussentemperatur Rapperswil SG (θ_e)	-9.0	°C	Meteonorme 7.2
Temperatur gegen Erdreich ($\theta_{e,m}$)	0.0	°C	SIA 384/2
Bauphysikalische Eigenschaften EFH_N, MFH_N			
U-Wert opake Bauteile (U_{op})	0.19	W/(m ² *K)	SIA Merkbaltt 2024
U-Wert Fenster (U_w)	1.0	W/(m ² *K)	SIA Merkbaltt 2024
Temperaturanpassungsfaktor gegen Erdreich (f_{ig})	0.3	-	SIA 384/2
Temperaturanpassungsfaktor gegen Aussenluft (f_{ie})	1	-	SIA 384/2
Wärmebrücken (ΔU_{TB})	0.02	W/(m ² *K)	SIA 384/2
Bauphysikalische Eigenschaften EFH_S, MFH_S			
U-Wert opake Bauteile (U_{op})	0.6	W/(m ² *K)	SIA Merkbaltt 2024
U-Wert Fenster (U_w)	1.4	W/(m ² *K)	SIA Merkbaltt 2024
Temperaturanpassungsfaktor gegen Erdreich (f_{ig})	0.3	-	SIA 384/2
Temperaturanpassungsfaktor gegen Aussenluft (f_{ie})	1	-	SIA 384/2
Wärmebrücken (ΔU_{TB})	0.1	W/(m ² *K)	SIA 384/2
Lüftung			
spez. Wärmespeicherfähigkeit der Luft ($\rho \cdot c_p$)	0.34	Wh/(m ³ *K)	SIA 384/2
Temperatur-Änderungsgrad der Wärmerückgewinnung (n)	0.25	h ⁻¹	SIA 384/2

Beschreibung	Wert	Einheit	Quelle
Reduktionsfaktor für Wärmeverluste gegen Erdreich EFH_N, MFH_N (b_{GF})	0.8	-	SIA 380/1
Reduktionsfaktor für Wärmeverluste gegen Erdreich EFH_S, MFH_S (b_{GF})	0.6	-	SIA 380/1
spezifische Wärmespeicherfähigkeit von Luft ($\rho_a \cdot c_a$)	1'161.6	J/(m ³ *K)	SIA 380/1
Rapperswil SG Höhe über Meer	417.0	m ü.M.	Meteo Norm
flächenbezogener Aussenluftstrom V/A_E	0.7	m ³ /(K*m ²)	SIA 380/1
Länge der Berechnungsperiode (t_c)	31.0	Tage	SIA 380/1
Heiztage	216.0	Tage	
spezifische Wärmespeicherfähigkeit von Wasser ($\rho_w \cdot c_w$)	4.18	MJ/(m ³ *K)	SIA 380/1
Soll-Brauchwarmwassertemperatur (θ_{ww})	60.0	°C	SIA Merkbaltt
Mittlere Kaltwassertemperatur (θ_{ww0})	10.0	°C	Polysun
Interne Wärmeeinträge pro Tag Personen, Geräte, Beleuchtung EFH_N, MFH_N (Q_i) Wh/m ²	0.2	MJ/m ²	SIA Merkbaltt
Interne Wärmeeinträge pro Tag Personen, Geräte, Beleuchtung EFH_S, MFH_S (Q_i) Wh/m ²	0.3	MJ/m ²	SIA Merkbaltt 2024
globale Sonneneinstrahlung Süd (GsS)	270.0	kWh/(m ² *a)	SIA Merkbaltt 2028-C1:2015
globale Sonneneinstrahlung Nord (GsN)	100.0	kWh/(m ² *a)	SIA Merkbaltt 2028-C1:2015
globale Sonneneinstrahlung Ost (GsE)	155.0	kWh/(m ² *a)	SIA Merkbaltt 2028-C1:2015
globale Sonneneinstrahlung West (GsW)	155.0	kWh/(m ² *a)	SIA Merkbaltt 2028-C1:2015

Thermische Gebäudehüllfläche EFH_N, EFH_S (A_{th})	Wert	Einheit
Dach	74.7	m ²
Aussenmauer ohne Fenster inkl. Rahmen	145.3	m ²
Fenster inkl. Rahm (30% der Aussenmauer)	62.3	m ²
Boden gegen Erdreich	74.7	m ²
Beheiztes Gebäudevolumen EFH_N, EFH_S (V_i)	Wert	Einheit
Volumen	448.2	m ³
EFH_N	Wert	Einheit
Transmissionswärmeverluste Bodenplatte gegenüber Erdreich	94.1	W
Transmissionswärmeverluste Wand gegenüber Aussenluft	1'339.8	W
Transmissionswärmeverluste Fenster gegenüber Aussenluft	1'842.8	W
Norm-Transmissionswärmeverluste (Φ_T)	3'276.8	W
Lüftungswärmeverluste (Φ_V)	1'104.8	W
Wärmeverluste durch Lüftung, Transmission und Infiltration (Φ_{HL,build})	4'381.6	W
