Bundesamt für Energie BFE Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 19.11.2021

SolSeasStore - Saisonale Wärmespeicherung in städtischen Quartieren mit Erdwärmesonden

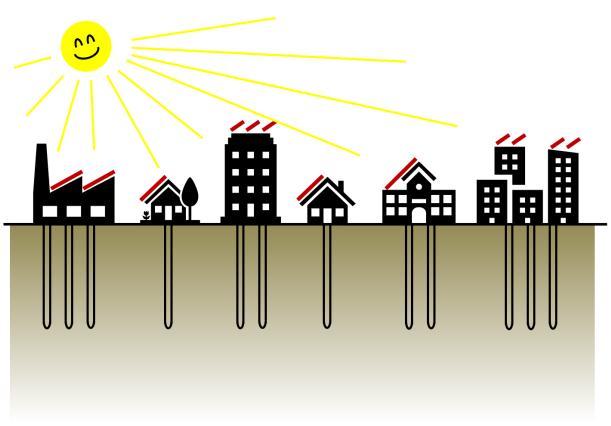


Bild: © ZHAW, 2020





Datum: 19. November 2021

Ort: Wädenswil

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE Sektion Energieforschung und Cleantech CH-3003 Bern www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Grüental CH-8820 Wädenswil www.zhaw.ch/iunr/erneuerbareenergien/

CSD Ingenieure AG Schachenallee 29A CH-5000 Aarau https://www.csd.ch/de-de/niederlassungen/schweiz/aarau

Autoren:

David Sauter, ZHAW Wädenswil, IUNR, david.sauter@zhaw.ch Manuel Hunziker, ZHAW Wädenswil, IUNR, manuel.hunziker@zhaw.ch Joachim Poppei, CSD Ingenieure AG, j.poppei@csd.ch Fabien Cochand, CSD Ingenieure AG, f.cochand@csd.ch Markus Hubbuch, ZHAW Wädenswil, IFM, markus.hubbuch@zhaw.ch Mario Rosso, ZHAW Wädenswil, IUNR, mario.rosso@zhaw.ch Niccolò Moro, ZHAW Wädenswil, IUNR, niccolo.moro@zhaw.ch Jürg Rohrer, ZHAW Wädenswil, IUNR, juerg.rohrer@zhaw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch Nadège Vetterli, nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501950-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Für die emissionsfreie Wärmeversorgung von Wohnbauten stellen Wärmepumpen mit Erdwärmesonden eine energieeffiziente und wirtschaftliche Lösung dar. Allerdings muss mit der zunehmenden Verbreitung von Erdwärmesonden ihr Einsatz sorgfältig geplant werden. Insbesondere in Gebieten mit dichter Nutzung besteht die Gefahr einer langfristigen Unterkühlung des Erdreichs. In diesen Fällen ist eine Regeneration der Erdwärmesonden, z.B. durch solarthermische Wärme, eine mögliche Lösung. Jedoch ist die für Solarkollektoren nutzbare Dachfläche bezogen auf den Wärmebedarf der Gebäude vor allem in städtischen Gebieten verhältnismässig klein. Zudem soll auf den Dächern auch möglichst viel Strom produziert werden.

In dieser Simulationsstudie wird untersucht, wie weit die Regeneration von Erdwärmesonden in urbanen und suburbanen Wohnquartieren mit Solarenergie möglich ist, wenn das gesamte Quartier von Wärmepumpen mit Erdwärmesonden versorgt werden soll. Basierend auf zwei Wohnquartieren in der Stadt Zürich werden Modellgebäude mit typischer Dachfläche, typischem Wärmebedarf und typischen Nachbargebäuden definiert. Der Wärmebedarf entspricht einem prognostizierten Wert für 2035. Mittels Systemsimulationen wird die nötige Sondenlänge und Fläche der Kollektoren für Solarthermie-Gewinnung ermittelt. Es werden unabgedeckte, ungedämmte PVT-Kollektoren, sowie solarthermische Absorber und Flachkollektoren ergänzt mit PV-Modulen, eingesetzt. Für Fälle, bei denen keine nachhaltige Regeneration durch eine PVT-Dachanlage möglich ist, wird stellvertretend ein Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regeneration definiert. Anhand dieses Gebäudes erfolgt eine Potenzialabschätzung zusätzlicher Wärmequellen für die EWS-Regeneration, sowie eine Abschätzung des erforderlichen Strombedarfs während 50 Jahren Betriebszeit.

Flachkollektoren ermöglichen für alle Beispielgebäude auf der zur Verfügung stehenden Dachfläche deutlich mehr Regeneration als PVT-Kollektoren oder solarthermische Absorber (z.B. Schwimmbadkollektoren). Mit Flachkollektoren ist 20 bis 40 % weniger Dachfläche erforderlich als mit PVT-Kollektoren. Bei kleineren Gebäuden ist damit eine hundertprozentige Regeneration möglich. Bei grossen und sehr grossen Beispielgebäuden ist die Dachfläche auch mit Flachkollektoren nicht ausreichend. Mit PVT-Kollektoren lässt sich auch Strom gewinnen, was diese vorteilhaft macht.

Zur groben Abschätzung der geeigneten Regenerationsmassnahme kann für vollständige Regeneration mit einem Bedarf an für Solarenergie nutzbarer Dachfläche von 1.8 m² pro MWh erforderlicher jährlicher Nutzwärme mit PVT-Kollektoren und von 1.2 m²/MWh mit Flachkollektoren gerechnet werden.

Über das ganze Quartier hinweg betrachtet ist in suburbanen Quartieren eine nachhaltige Wärmeversorgung mit regenerierten Erdwärmesonden sowohl mit Regeneration durch PVT-Kollektoren als auch durch Flachkollektoren möglich, sofern sich die Gebäude mit grossem Wärmebedarf über das Quartier verteilen. In urbanen Quartieren sind Bereiche zu erwarten, die eine vollständige Regeneration mit PVT-Kollektoren oder Flachkollektoren zulassen, aber auch Bereiche, in denen sich Gebäude mit grossem Wärmebedarf und geringer Dachfläche stark konzentrieren. Dort ist eine Regeneration alleine durch solare Wärme nur mit zusätzlichen Fassadenanlagen möglich. Alternativ ermöglicht auch die ergänzende Einbindung eines Luft-Wasser-Wärmeübertragers eine vollständige Regeneration. Ein zur Regeneration mittels PVT-Kollektoren paralleler Betrieb einer Gebäudekühlung ist sowohl passiv wie auch aktiv möglich Der Regenerationsnutzen hängt stark vom künftigen Kühlbedarf ab, ist in der Regel jedoch vergleichsweise gering.

Mit PVT-Kollektoren kann mehr Solarstrom erzeugt werden als in der Jahresbilanz von den Heizsystemen (Wärmepumpen, Umwälzpumpen, etc.) verbraucht wird. Bei der Verwendung von ertragsstärkeren Flachkollektoren kann auch dann in der Jahresbilanz nicht genügend Eigenstrom erzeugt werden, wenn die übrigbleibende Dachfläche mit PV-Modulen belegt wird.

Eine allfällige Kürzung der Erdwärmesonden infolge der Regeneration hat negative Auswirkungen auf die Systemeffizienz und verursacht eine initiale Erhöhung des Winterstrombedarfes um rund 10 % gegenüber einem nicht regenerierten System. Langfristig ist jedoch eine leichte Reduktion des Winterstrombedarfs zu beobachten. Eine gleichbleibende Sondenlänge hingegen führt, verglichen mit einem

unregenerierten System, zu einer langfristigen Reduktion des Winterstrombedarfes um bis zu 10 % und des Gesamtstromverbrauch über 50 Betriebsjahre um rund 1 %.

Summary

Ground source heat pump systems are an energy-efficient and economical way of supplying heat for residential buildings. However, with their increasing popularity, the deployment of borehole heat exchangers must be carefully planned. Especially in areas with dense usage, a risk of long-term undercooling of the ground is present. In these cases, regeneration is a possible solution, e.g. through solar thermal heat. But in urban areas, the roof area available for solar thermal collectors is often relatively small compared to the heat demand of the buildings. Moreover, there should also be as much electricity production as possible on these roof areas.

A simulation study is performed to examine how much regeneration of borehole heat exchangers is possible with solar thermal heat in urban and suburban residential districts in case the entire district uses ground source heat pumps. Based on two residential districts in the city of Zurich, model buildings with typical roof areas, typical heat demand, and typical neighbor buildings are defined. The heat demand corresponds to forecasted values for 2035. The necessary borehole dimensioning and size of the solar thermal collectors are determined by system simulations. Different collector types are investigated: Uncovered, uninsulated PVT collectors, solar thermal absorbers and flat-plate collectors as well as their combination with PV modules. For cases where no sustainable regeneration by a PVT roof system is possible, an example building with challenging regeneration of borehole heat exchangers is defined. Based on this building, the potential of additional heat sources for the regeneration of the borehole heat exchangers is estimated, as well as the required electricity demand during 50 years of operation.

For all model buildings, flat-plate collectors offer more regeneration on the available roof areas than PVT collectors or solar thermal absorbers ("swimming pool absorbers"). With flat-plate collectors, 20 to 40 % less roof area is required than with PVT collectors. For smaller buildings, 100 % regeneration is possible this way. However, for large and very large buildings, even flat-plate collectors are not sufficient for complete regeneration.

To roughly estimate appropriate regeneration methods for complete regeneration, a rule of thumb can be applied: With PVT, 1.8 m² roof area are needed per MWh of annual heat demand. With flat-plate collectors, the required roof area per MWh is 1.2 m².

On a district level, sustainable heat supply by regenerated borehole heat exchangers is possible in suburban districts with PVT as well as with flat-plate collectors, as long as the buildings with a large heat demand are evenly distributed over the district. In urban districts, areas are to be expected that allow for the complete regeneration by PVT or flat-plate collectors. But also areas in which buildings with large heat demand and small roof areas are heavily concentrated will most likely exist. There, regeneration by solar heat alone is only possible with additional facade systems. Alternatively, the supplementary integration of an air-water heat exchanger also enables complete regeneration. Parallel operation of a building cooling system to the regeneration with PVT collectors is possible both passively and actively. The regeneration benefit depends strongly on the future cooling demand but is usually comparatively low.

By using PVT collectors, more electricity can be produced over the course of a year than is consumed by the heating system. When flat-plate collectors are used, there is not enough electricity in the annual balance even when the remaining roof areas are covered with PV modules.

Any shortening of the borehole heat exchangers as a result of regeneration has a negative impact on system efficiency and causes an initial increase in winter electricity demand of around 10 % compared to a non-regenerated system. In the long term, however, a slight reduction in the winter electricity demand can be observed. A constant probe length, on the other hand, leads to a long-term reduction in

winter electricity demand of up to 10 % and total electricity consumption of around 1 % over 50 years of operation compared to an unregenerated system.

Riassunto

Le pompe di calore con sonde geotermiche rappresentano una soluzione economica ed efficiente per la fornitura di calore per edifici residenziali evitando emissioni. Data la crescente diffusione delle sonde geotermiche, il loro utilizzo va attentamente pianificato; sussiste infatti a lungo termine, specialmente nelle zone ad alta densità di utilizzo il rischio di surraffreddamento del terreno. Una possibile soluzione in questi casi è la rigenerazione delle sonde geotermiche, utilizzando ad esempio il calore solare termico. Nelle aree urbane la superficie dei tetti disponibile per l'istallazione di collettori solari termici è spesso relativamente piccola e limitata rispetto alla richiesta di calore degli edifici presenti. Va inoltre considerato che sui tetti disponibili andrebbe preferibilmente prodotta la maggior quantità di elettricità possibile.

Questo studio presenta una simulazione il cui scopo è esaminare quale porzione di rigenerazione delle sonde geotermiche è possibile soddisfare con il calore solare termico nei quartieri residenziali urbani e suburbani nel caso in cui l'intero quartiere utilizzi pompe di calore a terra. Edifici modello rappresentanti le tipiche superfici di tetto, la tipica richiesta di calore e i tipici edifici limitrofi sono stati definiti sulla base di due quartieri residenziali della città di Zurigo. Il fabbisogno di calore è rappresentato dal valore previsto per il 2035. Le simulazioni di sistema realizzate sono state utilizzate con lo scopo di determinare la lunghezza necessaria delle sonde e l'area dei collettori necessari per la generazione di energia solare termica. Sono stati considerati nello studio collettori PVT non coperti e non isolati, assorbitori solari termici e collettori piani come anche la loro integrazione con moduli fotovoltaici. Nei casi in cui non fosse possibile una rigenerazione sostenibile attraverso un sistema PVT sul tetto, è stato definito un esempio rappresentativo di edificio con una rigenerazione delle sonde geotermiche più complessa. Sulla base di questo edificio rappresentativo, viene stimato il potenziale delle fonti di calore aggiuntive per la rigenerazione delle sonde geotermiche, così come anche la domanda di elettricità richiesta durante 50 anni di funzionamento.

In tutti gli edifici modello considerati i collettori piani permettono una rigenerazione significativamente maggiore a parità di superficie di tetto disponibile se confrontati con collettori PVT scoperti o assorbitori solari termici. I collettori piani richiedono 20-40 % in meno della superficie del tetto rispetto ai collettori PVT o collettori solari. Per edifici più piccoli una rigenerazione del 100 % è in questo modo possibile, ciò non è invece possibile per gli edifici di dimensioni maggiori, dove neppure i collettori piani sono sufficienti per una rigenerazione completa.

Per ottenere una stima riguardante il metodo di rigenerazione appropriato per la rigenerazione completa è stata applicata la seguente approssimazione: per ogni MWh annuale di calore è necessario coprire 1,8 m² del tetto con collettori PVT, mentre l'aria richiesta per quanto riguarda i collettori piani è di 1,2 m².

Da un punto di vista di quartiere, un approvvigionamento sostenibile di calore tramite sonde geotermiche rigenerate è possibile nei quartieri periferici, sia per mezzo di rigenerazione con PVT sia grazie a collettori piani, a condizione che gli edifici con un elevato fabbisogno di calore siano distribuiti uniformemente sul quartiere. Nei quartieri urbani invece, ci si aspetta che ci siano aree dove la completa rigenerazione con PVT o con collettori piani sia possibile ma che esistano anche aree in cui gli edifici con un elevato fabbisogno di calore e con una bassa superficie del tetto siano fortemente concentrati. In questo caso la rigenerazione utilizzando unicamente il calore solare è possibile solamente con sistemi aggiuntivi sulle facciate. L'integrazione aggiuntiva di uno scambiatore di calore aria-acqua rappresenta anche un'alternativa per la rigenerazione completa. Il funzionamento di un sistema di raffreddamento dell'edificio parallelo alla rigenerazione con collettori PVT è possibile sia passivamente che attivamente. Il beneficio ricavato dal raffreddamento dipende fortemente dalla domanda futura di raffreddamento degli edifici, solitamente è però relativamente basso.

Utilizzando collettori PVT può essere generata più elettricità rispetto a quello consumata dai sistemi di riscaldamento nel corso dell'anno. Utilizzando invece collettori piani non viene generata elettricità sufficiente a coprire il bilancio annuale, anche nel caso in cui la superficie rimanente del tetto venga coperta con moduli fotovoltaici.

Qualsiasi accorciamento della lunghezza degli scambiatori di calore delle pompe di calore risultante dalla rigenerazione ha un impatto negativo sull'efficienza del sistema e causa un aumento iniziale di circa 10 % della domanda di elettricità durante l'inverno se comparata con la domanda di elettricità di un sistema non rigenerato. Tuttavia, a lungo termine, è possibile osservare una leggera riduzione della domanda di elettricità in inverno. Una lunghezza costante della sonda porta d'altra parte, in confronto ad un sistema non rigenerato, ad una riduzione nel lungo termine fino al 10 % della domanda di elettricità e ad una riduzione del consumo totale di elettricità di circa l'1 % in 50 anni di funzionamento.

Take-home messages

- Bei Regeneration der Erdwärmesonden mit PVT-Kollektoren kann in suburbanen Quartieren in Summe genügend Wärme für die Regeneration des gesamten Quartiers zur Verfügung gestellt werden. In urbanen Quartieren mit einer Häufung von grossen Gebäuden ist eine vollständige Regeneration mit PVT-Kollektoren hingegen schwierig.
- Insbesondere bei grossen Gebäuden sind zusätzliche Wärmequellen zur Regeneration der Erdwärmesonden erforderlich. PVT-Kollektoren an den südlichen Fassaden oder Luft/Wasser-Wärmeübertrager können die zusätzlich erforderliche Wärme bereitstellen.
- In urbanen Quartieren sind Bereiche zu erwarten, in denen sich Gebäude mit grossem Wärmebedarf und relativ kleiner Dachfläche konzentrieren. In solchen Bereichen ist eine vollständige Regeneration der Erdwärmesonden nur mit den erwähnten zusätzlichen Wärmequellen möglich.
- Eine aktive oder passive Gebäudekühlung kann parallel zu den getroffenen Regenerationsmassnahmen umgesetzt werden. Der Beitrag zur Regeneration ist stark vom Kühlbedarf abhängig und meist vergleichsweise gering.
- Die Nutzung von Flachkollektoren erfordert für die Regeneration rund 20 bis 40 % weniger Dachfläche als bei Nutzung von PVT-Kollektoren. Allerdings bleibt bei Nutzung von Flachkollektoren so wenig Dachfläche für PV-Module übrig, dass damit der eigenproduzierte Strom in der Jahresbilanz den Strombedarf der Heizungssysteme nicht decken kann. Werden hingegen vollflächig PVT-Kollektoren verwendet, ist in der Jahresbilanz ein Stromüberschuss zu erwarten.

Dank

Die Autoren danken den Mitgliedern der Begleitgruppe für die Anregungen und die fachliche Unterstützung. Dem Bundesamt für Energie (BFE) danken die Auftragnehmer für das entgegengebrachte Vertrauen und die finanzielle Unterstützung.

Mitglieder der Begleitgruppe: Rolf Moser (Enerconom AG, Vertretung BFE) Roland Wagner (Stadt Zürich) Arthur Huber (Huber Energietechnik AG) Rita Kobler (BFE) Adrian Altenburger (Hochschule Luzern) Karl-Heinz Schädle (Schädle GmbH)

Inhaltsverzeichnis

Zusan	nmenfassung	3
Sumn	nary	4
Riass	unto	5
Take-	home messages	6
Dank		7
	sverzeichnis	
Abkür	zungsverzeichnis	11
Symb	olverzeichnis	12
1	Einleitung	13
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	13
1.2	Motivation des Projektes	
1.3	Projektziele	
2	Vorgehen und Methode	16
2.1	Übersicht über die Vorgehensweise	16
2.2	Terminologie	
2.3	Beispielgebäude basierend auf Quartierdaten	
2.3.1	Auswahl der zugrunde liegenden Quartiere	
2.3.2	Verwendete Daten und Datenaufbereitung	20
2.3.3	Einteilung in typische Gebäude	21
2.3.4	Dachflächen der typischen Gebäude	24
2.4	Modellierung der Beispielgebäude in Polysun	27
2.4.1	Standort und Wetterdaten	27
2.4.2	Gebäudemodell (Heizwärmebedarf)	27
2.4.3	Wärmebedarf Warmwasser	28
2.4.1	Hydraulik	29
2.4.2	Komponenten	30
2.4.3	Elektrische Verbraucher	31
2.5	Eingesetzter PVT- und Flachkollektor	32
2.6	Simulation des EWS-Verhaltens und Ermittlung des Regenerationsbedarfs	33
2.6.1	Grundlegende Annahmen und Methodik	33
2.6.2	Modellgrundlagen der Simulation des EWS-Verhaltens	33
2.6.3	Berücksichtigung nachbarschaftlicher Beeinflussung	34
2.7	Iterativer Simulationsprozess zur Ermittlung des Regenerationsanteils	37
2.7.1	Prinzip	37
2.7.2	Rechenbeispiel	39
2.8	Abschätzung des Regenerationspotentials mit solarthermischen Absorbern	42

2.8.1	Vereinfachte Simulation	42
2.8.2	Verwendeter solarthermischer Absorbertyp / -Typen	42
2.9	Evaluation zusätzlicher Regenerationsquellen anhand eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration	42
2.9.1	Definition eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration (aus Kategorie U5)	
2.9.2	Mögliche Anzahl PVT-Kollektoren auf dem Dach des Beispielsgebäudes	44
2.9.3	Potenzial zur Fassadennutzung mittels PVT-Kollektoren beim Beispielgebäude	44
2.9.4	Kühlbedarf	45
2.9.5	Parameter des Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration	46
2.9.6	Simulationsprozess zur Ermittlung des Regenerationsanteils	47
2.10	Übersicht über die Regenerationsmassnahmen	47
2.11	Zeitliche Untersuchung des Stromverbrauchs mit/ohne Regeneration über 50 Jahre	50
2.11.1	Methodisches Vorgehen	50
2.11.2	Auslegung der Umwälzpumpen	50
3	Ergebnisse und Diskussion	51
3.1	Plausibilitätsüberprüfung der Wärmebedarfe	51
3.2	Sondenauslegung und Wärmebezug ohne Regeneration	53
3.3	Deckung des Regenerationsbedarfs mit PVT-Kollektoren	55
3.4	Deckung des Regenerationsbedarfs mit Flachkollektoren	60
3.5	Abschätzung der Deckung des Regenerationsbedarfs mit solarthermischen Absorbern	63
3.6	Jahresverlauf der Regeneration mit PVT- und Flachkollektoren	65
3.7	Elektrische Energieversorgung der Wärmebereitstellung	69
3.7.1	Gebäudeweise Betrachtung	69
3.7.2	Quartierweise Betrachtung	71
3.8	Lokale Verteilung der Regenerationsmöglichkeiten	73
3.9	Vergleich der Resultate mit Erkenntnissen der Literatur	76
3.10	Evaluation zusätzlicher Regenerationsquellen am Beispiel eines Gebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration	79
3.10.1	PVT an Fassaden	79
3.10.2	Luft-Wasser-Wärmeübertrager	80
3.10.3	Aktive und passive Kühlung	81
3.10.4	Vergleich mit kombinierten Regenerationsmassnahmen	82
3.10.5	Resultate Stromverbrauch	84
4	Schlussfolgerungen und Fazit	88
4.1	Regenerationspotential in urbanen und suburbanen Quartieren	88
4.2	Stromverbrauch anhand eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration.	89
4.3	Dachausnutzung in der Praxis	89
4.4	Konkrete Empfehlungen für die Praxis:	90
5	Ausblick und weitere Forschungsfragen	90

6	Nationale und internationale Zusammenarbeit	91
7	Literaturverzeichnis	92
8	Anhang	95
8.1	Charakterisierung der Kollektoren	95
8.1.1	PVT-Kollektor	95
8.1.2	Flachkollektor	95
8.1.3	Solarthermischer Absorber	95
8.2	Nutzbare Fassadenflächen beim Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regener	ation 97
8.3	Beschreibung der zusätzlichen Regenerationsmassnahmen	98
8.3.1	PVT-Kollektoren an Fassade	98
8.3.2	Luft-Wasser-Wärmeübertrager	99
8.3.3	Abwärme aus aktiver und passiver Gebäudekühlung	100
8.4	Netto-Entzugsenergie der verschiedenen Fälle	102
8.4.1	PVT	102
8.4.2	Flachkollektoren	103
8.5	Quartierweise Betrachtung von Regenerationsdefizit / -überschuss	104
8.5.1	PVT	104
8.5.2	Flachkollektoren	105
8.6	Netzeinspeisung und -bezug auf Stufe Beispielgebäude	106
8 7	Spezifische Erträge der verwendeten PV-Module sowie PVT- und Flachkollektoren	107

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Bedeutung

BFS Bundesamt für Statistik
EBF Energiebezugsfläche

EED-Tool Software «Earth Energy Designer» der Firma Blocon AG

EFH Einfamilienhaus

EGID Eidgenössischer Gebäudeidentifikator

EGRID Eidgenössischer Grundstücksidentifikator

EWS Erdwärmesonde

EWS-Tool Simulationstool « EWS » der Firma HETAG

GPM Gebäudeparkmodell

IEA SHC International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme

LWWP Luft-Wasser-Wärmepumpe
LWWÜ Luft-Wasser-Wärmeübertrager

MFH Mehrfamilienhaus

PV Photovoltaik

PVT Photovoltaisch-thermischer Kollektor

RW Raumwärme

SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

SJAZ System-Jahresarbeitszahl

VLT Vorlauftemperatur WP Wärmepumpe WÜ Wärmeübertrager

WW Warmwasser

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung
λ	Wärmeleitfähigkeit
Ø	Durchschnitt
а	Temperaturleitfähigkeit
EI(x)	Exponentialintegral $\int_{x}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$
t	Zeit

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Für die Energiewende in der Schweiz spielen Wärmepumpen (WP) mit Erdwärmesonden (EWS) im Gebäudeenergiebereich eine tragende Rolle. Sie benötigen durch eine hohe Systemeffizienz wenig Strom für die Beheizung von Gebäuden. Die immer dichter werdende Nutzung des Untergrundes zum Wärmeentzug kann allerdings zu einer langfristigen Abkühlung des Untergrundes führen. Eine Regeneration des Erdreiches mittels saisonaler Speicherung sommerlicher Wärme im Untergrund wird in vielen Fällen erforderlich werden. Solche sommerliche Wärme kann auf Dächern gewonnen werden. Gerade in städtischen Quartieren ist das Verhältnis aus Dachflächen und Wärmebedarf aufgrund der verdichteten Bauweise klein.

Im Jahr 2017 wurden in der Schweiz noch immer rund zwei Drittel der Bestandsgebäude mit fossilen Energieträgern beheizt (Bundesamt für Statistik, o. J.). Aufgrund der Lebensdauer der Wärmeerzeuger ist alle ca. 15 bis 25 Jahre ein Ersatz erforderlich. Die Rate für vollständige energetische Sanierungen bei Bestandsgebäuden in der Schweiz beträgt nur ca. 1 % pro Jahr (Meier et al., 2018). Etwa 80 % der Gebäude in der Schweiz wurden vor 1990 erbaut (Konferenz Kantonaler Energiedirektoren, 2014). Dementsprechend gross ist der Anteil von Gebäuden, welche bei einem Heizungsersatz noch nicht vollständig energetisch saniert sind. Für die Einhaltung des Ziels einer globalen Erwärmung von max. 1.5 K muss die Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems innert 10 Jahren, bei max. 2 K innert 30 Jahren abgeschlossen sein (Meier et al., 2018; Rohrer, 2019). Es muss deshalb dringend dafür gesorgt werden, dass bei einem Ersatz der Wärmeerzeugung eine fossilfreie Lösung eingesetzt wird. Dies ist mit Vorteil eine Wärmepumpe, ausser es ist Nah- oder Fernwärme verfügbar. Deshalb wird ein Heizungsersatz mit Wärmepumpen auch in Zukunft noch häufig ohne vorgängige Gebäudesanierung durchgeführt werden. Um den zusätzlichen Strombedarf zu begrenzen und insbesondere um die Netzbelastung an kalten Tagen zu reduzieren, sollten dies wo möglich Wärmepumpen mit Erdwärmesonden sein. Diese haben höhere Jahresarbeitszahlen und an kalten Tagen eine etwa doppelt so hohe Arbeitszahl wie Wärmepumpen mit Aussenluft als Wärmequelle.

Das Potential zur CO₂-Einsparung beim Ersatz fossiler Heizsysteme durch Wärmepumpen ist immens. Wird eine bestehende Ölheizung durch eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonden ersetzt, die eine Jahresarbeitszahl von 3.5 aufweist, so werden die CO₂-Emissionen bei gleichbleibendem Heizwärmebedarf um gut 90 % gesenkt. Dies ist berechnet unter Annahme der CO₂-Emissionsangaben aus der KBOB-Liste, Version 2009-1-2016 (Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren, 2016). Mit selbst erzeugtem Solarstrom oder der Verwendung von Strom aus anderen erneuerbaren Quellen kann die Wärmeversorgung eines Gebäudes fast vollständig dekarbonisiert werden. Wird als Wärmequelle der WP eine EWS verwendet, die solarthermisch regeneriert wird, ergibt sich eine «Konkurrenzsituation» bei der Nutzung der geeigneten Dachflächen, wenn gleichzeitig Photovoltaik-Strom erzeugt werden soll. Gerade bei älteren Mehrfamilienhäusern sind die verfügbaren Dachflächen im Vergleich zum Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser (WW) beschränkt. Eine mögliche Lösung ist die Verwendung von PVT-Kollektoren, welche auf der gleichen Fläche sowohl PV-Strom («PV») als auch solarthermische Wärme («T») erzeugen. Dies ist insbesondere bei Neubauten mit Pflicht zur Eigenstromerzeugung nach MuKEn (Konferenz Kantonaler Energiedirektoren, 2015) von Bedeutung.