Zuschlag für Verluste und Aufheizung der Wärmeverteilung 15%	657.2	W
Erforderliche Heizleistung Wärmepumpe	5'038.8	W
EFH_S	Wert	Einheit
Transmissionswärmeverluste Bodenplatte gegenüber Erdreich	313.7	W
Transmissionswärmeverluste Wand gegenüber Aussenluft	4'466.0	W
Transmissionswärmeverluste Fenster gegenüber Aussenluft	2'710.1	W
Norm-Transmissionswärmeverluste (Φ_T)	7'489.8	W
Lüftungswärmeverluste (Φ_V)	1'104.8	W
Wärmeverluste durch Lüftung, Transmission und Infiltration (Φ_{HL,build})	8'594.6	W
Zuschlag für Verluste und Aufheizung der Wärmeverteilung 15%	1'289.2	W
Erforderliche Heizleistung Wärmepumpe	9'883.8	W
Thermische Gebäudehüllfläche MFH_N, MFH_S (A_{th})	Wert	Einheit
Dach	150.0	m ²
Aussenmauer	315.0	m ²
Fenster inkl. Rahm (30% der Aussenmauer)	135.0	m ²
Boden gegen Erdreich	150.0	m ²
Beheiztes Gebäudevolumen MFH_N, MFH_S (V_i)	Wert	Einheit
Volumen	1'350.0	m ³
MFH_N	Wert	Einheit
Transmissionswärmeverluste Bodenplatte gegenüber Erdreich	189.0	W
Transmissionswärmeverluste Wand gegenüber Aussenluft	2'831.9	W
Transmissionswärmeverluste Fenster gegenüber Aussenluft	3'993.3	W
Norm-Transmissionswärmeverluste (Φ_T)	7'014.2	W
Lüftungswärmeverluste (Φ_V)	3'327.8	W
Wärmeverluste durch Lüftung, Transmission und Infiltration (Φ_{HL,build})	10'341.9	W
Zuschlag für Verluste und Aufheizung der Wärmeverteilung 15%	1'551.3	W
Erforderliche Heizleistung Wärmepumpe	11'893.2	W
MFH_S	Wert	Einheit
Transmissionswärmeverluste Bodenplatte gegenüber Erdreich	630.0	W
Transmissionswärmeverluste Wand gegenüber Aussenluft	9'439.5	W
Transmissionswärmeverluste Fenster gegenüber Aussenluft	5'872.5	W
Norm-Transmissionswärmeverluste (Φ_T)	15'942.0	W
Lüftungswärmeverluste (Φ_V)	3'327.8	W
Wärmeverluste durch Lüftung, Transmission und Infiltration (Φ_{HL,build})	19'269.8	W
Zuschlag für Verluste und Aufheizung der Wärmeverteilung 15%	2'890.5	W
Erforderliche Heizleistung Wärmepumpe	22'160.2	W

Anhang 3: R-Skript

```

#Masterthesis

library(multcompView)

library(tidyverse)          #Laden der Bib tidyverse ("Datenhandling")

library(readr)             #Laden der Bib readr (Einlesebefehle)

library(ggplot2)

library(repo)

setwd("~/ZHAW/04_FS 2020/01_Masterthesis/13_RStudio")      #setzen des Pfades, wo die Datei abgelegt ist

dat0<-read.delim(file="Temperatur_Globalstrahlung.csv", dec=".",header = TRUE, sep=";") #Einlesen des Datensatzes

View(dat0)

str(dat0)

#####LWWP#####

#Aufteilung nach WP Laufzeit

dat_Referenz_LWWP<-filter(dat0,Status.WP.Referenz.LWWP > 0) #filtern nach Laufzeit der WP (Status >0) Referenz

View(dat_Referenz)

dat_NBS_LWWP<-filter(dat0,Status.WP.0.9.Uhr.LWWP > 0)      #filtern nach Laufzeit der WP (Status >0) NBS 0-9

View(dat_NBS)

#Testen der Voraussetzungen für T-Test (Varianzgleichheit, Normalverteilung)

boxplot(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP,dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWWP)

hist(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP)