1.2 Motivation des Projektes

Bei Wohngebäuden haben sich Wärmepumpen-Systeme mit Erdwärmesonden bewährt. In dicht bebauten Gebieten mit einer hohen Anzahl von Erdwärmesonden kann die dem Boden im Winter entzogene Wärme allerdings über den Sommer nicht in ausreichendem Masse nachfliessen (Poppei & Schwarz, 2010). Daher kühlt das Erdreich langfristig ab und verschlechtert die Effizienz der Wärmepumpen. Um eine Abkühlung zu vermeiden, sollten Erdwärmesonden in dicht bebauten Gebieten mit

Regeneration geplant werden. Durch bestehende Erdwärmesonden bereits abgekühltes Erdreich kann auch nachträglich regeneriert werden. Durch eine Regeneration wird das Erdreich quasi als Speicher genutzt. Im Sommer wird überschüssige Wärme über die EWS ins Erdreich gebracht und gleicht die Abkühlung über den Winter aus. Dabei bedeutet hundertprozentige Regeneration, dass der ursprüngliche, ungestörte Temperaturzustand im Untergrund wiederhergestellt wird. Heute werden die meisten Erdwärmesonden ohne Regeneration resp. die Möglichkeit der saisonalen Speicherung installiert. In zwei Studien im Auftrag der Stadt Zürich ist festgestellt worden, dass die Temperaturen im Sondenfluid und damit im Erdreich gerade in dicht besiedelten Gebieten in vielen Fällen mit der Zeit so weit absinken, dass die EWS als «klar unterkühlt» zu bewerten sind. (Kriesi, 2017; Kriesi et al., 2018). Dadurch nimmt die Systemeffizienz stark ab und die Betriebskosten steigen, bei Frostbildung um die EWS kann ein Schaden entstehen.

Die Notwendigkeit der Regeneration von Erdwärmesonden ist nicht auf die Stadt Zürich begrenzt und Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte in der Schweiz und im Ausland. International wird dem Thema beispielsweise in den Niederlanden (Witte, 2018) und in Schweden grosse Beachtung geschenkt (Fasci & Lazzarotto, 2019). Im Jahr 2018 wurde durch CSD im Auftrag des BFE neben zwei Quartieren in der Stadt Zürich auch ein Quartier in Bern exemplarisch untersucht (Poppei et al., 2019). Dass die Unterkühlung von EWS durch potenzielle Interaktion benachbarter Sonden heute noch nicht überall wahrgenommen wird, kann im Wesentlichen auf drei Gründe zurückgeführt werden:

- 1. EWS werden auf 50 Jahre Betrieb ausgelegt, die meisten Sonden sind heute jedoch erst seit einem bis maximal drei Jahrzehnte in Betrieb.
- 2. Die thermischen Auswirkungen des Wärmeentzugs haben langfristige, radial gegen aussen asymptotisch abnehmende "Trichter" zur Folge. Typische Reichweiten der Trichter (und damit gegenseitiger Beeinflussung) umfassen bei rein konduktiven Wärmeentzug langfristig wenige zehn Meter (Poppei & Masset, 2017). Negative Beeinflussungen sind deshalb nur bei dichter Anordnung wie sie in Städten in Wohngebieten ohne Fernwärmeversorgung zunehmend anzutreffen sind zu erwarten (Poppei et al., 2017).1
- 3. In der Vergangenheit wurden EWS oftmals konservativ (unter Kreditnahme von Sicherheitsreserven) ausgelegt. Zudem waren in der Vergangenheit die Arbeitszahlen der Wärmepumpen niedriger. Der spezifische Wärmeentzug ist in beiden Fällen geringer.

Das Thema Regeneration von EWS beinhaltet auch den Aspekt der saisonalen Speicherung: Geothermie ist die Nutzung von im Untergrund gespeicherter Energie. Auch die Speicherung solar gewonnener Energie z.B. zur Regeneration entzogener Erdwärme gehört dazu.

1.3 Projektziele

Zwei typische Beispielquartiere in der Stadt Zürich, die sehr unterschiedliche Charakteristika in der Bebauung zeigen, werden untersucht: Ein «urbanes» Quartier mit grosser Gebäudedichte und tendenziell höheren Gebäuden sowie ein «suburbanes» Quartier, das weniger dicht bebaut ist und eher niedrigere Gebäude aufweist. Es wird untersucht, ob und wie solarthermische Regeneration realisiert werden kann, wenn im Endzustand alle Gebäude im Quartier mit Wärmepumpen und EWS ausgestattet sind. Die Ergebnisse sollen so verallgemeinert werden, dass die Erkenntnisse auch auf andere mehr oder weniger dicht bebaute Wohnquartiere anwendbar sind.

Methodisch wird mit einer Simulationsstudie die saisonale Speicherung solarthermischer Energie über Erdwärmesonden untersucht, wobei ein besonderer Fokus auf der flächeneffizienten Nutzung von PVT-Kollektoren zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme liegt. Die Untersuchung bezieht sich auf ganze Quartiere, der grundstücksübergreifende Einfluss der einzelnen Gebäude wird untersucht.

¹ Entsprechend schreiben aktuell die Kantone und auch die deutschen Bundesländer nur geringe Mindestabstände zwischen 5 und 10 m vor, die den Aspekt des gegenseitigen Wärmeentzugs nicht berücksichtigen.

Solare Wärme für die Regeneration soll primär auf der zur Verfügung stehenden Dachfläche gewonnen werden. Dazu werden verschiedene Kollektortypen berücksichtigt. Anhand eines Beispielgebäudes mit ungenügender Dachfläche für vollständige EWS-Regeneration durch die PVT-Dachanlage soll zudem das Potenzial ergänzender Regenerationsmassnahmen untersucht werden. Neben der Abwärmenutzung aus der Gebäudekühlung bieten sich insbesondere weitere PVT-Kollektorfelder an den südlichen Fassaden sowie die Verwendung von Luft-Wasser-Wärmeübertrager (LWWÜ) an.

Bei der Regeneration werden Obergrenzen für den Wärmeeintrag in den Untergrund berücksichtigt. Dies sind auf der einen Seite genehmigungsrechtliche Beschränkungen und auf der anderen Seite Beschränkungen aufgrund der Temperaturbeständigkeit der üblicherweise verwendeten Materialien für die Sondenrohre.

Der energetische Teil soll auch die Betrachtung der gebäudeeigenen Stromerzeugung durch PV oder PVT und somit eine Untersuchung der energetischen Autarkie beinhalten. Die Wärmebereitstellung durch WPs ist nur dann vollständig nachhaltig, wenn dafür erneuerbarer Strom verwendet wird. Somit kommt einerseits dem mittels PV selbst erzeugten Strom und andererseits dem Stromverbrauch während der Wintermonate eine bedeutende Rolle zu. Für Letzteren erfolgt eine Betrachtung über die Nutzungsdauer von 50 Jahren.

Die Projekterkenntnisse sollen als Grundlage für nicht-normative Wegleitungen oder Leitfäden für die Planung von regenerierten EWS-Feldern in städtischen Gebieten verwendet werden können. Die Ergebnisse sollen eine Grundlage für die Umsetzung von nachhaltigen Regenerationsmassnahmen darstellen, die technisch, energetisch und ökonomisch sinnvoll sind. Sie sollen auch für Behörden eine Hilfe sein bei der Energieplanung oder der Bewilligung von EWS-Projekten.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Übersicht über die Vorgehensweise

Das methodische Vorgehen kann grob mit den folgenden Schritten beschrieben werden. Die Auflistung dient der Übersicht. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte ist ab Abschnitt 2.3 zu finden:

- Charakterisierung der Beispielgebäude: Basierend auf Gebäudepark- und Solarpotential-Daten werden für zwei ausgewählte Quartiere je fünf Gebäudetypen definiert, welche sich über ihren Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser sowie über Neigung, Ausrichtung und Fläche ihrer Dächer definieren. Diese Beispielsgebäude repräsentieren den Gebäudebestand der beiden Quartiere.
- Modellierung der Beispielgebäude in Polysun: Alle Beispielgebäude werden als einzelne Modelle in Polysun modelliert.
- 3. Iteratives Bestimmen der EWS-Dimensionierung und der Kollektorzahl: Durch abwechslungsweise Simulationen im EWS-Tool und in Polysun werden für jedes Beispielgebäude die EWS-Dimensionierung und die erforderliche Kollektorzahl ermittelt. In Polysun wird die Regeneration der EWS simuliert. Im EWS-Tool wird die erforderliche Dimensionierung der EWS unter Berücksichtigung nachbarschaftlicher Beeinflussung ermittelt, welche durch eine Anpassung der Erdreichtemperatur modelliert wird.
- 4. **Polysun-Simulationen mit den ermittelten Dimensionierungen:** Für alle Lösungsvarianten werden basierend auf der bestimmten EWS-Dimensionierung und Kollektorzahl weitere Simulationen zur Ermittlung von Regenerationsanteil, elektrischem Autarkiegrad, usw. durchgeführt.
- 5. Charakterisierung eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration: Basierend auf den Gebäudepark-Daten und den Polysun-Simulationen zu den fünf typischen Gebäuden, wird ein Gebäude definiert, um weitere Regenerationsmassnahmen neben der PVT-Dachanlage zu untersuchen. Zusätzlich zu den Dachflächen wird auch die potenziell nutzbare Fläche für PVT-Fassadenanlagen bestimmt.
- 6. Polysun-Simulationen am Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regeneration mit zusätzlichen Wärmequellen: Am spezifizierten Beispielgebäude werden für zusätzliche Regenerationsmassnahmen Simulationen durchgeführt, um den Regenerationsanteil, den zusätzlichen Stromverbrauch durch die Regeneration für unterschiedliche Betriebsjahre usw. zu bestimmen.

2.2 Terminologie

Die folgende Auflistung soll einige im Bericht verwendete Begriffe exakt definieren, deren Bedeutung andernfalls unklar oder uneindeutig sein kann:

Dachflächen:

- **Brutto-Dachfläche:** Geometrische Dachfläche gemäss dem Datensatz von sonnendach.ch (Bundesamt für Energie, o. J.)
- **Ausnutzungsgrad:** Sinnvoll nutzbarer Anteil der Brutto-Dachfläche für PV-Module oder PVT-, bzw. Flachkollektoren. Wert zwischen 0 und 1.
- **Netto-Dachfläche:** Sinnvoll nutzbarer Anteil der Brutto-Dachfläche für PV-Module oder PVT-, bzw. Flachkollektoren (Brutto-Dachfläche multipliziert mit Ausnutzungsgrad)
- Nutzbare Dachfläche: Summe aller Netto-Dachflächen eines Gebäudes, die der Eignungsklasse 3 oder höher entsprechen und somit als «gut», «sehr gut» oder «hervorragend» nach

Sonnendach (Klauser, 2016) eingestuft werden. Neigung und Ausrichtung haben keinen Einfluss auf die nutzbare Dachfläche. Gering und mittel geeignete Dächer fliessen nicht in die nutzbare Dachfläche mit ein.

- Südabweichung: Ausrichtungswinkel, um dessen Betrag ein Dach abweicht von einer perfekten Ausrichtung nach Süden. Für die Beschreibung der typischen Gebäude wird davon ausgegangen, dass die Abweichung nach Osten und nach Westen einen in erster Näherung gleich grossen Einfluss auf den Ertrag von PV-Modulen und PVT- bzw. Flachkollektoren haben. Wert zwischen 0 und 180°.
- «maximale Kollektorzahl»: Anzahl Kollektoren, die maximal auf der Netto-Dachfläche angebracht werden können.
- «erforderliche Kollektorzahl»: Anzahl Kollektoren, die erforderlich sind für einen Regenerationsanteil von 100 %. Limitiert auf maximale Kollektorzahl.

Energiebilanz der EWS:

- **Brutto-Wärmeentzug:** Gesamte Wärmeenergie, die dem Erdreich über die EWS entzogen wird. Vorzeichen positiv.
- **Regenerationswärme**: Wärmenergie, die durch Regeneration in das Erdreich eingebracht wird. Vorzeichen negativ.
- **Regenerationsanteil**: Anteil des Brutto-Wärmeentzugs, der durch Regeneration gedeckt werden kann. Regenerationswärme geteilt durch Brutto-Wärmeentzug mal 100 %.
- Netto-Wärmeentzug: Brutto-Wärmeentzug plus Regenerationswärme (bzw. Brutto-Wärmeentzug minus Regenerationswärme bei Verwendung von absoluten Zahlen). Vorzeichen positiv (Regenerationsanteil < 100 %) oder negativ (Regenerationsanteil > 100 %).

Elektrische Systemkenngrössen:

- Lastgerechter Autarkiegrad: Anteil des Stromverbrauchs der Wärmepumpenanlage, der tatsächlich durch eigenproduzierten Strom gedeckt werden kann, also wenn Stromverbrauch und Eigenstromproduktion zeitlich übereinstimmen. Zu beachten ist, dass der Stromverbrauch nur die Wärmebereitstellung berücksichtigt, sofern nichts anderes angegeben ist. Es wird kein elektrisches Verbrauchsprofil für Beleuchtung, Kochen, Waschen, etc. verwendet.
- **Bilanzieller Autarkiegrad:** Anteil des Stromverbrauchs der Wärmepumpenanlage, der in der Jahresbilanz durch die Eigenstromproduktion gedeckt werden kann. Eigenstromproduktion geteilt durch Stromverbrauch mal 100 %. Zu beachten ist, dass der Stromverbrauch nur die Wärmebereitstellung berücksichtigt, sofern nichts anderes angegeben ist. Es wird kein elektrisches Verbrauchsprofil für Beleuchtung, Kochen, Waschen, etc. verwendet.

Kenngrössen des Wärmebedarfs und kombinierte Kenngrössen

- Wärmebedarf: Sofern nichts anderes angegeben ist, bezeichnet der Begriff Wärmebedarf den in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Mittelwert des jährlichen Wärmebedarfs der Jahre 2020 und 2050 und beinhaltet sowohl Raumwärme als auch Warmwasser.
- **Wärmebedarfsdichte:** Wärmebedarf (gemäss obiger Definition) pro 100-x-100-Meter-Raster wie in Abbildung 5 gezeigt.
- **Dachfläche pro Wärmebedarf:** Nutzbare Dachfläche (gemäss obiger Definition) geteilt durch den jährlichen Wärmebedarf (gemäss obiger Definition).

2.3 Beispielgebäude basierend auf Quartierdaten

2.3.1 Auswahl der zugrunde liegenden Quartiere.

Es werden zwei Quartiere der Stadt Zürich ausgewählt, wovon eines einen «urbanen» und das andere einen «suburbanen» Charakter hat. Für ersteres wird das Quartier Zürich-Altstetten und für zweiteres das Quartier Looren in Zürich-Witikon ausgewählt.

Grundsätzlich sind die beiden Quartiere für typische Aussenquartiere in Städten resp. für viele Gemeinden verallgemeinerbar. Sie haben eine Bedarfsdichte, welche beim Beispiel Altstetten etwas kleiner ist als in Innen- oder Altstadtgebieten. Solche weisen ausgeprägte individuelle Charakteristika sowie erhöhte regulatorische Rahmenbedingungen auf. In Zürich-Witikon ist sie höher als in rein ländlichen Gebieten, bei denen die Übernutzung des Untergrunds nicht zu befürchten ist.

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen die Kartenausschnitte der beiden ausgewählten Quartiere. Das urbane Quartier «Altstetten» hat gemäss dem Geoportal des Bundes (Bundesamt für Landestopografie, o. J.) eine Fläche von 973'000 m² und das suburbane Quartier «Looren» eine Fläche von rund 180'000 m².

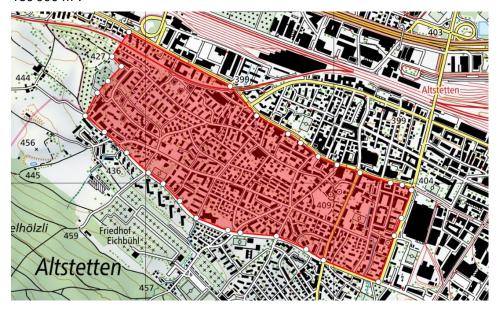


Abbildung 1: Das urbane Quartier "Altstetten" (Bundesamt für Landestopografie, o. J.)

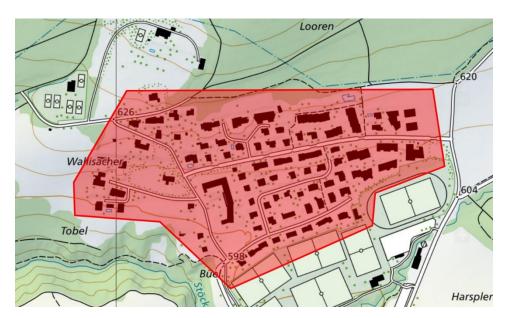


Abbildung 2: Das suburbane Quartier "Looren" in Zürich-Witikon (Bundesamt für Landestopografie, o. J.)

Einen Eindruck der Quartierzusammensetzung liefern die in Abbildung 3 und Abbildung 4 gezeigten 3D-Ansichten der beiden Quartiere.



Abbildung 3: 3D-Ansicht des urbanen Quartiers "Altstetten" (Bundesamt für Landestopografie, o. J.)



Abbildung 4: 3D-Ansicht des suburbanen Quartiers "Looren" in Zürich-Witikon (Bundesamt für Landestopografie, o. J.)

Die Gebäude der jeweiligen Quartiere dienen als Datengrundlage für die Ableitung von je fünf «Beispielgebäuden» für das urbane und das suburbane Quartier.

In Abbildung 5 ist die Wärmebedarfsdichte der beiden Quartiere in einem Raster der Seitenlänge 100 m x 100 m gezeigt. Als Datengrundlage dient der in Abschnitt 2.3.3 ermittelte Wärmebedarf aus dem Gebäudeparkmodell (GPM) der Stadt Zürich (Wallbaum et al., 2010). Über das gesamte Quartier gemittelt, weist das urbane Quartier eine Wärmebedarfsdichte von rund 730 MWh/ha auf. Im suburbanen Quartier beträgt sie rund 240 MWh/ha. Erwartungsgemäss weist das urbane Quartier eine deutlich grössere Wärmebedarfsdichte auf. Insbesondere am nordöstlichen Rand ist eine deutliche Konzentration des Wärmebedarfs zu erkennen. Wie in Abbildung 1 und Abbildung 3 zu erkennen, gibt es an dieser Stelle vermehrt grössere Gebäude und damit eine dichtere Bebauung. Das suburbane Quartier hat über weite Teile eine sehr moderate Wärmebedarfsdichte von unter 200 MWh/ha. Allerdings gibt es im nordöstlichen Teil Bereiche, wo Wärmebedarfsdichten von 600 MWh/ha oder mehr auftreten und eine sorgfältige Planung von EWS-Lösungen erfolgen sollte.

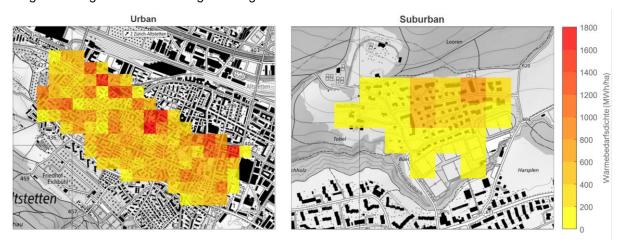


Abbildung 5: Wärmebedarfsdichte der beiden Quartiere über ein Raster der Fläche 100 m x 100 m (Bundesamt für Landestopografie, o. J.).

2.3.2 Verwendete Daten und Datenaufbereitung

Die Datengrundlage für den Wärmebedarf der Gebäude bildet das GPM der Stadt Zürich (Wallbaum et al., 2010). Es wird ein von der Stadt Zürich zur Verfügung gestelltes, nicht öffentliches Datenfile mit den

EGID- und EGRID-Daten sowie den Wärmebedarfsangaben aller Gebäude in den zwei Quartieren als Ausgangspunkt genommen. Das GPM unterscheidet zwischen den Szenarien «Referenz» und «Effizienz». Es werden die Daten des Szenarios «Referenz» verwendet. Dieses Szenario stellt quasi den «Worstcase» dar. Wenn die Machbarkeit einer vollständigen Regeneration im Quartier bei EWS in allen Gebäuden nachgewiesen werden kann, dann ist auch der Nachweis für das Szenario «Effizienz» gegeben. Aus der Dokumentation des GPM (Wallbaum et al., 2010) kann abgeleitet werden, dass das Effizienz-Szenario für das Jahr 2035 im Mittel über alle Gebäude einen rund 14 % tieferen spezifischen Heizwärmebedarf voraussagt als das Referenz-Szenario. Die beiden Szenarien befinden sich also in der gleichen Grössenordnung und ein erhebliches Überschätzen des Wärmebedarfs ist durch die Verwendung der Daten des Referenz-Szenarios nicht zu befürchten.

Vor der eigentlichen Auswertung werden sehr kleine Gebäude mit einer Energiebezugsfläche (EBF) von weniger als 50 m² aus dem Datensatz entfernt, um die Anwendbarkeit der Quartiermodelle auf beliebige Quartiere nicht zu beeinträchtigen. Zudem beeinflussen so kleinen Gebäude das Resultat dieser Studie kaum.

2.3.3 Einteilung in typische Gebäude

Die Einteilung in typische Gebäude erfolgt über die Anzahl Wohnungen. Es werden fünf Gebäudegrössen definiert, denen jeweils ein bestimmter Bereich an Anzahl Wohnungen zugeordnet wird (Tabelle 1). Das EFH hat nur eine einzige Wohnung, bei der Grossbaute sind es 21 oder mehr Wohnungen. In den Beispielquartieren gibt es auch gewerbliche oder industrielle Bauten. Da die Untersuchung für Wohnquartiere gemacht wird, ist dennoch die Unterscheidung über die Anzahl Wohnungen am zweckmässigsten. Die Gewerbe- und Industriebauten werden bei der statistischen Auswertung der Quartierdaten ebenfalls mit einbezogen und fliessen in die Modellierung der Beispielgebäude ein. Ihr Einfluss ist somit in den unten gezeigten Beispielgebäuden genauso berücksichtigt wie der der Wohnbauten, auch wenn die Benennung und Abgrenzung sich an Charakteristika von Wohnbauten orientiert.

Tabe	elle	1:	Bezeic	hnung	und	Anzahl	Wc	hnungen	der	Beispielgebäude	€.
------	------	----	--------	-------	-----	--------	----	---------	-----	-----------------	----

Gebäudekategorie	Bezeichnung	Anz. Wohnungen
1	EFH	1
2	MFH klein	2 bis 3
3	MFH mittel	4 bis 6
4	MFH gross	7 bis 20
5	Grossbaute	21 und mehr

Über die Anzahl Wohnungen werden EBF-Grenzwerte ermittelt, welche die Beispielgebäude voneinander abgrenzen. In Tabelle 2 sind die Grundlagen gezeigt, mit denen die typische EBF für eine Wohnung ermittelt wird. Über die durchschnittliche Belegungsdichte und die Wohnfläche pro Bewohner wird eine durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung ermittelt. Mit Umrechnungsfaktoren aus der Literatur wird aus der durchschnittlichen Wohnfläche eine durchschnittliche EBF berechnet.

Tabelle 2: Grundlagen für die Umrechnung der Wohnungszahl in EBF.

	Belegungs- dichte pro Wohnung (Bundesamt für Statistik, 2019a)	Wohnfläche pro Bewohner (m²) (Bundes- amt für Statistik, 2019b)	Wohnfläche pro Woh- nung (m²)	EBF pro Wohnfläche nach ECOSPEED (Hartmann & Jakob, 2016)	EBF pro Wohnung (m²)
EFH	2.2	54	120	1.30	155
MFH	2.2	43	95	1.25	120

Über die mögliche Anzahl Wohnungen und die durchschnittliche EBF pro Wohnung wird für jede Kategorie eine Ober- und eine Untergrenze für die EBF berechnet. Als Grenzwert dient jeweils der Mittelwert zwischen der Obergrenze der kleineren Kategorie und der Untergrenze der grösseren Kategorie. Die so ermittelten EBF-Grenzwerte pro Kategorie sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: EBF-Grenzwerte pro Gebäudekategorie.

Gebäude- EBF bei min. Woh- kategorie nungszahl (m²)			
1	155	155	198
2	240	360	420
3	480	720	780
4	840	2400	2460
5	2520	∞	∞

Über die in der letzten Spalte von Tabelle 3 gegebene Obergrenze werden alle Gebäude des GPM-Datensatzes in eine der fünf Kategorien eingeteilt. Der Datensatz enthält EBF-Werte für die Jahre 2020, 2035 und 2050. Für die Einteilung werden die Werte des Jahres 2020 verwendet, da sich auch die Berechnungsgrundlagen in Tabelle 2 auf die jetzige Zeit beziehen.

Anschliessend werden über den gesamten Datensatz (beide Quartiere) die Mittelwerte berechnet für:

- Wärmebedarf Raumwärme (RW) für die Jahre 2020, 2035 und 2050
- Wärmebedarf Warmwasser (WW) für die Jahre 2020, 2035 und 2050
- EBF (im Jahr 2020)
- Grundstücksfläche

Sofern mehrere Gebäude (EGID) dem gleichen Grundstück (EGRID) zugeordnet sind, wird die Grundstücksfläche pro Einzelgebäude proportional zur Gebäudegrundfläche angenommen. Um beim Wärmebedarf die zukünftige Entwicklung zu berücksichtigen, wird sowohl bei RW als auch bei WW der Mittelwert aus den Werten von 2020 und 2050 verwendet.

Das Aufsummieren der so ermittelten Durchschnittswerte pro Gebäudekategorie auf die beiden Quartiere ergibt für das urbane Quartier ein Unterschätzen des Wärmebedarfs und ein Überschätzen der Grundstücksflächen und für das suburbane Quartier eine Abweichung in die umgekehrte Richtung. Es wird deshalb auf die ermittelten Werte für den RW-Wärmebedarf, den WW-Wärmebedarf sowie die Grundstücksfläche ein Korrekturfaktor angewandt, der für die beiden Quartiere verschieden ist. So wird

der Tatsache Rechnung getragen, dass diese Grössen in den beiden Quartieren für Gebäude der gleichen Kategorie unterschiedlich sind. Die Korrekturfaktoren sind in Tabelle 4 gezeigt. Dass die durchschnittliche Grundstücksfläche pro Gebäude im suburbanen Quartier grösser ist als im urbanen, ist aufgrund der weniger dichten Bebauung nicht weiter erstaunlich. Beim Wärmebedarf sind die Unterschiede primär damit zu begründen, dass im urbanen Quartier im Durchschnitt ein geringerer Baustandard vorhanden ist und die Belegungsdichte pro Wohnung grösser ist. Ersteres führt zu einem grösseren Wärmebedarf für RW und zweiteres zu einem grösseren WW-Bedarf. Die Absolutwerte der Korrekturfaktoren sind im suburbanen Quartier deshalb grösser, weil dieses Quartier aufgrund der geringeren Gebäudezahl die unkorrigierten Durchschnittswerte über beide Quartiere weniger stark beeinflusst. Aus den ursprünglichen fünf Kategorien entstehen somit zehn Beispielgebäude: Je eines pro Kategorie und Quartier. Die Beispielgebäude des urbanen Quartiers erhalten den Präfix U, die des suburbanen Quartiers den Präfix S. Mit einem erneuten Aufsummieren pro Quartier wird sichergestellt, dass die Durchschnittswerte in Summe die Quartierswerte abbilden. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

Tabelle 4: Korrekturfaktoren für die Anpassung der Gesamtdurchschnittswerte an die einzelnen Quartiere.

Quartier	Korrekturfaktor Grundstücksfläche	Korrekturfaktor Raumwärme	Korrekturfaktor Warmwasser	
Urban	-3.0 %	0.5 %	0.5 %	
Suburban	23.0 %	-8.6 %	-9.7 %	

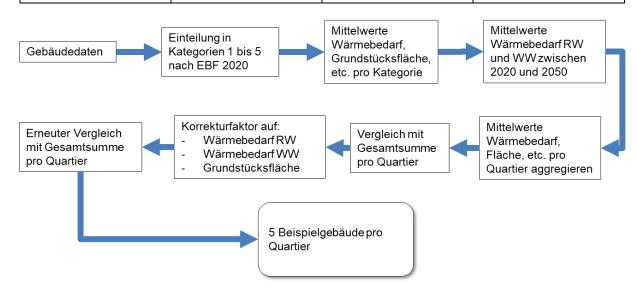


Abbildung 6: Vorgehensweise beim Ermitteln der Eigenschaften der Beispielgebäude.

Die nach diesem Vorgehen ermittelten Beispielgebäude sind in Tabelle 5 aufgeführt. Zu beachten ist, dass das Gebäude S5 ein rein hypothetisches Gebäude ist, das im Datensatz kein einziges Mal vorkommt. Da die ursprüngliche Einteilung auf den gemeinsamen Daten beider Quartiere sowie quartierspezifischen Korrekturfaktoren basiert, können dennoch erwartete Werte zum Wärmebedarf und der Grundstücksfläche angegeben werden. Da die Resultate dieser Studie auch auf andere Quartiere anwendbar sein sollen, sind diese Werte hier angegeben, obwohl sie in der Studie nicht verwendet werden.