hist(LWWP,dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWW)

qqnorm(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP)&qqline(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP)

qqnorm(dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWWP)&qqline(dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWWP)

t.test(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP,dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWWP,alternative="two.sided")

wilcox.test(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP,dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWWP,alternative="two.sided")

LWWP_Variable<-c("Referenz", "0-9 Uhr")

boxplot(dat_Referenz_LWWP$Tamb.Referenz.LWWP,dat_NBS_LWWP$Tamb.0.9.Uhr.LWWP,xlab="LWWP", ylab="Aussentemperatur in
°C",names=LWWP_Variable)

source("tests_and_visuals.R")

two_sample_WilcoxonTest_twoSided(dat_Referenz$Tamb_Referenz,dat_NBS$Tamb_0.9_Uhr,alpha=0.05) #Visualisierung Wilcoxon

str(wilcox.test(dat_Referenz$Tamb_Referenz,dat_NBS$Tamb_0.9_Uhr,alternative="two.sided"))

#####LSOL#####

```

#Aufteilung nach WP Laufzeit

```
dat_Referenz_LSOL<-filter(dat0,Status.WP.Referenz.Lsol > 0) #filtern nach Laufzeit der WP (Status >0) Referenz
```

```
View(dat_Referenz)
```

```
dat_NBS_LSOL<-filter(dat0, Status.WP.19.9.Lsol > 0) #filtern nach Laufzeit der WP (Status >0) NBS 19-9
```

```
View(dat_NBS)
```

```
Sol_Variable<-c("Referenz", "19-9 Uhr")
```

```
boxplot(dat_Referenz_LSOL$Tamb.Referenz.LSol,dat_NBS_LSOL$Tamb.19.9.LSol,xlab="L-SOL", ylab="Aussentemperatur in °C",names=Sol_Variable)
```

```
boxplot(dat_Referenz_LSOL$Globalstrahlung.Referenz.Lsol, dat_NBS_LSOL$Globalstrahlung.19.9.Lsol,xlab="L-SOL", ylab="Globalstrahlung in W/m^2", names=Sol_Variable)
```

```
boxplot(dat_Referenz_LSOL$Temp.Schicht.11.Referenz,dat_NBS_LSOL$Temp.Schicht.11.19.9.LSOL,xlab="L-SOL", ylab="Temperatur Schicht 11 in °C",names=Sol_Variable)
```

```
t.test(dat_Referenz_LSOL$Tamb.Referenz.LSol,dat_NBS_LSOL$Tamb.19.9.LSol,alternative="two.sided")
```

```
t.test(dat_Referenz_LSOL$Globalstrahlung.Referenz.Lsol,dat_NBS_LSOL$Globalstrahlung.19.9.Lso,alternative="two.sided")
```

```
t.test(dat_Referenz_LSOL$Temp.Schicht.11.Referenz,dat_NBS_LSOL$Temp.Schicht.11.19.9.LSOL,alternative="two.sided")
```

```
wilcox.test(dat_Referenz_LSOL$Tamb.Referenz.LSol,dat_NBS_LSOL$Tamb.19.9.LSol,alternative="two.sided")
```

```
wilcox.test(dat_Referenz_LSOL$Globalstrahlung.Referenz.Lsol,dat_NBS_LSOL$Globalstrahlung.19.9.Lso,alternative="two.sided")
```

```
#####LWWP_ST#####
```

#Aufteilung nach WP Laufzeit

```
dat_Referenz_LWWP_ST<-filter(dat0,Status.WP.Referenz.LWWP_ST > 0) #filtern nach Laufzeit der WP (Status >0) Referenz
```

```
View(dat_Referenz_LWWP_ST)
```

```
dat_NBS_LWWP_ST<-filter(dat0, Status.WP.2.9.Uhr.LWWP_ST > 0) #filtern nach Laufzeit der WP (Status >0) NBS 2-9
```

```
View(dat_NBS_LWWP_ST)
```

```
boxplot(dat_Referenz_LWWP_ST$Tamb.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Tamb.2.9.Uhr.LWWP_ST)