Tabelle 5: Beispielgebäude für das urbane (U) und das suburbane (S) Quartier. Der Wärmebedarf entspricht dem Mittelwert der Werte von 2020 und 2050.

Beispiel- gebäude	EBF (m²)	Grund- stücksflä- che (m²)	Jährl. Wärme- bedarf RW (kWh kWh/m²)	Jährl. Wärme- bedarf WW (kWh kWh/m²)	Jährl. Wärmebe- darf gesamt (kWh kWh/m²)	Anzahl Gebäude
U1	180	430	14'800 82.2	2'400 13.3	17'200 95.6	119
S1	100	580	13'500 75.0	2'200 12.2	15'700 87.2	45
U2	360	610	26'500 73.6	6'400 17.8	32'900 91.4	174
S2		830	24'300 67.5	5'800 16.1	30'100 83.6	39
U3	640	720	42'700 66.7	12'600 19.7	55'300 86.4	336
S3		970	39'100 61.1	11'400 17.8	50'500 78.9	13
U4	1'420	1'050	86'200 60.7	27'200 19.2	113'400 79.9	261
S4	1 120	1'420	79'000 55.6	24'600 17.3	103'600 73.0	17
U5	4'980	1'680	238'300 47.9	80'700 16.2	319'000 64.1	48
S5	. 500	2'270	218'200 43.8	73'200 14.7	291'400 58.5	0

2.3.4 Dachflächen der typischen Gebäude

Für jedes Beispielgebäude wird eine «typische Dachfläche» für die Modellierung in Polysun ermittelt. Dafür werden zunächst für jedes Beispielgebäude eine durchschnittliche Grösse, Ausrichtung und Neigung der Dachfläche ermittelt. Letztere wird mit einem «Ausnutzungsgrad» ≤1 multipliziert, der den Anteil der effektiv belegbaren Dachfläche darstellt. Diese «Nettodachfläche» geteilt durch die Kollektorgrösse ergibt die maximal mögliche Anzahl Kollektoren pro Beispielgebäude.

Der Ausnutzungsgrad wird durch manuelles Belegen von hundert zufällig ausgewählten Gebäuden aus den beiden Beispielquartieren ermittelt. Dafür wird auf Satellitenbildern der Gebäude auf jeder Dachfläche eine «sinnvolle Belegung» dargestellt. Damit ist gemeint, dass eine möglichst grosse Ausnutzung der Dachfläche angestrebt wird, allerdings unter Berücksichtigung von Verschattung durch Dachaufbauten sowie praktischer und ästhetischer Aspekte. Die Module werden möglichst zusammenhängend angeordnet. Einzelne abgesetzte Module werden vermieden.

Die virtuelle Belegung der Dächer wird mit dem frei zugänglichen Online-Tool «K2 Base» (K2 Systems GmbH, 2020) des Montagesystem-Herstellers «K2 Systems» automatisiert durchgeführt. Die Resultate des Tools müssen, wo erforderlich, durch manuelles Hinzufügen oder Entfernen von Modulen angepasst werden. Zwei Beispiele für die virtuelle Belegung sind in Abbildung 7 gezeigt. Für die Belegung werden PV-Module des Typs «AX270M» von «Axitech Energy GmbH & Co.» verwendet. Sie haben eine Grösse von 1'640 x 992 mm. Bei Flachdächern wird das Montagesystem «D-Dome 10°» verwendet, welches jeweils zwei Module paarweise mit einer Neigung von 10° auf beide Seiten zusammenfasst. Zwischen den Modulpaaren gibt es jeweils eine schmale Lücke für die Begehung. Die Modulpaare werden in der Regel entlang der längsten Fassadenseite ausgerichtet (hellgrüne Linie in Abbildung 7).



Abbildung 7: Zwei Beispiele der mit «Base K2» (K2 Systems GmbH, 2020) virtuell belegten Dächer: Schrägdach (links) und Flachdach (rechts). Bei der Belegung wurden Hindernisse, Verschattung sowie ästherische Grundanforderungen berücksichtigt.

Für die Ermittlung des Ausnutzungsgrads wird für jede Dachfläche die gesamte Modulfläche (Anzahl Module mal Fläche des einzelnen Moduls) durch die Brutto-Dachfläche des sonnendach.ch-Datensatzes geteilt. Das Resultat ist ein Ausnutzungsgrad für jede Dachfläche der hundert Gebäude. Auch Dachflächen, auf denen keine Module angebracht werden können, werden berücksichtigt und fliessen mit einem Ausnutzungsgrad von null in die Gesamtbetrachtung ein. Bei Flächen, die bereits heute mit PV-Modulen oder Flachkollektoren belegt sind, wird die bestehende Belegung übernommen oder erweitert, falls noch Platz für mehr Module übrigbleibt. Bei Flachdächern wird davon ausgegangen, dass die verfügbaren und geeigneten Flächen komplett für PV genutzt werden können und nicht anderweitig genutzt werden, z.B. für eine intensive Dachbegrünung. Eine Ausnahme stellen Dachterrassen dar. Diese werden nicht mit PV belegt, damit sie weiterhin für den Aufenthalt genutzt werden können. Aus den Ausnutzungsgraden der einzelnen Dachflächen werden die mittleren Ausnutzungsgrade der jeweiligen Gebäudekategorien ermittelt. Dafür werden pro Gebäudekategorie die Netto- und die Bruttodachflächen aller Dachflächen aufsummiert und dann die Netto-Summe durch die Brutto-Summe geteilt. Somit wird pro Gebäudekategorie ein gewichteter Mittelwert berechnet. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Untersuchung der Ausnutzungsgrade Gegenstand eines anderen laufenden Projekts ist, und die Dachbelegungen nach dem Zeitpunkt der Auswertung noch einigen Änderungen unterzogen worden sind. Die in Tabelle 6 gezeigten Ausnutzungsgrade stellen also einen Zwischenstand dar. Ebenso weisen die Ausnutzungsgrade zwischen verschiedenen Gebäuden eine grosse Varianz auf, sodass die Aussagekraft der Stichprobengrösse von nur 20 Gebäuden pro Kategorie kritisch hinterfragt werden muss. Die berechneten Werte werden deswegen pragmatisch gerundet zu den in Tabelle 6 gezeigten Werten. Es wird davon ausgegangen, dass diese Werte mit nennenswerten Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Ermittlung der durchschnittlichen Neigung und Ausrichtung werden die Dächer aller Gebäude der zwei Quartiere berücksichtigt. Es werden lediglich die geeigneten Dachflächen, also Dachflächen der Eignungsklasse 3 und höher (nach Sonnendach) berücksichtigt. Dachflächen der Eignungsklassen 1 und 2 sind «gering» und «mittel» geeignet (Klauser, 2016) und werden nicht berücksichtigt. In einem nächsten Schritt werden alle Flachdächer, also Dachflächen mit einer Neigung von weniger als 5°, ersetzt durch die Neigung und Ausrichtung des verwendeten Montagesystems. Die Neigung beträgt in allen Fällen 10°, aber ist jeweils vom Gebäude abhängig. Da das verwendete Montagesystem «D-Dome 10°» jeweils zwei Module mit entgegengesetzter Ausrichtung kombiniert, spielt die Ausrichtung eine stark untergeordnete Rolle: Angenommen, die Module sind in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet, so ist jeweils ein Modul der Sonne zu- und eines abgewandt, was sich in Summe wieder ausgleicht. Dreht man die gesamte Installation zu einer Ost-West-Ausrichtung, sind beide Seiten der Sonne einmal am Tag ab- und einmal zugewandt. Aufgrund der zweiseitigen Ausrichtung und der geringen Neigung hat

die Ausrichtung dieser aufgeständerten Module auf den Jahresertrag am Standort Zürich keinen erheblichen Einfluss² und es kann für alle Flachdächer eine Ausrichtung von 90° eingesetzt werden. Mit den neuen Neigungs- und Ausrichtungs-Werten wird pro Gebäudekategorie ein gewichteter Durchschnitt ermittelt, wobei die Gewichtung nach der Brutto-Dachfläche vorgenommen wird. Für die Ausrichtung wird nicht der Ausrichtungswinkel selbst gemittelt, sondern der Absolutwert der Abweichung von der Südausrichtung, da der Mittelwert von Ausrichtungen zwischen -180° und 180° ungefähr null ergeben würde. Dies wäre jedoch der Idealfall und nicht der Durchschnitt.

Für die mittlere Dachfläche pro Gebäudekategorie werden ebenfalls alle Dachflächen beider Quartiere berücksichtigt, die die Eignungsklasse 3 oder höher aufweisen. Über die EGID werden mehrere Dachflächen desselben Gebäudes zu einer Brutto-Dachfläche des gesamten Gebäudes aufsummiert. Pro Gebäudekategorie wird der Mittelwert gebildet und mit dem Ausnutzungsgrad multipliziert. Dies ergibt die Netto-Dachfläche der jeweiligen Gebäudekategorie.

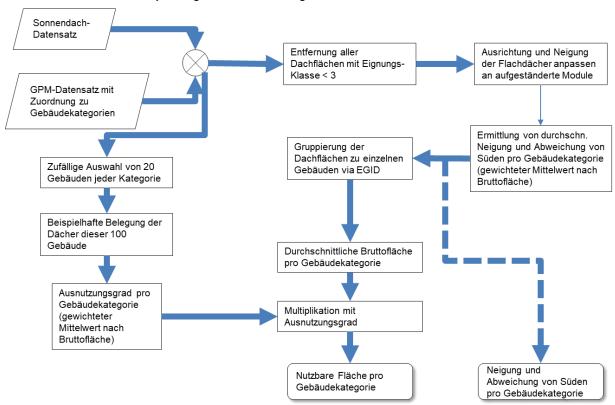


Abbildung 8: Vorgehen zur Ermittlung der Beispieldächer pro Gebäudekategorie

Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 8 in schematischer Darstellung präsentiert. Pro Gebäude-kategorie wird eine einzige «typische Dachfläche» ermittelt, deren Fläche, Neigung und Ausrichtung die Gesamtheit aller geeigneten Dachflächen pro Gebäude zusammenfassen soll. Diese typischen Dachflächen bilden auch die Grundlage für die Polysun-Modelle der Beispielgebäude. Sie sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Ausrichtung wird in Polysun als positiver Wert eingegeben, was in Polysun einer Ost-Ausrichtung entspricht (Vela Solaris AG, 2018). Am Standort Zürich ist der Unterschied des Jahresertrags zwischen Ost- und West-Ausrichtung vernachlässigbar.

² Eine Polysun-Simulation mit zweiseitig aufgeständerten PV-Modulen, die in 15°-Schritten rotiert wurden, hat für alle Ausrichtungen einen spezifischen Ertrag ergeben, der weniger als 1 % vom Mittelwert aller Varianten abweicht.

Tabelle 6: Typische Dächer und Kollektorzahl der Beispielgebäude

Gebäude- kategorie	Neigung (°)	Ausrichtung (Abweichung von Süden)	Brutto-Dach- fläche (m²)	Ausnut- zungsgrad (-)	Netto-Dach- fläche (m²)
1	28	60	71	0.55	39
2	28	60	104	0.55	57
3	25	70	172	0.55	95
4	20	80	284	0.48	136
5	20	80	570	0.43	245

Erwartungsgemäss weisen die Dächer der grösseren Gebäude im Mittel eine geringere Neigung auf, da der Anteil an Flachdächern grösser ist. Damit einhergehend ist auch die grössere Abweichung von Süden, da für Flachdächer aufgrund der Aufständerung eine Ausrichtung von 90° eingesetzt wird. Bemerkenswert ist die Abnahme des Ausnutzungsgrads bei Zunahme der Gebäudegrösse. Dies scheint plausibel, da grössere Gebäude öfters über zusätzliche Dachaufbauten verfügen, wie z.B. Installationen für Kühlung und Lüftung oder aber auch Fahrbahnen für Fassadenbefahranlagen.

Die angegebenen Ausnutzungsgrade sind als optimistische Werte einzustufen, da eine möglichst vollständige Belegung der Dächer erfolgte und alternative Nutzungen der Flachdächer nicht vorgesehen sind. Bei den Netto-Dachflächen ist zu berücksichtigen, dass gering und mittel geeignete Dachflächen nicht berücksichtigt sind. In der Praxis kann es sinnvoll sein, zumindest mittel geeignete Flächen ebenfalls zu nutzen.³ Dies wirkt einer möglichen Überschätzung durch die optimistischen Ausnutzungsgrade entgegen.

2.4 Modellierung der Beispielgebäude in Polysun

2.4.1 Standort und Wetterdaten

Als Standort für die Meteodaten und Simulationen wird das Stadtzentrum von Zürich (Breitengrad 47.37°, Längengrad: 8.54°, 413 m.ü.M.). Dieser Standort befindet sich ungefähr in der Mitte zwischen den beiden Beispielquartieren Altstetten und Witikon. Als Wetterdaten wird in Polysun der Wetterdatensatz Meteonorm 7.2 verwendet. Ebenfalls werden die Horizontdaten von Meteonorm für den genannten Standort verwendet.

2.4.2 Gebäudemodell (Heizwärmebedarf)

Weil detaillierte Verbrauchswerte für die in Tabelle 5 gezeigten Beispielgebäude nicht vorhanden und bei der Betrachtung von Musterquartieren auch nicht zielführend sind, wird bei den Simulationen in Polysun auf das vereinfachte quasi-dynamische Gebäudemodell zurückgegriffen. Es erlaubt eine Gebäudebeschreibung auf Nutzenergieebene und berücksichtigt dynamische Gebäudeeigenschaften sowie den Solarertrag. Die Definition der jeweiligen Beispielgebäude erfolgt entsprechend über drei Eingabeparameter, die Wärmeverluste (Transmissions-, Lüftungs- und Infiltrationsverluste), den Heizwärmebedarf und die EBF. Während der Heizwärmebedarf und die EBF pro Beispielgebäude gegeben sind, lässt sich die zeitliche Charakteristik des Heizbetriebes über die Annahme der Wärmeverluste verändern. Als Wert für die Wärmeverluste wird jeweils der dreifache Heizwärmebedarf der betrachteten Gebäudekategorie verwendet. Dies bedeutet, dass zwei Drittel des Wärmebedarfes über solare und interne Wärmegewinne und der Rest vom Heizungssystem gedeckt werden. Dies entspricht einem neuen Gebäude mit im Vergleich zu heute verbessertem Nutzerverhalten (in Anlehnung an Mojic et al., 2018).

³ Dies ist insbesondere bei PVT- oder Flachkollektoren in Kombination mit einer Wärmepumpe der Fall, da nicht nur Solarstrahlung, sondern auch Umgebungswärme genutzt wird.

Soll-Raumtemperatur

Die Soll-Raumtemperatur ist mit 22 °C festgelegt, was deutlich über der Standardannahme der SIA 380/1 von 20 °C liegt. Messungen der effektiven Raumtemperaturen in MFH zeigen, dass in der Praxis Raumtemperaturen von 22 bis 23 °C zu erwarten sind (Brücker, 2015; Mojic et al., 2018).

Für die unbeheizten Kellerräume ist eine mittlere Raumtemperatur von 16 °C und ein Temperaturbereich von 4 °C festgelegt. Dies liegt im unteren Bereich der von Hoffmann und Geissler (2017) berichteten Messergebnisse für unbeheizte Untergeschosse in MFH. Aufgrund der milden Klimabedingungen während den Messungen ist jedoch davon auszugehen, dass der gemessene Temperaturbereich bei längeren Messperioden tiefer ausfallen würde. Der angenommene Temperaturbereich ist dementsprechend eine konservative Schätzung.

Heizgrenze

Die Heizgrenze wird bei 16 °C und damit deutlich über der von der SIA 380/1:2016 empfohlenen theoretischen Heizgrenze 12 °C festgesetzt. Damit entspricht sie eher den in der Praxis gemessenen Heizgrenzwerten, welche im Schweizer Mittelland im Bereich zwischen 14 und 17 °C (Hubacher et al., 2017; Mojic & Haller, 2016) liegen. Im Vergleich mit aktuellen Messungen aus der Praxis ist die verwendete Heizgrenze nach wie vor eher tief. Messungen von (Mojic et al., 2018) und (Roost et al., 2018) zeigen, dass die effektiv eingestellten Heizgrenzen zwischen 15.7 und 22 °C (Median 18.5 °C) respektive 13 und 20 °C (Median 18 °C) liegen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Einstellungen der Heizgrenzen künftig angepasst werden.

Heizkurve

Für sämtliche Gebäudekategorien wird eine lineare Heizkurve verwendet. Aufgrund der Norm-Aussentemperatur von -8 °C in Zürich, der Soll-Vorlauftemperatur der eingesetzten Fussbodenheizung von 45 °C (bestehende Gebäude, Spreizung 10 K) und der gewählten Heizgrenze ergibt sich eine Steigung von 0.417.

2.4.3 Wärmebedarf Warmwasser

Der tägliche Warmwasserbedarf wird auf der Grundlage des ermittelten mittleren jährlichen Wärmebedarfes für Warmwasser pro Gebäudekategorie in Normliter berechnet (Tabelle 7). Der Tabelle ist auch die Entnahmemenge bei der tieferen Soll-Temperatur an der Entnahmestelle von 50 °C zu entnehmen. Anstelle eines Verbrauchsprofiles wird das standardmässig bereitgestellte Tagesprofil «Dauernd» verwendet. Dies bedeutet, dass jede Stunde 4.16 % des Tagesverbrauches gezapft werden.

Tabelle 7: Täglicher Warmwasserbedarf und erforderliches Speichervolumen

Beispiel- gebäude		Jährl. Wärmebedarf für WW (kWh kWh/m²)	Tagesbedarf bei 60 °C (I/d)	Tagesbedarf bei 50 °C (I/d)	Benötigtes Speichervolu- men (I)	Verwendetes Speichervolu- men (I)
		((1)
	U1	2'400 13.3	113	142	203	200
_	U2	6'400 17.8	302	378	566	600
Urban	U3	12'600 19.7	595	743	1'071	1'100
)	U4	27'200 19.2	1'284	1'605	2'311	2'300
	U5	80'700 16.2	3'808	4'760	6'854	6'900
	S1	2'200 12.2	104	130	187	200
an	S2	5'800 16.1	274	342	493	500
Suburban	S3	11'400 17.8	538	672	968	1'000
Suk	S4	24'600 17.3	1'161	1'451	2'090	2'100
	S5	73'200 14.7	3'454	4'318	6'217	6'200

Bemerkungen: Die Berechnung des Speichervolumens wird in Abschnitt 2.4.2 beschrieben.

2.4.1 Hydraulik

Abbildung 9 zeigt die in den Simulationen eingesetzte Hydraulik. Die über einen Plattenwärmeübertrager eingebundenen PVT-Kollektoren werden neben der Regeneration auch zur Vorerwärmung der Sole während dem Betrieb der WP verwendet. Als Ein- resp. Ausschalttemperaturdifferenz für den PVT-Kreislauf werden 6 resp. 2 K sowohl zur Soletemperatur (Heizbetrieb) als auch zur mittleren Sondentemperatur (Regeneration) verwendet. Der spezifische Durchfluss im PVT-Kreislauf ist auf 30 l/(h*m²) festgesetzt.

Die Bereitstellung des Warmwassers erfolgt über eine Frischwasserstation, wodurch mehr Flexibilität bei der Speichertemperatur ermöglicht wird. Für das Heizsystem wird ein technischer Speicher eingesetzt. Dieser überbrückt die Zeit während der Erwärmung des Warmwassers, aber auch mögliche Sperrzeiten durch den Energieversorger.

Der Durchfluss im Primärkreis der WP wird während dem Betrieb der WP auf das Zweifache des Nenndurchflusses im Sekundärkries festgelegt. Während dem Regenerationsbetrieb hingegen wird der Durchfluss jenem im PVT-Kreislauf angepasst und bei Bedarf auf das Zweifache dessen gesteigert. Mit der Regelung des Volumenstroms soll eine möglichst konstante Temperaturspreizung von 4 K an der Sonde erreicht werden. Sollte die Sondeneintrittstemperatur trotz Volumenstromregelung zu stark ansteigen, wird diese durch das Mischventil «Mixing-Valve BHE» auf 30 °C begrenzt (auch während der Vorerwärmung im WP-Betrieb). Dadurch wird sowohl ein Überschreiten der maximal erlaubten primärseitige Fluidtemperatur der WP während dem Betrieb der WP als auch eine zu starke thermische Beanspruchung der Sondenrohre vermieden.

Durch den Einsatz des Bypassventils «ByPass» kann der PVT-Kreislauf umgangen und damit eine reine Erdwärmesondenheizung simuliert werden. Damit wird die monatliche Entzugsleistung der Sonden bestimmt.

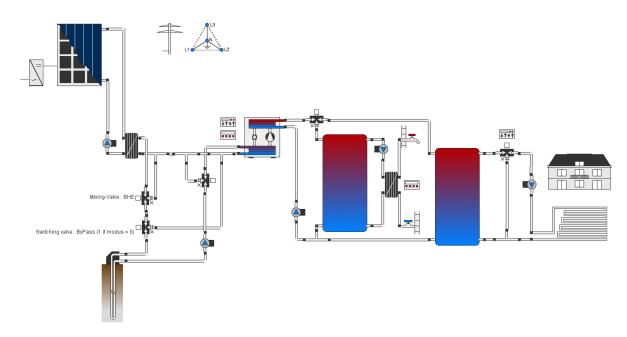


Abbildung 9: Simulationsschema der eingesetzten Hydraulik.

2.4.2 Komponenten

Wärmepumpen

Die Wahl der Wärmepumpen erfolgt anhand der Jahresdauerlinien und der Vollaststunden. Pro Gebäudekategorie wird sowohl im urbanen als auch im suburbanen Fall eine je gleiche Wärmepumpe eingesetzt. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich wird, hat dies aufgrund des niedrigeren Heiz- und Warmwasserbedarfes im suburbanen Gebiet eine kleine Reduktion der Vollaststunden zur Folge.

Mit Gütegraden von 0.49 bis 0.58 (Tabelle 8) liegen die eingesetzten Wärmepumpen in Bezug auf die Effizienz im oberen Bereich der zurzeit eingesetzten Wärmepumpen. Gemäss (Dott et al., 2018) liegt dieser zwischen 0.4 und 0.6, wobei bis 2050 eine Steigerung der Effizienz erwartet wird (Prinzing et al., 2019). Im besten Fall werden Gütegrade um 0.65 und im schlechtesten Fall um 0.55 erwartet. Um diese mögliche Entwicklung bei den Simulationen zu berücksichtigen (insbesondere die Entzugsleistung bei den Erdwärmesonden), muss der elektrische Leistungsbedarf der Wärmepumpen um 10 % reduziert werden. Ausgehend von einem durchschnittlichen Szenario (Effizienzsteigerung um 20 % im Vergleich zu heute) und der Annahme einer lineareren Effizienzsteigerung entspricht dies dem Mittelwert zwischen heute und 2050.

Tabelle 8: Eingesetzte Wärmepumpenmodelle mit angepasstem Gütegrad.

Gebäude- kategorie	Wärmepumpenmo- dell (Vitocal)	Nenn- leistung	Gütegrad		Vollaststunden (h)	
		kW	Ø	erwartet	Urban	Suburban
1	300-G. BW(S) 301.B08	8	0.49	0.54	2'005	1'914
2	300-G, BW(S) 301.B13	13	0.51	0.56	2'270	2'071
3	350-G BWS 351.B20	20	0.53	0.59	2'389	2'145
4	300-G BW 301.A45	45	0.58	0.64	2'043	1'879
5	350-G PROBW 352.A114	114	0.50	0.55	2'339	2'078

Thermische Speicher

Die verwendeten thermischen Speicher weisen sowohl am Mantel als auch am Deckel eine 140 mm und am Boden eine 100 mm starke Dämmung aus Glas-/Steinwolle ("Glas- und Steinwolle in Matten" mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.04 W/(m*K) auf und verfügen über siphonierte Stutzen (Anschlussverluste 2 W/K). Die Dimensionierung der Warmwasser-Speicher erfolgt anhand der in Tabelle 7 aufgeführten täglichen Entnahmemenge in Normlitern. Die erforderliche Volumenanpassung infolge des geänderten Temperaturniveaus (50 °C) erfolgt durch die Multiplikation mit dem Faktor 1.2. Durch Runden auf den nächsten Hunderter wird das definitive Volumen der verwendeten Speicher bestimmt (Tabelle 7). Das Volumen der technischen Puffer-Speicher wird, ausgehend von einem Speichervolumen von 0.5 m³ für die kleinste Gebäudekategorie, pro Gebäudekategorie um jeweils 0.5 m³ erweitert.

Wärmeübertrager

Um eine mögliche Flaschenhalsbildung zu vermeiden sind die Wärmeübertrager zwischen PVT- und Primärkreis der Wärmepumpe mit 2.5 bis 3.7 kW pro 20 m² Kollektorfläche ausreichend gross dimensioniert (bei einer Auslegeleistung von 500 W/m² (VDI) wären rund 2.0 kW pro 20 m² ausreichend). Eine optimale Auslegung steht an dieser Stelle nicht im Vordergrund. Als Wärmeübertrager zwischen PVT- und Primärkreis der Wärmepumpe werden die generischen Modelle «klein», «mittel», «gross» und «riesig» von Polysun und für die Grossbauten das Modell «SC ACS225» von Riello. Für die Frischwasserstation wird das Modell «klein» sowohl für die EFH als auch die kleinen MHF und für die anderen Gebäudekategorien das jeweils nächst grössere Modell verwendet.

2.4.3 Elektrische Verbraucher

Neben den elektrischen Verbrauchern für die Wärmebereitstellung (WP, Umwälzpumpe, etc.) werden keine weiteren elektrischen Verbraucher für Beleuchtung, Kochen, Waschen, etc. modelliert. Dies erlaubt einen verzerrungsfreien Vergleich des für die Wärmebereitstellung erforderlichen Stromverbrauches.

2.5 Eingesetzter PVT- und Flachkollektor

Ein Schwerpunkt soll auf die Verwendung von flächeneffizienten PVT-Kollektoren gelegt werden, welche auf der gleichen Fläche sowohl solarthermische Wärme als auch photovoltaische Elektrizität erzeugen. Neben der Flächeneffizienz haben PVT-Kollektoren einen weiteren entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Flachkollektoren. Unabgedeckte PVT-Kollektoren weisen ohne rückseitige Dämmung Stagnationstemperaturen unter 90 °C und mit rückseitiger Dämmung unter 120 °C auf (Cremers et al., 2015). Somit erfolgt keine Dampfbildung während eines Betriebsstillstandes, was die Systemkomplexität reduziert. Weiter können unabgedeckte und ungedämmte PVT-Kollektoren zur Nutzung der Umgebungswärme oder zu Kühlzwecken eingesetzt werden.

Wie Beispiele aus der Praxis zeigen (Ramschak, 2020), eignen sich PVT-Kollektoren sowohl für die aufgeständerte Aufstellung auf Flachdächern als auch für die Auf-Dach-Montage auf Schrägdächern. Jüngste Bestrebungen der Modulhersteller (siehe z.B. (DualSun, 2019b)), den hydraulischen Anschluss der Module mittels neuer seitlicher Schnellverbinder zu vereinfachen, werden zudem den Installationsaufwand deutlich reduzieren.

In einem ersten Schritt werden unabgedeckte, ungedämmte PVT-Kollektoren (im Folgenden nur PVT-Kollektor genannt) als Wärmequelle zur Regeneration der Erdwärmesonden verwendet. Sie sind am Markt breit vertreten (Zenhäusern et al., 2017) und bieten im Hinblick auf eine Systemoptimierung die grössere Flexibilität (z.B. effizientere Nutzung der Umgebungswärme) als gedämmte PVT-Kollektoren. Für die Simulation wird das Modul «Spring 310M unisolated» von DualSun mit einer thermischen und elektrischen Nennleistung von 629 W/m² bzw. 188 W/m² verwendet. DualSun ist sowohl in der Entwicklung von PVT-Kollektoren als auch in der Forschung aktiv (IEA-Tasks 60). Entsprechend dürfte das gewählte Modul den «state of the art» gut repräsentierten. Der verwendete PVT-Kollektor hat eine Bruttofläche von 1.65 m², wodurch sich die in Tabelle 9 ersichtliche maximal mögliche Kollektorzahl für jede Gebäudekategorie ergibt.

Die im Vergleich zu herkömmlichen Flachkollektoren fehlende Wärmedämmung und Abdeckung führt bei steigenden Betriebstemperaturen zu höheren Strahlungsverlusten sowie zu einem erhöhten windbedingten Wärmeverlust (Zenhäusern et al., 2017). Bei tiefen Betriebstemperaturen haben unabgedeckte Kollektoren aber einen höheren Ertrag. Zur Einordnung des solarthermischen Ertrages der PVT-Kollektoren erfolgt ein Vergleich mit herkömmlichen Flachkollektoren. Aufgrund der Vielfalt von Flachkollektoren auf dem Markt wird auf das generische Modell «Flachkollektor, sehr gut» des SPF zurückgegriffen, welches im Polysun-Katalog verfügbar ist. Aufgrund der grösseren Brutto-Fläche von 2.00 m² reduziert sich die maximal mögliche Kollektorzahl im Vergleich zu den PVT-Kollektoren (Tabelle 9).

Taballa O. Massinaal na saliaba Anaabi Kallald	
Tabelle 9: Maximal mögliche Anzahl Kollekte	oren bro Gebaudekatedorie.

Gebäude- kategorie	Kollektorflä- che (m²)	Maximale Anzahl PVT-Kollektoren	Maximale Anzahl Flach- kollektoren
1	39	24	19
2	57	35	28
3	95	58	47
4	136	82	68
5	245	148	122

2.6 Simulation des EWS-Verhaltens und Ermittlung des Regenerationsbedarfs

2.6.1 Grundlegende Annahmen und Methodik

Die Wärmebedarfskurven der Beispielgebäude sind durch Gebäudesimulation ermittelt, siehe Abschnitte 2.3 und 2.4. Sie dienen als Grundlage zur Simulation der Erdwärmesonden. Dabei wird zur Wärmeversorgung eine möglichst hohe, idealerweise 100 %ige Deckung des Wärmebedarfs der Quartiere durch Erdwärme angestrebt, unterstützt durch solare Regeneration.

Bei der Dichte der potenziellen Nutzung müssen nachbarschaftliche Einflüsse Berücksichtigung finden. Dies ist in Übereinstimmung mit der SIA 384/6 bei Abständen der EWS von weniger als 50 m zwingend. Zur Simulation der Nutzungen ist eine standortgenaue Aufnahme einzelner Objekte und Auslegung der EWS nicht möglich und aufgrund des generischen Vorhabens auch nicht erforderlich. Es wird daher ein generalisiertes Vorgehen verfolgt, welches auf «typischen» Verhältnissen von Nutzern in Bezug auf Bedarf und Abständen basiert. Dieses Verfahren basiert auf der Kenntnis der Verteilung der Gebäudetypen im Quartier, die auch «typische» Nachbarschaftsverhältnisse konstruieren lässt. Diese «typischen» Nachbarschaften sind durch Typ (und damit Wärmebedarf) des Nachbarn im Umkreis von 50 m und mittleren Abständen zwischen den Gebäuden spezifiziert (Abschnitt 2.6.3). Vereinfacht werden die Objektkoordinaten aus dem Gebäudedatensatz zur Berechnung der Abstände nachbarschaftlicher Nutzer (genauer: deren EWS) herangezogen. In praktischen Fällen werden die Abstände zwischen den EWS durch die verfügbaren Freiflächen der Grundstücke bestimmt. In der Folge werden bei einer objektgenauen Auslegung Abstände resultieren, die grösser oder auch kleiner als die Abstände zwischen den Gebäudekoordinaten sind. Für eine Betrachtung auf Quartiersebene wird der verwendete Mittelungsansatz als ausreichend bewertet. Konkrete Schlüsse auf einzelne Objekte sind jedoch nicht möglich (und auch nicht erforderlich).

Der EWS-Bedarf zur Versorgung eines Gebäudes wird durch das Programm «EWS-Tool» berechnet. Das Ergebnis der Berechnungen ist eine optimale Auslegung der Versorgung eines Gebäudetyps mit Anzahl und Länge erforderlicher EWS. Die langfristigen Einflüsse durch nachbarschaftliche Nutzungen werden – ausserhalb des EWS-Tools – durch eine niedrigere Erdreichtemperatur berücksichtigt. Konkret wird in Polysun ein Projektfile des EWS-Tools eingelesen, welches neben der Sondendimensionierung auch die Temperaturen des Erdreichs etc. beinhaltet. Im Fall der Regeneration wird diese Auskühlung eliminiert bzw. reduziert, je nach Grad der Regeneration.

Für die Simulation mit dem EWS-Tool werden keine spezifischen Standortdaten (Wärmeleitfähigkeit, genehmigungsrechtliche Tiefenbegrenzung etc.) berücksichtigt. Die Übertragbarkeit auf andere Standorte in der Schweiz wird durch eine typische Wärmeleitfähigkeit und durch einen üblichen EWS-Typ (und dessen Aufbau) garantiert.

Die Ermittlung des standortspezifischen Regenerationspotenzials erfolgt iterativ (siehe Abschnitt 2.7): Die mit «EWS-Tool» ermittelte EWS-Konfiguration wird in Polysun übernommen, die mögliche Wärmeeinspeisung aus den solaren Gewinnen schlägt sich in der Simulation mit dem «EWS-Tool» in geringeren Sondenlängen und/oder geringerer Anzahl erforderlicher EWS nieder.

2.6.2 Modellgrundlagen der Simulation des EWS-Verhaltens

Die erforderliche Anzahl und Länge der EWS zur autarken und monovalenten Versorgung eines Gebäudetyps wird durch das «EWS-Tool» ermittelt. Die maximale EWS-Tiefe wird auf 350 m begrenzt. Die EWS sind pro Gebäude in einer typischen, regulären Konfiguration angeordnet. Ihre Abstände untereinander betragen 10 m. Auslegungspunkt ist eine minimale Fluidtemperatur von -1.5 °C (Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauf im Spitzenlastfall) nach 50 Jahren.

Die EWS sind Standard PE Doppel-U-Sonden (40 mm) mit Wandstärken von 3.7 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0.42 W/mK. Die U-Sonden haben ein «shank spacing» von 10 cm. Die Hinterfüllung (Bohrdurchmesser 16.5 cm) ist homogen und hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0.81 W/mK.

Das Erdreich ist homogen und hat eine Wärmeleitfähigkeit von 2.4 W/mK und eine geothermische Wärmeflussdichte von 80 mW/m². Entsprechend einer mittleren Lufttemperatur, einer zusätzlichen Bodenerwärmung von 0.8 K und einem Einfluss der Klimaerwärmung von 1.5 K (in 80 m Tiefe) stellt sich ein entsprechender Temperaturgradient im Erdreich ein. Als unbeeinflusste mittlere Lufttemperatur wird 8.5 °C angesetzt. Diese Werte stammen aus dem Datensatz für Zürich im «EED-Tool».

Der Einfluss der nachbarschaftlichen Objekte wird durch eine Reduktion der Lufttemperatur (und damit der sich einstellenden Erdreichtemperatur⁴) am Standort des zu betrachtenden Objektes – zunächst ohne Regeneration - berücksichtigt. Im Falle der Regeneration reduziert sich dieser Einfluss entsprechend. Auf deren Ermittlung wird nachfolgend eingegangen.

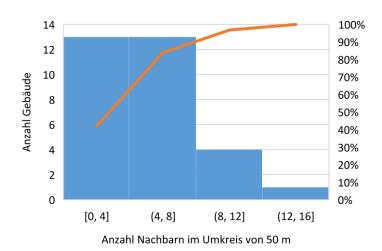
2.6.3 Berücksichtigung nachbarschaftlicher Beeinflussung

Es ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, ein ganzes Quartier mit allen Gebäuden mit jeweils unterschiedlicher Nutzungscharakteristik zu simulieren. Für die beiden zu betrachtenden Quartiere liegen aber genügend Informationen vor, die eine statistische Behandlung der Daten ermöglichen (für das suburbane Quartier, Witikon, ca. 100, für das urbane Quartier Altstätten-Albisrieden knapp 1'000 Gebäude). So lassen sich aus den Datensätzen Histogramme für jeden Gebäudetyp erstellen, die zeigen, welche unmittelbaren Nachbarn ein Gebäude dieses Typus beeinflussen können. Zu berücksichtigen sind gem. SIA 384/6 mindestens Nachbarn im Umkreis von 50 m. Diese Nachbarn werden wiederum von Nachbarn beeinflusst, was zu berücksichtigen ist. Dies betrifft – auch im suburbanen Quartier - über 80 % aller Objekte⁵.

Abbildung 10 zeigt am Beispiel des Gebäudetyps S1 (EFH, suburban), dass dieser Gebäudetyp mehrheitlich 4 Nachbarn hat, deren Abstände geringer als 50 m sind. Diese Nachbarn sind mehrheitlich vom Typ 2 (knapp die Hälfte aller zu berücksichtigenden Nachbarn).

⁴ Das EWS-Tool geht von einer mittleren Lufttemperatur aus, addiert für die Terrain-Oberfläche einen bestimmten Wert dT dazu, und berechnet dann entsprechend dem terrestrischen Wärmestrom und der Wärmeleitfähigkeit einen Gradienten im Erdreich (bei konstanter Wärmeleitfähigkeit eine lineare Zunahme). Diese Temperatur wird vom Nachbarn beeinflusst. Und diese Beeinflussung kann durch die geringere Lufttemperatur eingestellt werden.

⁵ Grössere Abstände haben i.d.R. nur die grösseren Gebäude mit Parkplätzen, Freiflächen und Spielplätzen.



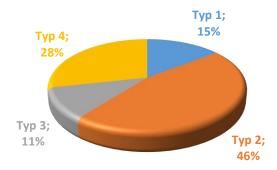


Abbildung 10: Anzahl der Nachbarn vom Typ S1 in einer Entfernung < 50 m (oben); Typ der Nachbarn eines Gebäudes vom Typ S1 (unten).

Auf diese Weise lassen sich für jeden Gebäudetyp in den beiden Quartieren «typische» Nachbarschaftsverhältnisse extrahieren.⁶

Aus den Abständen der Gebäudekoordinaten lassen sich auch typische Abstände zwischen den möglichen Standorten extrahieren. Wir nehmen – wie oben begründet – nachfolgend an, dass diese Abstände mit hier hinreichender Genauigkeit als Mittelwert für die Abstände von Sonden nachbarschaftlicher Nutzer zugrunde gelegt werden können⁷ (Tabelle 10). Die Gebäude S2 und S3 haben jeweils etwa gleich viele Nachbarn von Typ 2 und Typ 4, deshalb werden beide Fälle als Varianten a und b berücksichtigt.

Diese lassen sich – mit hier ausreichender Genauigkeit – im suburbanen Gebiet auf 35 m und im urbanen Gebiet auf 34 m (konservative Annahme 30 m) generalisieren.

⁶ In der Gesamtbetrachtung der Quartiere ist dann die Gesamtzahl der Nachbarn (Gebäude) nicht notwendigerweise kongruent zum Datensatz. Dies ist aber aufgrund des generischen Ansatzes des Projektes auch nicht erforderlich.

⁷ Ein geringerer Abstand, der sich aus den Platzverhältnissen ergäbe, hätte notabene grösseren Einfluss auf den direkten Nachbarn. Er wäre für den anderen, entfernteren Nachbar aber von geringerem Einfluss.

Tabelle 10: Typische Nachbarschaftsverhältnisse der betrachteten Beispielgebäude (S2 und S3 haben zu vergleichbaren Anteilen Nachbarn vom Typ 4 und vom Typ 2). Typ 5 kommt im suburbanen Gebiet nicht vor.

Beispiel- gebäude	Charakteristische Anzahl der Nachbarn im Abstand < 50 m	Mehrheitlicher Typ der Nachbarn	Abstand der Nach- barn (m)	
U1	3	4	34 ± 5	
U2	4	4	35 ± 9	
U3	3	4	30 ± 5	
U4	4	1	34 ± 3	
U5	3	2	36 ± 7	
S1	4	2	34 ± 11	
S2a	2	2	24 . 44	
S2b	3	4	34 ± 11	
S3a	3	2	27 . 11	
S3b	3	4	- 37 ± 11	
S4	2	4	38 ± 6	

Mit dem EWS-Tool lässt sich – zunächst ohne Berücksichtigung der Nachbarn – abschätzen, wie viele EWS (ohne Regeneration) mit einer maximalen Tiefe von 350 m zur vollen Bedarfsdeckung eines Gebäudetyps benötigt werden. Die dem Gebäudetyp entsprechende Anzahl und Länge brauchen die Nachbarn des gleichen Typs auch. Der spezifische Wärmeentzug Q (in W/m, aus Jahreswärmebedarf, Stunden pro Jahr und Länge) einer Nachbarsonde im Abstand D führt am Standort des zu betrachtenden Objekts zu einer Erdreichauskühlung gegenüber ungestörten Verhältnissen ΔT gem. Gleichung (1):

$$\Delta T = \frac{1}{4\pi\lambda} Q \cdot EI\left(\frac{D^2}{4at}\right) \tag{1}$$

mit

λ ... Wärmeleitfähigkeit (W/m·K)

a ... Temperaturleitfähigkeit (m²/s); hier in hinreichender Näherung 1·10⁻⁶ m²/s

t ... Betriebszeit (s)

El(x) ... Exponentialintegral $\int_{x}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$

Bei mehreren nachbarschaftlichen Sonden superpositionieren sich deren Kühleffekte entsprechend. In einem nächsten Schritt wird mit «EWS-Tool» bei entsprechend reduzierter Erdreichtemperatur die erforderliche (höhere) Sondenlänge ermittelt, die einen entsprechend geringeren spezifischen Wärmeentzug Q zur Folge hat. Dementsprechend reduziert sich der Auskühlungseffekt auf/durch Nachbarn. Dieser Algorithmus wird iterativ fortgeführt, bis sich die Ergebnisse nur noch insignifikant ändern. Das Ergebnis dieser Iteration zeigt Tabelle 11.

Tabelle 11: Grobdimensionierung der Versorgungslösungen ohne und mit Einfluss der Nachbarschaft gem. Tabelle 10 (mit einheitlichen Abständen von 35 m im suburbanen und 30 m im urbanen Gebiet).

Beispiel- gebäude	Erforderliche Anzahl EWS	Länge der EWS ohne Nachbarn (m)	Temperatureinfluss durch Nachbarn gem. Tabelle 10 (K)	Erforderliche Länge der EWS mit Nachbarn (m)
U1	1	185	5.7	282
U2	2	193	7.6	350
U3	3	199	5.7	312
U4	5	260	1.2	284
U5	18	267	1.4	295
S1	1	183	2.4	216
S2a	2	100	1.8	209
S2b	2	182	4.0	245
S3a	2	201	1.8	228
S3b	3	201	4.0	269
S4	5	264	2.6	312

Ein Gebäude vom Typ U3, beispielsweise, hat typischerweise 3 Nachbarn vom Typ U4 mit dementsprechend total 15 Sonden in der Nachbarschaft, typischerweise im Abstand von 30 m:

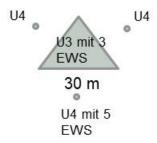


Abbildung 11: Konfiguration für U3

Diese Nachbarssonden entziehen zusätzlich 39 % des eigenen Bedarfs und machen eine Erhöhung der Sondenlänge des Objekts vom Typ U3 von 199 m auf 312 m (pro Sonde) erforderlich. Dieser Betrag zur Kompensation nachbarschaftlicher Beeinflussung ist somit das minimal erforderliche Regenerationsbedürfnis eines typischen Gebäudes U3. Das Ziel ist eine möglichst hohe Regeneration, die aber durch die zur Verfügung stehenden solaren Gewinne limitiert wird.

2.7 Iterativer Simulationsprozess zur Ermittlung des Regenerationsanteils

2.7.1 Prinzip

Da die EWS-Dimensionierung die Regeneration beeinflusst und umgekehrt, wird die erforderliche Kollektorzahl und EWS-Dimensionierung iterativ gemäss dem nachfolgend beschriebenen und in Abbildung 12 dargestellten Prozess bestimmt:

- 1. Simulation in Polysun mit der «empfohlenen EWS-Dimensionierung» des Wizards zur Ermittlung des maximalen Wärmeentzugs aus dem Erdreich und des maximalen Leistungsbedarfes (Run 0). Regeneration wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.
- Auslegung der EWS im «EWS-Tool» unter Verwendung des monatlichen Netto-Wärmeentzugs, des maximalen Leistungsbedarfes (48 h-Mittel) und unter Berücksichtigung der Nachbarschaftseffekte (gemäss Abschnitt 2.6.3).

- 3. Simulation in Polysun mit Regeneration zur Ermittlung der EWS-Vorbelastung im ersten Betriebsjahr (Run 1.1). Das Projektfile aus dem «EWS-Tool» wird in Polysun eingelesen. Dabei werden die EWS-Dimensionierung sowie der Einfluss der Nachbargebäude übernommen. Das Kollektorfeld ist mit der maximalen Anzahl Kollektoren bestückt, um das theoretisch mögliche Regenerationspotenzial zu bestimmen. Dieser Schritt wird lediglich für die Ermittlung des Wärmebedarfs für die EWS-Vorbelastung im nächsten Schritt benötigt.
- 4. Simulation in Polysun mit Regeneration und 25 Jahren EWS-Vorbelastung (Run 1.2). Der in Run 1.1 (Schritt 3) ermittelte Netto-Wärmeentzug im erstem Betriebsjahr wird während 25 Jahren als jährliche EWS-Vorbelastung verwendet. Bei einem Regenerationspotenzial über 100 % erfolgt eine Reduktion der Anzahl Kollektoren bis der Netto-Wärmeentzug im Bereich um 0 MWh (± 1 MWh) liegt.⁸ Ist der Netto-Wärmeentzug dabei kleiner als null (mehr als 100 % Regeneration), wird anstelle dessen beim nächsten Run null als Vorbelastung eingesetzt, da Polysun hier keine negativen Werte zulässt.
- 5. Auslegung der EWS im «EWS-Tool» mit den in Run 1.2 (Schritt 4) neu simulierten monatlichen Wärme- und Leistungsbedarfswerten analog zu Schritt 2.
- 6. Simulation in Polysun (Run 2) analog zu Run 1.2 mit der neuen EWS-Dimensionierung und EWS-Vorbelastung über 25 Jahre mit dem Netto-Wärmeentzug aus der letzten Simulation in Polysun (Run 1.2).
- 7. Wiederholung der Schritte 5 und 6, bis Konvergenz der Iteration erreicht ist (Run 2 bis N). Als Konvergenzkriterium ist eine Änderung der EWS-Gesamtlänge von 5 % festgelegt. Auf weitere Iterationsschritte wird ebenfalls verzichtet, wenn sich sowohl die EWS-Gesamtlänge als auch die Anzahl Kollektoren um weniger als 10 % ändern. Die in diesem Fall zu erwartenden Anpassungen der EWS-Gesamtlänge im darauffolgenden Iterationsschritt wird in diesem Fall als vernachlässigbar beurteilt.
- 8. Weiterführende Simulationen in Polysun mit gleichbleibender EWS-Auslegung, aber mit der maximalen Anzahl an Kollektoren (Run N_max). Für die Variante mit Flachkollektoren wird zusätzlich eine Ergänzung der für die Regeneration erforderlichen Kollektoren mit PV-Modulen gerechnet (Fall «Flachkollektoren & PV», siehe Abschnitt 2.10). Die EWS-Vorbelastung ist dabei jeweils identisch mit jener aus dem vorherigen Run.

⁸ In der Praxis kann bereits eine Regeneration von ca. 90 % ausreichend sein, da auch anthropogene Wärme und solare Einstrahlung auf das Erdreich zur Regeneration beitragen. Diese Effekte sind allerdings nur schwer verallgemeinerbar und werden deshalb nicht berücksichtigt. Das Anstreben einer 100-prozentigen Regeneration stellt eine konservative Vorgehensweise dar.

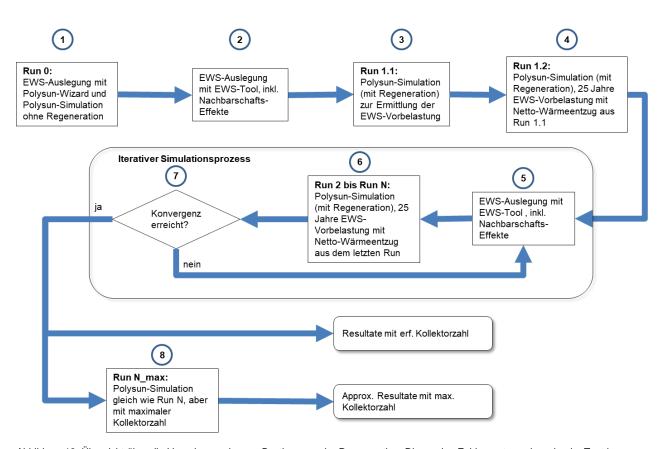


Abbildung 12: Übersicht über die Vorgehensweise zur Bestimmung der Regeneration. Die runden Zahlen entsprechen den im Text beschriebenen Schritten.

2.7.2 Rechenbeispiel

Nachfolgend wird das unter 2.6.2, 2.6.3 und 2.7.1 dargestellte methodische Vorgehen illustriert. Als Beispiel soll der Gebäudetyp U3 mit PVT-Belegung betrachtet werden.

In einem ersten Schritt wird eine EWS-Auslegung von 2 x 226 m mit dem Polysun-Wizard bestimmt. Basierend auf dieser ergibt sich der in Abbildung 13 gezeigte monatliche Wärmeentzug und ein maximaler Leistungsbedarf (im 48-h-Mittel) von 12.8 kW. Mit diesen Werten wird mittels «EWS-Tool» die erste EWS-Auslegung gemacht.

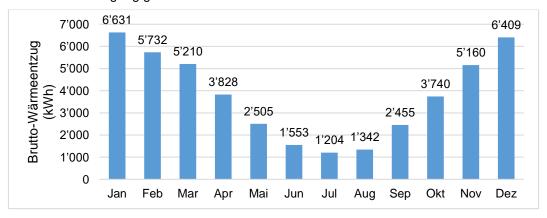
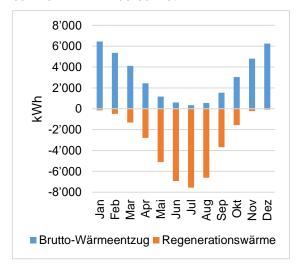


Abbildung 13: Monatlicher Brutto-Wärmeentzug des Gebäudes U3, wenn nicht regeneriert wird. In diesem Fall sind Brutto- und Netto-Wärmebezug identisch.

Dies führt zu drei EWS von je 312 m Länge, unter Berücksichtigung des Einflusses des Entzugs von drei nachbarschaftlichen Objekten vom Typ U4 mit total 3 x 5 EWS im mittleren Abstand von 30 m. Im «EWS-Tool» wird dies durch eine geringere Lufttemperatur von 8.5 - 5.7 = 2.8 °C entsprechend berücksichtigt. Die Temperaturen der EWS (Vor- und Rücklauf) für den Fall mit und ohne Nachbarn sind in Abbildung 15 (oben links und oben rechts) gezeigt.

Diese EWS-Dimensionierung wird im Polysun-Run 1.1 gemeinsam mit der maximal möglichen Kollektorbelegung verwendet. Im Fall von U3 sind dies 58 PVT-Kollektoren. Dabei ergibt sich mit Regeneration und ohne EWS-Vorbelastung ein jährlicher Netto-Wärmeentzug von -15'598 kWh. Demzufolge wird mehr Wärme in den Boden eingespeist als ihm entzogen wird, da deutlich zu viele PVT-Kollektoren verwendet werden.

Aufgrund des negativen Netto-Wärmeentzugs aus Run 1.1 wird in Run 1.2 über 25 Jahre eine jährliche EWS-Vorbelastung von 0 kWh modelliert. Die Anzahl Kollektoren wird auf 39 reduziert, da sich dadurch ein jährlicher Netto-Wärmeentzug von beinahe 0 kWh, nämlich 86 kWh, erreichen lässt. Mit einem Kollektor mehr würde sich ein negativer Netto-Wärmeentzug ergeben. Mit diesen Einstellungen wird nun der in Abbildung 14 (rechts) gezeigte monatliche Netto-Wärmeentzug und ein maximaler Leistungsbedarf von 12.7 kW berechnet.



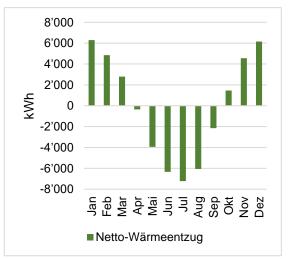
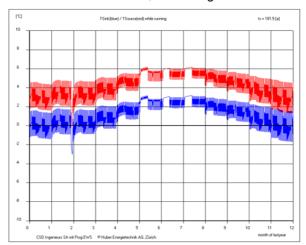


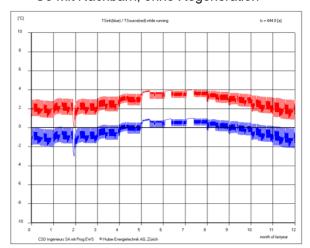
Abbildung 14: Monatlicher Wärmeentzug und Regenerationswärme (links) sowie monatlicher Netto-Wärmeentzug (rechts) des Beispielgebäudes U3 im Simulationsschritt Run 1.2.

Nun beginnt der iterative Simulationsprozess. Es werden auch den drei Nachbarn des Objektes vom Typ U4 Regenerationsanteile von 72 % verrechnet. Dies verringert deren thermische Beeinflussung, erhöht gegenüber der Ausgangsrechnung die Erdreichtemperatur und lässt kürzere EWS-Längen zu. Anhand des «EWS-Tools» ergibt sich mit den Bedarfswerten aus Run 1.2 eine neue EWS-Auslegung von 3 x 177 m und den in Abbildung 15 (unten) gezeigten Temperaturen. Mit dieser Auslegung wird eine Polysun-Simulation mit einer EWS-Vorbelastung von jährlich 86 kWh während 25 a durchgeführt. In diesem Fall sind 53 PVT-Kollektoren notwendig, um einen jährlichen Netto-Wärmeentzug von ungefähr null, nämlich 393 kWh, zu erreichen. Hier ist ersichtlich, dass das Vorgehen eine grössere Kollektorzahl zugunsten einer geringeren Sondenlänge bevorzugt. Im vorliegenden Beispiel ist dies sinnvoll, da eine EWS-Tiefe von 312 m vielerorts durch regulatorische Begrenzungen verunmöglicht wäre. Im Einzelfall kann es auch eine wirtschaftliche Abwägung sein, ob eine tiefere EWS oder mehr Kollektoren verwendet werden.

U3 ohne Nachbarn, ohne Regeneration



U3 mit Nachbarn, ohne Regeneration



U3 mit Nachbarn, mit Regeneration

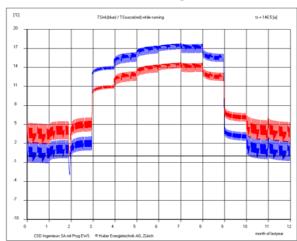


Abbildung 15: Temperaturen der EWS (Vor- und Rücklauf) bei Gebäude U3 im 50. Betriebsjahr, also im Auslegungspunkt. Oben links: Ohne Nachbarschaftseinflüsse und ohne Regeneration. Oben rechts: Mit Nachbarschaftseinflüssen, ohne Regeneration. Unten links: Mit Nachbarschaftseinflüssen und mit Regeneration durch PVT (Quelle: EWS-Tool). Zu beachten ist, dass die y-Achse im letzten Fall eine andere Skalierung aufweist.

In einer zweiten Iteration wird eine EWS-Auslegung von 3 x 179 m ermittelt. Die EWS-Gesamtlänge änderte sich somit um unter 5 % im Vergleich zum ersten Iterationsschritt, weshalb dies bereits die finale EWS-Auslegung ist. Es wird eine letzte Polysun-Modellierung mit jährlich 393 kWh Vorbelastung durchgeführt. Neu sind noch 52 Kollektoren erforderlich für rund 100 % Regeneration. Konkret beträgt der Netto-Wärmeentzug 187 kWh pro Jahr, was einer Regeneration von 99 % entspricht.

2.8 Abschätzung des Regenerationspotentials mit solarthermischen Absorbern

2.8.1 Vereinfachte Simulation

Unabgedeckte, nicht selektiv absorbierende solarthermische Absorber, sogenannte Schwimmbadkollektoren, bieten eine einfache und kostengünstige Alternative zu PVT- und Flachkollektoren. In einem vereinfachten Verfahren soll abgeschätzt werden, inwiefern solarthermische Absorber zur EWS-Regeneration genutzt werden könnten. Dabei wird auf eine iterative Sondenauslegung gemäss Abschnitt 2.7 verzichtet und die finale Auslegung aus der PVT-Iteration übernommen. Es soll hier lediglich um eine grobe Einschätzung des Potentials von SBK gehen. Dazu werden die verfügbaren Dachflächen jeweils vollständig mit solchen Kollektoren belegt. In einem ersten Modellierungs-Run wird ohne EWS-Vorbelastung der jährliche Netto-Wärmeentzug für jeden Gebäudetypen ermittelt. Dieser wird anschliessend im zweiten und finalen Modellierungs-Run über 25 Jahre als Vorbelastung verwendet.