```

```
boxplot(dat_Referenz_LWWP_ST$Globalstrahlung.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Globalstrahlung.2.9.Uhr.LWWP_ST)
```

```
t.test(dat_Referenz_LWWP_ST$Tamb.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Tamb.2.9.Uhr.LWWP_ST,alternative="two.sided")
```

```
t.test(dat_Referenz_LWWP_ST$Globalstrahlung.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Globalstrahlung.2.9.Uhr.LWWP_ST,alternative="two.sided")
```

```
wilcox.test(dat_Referenz_LWWP_ST$Tamb.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Tamb.2.9.Uhr.LWWP_ST,alternative="two.sided")
```

```
wilcox.test(dat_Referenz_LWWP_ST$Globalstrahlung.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Globalstrahlung.2.9.Uhr.LWWP_ST,alternative="two.sided")
```

```
LWWP_ST_Variable<-c("Referenz", "2-9 Uhr")
```

```
boxplot(dat_Referenz_LWWP_ST$Tamb.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Tamb.2.9.Uhr.LWWP_ST,xlab="LWWP_ST",ylab="Aussentemperatur in °C",names=LWWP_ST_Variable)
```

```
boxplot(dat_Referenz_LWWP_ST$Globalstrahlung.Referenz.LWWP_ST,dat_NBS_LWWP_ST$Globalstrahlung.2.9.Uhr.LWWP_ST,xlab="LWWP_ST",ylab="Globalstrahlung in W/m^2",names=LWWP_ST_Variable)
```

```
?boxplot()
```


Anhang 4: Verwendete Komponenten für Heizsysteme

	Einheit	L-SoL				LWWP				LWWP_ST			
		EFH_N	EFH_S	MFH_N	MFH_S	EFH_N	EFH_S	MFH_N	MFH_S	EFH_N	EFH_S	MFH_N	MFH_S
Wärmepumpe		HCS PN 35 (Hautec)	Vitocal 300-G, BW(S) 301.B13 (Viessmann)	geoTHERM VWS 141 (Vaillant)	Vitocal 350-G PRO BW 352.A0345A (Viessmann)	VITOCAL 200-A AWO-E-AC 201.A10 (400) (Viessmann)	VITOCAL 250-S HAWB-AC 252.A13(400) (Viessmann)	Belaria 12kW (Hoval)	Belaria*twin A (24) (Hoval)	VITOCAL 200-A AWO-E-AC 201.A10 (400) (Viessmann)	VITOCAL 250-S HAWB-AC 252.A13(400) (Viessmann)	Belaria 12kW (Hoval)	Belaria*twin A (24) (Hoval)
Heizleistung bei B-5/W50	kW	6.0	10.7	11.5	22.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Heizleistung bei A2/W35	kW	-	-	-	-	6.1	11.3	12.5	23.7	6.1	11.3	12.5	23.7
Solarthermie-Kollektoren (Anonym)										Vakuümrohren-Kollektoren (Anonym)	Vakuümrohren-Kollektoren (Anonym)	Vakuümrohren-Kollektoren (Anonym)	Vakuümrohren-Kollektoren (Anonym)
Bruttogesamtfläche	m²	-	-	-	-	-	-	-	-	10	14	44	44
Gesamte Aperturfläche	m²	-	-	-	-	-	-	-	-	7	9.8	30.8	30.8
Gesamte Absorberfläche	m²	-	-	-	-	-	-	-	-	6.5	9.1	28.6	28.6
Anstellwinkel (hor.=0°, vert.=90°)	°	-	-	-	-	-	-	-	-	35	35	35	35
Ausrichtung (O=+90°, S=0°, W=-90°)	°	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0
Heiz-/Kühlelement		Fussbodenheizung	Radiator	Fussbodenheizung	Radiator	Fussbodenheizung	Radiator	Fussbodenheizung	Radiator	Fussbodenheizung	Radiator	Fussbodenheizung	Radiator
Anzahl Heiz-/Kühlmodule	W	2	7	7	15	2	6	6	15	2	6	6	15
Leistung pro Heiz-/Kühlelement bei Normbedingungen	°C	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000
Soll-Vorlauftemperatur	°C	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