2.8.2 Verwendeter solarthermischer Absorbertyp / -Typen

Es werden zwei unterschiedliche solarthermische Absorbertypen betrachtet. Zum einen wird der Kunststoffabsorber SLK-S der Firma Viessmann verwendet (Polysun-Katalog-Nr. 15475). Dieser besteht vollkommen aus Polyethylen. Die im Polysun hinterlegte Charakteristik ist von der FHNW validiert (Minder et al., 2016). Zum anderen wird der solarthermische Absorber SolarRipp von der gleichnamigen Firma verwendet. Dieses Modell weist bessere Charakteristiken auf und sollte dementsprechend eine höhere Regeneration ermöglichen als der SLK-S Absorber. Die Charakteristiken beider Absorbertypen sind im Anhang in Tabelle 25, resp. Tabelle 26 aufgelistet. Die beiden Absorber sind in Abbildung 16 gezeigt.





Abbildung 16: Die zur Modellierung verwendeten SLK-S- (links, Viessmann.de) und SolarRipp-Absorber (rechts, Solarripp.com).

Die Absorberanzahl ergibt sich aus der Absorberfläche von 2.54 m² für den SLK-S Absorber und 1.00 m² für den SolarRipp Absorber und aus der verfügbaren Dachfläche. Für die Beispielgebäude-Nr. 1-5 können jeweils 15, 22, 37, 53 und 177 SLK-S- Absorber oder 39, 57, 95, 136 und 245 SolarRipp- Absorber verwendet werden.

2.9 Evaluation zusätzlicher Regenerationsquellen anhand eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration

Aufgrund der im Verhältnis zur EBF und dem Wärmebedarf kleinen nutzbaren Dachfläche bei grösseren Gebäuden ist zu erwarten, dass die ausschliessliche Regeneration mittels PVT-Dachanlage für einen nachhaltigen Betrieb der EWS schwieriger sein wird als bei kleineren Gebäuden. Das Verhältnis von nutzbarer Dachfläche zum gesamten Wärmebedarf ist bei Gebäuden der Kategorie U5 um rund 66 % kleiner als bei U1 Gebäuden (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6). Die Möglichkeit, genügend Wärme für eine ausreichende Regeneration zu produzieren, ist entsprechend reduziert. Dies gilt insbesondere für hohe Gebäude mit kleiner Grund- und entsprechend kleiner Dachfläche sowie hohem Wärmebedarf.

Ergänzend zu der in Abschnitt 2.5 beschriebenen Möglichkeit der Regeneration mittels PVT-Kollektoren auf dem Dach, werden anhand eines stellvertretenden Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration der Kategorie U5 weitere Wärmequellen für die Regeneration betrachtet. Das verwendete Beispielgebäude soll exemplarisch für Gebäude stehen, bei denen eine EWS-Regeneration mittels einer PVT-Dachanlage besonders herausfordernd ist.

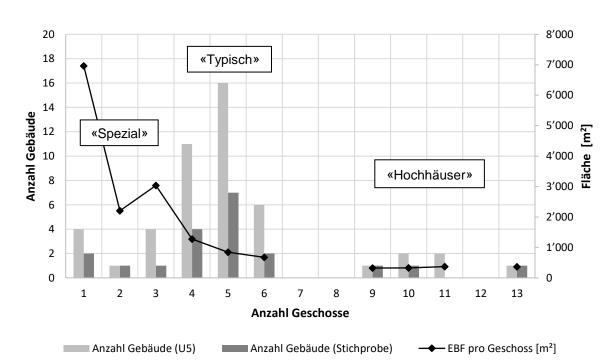
Es erfolgt eine Abschätzung des Potenzials naheliegender Möglichkeiten, wie zusätzlicher Kollektorfelder an geeigneten Fassaden, der Nutzung von Abwärme aus der Gebäudekühlung oder dem Einsatz eines LWWÜ. Ein Kurzbeschrieb der Regenerationsmassnahmen findet sich in Abschnitt 2.10 (detailliertere Beschriebe der verwendeten Modelle finden sich im Anhang unter Abschnitt 8.3).

2.9.1 Definition eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration (aus Kategorie U5)

Im betrachteten urbanen Quartier Altstetten umfasst die Gebäudekategorie U5 insgesamt 48 Gebäude. Aus diesem Gebäudebestand wird im Folgenden ein Beispielgebäude der Kategorie U5 bestimmt, welches exemplarisch für Gebäude steht, bei denen eine EWS-Regeneration mittels PVT-Dachanlage nicht ausreicht. Zunächst wird anhand der Anzahl Geschosse und der EBF ein Vergleich mit dem in Abschnitt 2.3.3 Beispielgebäude der Kategorie U5 durchgeführt. Zudem wird eine Stichprobe gezogen, welche im Bereich von ±20 % um den Mittelwert der Heizwärmebedarfe der U5 Gebäude streut. Diese dient in erster Linie der im Folgekapitel durchgeführten Analyse der Fassaden in Bezug auf die Eignung für die Nutzung von PVT.

Abbildung 17 zeigt die Verteilung der U5-Gebäude anhand der Anzahl Stockwerke sowohl für die Gesamtheit der Gebäude als auch für die ausgewählte Stichprobe von 12 Gebäuden. Rund 68 % der Gebäude weisen vier bis sechs und rund 12 % mehr als neun Geschosse auf. Wie in Abbildung 17 ersichtlich wird, ist der bisher verwendete Mittelwert für die Grundfläche und die Anzahl Geschosse der U5 Gebäude durch die neun niedergeschossigen Gebäude verzerrt. Dabei handelt es sich um Gebäude der Kategorie KSKU (Kultur, Sport, Kirche und Andere) und IGL (Industrie und Landwirtschaft), wobei insbesondere alle drei KSKU-Gebäude und zwei von drei IGL-Gebäuden zu dieser Verzerrung beitragen. Weil es sich dabei um einzelne spezielle Gebäude handelt, ist eine Verallgemeinerung auf Wohnoder Bürogebäude kaum möglich. Zudem ist aufgrund der zu erwartenden, grossen Dachfläche eine Regeneration der EWS einfacher als bei Gebäuden mit vergleichsweise kleiner Grund- und damit Dachfläche. Abbildung 17 zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel der gezogenen Stichprobe anschaulich auf. Bei ähnlichem Heizwärmebedarf steht insbesondere bei den beiden eingeschossigen Gebäuden erheblich mehr Grund- und damit potenziell nutzbare Dachfläche zur Verfügung als bei den mehrgeschossigen Gebäuden. Folglich werden diese beiden Gebäude (Kirche und Hallenbad) von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Die Gebäude lassen sich nach Abbildung 17 also grob in drei Kategorien unterteilen. Die erste Gruppe umschliesst in erster Linie grossflächige «Spezialgebäude». Aufgrund der geringen Verallgemeinerbarkeit dieser Gebäude wird auf deren weitere Betrachtung verzichtet. Die zweite Gruppe bildet, aufgrund der hohen Anzahl Gebäude in dieser Kategorie, die für ein urbanes Quartier «typischen Gebäude» der Kategorie U5 mit durchschnittlich fünf Stockwerken (4 bis 6) und rund 1'000 m² Grundfläche ab (siehe Abbildung 17). In Bezug auf die Anzahl Stockwerke etwas nach oben abgesetzt, beinhaltet die



dritte Gruppe «Hochhäuser» mit mehr als neun Geschossen und einer mittleren Grundfläche von rund 338 m².

Abbildung 17: Verteilung der Gebäude der Kategorie U5, die +/- 20 % um den Mittelwert der jährlichen Heizwärmebedarfe der U5-Gebäude streuen, anhand der Anzahl Geschosse.

Weil das zu verwendende Beispielgebäude mitunter stellvertretend für Gebäude stehen soll, bei denen eine Regeneration der EWS herausfordernd sein dürfte, wird es auf der Grundlage der dritten Gruppe «Hochhäuser» gebildet. Bei vergleichbarem Heizwärmebedarf wird die Regeneration der EWS aufgrund der geringeren Grund- und damit auch Dachfläche deutlich schwieriger sein als bei der Gruppe der «typischen Gebäude». Gelingt es also, die EWS eines solchen Gebäudes ausreichend zu regenerieren, kann davon ausgegangen werden, dass dies auch bei flacheren Gebäuden mit vergleichbarer EBF möglich ist. Die Verallgemeinerbarkeit der Resultate ist somit gewährleistet.

Der Wärmebedarf des Beispielgebäudes wird analog zu Abschnitt 2.3 bestimmt. Der über die drei «Hochhäuser» der Stichprobe gemittelte Wärmebedarf für Raumheizung beläuft sich auf 217 MWh und jener für Warmwasser auf 73 MWh.

2.9.2 Mögliche Anzahl PVT-Kollektoren auf dem Dach des Beispielsgebäudes

Um die mögliche Anzahl PVT-Kollektoren auf dem Dach des Beispielgebäudes zu bestimmen, wird die effektiv nutzbare Dachfläche in Anlehnung an Abschnitt 2.3.4 bestimmt. Die Bruttogeschossfläche des Beispielgebäudes beträgt 338 m², von denen 145.3 m² effektiv mit PVT-Kollektoren belegt werden können. Dies entspricht 88 PVT-Kollektoren, die auf dem Dach Platz finden.

2.9.3 Potenzial zur Fassadennutzung mittels PVT-Kollektoren beim Beispielgebäude

Für die im vorhergegangenen Abschnitt beschriebene Stichprobe erfolgt eine Beurteilung der Fassaden hinsichtlich der Eignung zur Energieproduktion mittels PVT-Kollektoren (nutzbare Fläche). Zur Bestimmung des Potenzials wird zunächst eine erste vereinfachte Analyse der für die Installation von PVT-Kollektoren geeigneten Fassadenflächen durchgeführt. Als geeignete Fassadenflächen werden jeweils die nach Süden ausgerichteten Fassaden (Süd-West und Süd-Ost) ab dem 2. OG betrachtet. Dadurch

lassen sich die direkte Verschattung durch Büsche, Sonnenschirme, usw. sowie Vandalismus ausschliessen bzw. verringern. Ausserdem werden ausschliesslich Flächen betrachtet, auf welchen mindestens zwei PVT-Kollektoren zusammenhängend montiert werden können. Zur Ausmessung der Gebäudefassaden wurde das 3-D Polygon Tool von Google Earth verwendet und eine Plausibilitätskontrolle anhand der Geschossanzahl und -höhe von 3 m durchgeführt. Für die Untersuchung wurde der in Abschnitt 2.5 beschriebene «PVT-Kollektor «Spring 310M unisolated» von DualSun verwendet.

Die Mehrheit der vier- bis sechsgeschossigen «typischen Gebäude» weist eine substanziell kleinere für PVT nutzbare Fassadenfläche auf als die drei «Hochhäuser» mit neun oder mehr Stockwerken (siehe Tabelle 27 im Anhang). Diese weisen gegenüber den «typischen Gebäuden» insgesamt rund die doppelte Fassadenfläche auf. Die absolut für PVT nutzbare Fläche ist zudem rund viermal grösser. Der mittlere Belegungsfaktor in Bezug auf die gesamte Fassadenfläche liegt bei den «Hochhäusern» bei rund 0.35 resp. 0.34 (Süd-Ost / Süd-West), verglichen mit 0.26 und 0.18 für die restlichen Gebäude der Stichprobe. Letztere werden durch hohe Belegungsfaktoren von drei Gebäuden mit kleiner Fassade verzerrt. Das Potenzial für die Wärmeproduktion an den südlich ausgerichteten Fassaden ist bei der Gebäudegruppe «Hochhäuser» folglich deutlich grösser als bei den «typischen Gebäuden» mit vier bis sechs Geschossen.

Durch den zusätzlichen Einbezug der Nahverschattung aller «Hochhäuser» wird die mögliche Fassadenbelegung weiter konkretisiert. Um die Verschattung durch nahegelegene Objekte wie Gebäude oder Bäume abschätzen zu können, wurden für die «Hochhäuser» mit mehr als neun Geschossen jeweils die markantesten Objekte in südlicher Richtung ausgemessen und die Höhe der dadurch am Gebäude entstehenden Verschattung während den Wintermonaten (November – Januar) berechnet. Weil bei der visuellen Beurteilung der Gebäude ersichtlich wurde, dass die drei «Hochhäuser» der Stichprobe zwei Überbauungen mit je drei weitgehend baugleichen Gebäuden angehören, erfolgt die Bestimmung der Nahverschattung anhand aller sechs «Hochhäuser». Dadurch wird mitunter der gegenseitigen Verschattung besser Rechnung getragen. Die drei nicht in der Stichprobe enthaltenen «Hochhäuser» weisen einen um bis zu 50 % geringeren oder grösseren Heizwärmebedarf auf als ihre baugleichen Nachbarn, weshalb sie nicht in der Stichprobe erfasst wurden. Visuell sind keine Sanierungsmassnahmen oder Unterschiede im Baustandard erkennbar.

Durch die Nahverschattung muss mit einer Reduktion der tatsächlich nutzbaren Fassadenfläche von rund 31 % bei der Süd-Ost-Fassade resp. 36 % bei der Süd-West-Fassade gerechnet werden (siehe Tabelle 28 im Anhang). Der korrigierte mittlere Belegungsfaktor, welcher für das Beispielgebäude genutzt wird, liegt bei 0.23 für die Süd-Ost-Fassade und 0.25 für die Süd-West-Fassade. Insgesamt können 90 resp. 77 PVT-Kollektoren an den Fassaden installiert und verschattungsfrei genutzt werden.

2.9.4 Kühlbedarf

Settembrini et al. (2017) gibt den spezifischen Kühlbedarf eines massiven Neubaus für die Periode 2045 - 2074 mit einem Wert von 3 kWh/m² EBF pro Jahr an. Die SIA 380/1 nennt einen spezifischen Kühlbedarf von 3.3 kWh/m² a als Grenzwert. Messwerte von Rogenhofer & Leumann (2018) für Neubauten in Zürich liegen jedoch bereits im Jahr 2018 mit 4.3 bis 7.3 kWh/m² pro Jahr höher. Folglich werden Simulationen mit 3 und 6 kWh/m² EBF pro Jahr durchgeführt, um den erwähnten Bedarfsbereich ausreichend abzudecken. Dies entspricht bei der definierten EBF von 3'635 m² einem absoluten Kühlbedarf von 10'905 bzw. 21'810 kWh pro Jahr. Im Gegensatz zum hier betrachteten Wohngebäude dürfte der Kühlbedarf für Bürogebäude um ein Vielfaches höher liegen (Bayer et al., 2014). Es erfolgt eine qualitative Übertragung und Einordnung der Resultate.

Als Grundlage für die Definition des Kühlprofils resp. der saisonalen Verteilung des Kühlbedarfes werden Meteodaten von Meteonorm 7.3 verwendet, denen das IPCC Szenario B1 2040 (IPCC, 2000) zugrunde liegt. Damit wird der wahrscheinlichen klimatischen Entwicklung bei der Verteilung des Kühlbedarfes Rechnung getragen. Das Kühlprofil wird unter der Annahme des Vorhandenseins einer Aussenluftkühlung erstellt. Für die Bestimmung des zu kühlenden Luftvolumenstroms wird eine Raumhöhe von 2.4 m, ein Faktor für die Nettofläche von 0.85 und eine Luftwechselrate von 0.4 1/h angenommen. Bei der Berechnung ist zudem der Einfluss der Luftfeuchtigkeit berücksichtigt. Die resultierende prozentuale Verteilung über ein Jahr wurde als Kühlprofil verwendet und ist in Abbildung 18 gezeigt.

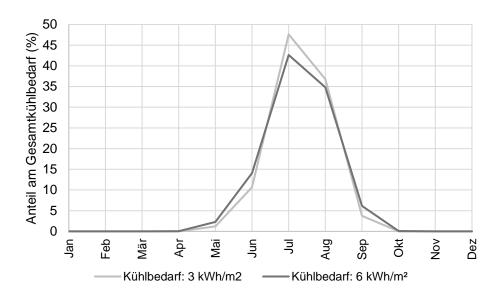


Abbildung 18 Prozentuale Verteilung des Kühlbedarfes in den verwendeten Kühlprofilen.

2.9.5 Parameter des Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration

Die Parameter des verwendeten Beispielgebäudes sind zusammenfassend in Tabelle 12 aufgeführt. Während der jährliche Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser knapp unter jenem des Beispielgebäudes U5 liegt, ist die EBF um rund 30 % niedriger. Der spezifische Heizwärmebedarf liegt damit bei rund 61 kWh/m², verglichen mit rund 48 kWh/m² des U5-Gebäudes. Dem grösseren spezifischen Heizwärmebedarf stehen rund 40 % weniger Dachfläche für die thermische Nutzung gegenüber. An den beiden nach Süden ausgerichteten Fassaden können jedoch rund 90 resp. 77 PVT-Kollektoren installiert werden.

Tabelle 12: Vergleich zwischen dem definierten Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regeneration und dem Beispielgebäude

		Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regeneration	Beispielgebäude U5
Jährlicher Wärmebedarf Heizen	kWh	217'054	238'300
Jannicher Warniebedan Heizen	kWh/m ²	59.7	47.9
Jährlicher Wärmebedarf Warmwasser	kWh	73'089	80'700
Jannicher Warniebedan Warniwasser	kWh/m ²	20.1	16.2
Jährlicher Kühlbedarf	kWh	10'905 - 21'810	-
Jannicher Kunibedan	kWh/m²	3 - 6	-
EBF	m ²	3'635	4'980
Bruttodachfläche	m ²	338	570
Max. PVT-Kollektoren auf dem Dach	-	88	148
Max. PVT-Kollektoren an der S/O-	-	90	-
Fassade			
Ausrichtung S/O-Fassade	0	57	-
Max. PVT-Kollektoren an der S/W-	-	77	-
Fassade			
Ausrichtung S/W-Fassade	0	-33	-

2.9.6 Simulationsprozess zur Ermittlung des Regenerationsanteils

Der Simulationsprozess orientiert sich an dem in Abbildung 12 dargestellten Ablauf. Mit Ausnahme der Schritte 7 und 8 werden sämtliche Schritte durchlaufen. Damit erfolgen auch diese Simulationen unter Berücksichtigung von Nachbareffekten. Sämtliche Nachbarn regenerieren die EWS entweder mit der maximalen oder mit der für einen Regenerationsanteil von 100 % erforderlichen Anzahl PVT-Kollektoren auf dem Dach. Für die Nachbarn werden keine zusätzlichen Regenerationsmassnahmen bereitgestellt, auch wenn deren Regenerationsanteil unter 100 % liegt.

2.10 Übersicht über die Regenerationsmassnahmen

Nachfolgend sind die verschiedenen Fälle, die betrachtet werden, in ihrem Grundprinzip beschrieben. Es handelt sich dabei einerseits um verschiedene Regenerationsmassnahmen und andererseits um Referenzfälle für die Ermittlung das Wärme- und Strombedarfs, wenn nicht regeneriert wird. Die Aufzählung soll auch eine Übersicht darüber geben, in welchen Fällen die Resultate vollständig nach dem in Abschnitt 2.7 beschriebenen iterativen Prozess ermittelt werden, und in welchen Fällen es sich um eine Abschätzung in Form einer Variation eines anderen Falls handelt.

- Ohne Regeneration, ohne PV: Die EWS werden so ausgelegt, dass bei Berücksichtigung der Nachbarschaftseinflüsse alle EWS nach 50 Jahren im Jahresmittel nicht kälter als -1.5 °C sind. Es findet keine Regeneration statt und es gibt keine PV-Anlagen auf den Dächern. Dieser Fall dient dazu, den gesamten thermischen und elektrischen Bedarf im Quartier zu ermitteln. Er ist in der Praxis keine nachhaltige Lösungsvariante, da dieser Fall über den Zeitraum von 50 Jahren hinaus zu einer weiteren Auskühlung des Erdreichs führen würde, so dass ein weiterer Betrieb der Heizsysteme nicht mehr sinnvoll machbar wäre. Es müssten danach neue EWS im Abstand von mehreren Metern erstellt werden, was allerdings aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse in städtischen Quartieren oftmals nicht möglich ist.
- Ohne Regeneration, mit PV: Dieser Fall ist analog zum oben genannten, mit dem Unterschied, dass alle verfügbaren Dachflächen (Netto-Dachflächen) mit PV-Modulen des Typs JAM60S12-320/PR von der Firma Shanghai JA Solar Technology belegt sind.

- PVT (erforderliche Kollektorzahl): Die erforderliche Kollektorzahl und EWS-Dimensionierung werden mit dem in Abschnitt 2.7 beschriebenen iterativen Prozess bestimmt. Die erforderliche Kollektorzahl kann nicht grösser sein als die maximale Kollektorzahl. Ist trotz Verwendung der maximalen Kollektorzahl keine vollständige Regeneration möglich, so werden die EWS so ausgelegt, dass sie nach 50 Jahren im Jahresmittel nicht kälter als -1.5 °C sind.
- PVT (maximale Kollektorzahl): Analog dem Fall «PVT (erforderliche Anzahl)», allerdings mit dem Unterschied, dass alle verfügbaren Dachflächen mit der maximal möglichen Kollektorzahl belegt sind. Die EWS-Dimensionierung soll nicht erneut iterativ bestimmt werden, sondern kann der Einfachheit halber von dem Fall «PVT (erforderliche Anzahl)» übernommen werden. Aufgrund des vereinfachten Lösungswegs sind die Resultate als Abschätzung zu verstehen. Dieser Fall dient dazu, abzuschätzen, ob mit einer maximalen Belegung aller Dächer auf Stufe Quartier eine Nullbilanz erreicht werden kann, auch wenn bei einzelnen Gebäuden ein Wärmedefizit herrscht.
- Flachkollektoren (erforderliche Kollektorzahl): Analog zum Fall «PVT (erforderliche Kollektorzahl)». Anstelle der PVT-Kollektoren werden Flachkollektoren verwendet. Die EWS-Dimensionierung und die Kollektorzahl werden mit dem iterativen Simulationsverfahren bestimmt.
- Flachkollektoren & PV: Der Fall «Flachkollektor (erforderliche Kollektorzahl)» soll mit Photovoltaikmodulen ergänzt werden, sodass alle verfügbaren Dachflächen (Netto-Dachflächen) belegt sind. Die EWS-Dimensionierung bleibt unverändert. Mit diesem Fall soll gezeigt werden,
 wie viel PV-Strom noch erzeugt werden kann, wenn Teile der Dachflächen bereits mit Flachkollektoren belegt sind.
- Flachkollektoren (maximale Kollektorzahl): Analog zum Fall «PVT (maximale Kollektorzahl)». Jedoch mit Flachkollektoren und Übernahme der EWS-Auslegung des Falles «Flachkollektoren (erforderliche Kollektorzahl)». Aufgrund des Wärmeeintrags, der grösser ist als der Wärmeentzug, ist dieser Fall ebenfalls als rein hypothetischer Fall zu betrachten.
- Solarthermische Absorber: In diesem Fall werden die gesamten Netto-Dachflächen mit solarthermischen Absorbern belegt. Die EWS-Auslegung wird zur Vereinfachung vom Fall «PVT (erforderliche Kollektorzahl)» übernommen. Die Resultate sind als grobe Abschätzung der Eignung von solarthermischen Absorbern zur EWS-Regeneration zu verstehen.

Die Dachbelegung der verschiedenen Fälle ist in Abbildung 19 in prinzipieller Weise gezeigt. Der Fall «Solarthermische Absorber» ist nicht separat gezeigt, da es sich dabei lediglich um eine grobe Abschätzung handelt, die nicht zentraler Inhalt der vorliegenden Arbeit ist.

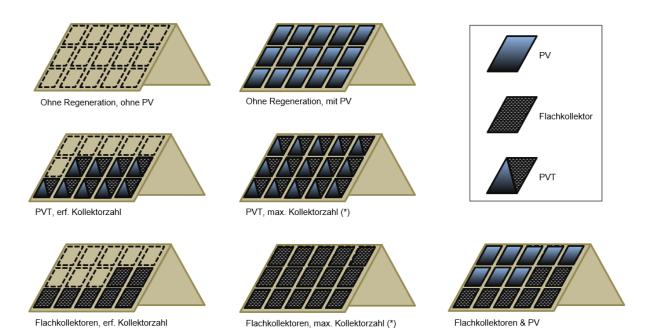


Abbildung 19: Prinzipielle Dachbelegungen der verschiedenen betrachteten Fälle. Die Kollektorzahl ist beispielhaft zu verstehen und variiert je nach Beispielgebäude. In der Darstellung ist für den Fall PVT eine grössere erforderliche Kollektorzahl gezeigt als für den Fall Flachkollektoren. Dies ist eine zu erwartende Realität, muss aber nicht in jedem Fall zutreffend sein. Bei den mit einem Stern (*) markierten Fällen ist die EWS-Dimensionierung nicht iterativ ermittelt, sondern entspricht der des zugehörigen Falls «erf. Kollektorzahl».

Anhand vom in Abschnitt 2.9.5 definierten Beispielgebäude mit PVT-Kollektoren auf dem Dach (maximale Kollektorzahl) werden zusätzlich die nachfolgenden Regenerationsmassnahmen betrachtet. Ausführlichere Beschriebe zur Implementation dieser Massnahmen befinden sich im Anhang unter Abschnitt 8.3. Basierend auf diesen Massnahmen werden verschiedene Simulations-Varianten definiert, mit deren Hilfe die Auswirkungen der einzelnen Massnahmen sowie ausgewählter Kombinationen untersucht werden.

- **PVT-Kollektoren an Fassade:** Zusätzlich zur PVT-Dachanlage wird eine zusätzliche Anbringung an den südlich ausgerichteten Fassaden untersucht.
 - Variante 1: PVT auf Dach + PVT an S/O-Fassade + PVT an S/W-Fassade
 - Variante 2: PVT auf Dach + PVT an S/O-Fassade
 - Variante 3: PVT auf Dach + PVT an S/W-Fassade
- Luft-Wasser-Wärmeübertrager (LWWÜ): Ein auf oder neben dem Gebäude installierter LWWÜ kann bei hohen Aussenlufttemperaturen zusätzlich zu den PVT-Kollektoren Wärme ans System liefern.
 - Variante 4 / 5 / 6: PVT auf Dach + LWWÜ (20 / 40 / 80 kW)
- Aktive Kühlung: Im Sommer wird das Gebäude mittels aktiver Kühlung über eine reversible WP gekühlt. Dabei wird die Erdwärmesonde als Wärmesenke und ein kalter Pufferspeicher als Wärmequelle genutzt.
 - Variante 8 / 9: PVT auf Dach + aktive Kühlung (3 / 6 kWh/m²)
- Passive Kühlung: Als Alternative zur aktiven Kühlung kann das Gebäude auch passiv über die EWS gekühlt, und diese somit regeneriert werden. Die maximale Regenerationstemperatur wird

dabei so eingestellt, dass das Fluid bei Sondenaustritt auf einem genügend tiefen Temperaturniveau ist, um eine passive Raumkühlung zu ermöglichen.

- Variante 10 / 11: PVT auf Dach + passive Kühlung (3 / 6 kWh/m²)
- Kombinierte Regenerationsmassnahmen: Zusätzlich zu den einzelnen Massnahmen werden auch folgende Kombinationen untersucht:
 - Variante 7: PVT auf Dach + PVT an Fassaden + LWWÜ (40 kW)
 - o Variante 12: PVT auf Dach + aktive Kühlung (6 kWh/m² a) + LWWÜ (40 kW)
 - Variante 13: PVT auf Dach + PVT an Fassaden + aktive Kühlung (6 kWh/m²) + LWWÜ (40 kW)

2.11 Zeitliche Untersuchung des Stromverbrauchs mit/ohne Regeneration über 50 Jahre

Die Regeneration von EWS geht mit einem erhöhten Stromverbrauch einher. Einerseits ist dieser durch den vermehrten Einsatz der Umwälzpumpe(n) bedingt, andererseits wird durch die Stabilisierung der Erdreichtemperatur eine Kürzung der EWS möglich, wodurch sich bei gleichbleibender Entzugsleistung im Heizbetrieb eine tiefere Quelltemperatur einstellt und damit die Effizienz der WP negativ beeinflusst wird. Weiter erhöhen zusätzliche Wärmequellen wie Fassadenanlagen oder LWWÜ den Stromverbrauch.