Soll-Rücklauftemperatur	kWh	35	50	35	50	35	50	35	50	35	50	35	50
Speicher Kombispeicher													
Volumen	l	-	-	-	-	-	-	-	-	900	1'500	1'800	3'450
Höhe	m	-	-	-	-	-	-	-	-	1.8	1.8	1.8	1.8
Material		-	-	-	-	-	-	-	-	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl
Wärmedämmung		-	-	-	-	-	-	-	-	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart
Dämmungs-Dicke	mm	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100	100	100
Speicher Heizpuffer													
Volumen	l	360	600	750	1'400	360	600	750	1'400	-	-	-	-
Höhe	m	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	-	-	-	-
Material		Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	-	-	-	-
Wärmedämmung		PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	-	-	-	-
Dämmungs-Dicke	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-	-	-
Speicher BWW													
Volumen	l	120	120	500	500	120	120	500	500	-	-	-	-
Höhe	m	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	-	-	-	-
Material		Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	-	-	-	-
Wärmedämmung		PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	-	-	-	-
Dämmungs-Dicke	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-	-	-
PVT-Kollektor		Hybrid 270/900 (Meyer Burger)	Hybrid 270/900 (Meyer Burger)	Hybrid 270/900 (Meyer Burger)	Hybrid 270/900 (Meyer Burger)								
Anzahl Module		23	30	25	45	-	-	-	-	-	-	-	-
Kollektor-Aperturfläche	m²	37.7	49.2	41	73.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Anstellwinkel (hor.=0°, vert.=90°)	°	45	45	45	45	-	-	-	-	-	-	-	-
Ausrichtung (O=+90°, S=0°, W=-90°)	°	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Kollektorfeldertrag [Qsol]	kWh	4'712	9'745	-	24'608	-	-	-	-	-	-	-	-
Gesamte Nennleistung DC	kW	6.21	8.1	6.75	12.15	-	-	-	-	-	-	-	-
Wechselrichter 1: Name		Symo 8.2-3-M	Inverter 7000T	Inverter 2900T	Anonym	-	-	-	-	-	-	-	-
Wechselrichter 1: Hersteller		Fronius International Gm	Anonym	Anonym	Anonym	-	-	-	-	-	-	-	-
Auslegung 1: Anzahl Wechselrichter		1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Auslegung 1: A Anzahl Stränge		1	2	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-
Speicher Kältspeicher													
Volumen	l	1'500	1'500	1'700	2'200	-	-	-	-	-	-	-	-
Höhe	m	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Material		Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl	-	-	-	-	-	-	-	-
Wärmedämmung		PU hart	PU hart	PU hart	PU hart	-	-	-	-	-	-	-	-
Dämmungs-Dicke	mm	100	100	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-
Pumpen													
Pumpe Solarthermie		-	-	-	-	-	-	-	-	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein
Pumpe Heizkreis		Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, mittel	Eco, mittel	Eco, mittel	Eco, mittel
Pumpe Wärmeerzeuger		Eco, mittel	Eco, mittel	Eco, mittel	Eco, mittel	-	-	-	-	-	-	-	-
Pumpe Pumpe PVT-Kreis		Eco, gross	Eco, gross	Eco, gross	Eco, gross	-	-	-	-	-	-	-	-
Pumpe Kältspeicher-WP		Eco, klein	Eco, klein	Eco, klein	Eco, mittel	-	-	-	-	-	-	-	-