2.11.1 Methodisches Vorgehen

Um den Strombedarf der zusätzlichen Regenerationsmassnahmen einzuordnen, erfolgt ein Vergleich der zielführendsten Regenerationsvariante (geringster konstruktiver Aufwand und einem Regenerationsanteil > 80 %) mit der Ausgangsvariante (PVT-Dachanlage) und einem konventionellen EWS-System ohne Regeneration. Verglichen wird der Stromverbrauch des primärseitigen Kreislaufes inkl. WP als auch der WP separat. Die Sekundärseite wird vernachlässigt, weil diese über sämtliche Varianten identisch ist. Ebenfalls vernachlässigt wird der Strombedarf für die Gebäudekühlung. Es scheint unwahrscheinlich, dass eine Gebäudekühlung ausschliesslich zur EWS-Regeneration installiert wird. Ausserdem würde der Stromverbrauch für ein benötigtes Kühlsystem so oder so anfallen und kann nicht der EWS-Regeneration angelastet werden.

Der Vergleich erfolgt aufgrund der Simulationsresultate für die Betriebsjahre 1, 3, 6, 10, 20, 35 und 50. Im Unterschied zu den restlichen Simulationen wird die Vorbelastung der EWS mittels entsprechendem Simulationsvorlauf bestimmt. Dies erlaubt eine realitätsnähere Belastung der EWS, als sie mit konstanter Vorbelastung möglich ist. Zudem erfolgt eine genauere Auslegung der erforderlichen Pumpen, wie sie im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Weil die Länge der EWS infolge der Regeneration reduziert werden kann, steigt deren Belastung während dem Heizbetrieb. Aufgrund des gleichbleibenden Wärmeentzugs bei kürzeren EWS reduziert sich die Temperatur in der EWS deutlich schneller, was die Effizienz der WP negativ beeinflusst. Aus diesem Grund wird die zielführendste Regenerationsvariante zusätzlich auch mit gleicher EWS-Länge simuliert, wie die Variante ohne Regeneration.

2.11.2 Auslegung der Umwälzpumpen

Die Umwälzpumpen im Primär- und PVT-Kreislauf werden überschlagsmässig ausgelegt. Die Schätzung der Förderhöhe erfolgte gemäss Leitfaden der Wilo Schweiz AG (2016) und die Auswahl einer geeigneten Pumpe gemäss dem Sizing-Tool von Grundfoss (Grundfoss, 2021) unter Berücksichtigung des jeweils maximal zu fördernden Volumenstroms. Weil nicht davon ausgegangen werden kann, dass es sich um neuere Bauten handelt, wird ein Rohrreibungsverlust von 100 Pa/m angenommen (Wilo Schweiz AG, 2016). Der Druckverlust des Plattenwärmeübertragers und der PVT-Kollektoren werden

aus den entsprechenden Datenblättern entnommen (Hoval Schweiz AG, 2021), (DualSun, 2019a). Die entsprechenden Resultate sind in Abschnitt 3.10.5 aufgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Plausibilitätsüberprüfung der Wärmebedarfe

Um die Plausibilität der Wärmebedarfe der Beispielgebäude zu überprüfen wird ein Vergleich mit den in der SIA-Norm 2024 «Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik» (SIA, 2015) gemacht. Da sich die SIA-Werte auf die Wohnfläche und nicht auf die EBF beziehen, wird zunächst mit den Umrechnungsfaktoren aus Tabelle 2 für jedes Beispielgebäude die Wohnfläche ermittelt (Tabelle 13).

Tabelle 13: Wohnfläche der Beispielgebäude

Beispielgebäude	EBF (m²)	Wohnfläche (m²)
U1, S1	180	138
U2, S2	360	288
U3, S3	640	512
U4, S4	1'420	1'136
U5, S5	4'980	3'984

Das Dividieren der Wärmebedarfswerte durch die Wohnfläche ergibt die in Abbildung 20 und Abbildung 21 gezeigten Wärmebedarfswerte für Raumwärme und Warmwasser. Die Wärmebedarfswerte sind sowohl für die einzelnen Beispielgebäude als auch als gewichteter Mittelwert für die ganzen Quartiere gezeigt. In den Abbildungen sind als waagrechte Linien die relevanten Vergleichswerte aus der SIA-Norm 2024 (SIA, 2015) dargestellt. Die SIA-Werte sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Spezifische Wärmebedarfe für Raumwärme und Warmwasser nach SIA 2024 (SIA, 2015).

		Spez. Wärmebedarf Raumwärme (kWh/m²)	Spez. Wärmebedarf Warmwasser (kWh/m²)
	Standardwert	28.8	
EFH	Zielwert	17.2	13.5
	Bestand	172.7	
	Standardwert	19.4	
MFH	Zielwert	11.2	19.8
	Bestand	112.9	

Bei der Betrachtung der Raumwärme fällt auf, dass sowohl für das urbane als auch für das suburbane Quartier der spezifische Heizwärmebedarf mit zunehmender Gebäudegrösse abnimmt. Die geht einher mit der Tatsache, dass grössere Gebäude i.d.R. aufgrund eines kleineren Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses einen geringeren spezifischen Heizwärmebedarf haben. Deswegen halten auch SIA-Normen fest, dass EFH einen grösseren spezifischen Heizwärmebedarf haben als MFH. Ausserdem ist ersichtlich, dass der spezifische Heizwärmebedarf in den Beispielgebäuden des suburbanen Quartiers jeweils tiefer ist als im urbanen Fall. Wie bereits im Methodenteil beschrieben (Abschnitt 2.3.3), kann dies

hauptsächlich damit begründet werden, dass im suburbanen Quartier tendenziell ein neuerer Gebäudestandard vorherrscht. Dass in der Gesamtbetrachtung dennoch das urbane Quartier einen tieferen spezifischen Heizwärmebedarf hat, liegt daran, dass es im urbanen Quartier mehr grosse Gebäude gibt, die den gewichteten Mittelwert überproportional nach unten beeinflussen. Grundsätzlich liegen die Heizenergie-Bedarfswerte aller Beispielgebäude ungefähr mittig zwischen den Bestands- und den Standardwerten von SIA. Dies entspricht einem zu erwartenden Resultat. Die Wärmebedarfswerte stellen den Mittelwert aus den Jahren 2020 und 2050 dar, was einer Mischung aus Gebäuden nach den heutigen Kategorien «Bestand» und «Standard» ungefähr entsprechen dürfte.

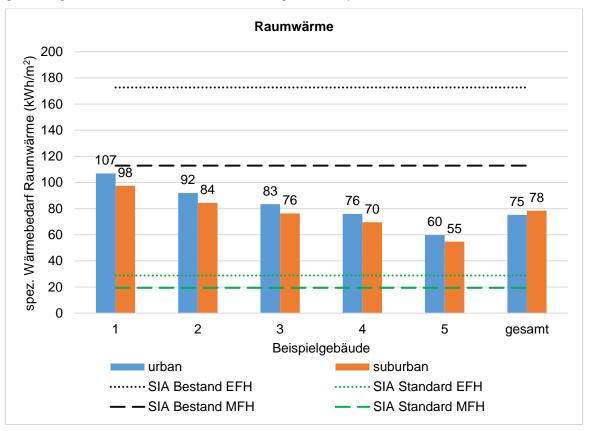


Abbildung 20: Spezifischer Wärmebedarf für Raumwärme der Beispielgebäude. Der gewichtete Mittelwert pro Quartier ist als «gesamt» gezeigt. Die Standard- und Bestandswerte für MFH und EFH der SIA-Norm 2024 (SIA, 2015) sind als waagrechte Linien dargestellt.

In der Darstellung des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitstellung (Abbildung 21) sind die waagrechten Linien der SIA-Werte nicht nach Standard- und Bestands-Werten unterteilt, da beide Werte (und auch die Zielwerte) identisch sind (siehe Tabelle 14). In der Abbildung ist ersichtlich, dass für EFH (Gebäude Typ 1) der spezifische Warmwasser-Wärmebedarf am geringsten ist, was mit den SIA-Werten einhergeht. Für grössere Gebäude bis Grösse 3 nimmt der Bedarf zu, und danach wieder ab. Die Abnahme bei grossen Gebäuden wird damit erklärt, dass diese oft einen höheren Anteil an gewerblicher Nutzung haben, was in vielen Fällen mit einem geringeren Warmwasserbedarf einhergeht. In Gebäuden des suburbanen Quartiers ist der Bedarf für alle Beispielgebäude geringer als im urbanen Quartier. Der Hauptgrund dafür dürfte eine grössere Personenbelegung in den urbanen Gebäuden sein. Alle Beispielgebäude, mit Ausnahme von U5, weisen einen höheren Warmwasser-Wärmebedarf aus als die SIA-Norm. Dies liegt vermutlich hauptsächlich daran, dass zukünftige Werte gezeigt sind (Durchschnitt aus 2020 und 2050), und das GPM in der Zukunft von einer zunehmenden Bevölkerung, inkl. Zunahme der EBF pro Gebäude, ausgeht. Dass in der Gesamtbetrachtung das suburbane Quartier hier einen tieferen Mittelwert aufweist als das Urbane, während es beim Heizwärmebedarf umgekehrt ist, ist kein Widerspruch. Beim Warmwasserbedarf zeigt sich die grosse Anzahl EFH im suburbanen Quartier.

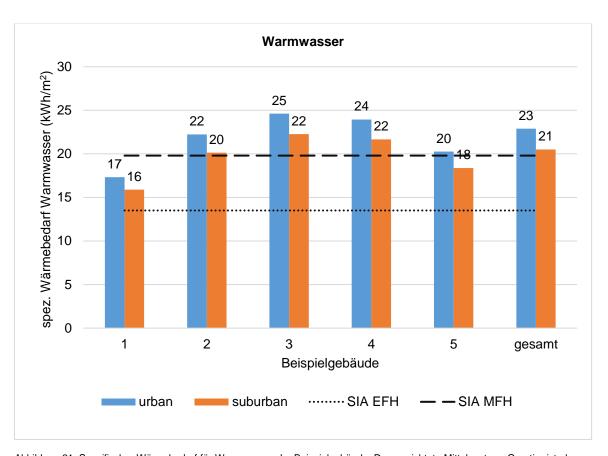


Abbildung 21: Spezifischer Wärmebedarf für Warmwasser der Beispielgebäude. Der gewichtete Mittelwert pro Quartier ist als «gesamt» gezeigt. Die Standard- und Bestandswerte für MFH und EFH der SIA-Norm 2024 (SIA, 2015) sind als waagrechte Linien dargestellt.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Beispielgebäude beim Heizwärmebedarf den für die nächsten 50 Jahre zu erwartenden Mix aus Bestandsbauten und Neubauten angemessen abbilden. Beim Warmwasserbedarf ist eine leichte Überschätzung des Bedarfs, verglichen mit den SIA-Werten, gegeben, was im Sinne einer konservativen Betrachtung allerdings zu begrüssen ist. Zudem wird damit der Möglichkeit einer grösseren Personenbelegung in der Zukunft Rechnung getragen.

3.2 Sondenauslegung und Wärmebezug ohne Regeneration

Um die Resultate der verschiedenen Regenerationsmassnahmen in Kontext zu setzen, wurden auch die Sondenauslegung und der Wärmebedarf im Quartier für den Fall untersucht, dass auf eine Regeneration verzichtet wird. Die nachbarschaftliche Beeinflussung wurde auch in diesem Fall berücksichtigt. Die gewonnenen Resultate dienen für die Resultate mit Regeneration als Referenz in Bezug auf Wärmeentzug und Strombedarf. Die EWS-Dimensionierung ist in Tabelle 15 gezeigt.

Tabelle 15: EWS-Dimensionierung der Beispielgebäude für den Fall ohne Regeneration.

	Beispielgebäude	Anzahl Sonden	Sondenlänge (m)
	U1	1	282
⊑	U2	2	350
Urban	U3	3	312
ر	U4	5	284
	U5	18	295
	S1	1	216
_	S2a	2	209
ban	S2b	2	245
Suburban	S3a	3	228
้ง	S3b	3	269
	S4	5	312

In Tabelle 16 ist der Netto-Wärmeentzug, die in diesem Fall mit dem Brutto-Wärmeentzug identisch ist, gezeigt. Einerseits pro Beispielgebäude und andererseits der Gesamtbeitrag im Quartier. Die Summe der gesamten jährlichen Wärmeentzugs beträgt im urbanen Quartier rund 59'000 MWh und im Suburbanen rund 3'600 MWh. Aus der Fläche der jeweiligen Quartiere (Abschnitt 2.3.1) und der Wärmeflussdichte von 80 mW/m² (Abschnitt 2.6.2) ergibt sich ein terrestrischer Wärmefluss von jährlich rund 680 MWh für das urbane Quartier und 130 MWh für das Suburbane. Der terrestrische Wärmefluss ist somit um Grössenordnungen kleiner als der Wärmeentzug im Quartier. Im urbanen Quartier beträgt er rund 1 % des Wärmeentzugs und im Suburbanen rund 4 %.

Tabelle 16: Netto-Wärmeentzug pro Gebäude und im Quartier für den Fall ohne Regeneration.

	Beispielgebäude	Anzahl Gebäude im Quartier	Netto-Wärmeentzug pro Gebäude (kWh)	Netto-Wärmeentzug im Quartier (kWh)
	U1	119	14'419	1'715'861
	U2	174	27'650	4'811'100
Urban	U3	336	45'308	15'223'488
ļ	U4	261	96'189	25'105'329
	U5	48	251'367	12'065'616
	Gesamt			58'921'394
				_
	S1	45	13'375	601'875
	S2a	18	25'963	467'334
)an	S2b	21	25'808	541'968
Suburban	S3a 6		41'579	249'474
Sul	S3b	7	41'487	290'409
	S4	17	88'373	1'502'341
	Gesamt			3'653'401

Der in diesem Abschnitt untersuchte Fall ohne Regeneration ist als Untersuchung zur Abschätzung der benötigten Wärmemenge zu verstehen. Er ist keine nachhaltige Lösung für die Praxis. Die EWS sind

für diesen Fall so ausgelegt, dass die EWS-Temperatur im Betrieb nach 50 Jahren nicht unter -1.5 °C fällt. Im Zeitraum nach diesen 50 Jahren ist das Erdreich im ganzen Quartier stark ausgekühlt und das Nachfliessen von geothermischer Wärme über die Quartiergrenzen sowie von unten reicht nicht aus, um den Wärmeentzug zu decken. Eine weiter fortschreitende Auskühlung ist die Folge, so dass die sinnvolle Nutzung von EWS über den Zeitraum von 50 Jahren hinaus nicht möglich ist. Ausserdem würde dieser Fall sehr tiefe EWS erfordern, wie in Tabelle 15 gezeigt.

3.3 Deckung des Regenerationsbedarfs mit PVT-Kollektoren

Die resultierenden Systemauslegungen⁹ des in Abschnitt 2.7 beschriebenen Simulationsprozesses für die Regeneration mittels PVT-Kollektoren sind in Tabelle 17 gezeigt. In allen Fällen erlaubt die Regeneration eine deutliche Reduktion der Sondenlänge. Je nach Gebäudetyp ist eine Reduktion von 25 bis 45 % möglich. Bei kleineren Gebäuden in urbanen Quartieren sind trotz des leicht grösseren Wärmebedarfs weniger Kollektoren nötig für 100 % Regeneration als bei ihren Pendants der suburbanen Quartiere. Der Grund dafür ist die grössere Sondenlänge, welche einer grösseren Wärmeübertragerfläche entspricht. Bei gleichem Volumenstrom des Zirkulationsfluids ist also eine geringere Temperaturdifferenz erforderlich, um die erforderliche Wärmemenge pro Jahr in den Boden zu bringen. Dass die EWS bei den urbanen Gebäuden länger dimensioniert sind als bei den Suburbanen ist darauf zurückzuführen, dass die EWS nach dem monatlichen Netto-Wärmeentzug und der erforderlichen Maximalleistung ausgelegt werden. Letztere nimmt mit zunehmendem Wärmebedarf zu, auch bei Vorhandensein von Regeneration. Denn die maximale Leistung wird in den meisten Fällen an Zeitpunkten benötigt, an denen keine Regeneration stattfindet.

Tabelle 17: Systemauslegung für Rege	eneration mit PVT-Kollektoren.
--------------------------------------	--------------------------------

Beispiel- gebäude	Anzahl Sonden	Sondenlänge ohne Regene- ration (m)	Sondenlänge mit Regenera- tion (m)	Erreichte Reduktion der Sonden- länge (%)	Erf. Anzahl Kollektoren	Max. Anzahl Kollektoren
U1	1	282	196	30	17	24
U2	2	350	193	45	28	35
U3	3	312	179	43	52	58
U4	5	284	205	28	82	82
U5	18	295	198	33	148	148
S1	1	216	161	25	20	24
S2a	2	209	157	25	35	35
S2b	2	245	169	31	32	35
S3a	3	228	161	29	58	58
S3b	3	269	175	35	53	58
S4	5	312	214	31	82	82

In Abbildung 22 ist der jährliche Brutto- und Netto-Wärmeentzug der EWS für die beiden Fälle «erforderliche Kollektorzahl» und «maximale Kollektorzahl» gezeigt. Es handelt sich im zweiten Fall um eine Abschätzung. Sie zeigt die mögliche Regeneration, wenn mit der gleichen EWS-Auslegung die ganze

⁹ Die EWS-Anordnungen sind nicht zwangsläufig optimiert für die Anwendung von Regeneration. Im ersten Schritt des iterativen Prozesses wird die Auslegung ohne Regeneration vorgenommen. Sondenanzahl und -abstände werden danach beibehalten. So sind beispielsweise die 18 EWS im Abstand von 10 m für das Gebäude U5 keineswegs optimal. Der spezifische Entzug ist in diesem Beispielgebäude am geringsten, da sich die Sonden am meisten gegenseitig beeinflussen. Entsprechend «profitieren» diese Sonden am meisten von der Regeneration. Die Resultate sind also auch beeinflusst von der ursprünglichen Auslegung. In der Praxis müssten Optimierungen individuell für jedes Gebäude oder Areal vorgenommen werden.

verfügbare Dachfläche mit PVT-Kollektoren belegt wird. Wo für beide Fälle die gleichen Werte erreicht werden, entspricht die erforderliche Kollektorzahl der Maximalen. Dies sind Gebäude, bei denen mit der maximalen Kollektorzahl gerade 100 % Regeneration oder weniger erreicht werden kann. Die Netto-Entzugsenergie ist die Summe aus Brutto-Entzugsenergie und Regenerationswärme (unter Berücksichtigung des negativen Vorzeichens der Regenerationswärme). Eine Netto-Entzugsenergie von null entspricht demnach einer Regeneration von 100 %. Positive Werte bedeuten ein Energiedefizit und negative Werte einen Energieüberschuss. ¹⁰ Die dunklen Säulen auf der linken Seite zeigen den Fall mit der erforderlichen Kollektorzahl, während die hellen Säulen rechts den Fall mit der maximal möglichen Kollektorzahl darstellen. Es ist ersichtlich, dass bei den drei grössten Gebäuden U4, U5 und S4 der Regenerationsbedarf nicht vollständig gedeckt werden kann.

Im Fall der maximalen Kollektorzahl sind bei kleineren Gebäuden negative Netto-Wärmeentzüge, also in der Jahresbilanz ein Einbringen von Wärme ins Erdreich, möglich. Allerdings sind diese Wärmeeinspeisungen deutlich kleiner als die Regenerationsdefizite der grösseren Gebäude.

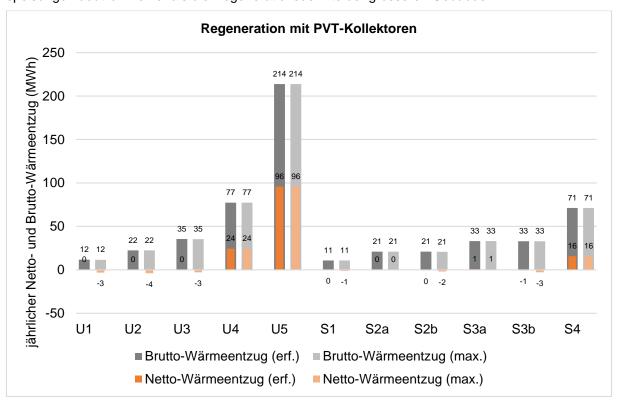


Abbildung 22: Jährlicher Netto- und Brutto-Entzug der EWS pro Beispielgebäude bei Regeneration mit PVT. Links mit der erforderlichen Kollektorzahl, rechts mit der maximalen Kollektorzahl.

Der mit der in Tabelle 17 gezeigten Dimensionierung erreichte Regenerationsanteil ist in Abbildung 23 gezeigt. Auffallend ist, dass bei Gebäude S2a weniger Regeneration möglich ist als bei S2b. Auch hier liegt die Ursache in der Sondenlänge. Obwohl die beiden Varianten an sich den gleichen Wärmebedarf haben, benötigt S2b aufgrund des stärkeren Einflusses der Nachbarn (Nachbarn vom Typ S4 anstatt S2) tiefere EWS. Zusätzlich bewirkt der stärkere nachbarschaftliche Einfluss eine tiefere Erdreichtemperatur, was wiederum eine grössere Temperaturdifferenz zum Kollektorausgang bedeutet und somit

¹⁰ Zu beachten ist, dass ein Energieüberschuss im Allgemeinen regulatorischen Einschränkungen unterliegt, da eine Erwärmung des Erdreichs über sein reguläres Temperaturniveau zu unterlassen ist. Dennoch ist dieser Fall hier gezeigt. Die Ermittlung der möglichen Energieüberschüsse soll es ermöglichen, über das gesamte Quartier eine Abschätzung zu machen, ob in der Bilanz die gesamten Energieüberschüsse im Quartier die Energiedefizite theoretisch kompensieren könnten.

der Regeneration dienlich ist. Kurzum hat Gebäude S2a den gleichen Wärmebedarf, aber einen «schlechteren» Wärmeübertrager als S2b, weswegen insgesamt weniger Regeneration möglich ist.

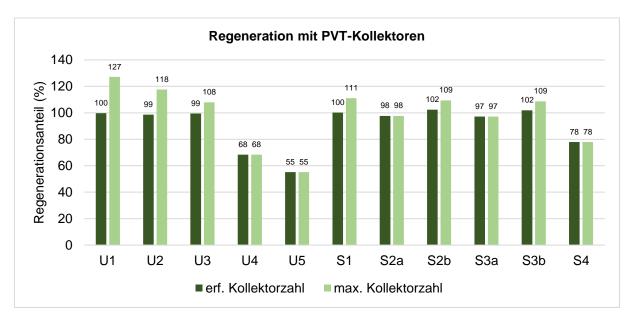


Abbildung 23: Regenerationsanteil bei Regeneration mit PVT. Links erforderliche Kollektorzahl, rechts maximale Kollektorzahl.

Eine Abschätzung des Defizits/Überschusses im gesamten Quartier kann gemacht werden, wenn die Anzahl Gebäude berücksichtigt wird. Abbildung 24 und Abbildung 25 pro Beispielquartier die Anzahl der jeweiligen Beispielgebäude multipliziert mit dem jeweiligen Netto- Wärmeentzug pro Beispielgebäude. Eine grosse Diagramm-Fläche über der Nulllinie bedeutet also einen grossen positiven Netto-Wärmeentzug und somit ein grosses Wärmedefizit. Negative Flächen bedeuten einen Wärmeüberschuss¹¹. Man kann sehen, dass im urbanen Fall für die Gebäude U1 bis U3 mehr als 100 % Regeneration möglich sind. Allerding sind die Defizite bei den Gebäuden U4 und U5 so gross, dass in der Summe ein deutliches Defizit resultiert. Die Beiträge von U4 und U5 zum Wärmedefizit sind ungefähr gleich gross, da es von Gebäude U4 eine viel grössere Anzahl gibt als von U5.

¹¹ Die Betrachtung dieses Wärmeüberschusses dient zunächst lediglich der Veranschaulichung der Grössenordnungen des Wärmebedarfs und der Möglichkeiten zur Regeneration im Gesamtquartier. In der Praxis ist eine Nutzung von überschüssiger Regenerationswärme eines Gebäudes zur Kompensation des Defizits eines anderen Gebäudes am ehesten durch eine kombinierte Nahwärmeversorgung zu lösen. Die direkte «Quer-Regeneration» mit überschüssiger Wärme eines Objekts zur Entlastung eines Nachbarobjekts auf unterirdischem Weg wäre planerisch kaum umsetzbar.

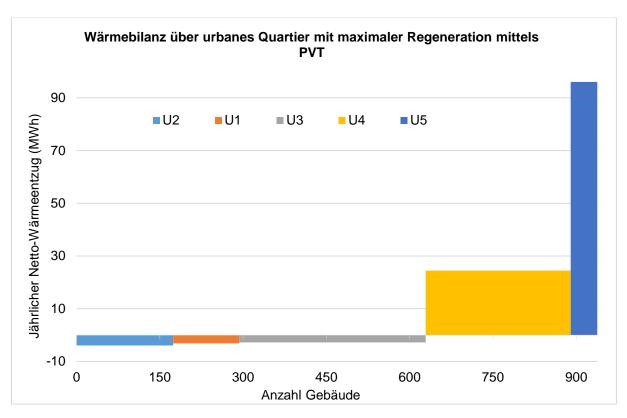


Abbildung 24: Netto- Wärmeentzug mal Anzahl Gebäude für das urbane Quartier. Regeneration mit der maximal möglichen Kollektorzahl.

Im suburbanen Quartier ist Ähnliches zu beobachten (Abbildung 25). Die kleineren Gebäude weisen einen Überschuss auf, während das grosse MFH S4 für ein Defizit sorgt, das durch die kleinen Gebäude nicht oder nur teilweise ausgeglichen werden kann. Interessanterweise weist bei den Beispielgebäuden S2 und S3 jeweils die Variante a) einen positiven Netto-Wärmeentzug, also ein Wärmedefizit, auf, während die Variante b) einen Wärmeüberschuss darstellt. Dieses Resultat ist auf den ersten Blick unerwartet, da die beiden Varianten jeweils den gleichen Wärmebedarf und die gleiche Kollektorzahl haben. Die Erklärung dafür liegt in der bereits oben beschriebenen unterschiedlichen Sondenlänge und Erdreichtemperatur.

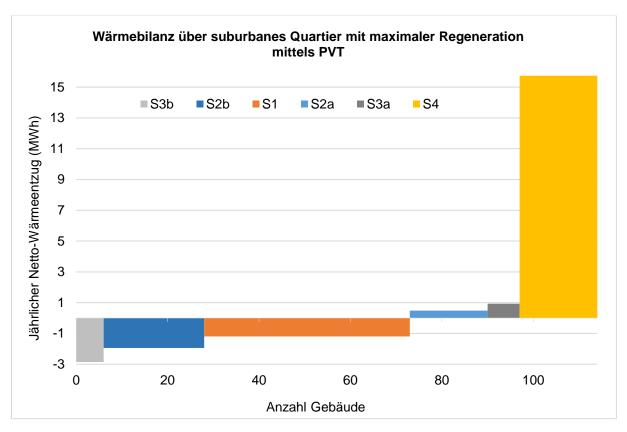


Abbildung 25: Netto-Wärmeentzug mal Anzahl Gebäude für das suburbane Quartier. Regeneration mit der maximal möglichen Kollektorzohl

Tabelle 18 zeigt die Summe der jährlichen Netto-Wärmeentzüge aller Gebäude der Quartiere multipliziert mit der jeweiligen Gebäudeanzahl. Zum Vergleich ist in der Tabelle pro Quartier der Netto-Wärmeentzug für den Fall gezeigt, dass nicht regeneriert würde. Der Beitrag des terrestrischen Wärmeflusses wird in der Bilanz nicht berücksichtigt, da er mit 1 bis 4 % vernachlässigbar gering ist (Abschnitt 3.2). Erwartungsgemäss ist für den Fall «erforderliche Anzahl Kollektoren» in beiden Quartieren keine vollständige Regeneration möglich, da in diesem Fall bei allen Gebäuden nur zu 100 % oder weniger regeneriert wird. Der Wärmeentzug im Quartier kann aber um 81 % (urban), beziehungsweise um 92 % reduziert werden, verglichen mit dem Fall, dass nicht regeneriert wird. Im Fall «maximale Kollektorzahl» ist ebenfalls in beiden Quartieren keine vollständige Regeneration möglich. Die Reduktion gegenüber dem Fall «ohne Regeneration» kann gesteigert werden auf 85 % (urban) und 95 % (suburban).

Tabelle 18: Quartierweise Betrachtung des jährlichen Regenerationsdefizits bzw. Überschusses bei Regeneration mit PVT-Kollektoren. Jedes Quartier wird verglichen mit dem gesamten jährlichen Netto-Wärmeentzug des Quartiers für den Fass, dass nicht regeneriert wird.

		Erforderliche Kollektorzahl	Maximale Kollektorzahl	
	Netto-Wärmeentzug mit Regeneration (MWh)	11'110	9'000	
Urban	Netto-Wärmeentzug ohne Regeneration (MWh)	58'920		
	Reduktion durch Regeneration	-81 %	-85 %	
ur Ur	Netto-Wärmeentzug mit Regeneration (MWh)	266	167	
Suburban	Netto-Wärmeentzug ohne Regeneration (MWh)	3'650		
S	Reduktion durch Regeneration	-92 %	-95 %	

Zusammenfassend ermöglicht also eine Regeneration mit PVT eine Reduktion der Sondenlänge um rund 25 bis 40 % gegenüber dem Fall, dass nicht regeneriert wird. 12 Die kleinen und mittleren Gebäude können mit PVT-Kollektoren i.d.R. vollständig regeneriert werden, nicht jedoch die grösseren Gebäude. Würde auf allen Gebäuden die maximale Kollektorzahl angebracht, könnte bei den kleineren Gebäuden ein leichter Wärmeüberschuss realisiert werden. Allerdings wäre dieser im urbanen Quartier nicht ausreichend, um die Defizite der grösseren Gebäude auszugleichen. Im suburbanen Quartier wäre der Wärmeüberschuss der kleinen Gebäude annähernd gross genug für das Ausgleichen der Defizite der Grossen.

3.4 Deckung des Regenerationsbedarfs mit Flachkollektoren

Bei der Ermittlung der möglichen Regeneration mit Flachkollektoren ist analog vorgegangen worden wie im Fall «PVT». Die Sondenlänge und die Anzahl Kollektoren sind iterativ ermittelt worden. Die Sondendimensionierung und Anzahl Kollektoren sind in Tabelle 19 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass gegenüber dem hypothetischen Fall «ohne Regeneration» eine Reduktion der Sondenlänge von rund 30 bis 50 % möglich ist. Die Sondenlänge kann also noch etwas kürzer gewählt werden als bei der Regeneration mit PVT-Kollektoren. In der Tabelle ist ebenfalls die Anzahl PV-Module angegeben, die im Fall «Flachkollektoren & PV» neben der erforderlichen Anzahl Flachkollektoren auf der nutzbaren Dachfläche noch angebracht werden können.

¹² Der Vergleich dient nur der Illustration, denn komplett auf Regeneration zu verzichten wäre keine nachhaltige Lösung.

Tabelle 19: Systemauslegung für Regeneration mit Flachkollektoren.

Beispiel- gebäude	Anzahl Son- den	Sonden- länge ohne Regenera- tion (m)	Sonden- länge mit Regenera- tion (m)	Erreichte Reduktion der Sonden- länge (%)	Anzahl Kollektoren	Max. An- zahl Kolle- ktoren	Anzahl PV-Mo- dule ¹³
U1	1	282	160	43	10	19	11
U2	2	350	153	56	19	28	11
U3	3	312	152	51	32	47	19
U4	5	284	185	35	68	68	0
U5	18	295	179	39	122	122	0
S1	1	216	158	27	9	19	13
S2a	2	209	150	28	17	28	14
S2b	2	245	154	37	17	28	14
S3a	3	228	157	31	29	47	22
S3b	3	269	157	42	29	47	22
S4	5	312	189	39	65	68	3

In Abbildung 26 ist für jedes Gebäude die jährliche Brutto-Entzugs- und die Regenerationswärme für die Fälle «erforderliche Kollektorzahl» und «maximale Kollektorzahl» gezeigt. Abbildung 27 zeigt die möglichen Regenerationsanteile in Prozent. Vollständige Regeneration ist bei allen Gebäuden, mit Ausnahme der Beispielgebäude U4 und U5, möglich. Bei Gebäude U4 kann die EWS mit der maximalen Kollektoranzahl zu 95 % regeneriert werden, bei U5 sind es lediglich 63 %. Alle anderen Gebäude kommen mit einer geringeren Kollektorzahl als der Maximalen aus, was Platz für PV-Module übriglässt.

Auffällig ist, dass hier mit der maximalen Kollektorzahl gegenüber der erforderlichen Kollektorzahl nicht nur die Regenerationswärme vergrössert, sondern auch der Brutto-Wärmeentzug verkleinert werden kann. Dieser Effekt ist auch im PVT-Fall (Abbildung 22) vorhanden, allerdings so schwach ausgeprägt, dass er in der Grafik nicht sichtbar ist. Dass sich der Brutto-Wärmebezug je nach Kollektorzahl ändert, ist zunächst unverständlich, da der Wärmebedarf der Gebäude unverändert bleibt und die gesamte Wärme für die WP den Weg über die EWS nimmt, auch in den Zeiträumen, in denen sie von den Kollektoren kommt. Der Grund liegt in der Definition der EWS-Entzugsenergie in Polysun, als dem Erdreich entzogene Energie. Fliesst Wärme vom Kollektor «durch die EWS» zur WP, wird sie der Entzugsenergie entsprechend nicht angerechnet. Je mehr Kollektoren, desto mehr Wärme wird direkt an die WP weitergegeben und desto geringer wird die dem Erdreich entzogene Wärmemenge. Der Brutto-Wärmeentzug wird somit trotz gleichbleibendem Wärmebedarf reduziert. Im PVT-Fall ist dieser Effekt vernachlässigbar klein, da die erforderliche und die maximale Kollektorzahl in den meisten Fällen nahe beieinander liegen und die EWS länger sind, was eine grössere Wärmeübertragerfläche und somit mehr Wärmeaustausch mit dem Erdreich bedeutet.

¹³ Bei Betrachtung der Variante «Flachkollektoren & PV», bei der die erforderliche Anzahl Flachkollektoren verwendet wird und der Rest der nutzbaren Dachfläche mit PV-Modulen belegt wird.

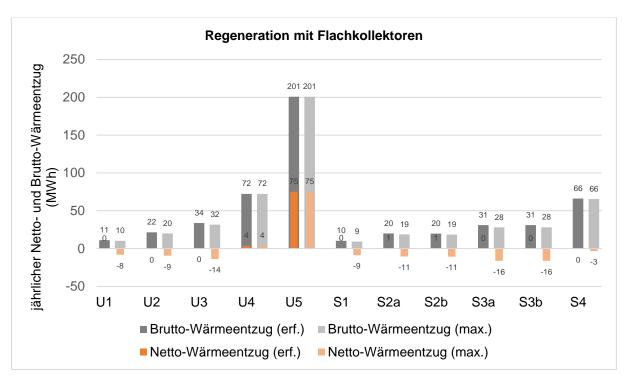


Abbildung 26: Jährlicher Netto- und Brutto-Entzug der EWS pro Beispielgebäude bei Regeneration mit Flachkollektoren. Links mit der erforderlichen Kollektorzahl, rechts mit der maximalen Kollektorzahl.

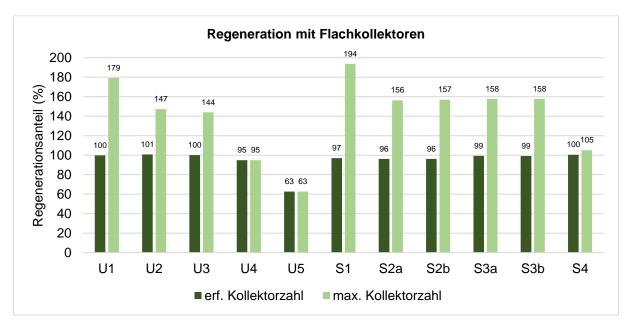


Abbildung 27: Regenerationsanteil bei Regeneration mit Flachkollektoren. Links erforderliche Kollektorzahl, rechts maximale Kollektorzahl.

Auf eine grafische Darstellung der Wärmedefizite und -überschüsse multipliziert mit der Anzahl Gebäude wird im Fall «Flachkollektoren» verzichtet. Im suburbanen Quartier ist vollständige Regeneration bei allen Gebäuden möglich, weshalb ein Aufzeigen des theoretisch möglichen Wärmeüberschusses hinfällig ist.

Tabelle 20 zeigt die Summe der jährlichen Netto-Wärmeentzüge aller Gebäude der Quartiere multipliziert mit der jeweiligen Gebäudeanzahl, verglichen mit dem theoretischen Fall «ohne Regeneration». Es ist ersichtlich, dass für den Fall «erforderliche Kollektorzahl» im urbanen Quartier keine vollständige Regeneration möglich ist. Die Defizite der Beispielgebäude U4 und U5 stellen auf das gesamte Quartier bezogen ein Regenerationsdefizit von rund 8 % dar. Im suburbanen Quartier ist vollständige Regeneration möglich.

Im Fall «maximale Kollektorzahl» ist in beiden Quartieren eine Regeneration von über 100 % in der Summe theoretisch möglich. In der Praxis wäre aber auch in diesem Fall eine Nahwärmeversorgung erforderlich, um mit den Überschüssen der kleinen Objekte die Defizite der Grossen zu kompensieren.

Tabelle 20: Quartierweise Betrachtung des Regenerationsdefizits bzw. Überschusses bei Regeneration mit Flachkollektoren. Jedes Quartier wird verglichen mit dem gesamten Netto-Wärmeentzug des Quartiers, wenn nicht regeneriert wird.

		Erforderliche Kollektorzahl	Maximale Kollektorzahl	
	Netto-Wärmeentzug mit Regeneration (MWh)	4'540	-2'700	
Urban	Netto-Wärmeentzug ohne Regeneration (MWh)	58'920		
	Reduktion durch Regeneration	-92 %	-105 %	
	Netto-Wärmeentzug mit Regeneration (MWh)	42	-1050	
Suburban	Netto-Wärmeentzug ohne Regeneration (MWh)	3'6	550	
Ś	Reduktion durch Regeneration	-99 %	-129 %	

Die Regeneration mit Flachkollektoren ist deutlich wirksamer als mit PVT-Kollektoren. Im suburbanen Quartier können damit die EWS aller Beispielgebäude komplett regeneriert werden. Im urbanen Quartier stellen die grossen Gebäude weiterhin eine Herausforderung dar.

3.5 Abschätzung der Deckung des Regenerationsbedarfs mit solarthermischen Absorbern

Gemäss Abschnitt 2.8 wird vereinfacht ermittelt, welches Ausmass an Regeneration mit solarthermischen Absorbern, sogenannten Schwimmbadkollektoren, möglich ist. Verglichen wird zwischen dem Viessmann SLK-S Kollektor und dem SolarRipp Kollektor. Die jährlichen Wärmeflüsse in der EWS sind in Abbildung 28 dargestellt. Beide solarthermischen Absorber erlauben weniger Regeneration als die untersuchten Flachkollektoren. Die thermischen Resultate sind jedoch ähnlich wie bei der Verwendung von PVT-Kollektoren. Trotz vollständiger Belegung der Dächer lässt sich mit den SLK-S Kollektoren lediglich bei U1 gleich viel Wärme einspeisen wie entzogen werden muss. Mit dem leistungsstärkeren SolarRipp Kollektor ist dies bis auf die grösseren Gebäudetypen U4, S4 und U5 bei allen möglich.

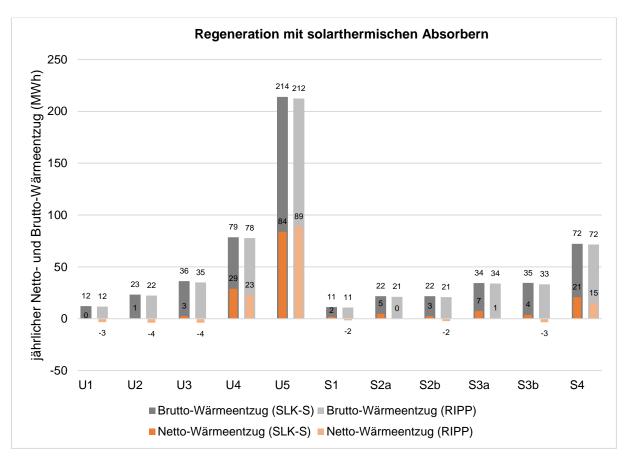


Abbildung 28: Jährlicher Netto- und Brutto-Entzug der EWS pro Beispielgebäude bei Regeneration mit solarthermischen Absorbern.

Vor allem bei den grossen Gebäudetypen U4, U5 und S4 ergibt sich ein hoher Nettoentzug. Der SLK-S Kollektor schliesst meist erwartungsgemäss schlechter ab als der SolarRipp Kollektor. Beim Gebäudetyp U5 ist dies nicht der Fall. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dieser Betrachtung kein iterativer Auslegungsprozess stattgefunden hat, und die Sondenauslegung nicht für die verschiedenen Kollektortypen optimiert worden ist.

Abbildung 29 zeigt zusätzlich die Deckungsrade der Regeneration. Über das gesamte Quartier betrachtet, ergäbe sich bei der Regeneration mit solarthermischen Absorbern ein hoher Nettoentzug und somit eine relativ starke Auskühlung des Bodens. Leistungsstarke solarthermische Absorber stellen eine kostengünstige Alternative zur vollständigen EWS-Regeneration für Gebäude vom Typ 1 bis 3 dar. Selbst bei der Verwendung von leistungsschwächeren solarthermischen Absorbern wird bei diesen Gebäudetypen noch eine hohe Regeneration von mindestens 78 % erreicht. Da der Boden dadurch bereits deutlich langsamer abkühlt als ohne Regeneration, liessen sich auch diese EWS wohl deutlich über 50 Jahre hinaus effizient betreiben. Zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der verschiedenen Regenerationsmassnahmen muss jedoch berücksichtigt werden, dass die thermisch ähnlich guten PVT-Kollektoren zusätzlich Solarstrom liefern, während mit solarthermischen Absorbern kaum mehr Platz zur Solarstromgewinnung bleiben würde.

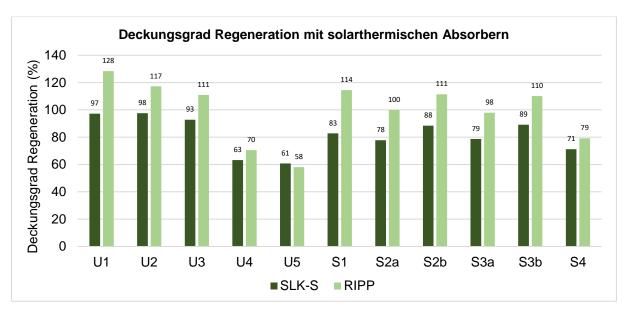


Abbildung 29: Deckungsgrad der EWS-Regeneration bei vollständiger Belegung der Dächer mit solarthermischen Absorbern.

3.6 Jahresverlauf der Regeneration mit PVT- und Flachkollektoren

Am Beispiel des Gebäudes U3 soll gezeigt werden, wie sich die Regeneration im Jahresverlauf verhält, bei Verwendung unterschiedlicher Kollektoren. Der spezifische thermische Ertrag liegt bei den verwendeten PVT-Kollektoren je nach Gebäudetyp zwischen 380 und 650 kWh/m². Bei den Flachkollektoren liegt er mit 750 bis 840 kWh/m² höher. Eine vollständige Auflistung der spezifischen Erträge findet sich im Anhang in Tabelle 31. Diese sind höher als bei den, beispielsweise von Zenhäusern et al., (2017) berichteten, bereits realisierten Projekten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich insbesondere die Ausrichtung, die Neigung und der Stand der Technik der Kollektoren sowie die Art der Einbindung in das Heizsystem unterscheiden. Abbildung 30 zeigt die Entzugsleistung der EWS im Jahresverlauf bei Regeneration mit PVT- und mit Flachkollektoren. In beiden Fällen wird die erforderliche Kollektorzahl betrachtet, also 52 PVT-Kollektoren oder 32 Flachkollektoren. Bei der Betrachtung von Abbildung 30 und Abbildung 31 ist daher zu berücksichtigen, dass es sich nicht um die gleiche Kollektorfläche handelt und die Flachkollektoren bezogen auf die Gesamtfläche grundsätzlich leistungsfähiger sind. Es ist ersichtlich, dass beide Regenerationsmassnahmen im Jahresverlauf sehr ähnliche Verläufe aufweisen. Die PVT-Lösung weist im Winterhalbjahr minimal höhere Entzugsleistungen auf, dafür wird zu gewissen Zeitpunkten im Sommer deutlich mehr regeneriert.

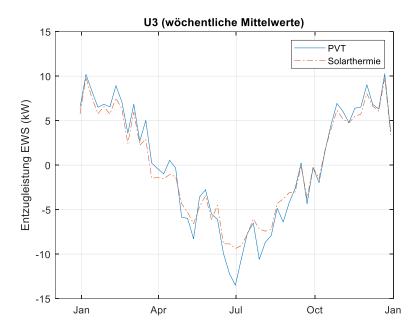


Abbildung 30: Netto-Wärmeentzugsleistung der EWS für Gebäude U3 bei Regeneration mit PVT- oder Flachkollektoren (Solarthermie) (wöchentliche Mittelwerte). Eine negative Entzugsleistung entspricht einer Wärmeeinspeisung in das Erdreich.

Zur genaueren Betrachtung der markanten Unterschiede im Sommer ist in Abbildung 31 der Ausschnitt der letzten Juni-Woche in stündlicher Auflösung gezeigt. Auffallend ist, dass bei Regeneration mit PVT abends in der Regel noch länger regeneriert werden kann als mit Flachkollektoren. Dies ist möglich aufgrund der fehlenden Isolation des PVT-Kollektors. Somit kann an warmen Sommerabenden noch Umgebungswärme genutzt werden, währen nur noch wenig oder gar keine Solarstrahlung mehr vorhanden ist.

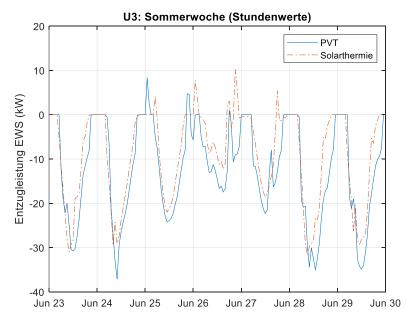


Abbildung 31: Stündliche Entzugsleistung der EWS für Gebäude U3 bei Regeneration mit PVT- oder Flachkollektoren (Solarthermie): Sommerwoche Ende Juni. Eine negative Entzugsleistung entspricht einer Wärmeeinspeisung in das Erdreich. Es kann beobachtet werden, dass mit PVT in der Regel abends noch länger regeneriert werden kann als mit Flachkollektoren.

Dieser Effekt kann anhand des thermischen Kollektorertrags bei verschiedenen Bedingungen veranschaulicht werden. Aus Abbildung 32 ist ersichtlich, dass bei Abwesenheit von solarer Einstrahlung der PVT-Kollektor erwartungsgemäss immer dann leistungsfähiger wird als der Flachkollektor, wenn die Differenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur negativ wird, sprich wenn die Umgebung wärmer ist als der Kollektor.

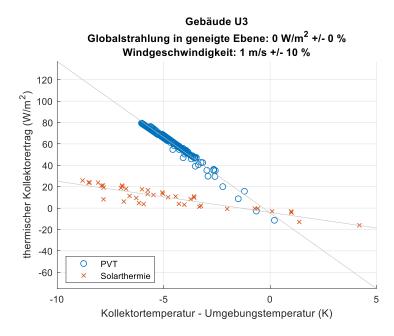


Abbildung 32: Thermischer Kollektorfeldertrag der PVT- und der Flachkollektoren (Solarthermie) pro Quadratmeter Aperturfläche in Abhängigkeit der Differenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur. Gezeigt sind Werte des Beispielgebäudes U3 bei 0 W/m² Globalstrahlung und 1 m/s Windgeschwindigkeit. Die Geraden durch die Datenpunkte stellen die linearen Regressionsgeraden nach der Least-Squares-Methode dar.

Auch aus Abbildung 33 ist ersichtlich, dass bei der Abwesenheit von Solarstrahlung und hohen Umgebungstemperaturen der thermische Kollektorertrag der PVT-Kollektoren deutlich grösser ist als bei den Flachkollektoren. Zu beachten ist, dass der spezifische Kollektorertrag pro Quadratmeter Aperturfläche gezeigt ist. In absoluten Zahlen ist der Unterschied noch deutlicher, da beim betrachteten Beispielgebäude die PVT-Kollektorfläche deutlich grösser ist als die Flachkollektorfläche.

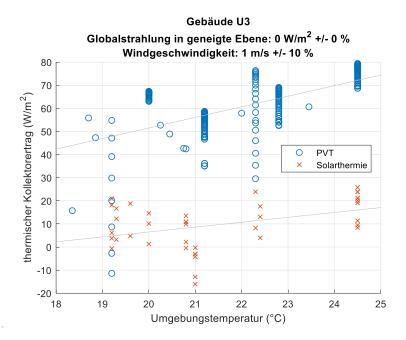


Abbildung 33: Spezifischer thermischer Kollektorertrag in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur bei Nichtvorhandensein von Solarstrahlung. Es sind nur Datenpunkte gezeigt, bei denen die Kollektoren in Betrieb sind. Es ist ersichtlich, dass in diesem Fall mit den PVT-Kollektoren mehr Umgebungswärme genutzt werden kann als mit den Flachkollektoren (Solarthermie).

Ist hingegen solare Strahlung vorhanden, zeigen sich deutlich die Vorteile der Flachkollektoren. Abbildung 34 zeigt den spezifischen Ertrag der beiden Kollektorarten bei einer Globalstrahlung von 500 W/m² in Abhängigkeit der Differenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur. Während bei Nichtvorhandensein von Solarstrahlung der «Break-even»-Punkt der beiden Kollektoren bei einer Temperaturdifferenz von 0 K liegt, liegt er hier deutlich tiefer- bei rund -10 K. Das bedeutet, dass erst ab einer Temperaturdifferenz von -10 K die Fähigkeit des PVT-Kollektors, Umgebungswärme besser nutzen zu können, überwiegt. Darüber überwiegt die Fähigkeit des Flachkollektors, solare Strahlung besser nutzen zu können.

¹⁴ In der Regel wird diese Betrachtung bei 1000 W/m² gemacht. Allerdings liegen für diesen Fall, bei gleich beschränkter Windgeschwindigkeit, nicht genügend Simulations-Datenpunkte vor, um aussagekräftige Zusammenhänge darzustellen. In der Praxis kommen auch Einstrahlungswerte von 1000 W/m² nur selten vor.

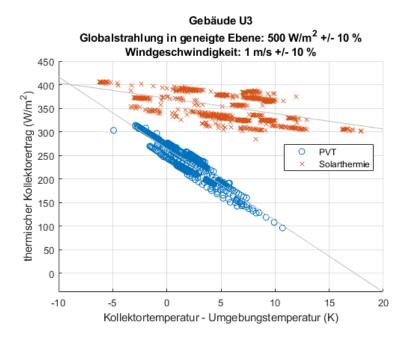


Abbildung 34: Thermischer Kollektorfeldertrag der PVT- und der Flachkollektoren (Solarthermie) pro Quadratmeter Aperturfläche in Abhängigkeit der Differenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur. Gezeigt sind Werte des Beispielgebäudes U3 bei 500 W/m² Globalstrahlung in die geneigte Ebene und 1 m/s Windgeschwindigkeit. Die Geraden durch die Datenpunkte stellen die linearen Regressionsgeraden nach der Least-Squares-Methode dar.

Die detaillierte Betrachtung der thermischen Erträge beider Kollektortypen bestätigt die gemachten Beobachtungen über die Eignung der beiden Kollektortypen für die Regeneration: Der Flachkollektor ist insgesamt leistungsfähiger, weswegen weniger Kollektorfläche für die Regeneration benötigt wird als beim PVT-Kollektor. Allerdings sind die Unterschiede geringer als erwartet. Aufgrund des tiefen Temperaturniveaus der Anwendung eignet sich der PVT-Kollektor insbesondere bei schwacher oder gänzlich fehlender Solarstrahlung für die Nutzung von Umgebungswärme, was den Unterschied in der Leistungsfähigkeit wieder verringert.

3.7 Elektrische Energieversorgung der Wärmebereitstellung

Neben den thermischen Betrachtungen, wie z.B. dem Regenerationsanteil, ist für die energetische Bewertung der Lösungen auch die elektrische Energieversorgung relevant. Im Folgenden werden die verschiedenen Lösungen bezüglich einiger elektrischer Kenngrössen verglichen. Zu beachten ist dabei, dass sich der elektrische Verbrauch immer nur auf die Wärmebereitstellung bezieht. Damit ist der Strom aller Komponenten gemeint, die im Simulationsschema (Abbildung 9) gezeigt sind. Also neben der WP auch alle Umwälzpumpen, etc. Andere Stromverbraucher wie Beleuchtung, Kochen, Waschen, etc. wurden nicht berücksichtigt, da es in dieser Arbeit lediglich darum geht, Lösungen für die Wärmebereitstellung zu vergleichen. Siehe dazu auch Abschnitt 2.2. Dies hat zur Konsequenz, dass der Autarkiegrad, insbesondere der Lastgerechte, in den meisten Fällen relativ tief ist im Vergleich zu Erfahrungswerten aus der Praxis. Denn im Sommer, wenn viel Eigenstrom erzeugt wird, wird verhältnismässig wenig Strom durch die WP verbraucht.

3.7.1 Gebäudeweise Betrachtung

In diesem Abschnitt werden einige Kenngrössen der elektrischen Energieversorgung auf Stufe der verschiedenen Beispielgebäude betrachtet. In Abbildung 35 und Abbildung 36 sind der lastgerechte resp. der bilanzielle Autarkiegrad pro Beispielgebäude und Regenerationsmassnahme gezeigt. Der lastgerechte Autarkiegrad beschreibt, wie viel des gesamten Strombedarf tatsächlich durch eigenproduzierten

Strom gedeckt werden kann, während der bilanzielle Autarkiegrad das Verhältnis in der Jahresbilanz darstellt (siehe Abschnitt 2.2). Es fällt auf, dass der Fall «Flachkollektoren & PV» mit Abstand die geringsten Autarkiegrade aufweist. Dies liegt daran, dass in diesem Fall die Anzahl der möglichen PV-Module sehr gering ist. Im Fall von U4 und U5 sind die Autarkiegrade sogar gleich null, da die gesamte verfügbare Dachfläche für die Flachkollektoren benötigt wird und keine PV-Module möglich sind. Die Autarkie für den Fall «PVT, maximale Kollektorzahl» ist in beinahe allen Fällen gleich gross oder grösser als beim Fall «ohne Regeneration, mit PV». In beiden Fällen sind jeweils die gesamten verfügbaren Dachflächen mit PV bzw. PVT belegt. Dass die Autarkie mit PVT in den meisten Fällen etwas höher ist, liegt daran, dass die PVT-Kollektoren dank des Zirkulationsfluids eine Kühlung erfahren und somit eine etwas höhere Effizienz bei der Stromerzeugung haben. Ausserdem ist aufgrund der Regeneration das Erdreich wärmer und die WP kann effizienter betrieben werden, was den Strombedarf senkt. Der spezifische elektrische Ertrag (AC) liegt bei den PVT-Kollektoren je nach Gebäudetyp zwischen 189 und 198 kWh/m². Bei der Verwendung von PV-Modulen liegt dieser Ertrag zwischen 188 und 193 kWh/m². Eine vollständige Auflistung der spezifischen Erträge findet sich im Anhang in Tabelle 31.

Dass die Unterschiede zwischen «PVT, maximale Kollektorzahl» und «ohne Regeneration, mit PV» je nach Beispielgebäude verschieden stark ausgeprägt ist, liegt daran, dass die lastgerechte Autarkie nicht nur durch die absolute Menge an produziertem PV-Strom definiert ist, sondern auch dadurch, wann die Verbraucher betrieben werden. Wird z.B. die WP in einem Beispielgebäude mehr am Tag betrieben als in einem anderen Beispielgebäude, erhöht dies bei gleicher Eigenstromproduktion die lastgerechte Autarkie.

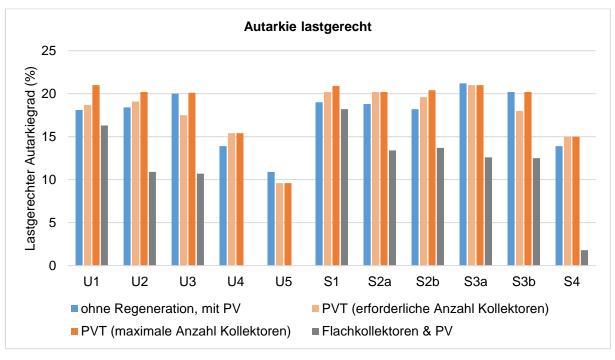


Abbildung 35: Lastgerechter Autarkiegrad (bezogen auf die Wärmebereitstellung) der Beispielgebäude mit verschiedenen Regenerationsmassnahmen.

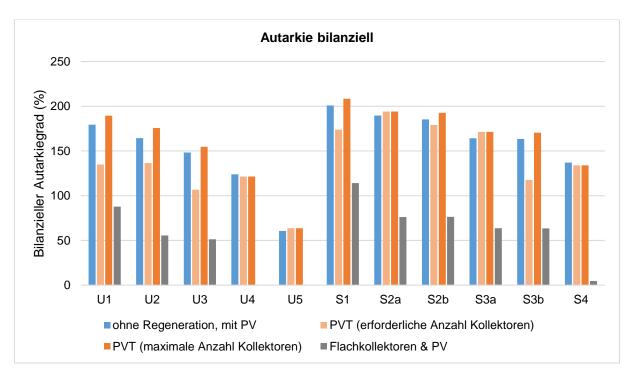


Abbildung 36: Bilanzieller Autarkiegrad (bezogen auf die Wärmebereitstellung) der Beispielgebäude mit verschiedenen Regenerationsmassnahmen.

Um die Unterschiede der verschiedenen Fälle im Gesamtkontext bewerten zu können, ist im folgenden Abschnitt eine Betrachtung über das jeweils gesamte Quartier gezeigt.

3.7.2 Quartierweise Betrachtung

In Abbildung 37 und Abbildung 38 ist jeweils die Summe der Netzeinspeisung und des Netzbezugs für die Wärmebereitstellung aller Beispielgebäude für das urbane und das suburbane Quartier gezeigt. Während keine der Regenerationsmassnahmen eine erhebliche Reduktion des Netzbezugs gegenüber dem Referenzfall «ohne Regeneration, ohne PV» darstellen kann, weisen die mittleren drei Lösungen eine beträchtliche Netzeinspeisung auf. Dies ist beim Fall «Flachkollektoren & PV» nicht der Fall. Die Summe der Netzeinspeisung ist in diesem Fall um ein Vielfaches kleiner als die Summe des Netzbezugs. Da der Fall «ohne Regeneration», auch mit PV, in der Praxis nicht sinnvoll ist, sind lediglich die Varianten mit PVT in der Lage, ihren Strombedarf in der Jahresbilanz selbst zu decken. Dass der Netzbezug bei diesen Varianten trotzdem nur unerheblich kleiner ist, liegt daran, dass die betrachteten Systeme nicht eigenverbrauchsoptimiert sind. Massnahmen zur Erhöhung des Eigenverbrauchs, wie beispielsweise eine Anpassung der Wärmepumpensteuerung, hätten ein grosses Potential zur Reduktion des Netzbezugs.

Netzeinspeisung bedeutet hier, dass der durch die PVT-Kollektoren oder PV-Module gewonnene Strom nicht für die Wärmepumpe und ihre unmittelbaren Hilfsbetriebe direkt genutzt werden kann. Wird der Strom im Gebäude in beispielsweise einem ZEV-Modell den Mietern resp. Bewohnern oder Nutzern verfügbar gemacht, kann wesentlich mehr lastgerechter Eigenverbrauch erzielt werden, was hier aber nicht weiter untersucht wird.

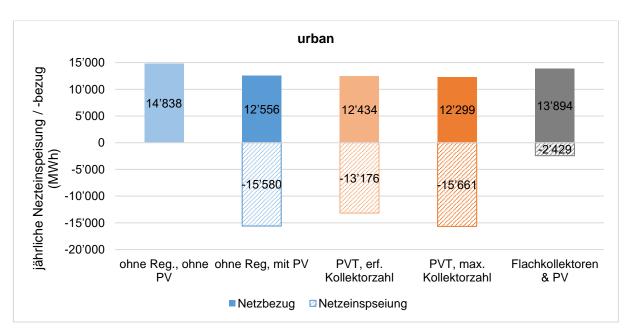


Abbildung 37: Summe der jährlichen Netzeinspeisung und des jährlichen Netzbezugs im urbanen Quartier mit verschiedenen Regenerationsmassnahmen. Positive Werte bedeuten Netzbezug und negative Werte Netzeinspeisung.

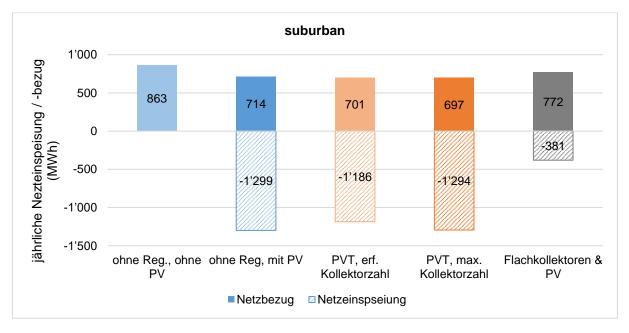


Abbildung 38: Summe der jährlichen Netzeinspeisung und des jährlichen Netzbezugs im suburbanen Quartier mit verschiedenen Regenerationsmassnahmen. Positive Werte bedeuten Netzbezug und negative Werte Netzeinspeisung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Regeneration mit Flachkollektoren und PV eine erheblich geringere Autarkie ermöglicht als die Regeneration mit PVT. Selbst bei Betrachtung des bilanziellen Autarkiegrads über die gesamten Quartiere sind 100 % bei Weitem nicht möglich. Der Fall «ohne Regeneration, mit PV» bewegt sich in der gleichen Grössenordnung wie bei Regeneration mit PVT. Allerdings ist der letzte Fall nur der Vollständigkeit halber gezeigt. In der Praxis stellt er aus den in Abschnitt 3.2 genannten Gründen keine Option dar.

3.8 Lokale Verteilung der Regenerationsmöglichkeiten

Um zu beurteilen, ob und wo es in den zwei Beispielquartieren zu kritischen Bereichen kommen kann, in denen eine Regeneration des Erdreichs nicht mehr möglich ist, wird zunächst ein neues Kriterium zur Beurteilung der Regenerationsfähigkeit eingeführt: Die nutzbare Dachfläche geteilt durch den jährlichen Wärmebedarf, in diesem Bericht kurz «Dachfläche pro Wärmebedarf» genannt. Dafür wird aus allen Simulationen mit maximaler Kollektorzahl¹⁵ die mögliche Regeneration dem zuvor genannten Kriterium gegenübergestellt (Abbildung 39). Eine lineare Regression ergibt einen Wert von rund 1.8 m²/MWh bei Regeneration mit PVT und rund 1.2 m²/MWh bei Regeneration mit Flachkollektoren zur Erreichung von 100 % Regeneration. Die Werte der Beispielgebäude sind sicherlich nicht beliebig linear extrapolierbar. Beispielsweise wäre bei linearer Extrapolation der Gerade der PVT-Falls bei null Dachfläche noch immer eine Regeneration von rund 25 % zu erwarten, was nicht möglich ist. Im gezeigten Bereich von einer Dachfläche pro Wärmebedarf zwischen 0.7 und 2.5 m²/MWh scheint die lineare Approximation jedoch zulässig zu sein.

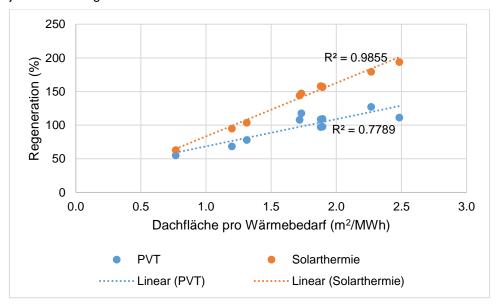


Abbildung 39: Mögliche Regeneration in Abhängigkeit des Kriteriums "nutzbare Dachfläche geteilt durch Wärmebedarf" bei Verwendung der maximalen Kollektorzahl von PVT- bzw. Flachkollektoren (Solarthermie).

In Abbildung 40 ist die lokale Verteilung des geschätzten Wärmebedarfs und der erwarteten Regenerationsfähigkeit der Gebäude in den Beispielquartieren gezeigt. Dachfläche und Wärmebedarf entsprechen den Definitionen in Abschnitt 2.2. Gering und mittel geeignete Dachflächen werden somit nicht dazugezählt und der Wärmebedarf setzt sich aus Raumwärme und Warmwasser zusammen. Die Farbskala ist so gewählt, dass eine weisse Einfärbung bei Verwendung von PVT-Kollektoren einer erwarteten Regeneration von 100 % entspricht. Rote Datenpunkte bedeuten eine mögliche Regeneration von mehr als 100 % und Blaue eine Regeneration von weniger als 100 %.

¹⁵ Die Datenpunkte für den Fall mit der erforderlichen Kollektorzahl sind alle für eine Regeneration von 100 % ermittelt worden und bieten für diese Untersuchung keine verwertbaren Informationen.

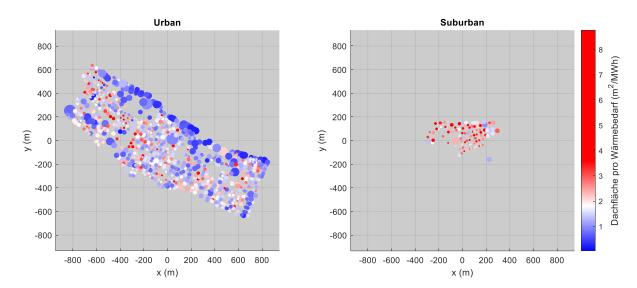


Abbildung 40: Örtliche Verteilung des Wärmebedarfs und der Dachfläche pro Wärmebedarf in den Beispielquartieren. Die Grösse der Datenpunkte ist proportional zum geschätzten Wärmebedarf und die Einfärbung der Datenpunkte entspricht der Dachfläche pro Wärmebedarf. Die Farbskala ist so gewählt, dass weiss dem Wert 1.8 m²/MWh entspricht, was bei Verwendung von PVT-Kollektoren einer erwarteten Regeneration von 100 % entspricht. Blaue Punkte bedeuten, dass eine mögliche Regeneration von weniger als 100 % zu erwarten ist, Rote stehen für mehr als 100 % erwartete Regeneration.

Zu erkennen ist im urbanen Quartier, dass praktisch alle Gebäude mit mittlerem oder grossem Wärmebedarf eine geringe Regenerationserwartung haben. Es gibt vor allem entlang des nordöstlichen Rands sowie im Südwesten des Quartiers ganze Ansammlungen dieser Gebäude. Auch an Stellen des Quartiers, die mehrheitlich aus Gebäuden mittleren Wärmebedarfs bestehen, sind in vielen Fällen die Dachflächen nicht ausreichend für eine vollständige Regeneration. Hier wäre zu prüfen, ob eine ausreichende Regeneration mit einer in Abschnitt 2.10 vorgeschlagenen und am Beispielsgebäude untersuchten Regenerationsmassnahme anwendbar ist, um auf eine vollständige Regeneration zu kommen. Andernfalls wäre in diesen Bereichen eine andere Art der Wärmeversorgung zu wählen. Im gleichen Quartier gibt es aber auch Stellen, die hauptsächlich aus kleineren Gebäuden bestehen, wo sich die Gebäude mit mehr und mit weniger als 100 % Regenerationspotential ungefähr die Waage halten. In diesen Gebieten scheint eine Wärmeversorgung mit EWS und Regeneration mit PVT durchaus machbar. Im suburbanen Quartier halten sich Gebäude mit mehr oder weniger Regeneration ebenfalls die Waage. Gebäude mit grösserem Wärmebedarf und nicht ausreichender Dachfläche mischen sich gut mit den Gebäuden mit mehr als 100 % erwarteter Regeneration. Selbst im nordöstlichen Teil des Quartiers, wo gemäss Abbildung 5 eine Wärmebedarfsdichte zwischen 600 und 800 MWh/ha herrscht, sind blaue Datenpunkte stets von Roten benachbart.

Für die Betrachtung der Möglichkeiten zur Regeneration mit verglasten Flachkollektoren eignet sich die gleiche Darstellung mit anderer Einfärbung. Abbildung 41 zeigt die Werte der Dachfläche pro Wärmebedarf so eingefärbt, dass weiss bei 1.2 m²/MWh liegt, also bei der ungefähr erforderlichen Dachfläche pro Wärmebedarf für 100 % Regeneration.

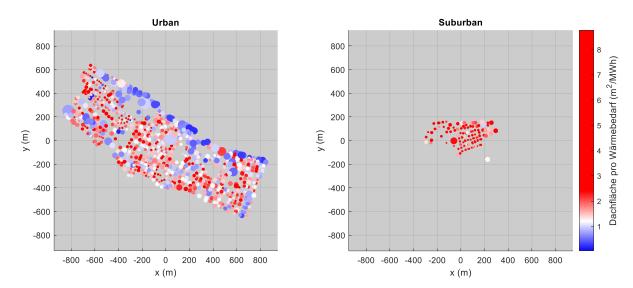


Abbildung 41: Örtliche Verteilung des Wärmebedarfs und der Dachfläche pro Wärmebedarf in den Beispielquartieren. Die Grösse der Datenpunkte ist proportional zum geschätzten Wärmebedarf und die Einfärbung der Datenpunkte entspricht der Dachfläche pro Wärmebedarf. Die Farbskala ist so gewählt, dass weiss dem Wert 1.2 m²/MWh entspricht, was bei Verwendung von Flachkollektoren einer erwarteten Regeneration von 100 % entspricht. Blaue Punkte bedeuten, dass eine mögliche Regeneration von weniger als 100 % zu erwarten ist, Rote stehen für mehr als 100 % erwartete Regeneration.

Es ist klar erkennbar, dass im urbanen Quartier die überwiegend blau eingefärbten Bereiche, also die Bereiche, wo keine vollständige Regeneration möglich ist, deutlich kleiner sind als für den Fall mit PVT. Es sind hauptsächlich Gebäude mit einem grossen bis sehr grossen Wärmebedarf, die nicht vollständig regeneriert werden können. Dies ist konsistent mit der Beobachtung in Abschnitt 3.4, dass Gebäude des Typs U4 und U5 mit Flachkollektoren nicht oder nur knapp zu 100 % regeneriert werden können. Es gibt im urbanen Quartier Bereiche, insbesondere am nordöstlichen Rand, wo sich diese Gebäude häufen. An dieser Stelle ist eine Wärmeversorgung ausschliesslich mit EWS und Regeneration durch Flachkollektoren voraussichtlich nicht ausreichend und es müssen andere Wärmequellen unterstützend hinzugezogen werden.

Im suburbanen Quartier sind die meisten Gebäude klar über dem Grenzwert für Regeneration von 1.2 m²/MWh. Dies gilt sowohl für kleine und mittlere als auch für die meisten grösseren Gebäude. Obwohl in den Simulationen ermittelt wurde, dass das Beispielgebäude S4 mit Flachkollektoren gerade ca. zu 100 % regeneriert werden kann, weisen in dieser Betrachtung die meisten der grösseren Gebäude eine erwartete Regeneration von über 100 % auf. Es kann daraus geschlossen werden, dass das Beispielgebäude S4 etwas zu konservativ definiert wurde. Der Wärmebedarf ist zwar mit einem Korrekturfaktor auf das suburbane Quartier angepasst, d.h. reduziert worden. Allerdings ist bei der Ermittlung der typischen Dachflächen nicht zwischen urbanen und suburbanen Gebäuden unterschieden worden. Die Dachflächen der suburbanen Gebäude sind dadurch vermutlich unterschätzt worden.

Abschliessend kann zusammengefasst werden, dass im suburbanen Quartier sowohl PVT- als auch Flachkollektoren geeignet scheinen um die EWS aller Gebäude zu regenerieren, da es keine nennenswerten Cluster von Gebäuden mit unzureichender Regeneration gibt. Im urbanen Quartier hingegen gibt es weitreichende Bereiche, in denen eine vollständige Regeneration mit PVT nicht möglich ist. Lediglich einige kleinere Bereiche im Quartier könnten mit PVT zu 100 % regeneriert werden. Bei Regeneration mit Flachkollektoren sind die Bereiche, in denen vollständige Regeneration möglich scheint, deutlich grösser. Allerdings gibt es auch in diesem Fall Cluster grösserer Gebäude, bei denen hundertprozentige Regeneration nicht erwartet werden kann.

3.9 Vergleich der Resultate mit Erkenntnissen der Literatur

In der Studie «RegenOpt» (Persdorf et al., 2015) im Auftrag der Stadt Zürich wurden ebenfalls verschiedene Möglichkeiten zur Regeneration von EWS untersucht. Im Unterschied zur vorliegenden Studie bezog sich RegenOpt nur auf eine Gebäudeart, und es wurden keine «Beispielquartiere» modelliert. Eine der Erkenntnisse der Studie war, dass sich mit PVT-Kollektoren für das betrachtete Gebäude keine hundertprozentige Regeneration erreichen lässt (Persdorf et al., 2015).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde festgestellt, dass dies bei einigen, jedoch nicht bei allen Gebäudetypen möglich ist. Im Folgenden werden Unterschiede und Gemeinsamkeiten der beiden Untersuchungen beleuchtet.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass für die Gebäudekategorien 1 bis 3, unter Berücksichtigung von Nachbarschaftseffekten, eine vollständige Regeneration der Erdwärmesonden mittels PVT-Kollektoren möglich ist. Ein Gebäude, das keine vollständige Regeneration mit PVT erlaubt, ist das Beispielgebäude U4. Der Regenerationsanteil beträgt hier lediglich 67 %. Der jährliche Netto-Wärmeentzug der Sonde beträgt Fall rund 30 MWh.

An einem Minergiegebäude mit vergleichbarem jährlichen Wärmebedarf (112 MWh), wurde in der RegenOpt-Studie im Jahr 2015 ebenfalls berichtet, dass eine hundertprozentige Regeneration durch PVT-Kollektoren nicht möglich ist. In Tabelle 21 ist der Wärmebedarf der beiden Gebäude gegenübergestellt.

Tabelle 21: Thermische Bedarfswerte eines	Gebäudemodells aus der RegenO	pt-Studie sowie des Beispielgebäudes U4 d	er vorliegen-
den Arheit			

		RegenOpt, 2015 ¹⁶	SolSeasStore, 2020, Gebäude U4
Anzahl Wohneinheiten	-	12	12 ¹⁷
Jährl. Wärmebedarf	kWh	72'000	86'200
Raumwärme	kWh/m²	48.0	60.7
Jährl. Wärmebedarf	kWh	40'000	27'200
Warmwasser	kWh/m²	26.7	19.2
Jährl. Wärmebedarf	kWh	112'000	113'400
gesamt	kWh/m²	74.7	79.9

Während die benötigte Heizwärme im RegenOpt-Gebäude mit rund 72 MWh aufgrund des Gebäudestandards deutlich niedriger war als im vorliegenden Modell (86 MWh), ist mit ca. 40 MWh ein um rund 13 MWh höherer Warmwasserbedarf angenommen worden. Dieser tiefere Bedarf ist durch die getroffenen Annahmen im GPM zu erklären. So wird dort beispielsweise davon ausgegangen, dass vermehrt in verbesserte Dämmung, wassersparende Armaturen, usw. investiert wird und die Speicher- und Verteilverluste durch eine geringere Bereitstellungstemperatur in Zukunft reduziert werden (Wallbaum et al., 2010). Der Netto-Wärmeentzug im RegenOpt-Gebäude beläuft sich dabei auf ungefähr 22 MWh (aus Grafik geschätzt). Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Resultate der vorliegenden Studie mit der Hälfte der Kollektoren, einer Ausrichtung von 80 °-Ost (es wird angenommen, dass RegenOpt-Studie eine Südausrichtung verwendet wurde, da eine entsprechende Angabe im Bericht fehlt) und einer niedrigeren maximalen Sondeneintrittstemperatur (30 statt 40 °C) erzielt wurden. Entsprechend erfolgte ein Vergleich der verwendeten Simulationsmodelle zur Plausibilitätskontrolle.

¹⁶ Umrechnungsfaktor von 1.25 zwischen Wohnfläche und EBF gemäss (Hartmann & Jakob, 2016)

¹⁷ Ergibt sich aus der durchschnittlichen EBF von 1420 m² pro Gebäude der Kategorie 4 und der durchschnittlichen EBF von 120 m² pro MFH-Wohnung

Abbildung 42 zeigt die Schemata der beiden Modelle. Die in der vorliegenden Studie verwendete Hydraulik ermöglicht es, während dem Heizbetrieb mehr solare Wärme zu nutzen als dies mit der in der RegenOpt-Studie verwendeten Hydraulik möglich ist. Grund dafür ist der direkt auf den Wärmeübertrager geführte Rücklauf des primärseitigen Kreislaufes der WP. Im Fall des gleichzeitigen Betriebes des Solar- und Wärmepumpenkreislaufs kann somit die grössere Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager genutzt werden. In der RegenOpt-Studie wird das Fluid erst nach dem Sondenaustritt auf den Wärmeübertrager geführt. Dadurch wird, im Gegensatz zur vorliegenden Hydraulik, nicht das tiefst mögliche Temperaturniveau des Fluides genutzt, um die gewonnene solare Wärme zu übertragen. Weiter wurde im vorliegenden Fall auf eine direkte Einbindung der PVT-Kollektoren in die Warmwasserbereitstellung verzichtet. Werden die Einstellungen und Komponenten der RegenOpt-Studie mit der vorliegenden Hydraulik verwendet, resultiert entsprechend einen niedrigeren Netto-Wärmeentzug der Sonden von rund 4.5 MWh. Wird die Dämmstärke der Speicher von 80 auf die heute üblichen 140 mm und das Speichervolumen erhöht, kann eine Regeneration von nahezu 100 % (Netto-Entzug von 0.6 MWh) erreicht werden. Mit dem Einsatz von PVT-Kollektoren neuester Generation würde gar ein Überschuss von rund 7.5 MWh produziert. Die eingesetzten Kollektoren liefern rund 16 % mehr thermische Energie unter STC-Bedingungen als die in der RegenOpt eingesetzten Kollektoren (DualSun, 2020; MB Hybrid 270/900 gemäss Polysun-Katalog). Der Einfluss der unterschiedlichen Sondenlängen (RegenOpt: 2 x 3 à je 160 m; SolSeasStore: 5 x 1 à je 205 m) ist hingegen mit weniger als 0.5 % vernachlässigbar.

Dies zeigt, dass sowohl die verwendete Hydraulik als auch der technische Fortschritt einen entscheidenden Einfluss auf das Regenerationspotenzial eines solarunterstützen Erdwärmesonden-Heizungssystems hat. Konkret könnte mit der vorliegenden Hydraulik und den angepassten Komponenten im Fall des RegenOpt-Modells auf die Hälfte der Module verzichtet werden, um ein vergleichbares Ergebnis wie 2015 zu erzielen. In diesem Fall läge der Netto-Entzug bei rund 23.7 MWh. Damit scheint die deutlich geringere Kollektoranzahl im vorliegenden Simulationsmodell als plausibel.

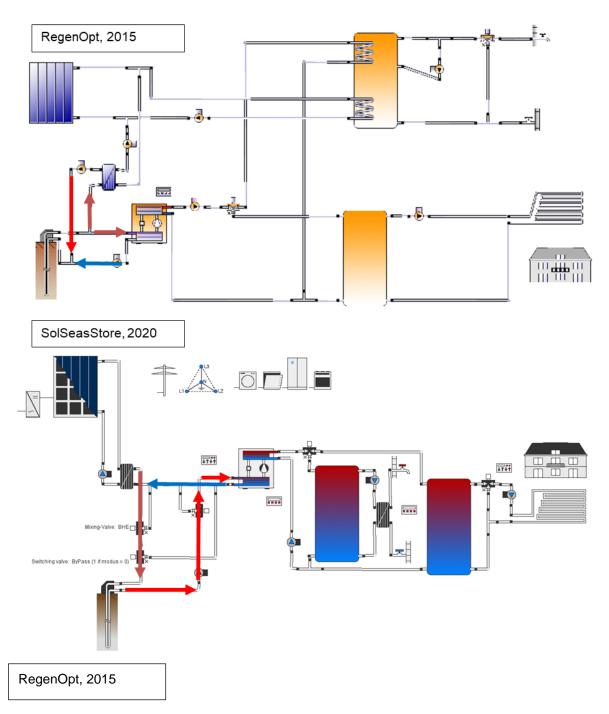


Abbildung 42: Anlagenschemata der Simulationsmodelle aus der RegenOpt-Studie (oben) und der vorliegenden Arbeit (unten). Die Hydraulik der vorliegenden Arbeit ermöglicht zeitweise eine grössere Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager, da der primärseitige Rücklauf direkt auf den Wärmeübertrager geführt werden kann.

Eine Vergleichbarkeit der Resultate wäre jedoch nicht vollständig zulässig, wenn nicht auch das jeweils verwendete Gebäudemodell betrachtet würde. Aufgrund der verwendeten generischen Gebäude mit bekanntem Jahresenergiebedarfes wurden die Gebäude auch über diesen definiert («vereinfachtes Gebäudemodell»). Dies im Gegensatz zum in der RegenOpt-Studie verwendeten Polysun-spezifischen

Gebäudemodell, bei dem die Definition über die Wahl eines spezifischen Gebäudetyps und die Bestimmung des U-Wertes, der Gebäudedimensionen und der spezifischen Heizlast erfolgte. Die Verwendung dieses Gebäudemodells würde im vorliegenden Modell zu einer Steigerung der jährlichen Entzugsleistung der Sonden um rund 9 % führen. Konkret steigt der Netto-Wärmeentzug aus den Erdwärmesonden im vorliegenden Modell von rund 30 auf 32.6 MWh, wenn mit dem in RegenOpt verwendeten Gebäude anstelle des vereinfachten Gebäudemodells gerechnet wird.

Die Differenz zwischen dem Ergebnis der RegenOpt-Studie (ca. 22 MWh) und des SolSeasStore-Modelles (32.6 MWh) bei der Verwendung des gleichen Gebäudemodelles kann grösstenteils durch die Ausrichtung der PVT-Kollektoren erklärt werden. Würde diese von der verwendeten 80°-Ostausrichtung zu einer 0°-Südausrichtung (Annahme für die RegenOpt-Studie) geändert, reduzierte sich diese Differenz auf rund 4.8 MWh. Vor diesem Hintergrund können die Ergebnisse dieser Studie als mit den Ergebnissen von RegenOpt übereinstimmend eingeordnet werden.

3.10 Evaluation zusätzlicher Regenerationsquellen am Beispiel eines Gebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration

Im Folgenden sind die Simulationsresultate für die in Abschnitt 2.10 dokumentierten Varianten der zusätzlichen Regenerationsmassnahmen für das in Abschnitt 2.9.1 definierte Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regeneration dargestellt. Erwartungsgemäss lässt sich die Netto-Entzugswärme aus den EWS, im Vergleich zum Referenzfall mit einer Regeneration durch eine PVT-Dachanlage, mittels LWWÜ wie auch zusätzlichen PVT-Kollektoren an den Fassaden um mehr als 50 % reduzieren. Das Regenerationspotenzial der aktiven oder passiven Gebäudekühlung hingegen ist naturgemäss durch das limitierte Wärmeangebot beschränkt.

3.10.1 PVT an Fassaden

Zusätzliche PVT-Kollektoren an den Fassaden können den Regenerationsanteil, verglichen mit einer PVT-Dachanlage der Ausgangsvariante, von 51 % auf bis zu 87 % erhöhen (siehe Abbildung 43). Der höchste Regenerationsanteil wird dabei durch eine konsequente Nutzung aller südlich ausgerichteten Fassaden erreicht. Der Zusatznutzen jeder zusätzlich genutzten PVT-Anlage ist jedoch abnehmend, wie aus der Abbildung 43 ebenfalls hervorgeht. Der spezifische jährliche Kollektorfeldertrag der PVT-Dachanlage reduziert sich beispielsweise von 830 kWh/m² auf rund 650 kWh/m² bei einer zusätzlichen Fassadenanlage und schliesslich auf 520 kWh/m² bei zwei Fassadenanlagen. Gleiches gilt auch für die Fassadenanlagen. Weist eine zusätzliche Fassadenanlage einen jährlichen spezifischen Kollektorfeldertrag von rund 570 kWh/m² auf, reduziert sich dieser auf 430 kWh/m² mit der Installation einer zweiten Fassadenanlage.

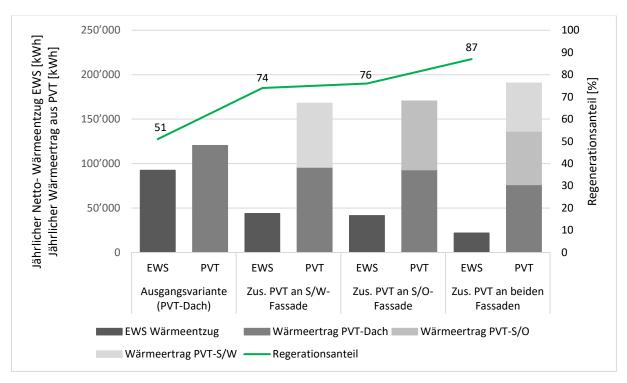


Abbildung 43: Jährlicher Netto-Wärmeentzug aus den EWS für unterschiedliche Kombinationen von PVT-Anlagen auf dem Dach und den Fassaden.

3.10.2 Luft-Wasser-Wärmeübertrager

Analog zu den Resultaten bezüglich zusätzlicher PVT-Kollektoren an den Fassaden zeigt sich auch bei der Verwendung eines zur PVT-Dachanlage zusätzlichen LWWÜ ein abnehmender Nutzen bei steigender thermischer Leistung (Abbildung 44). Bereits mit einer Leistung von 20 kW kann der Regenerationsanteil von 51 auf 74 % gesteigert werden, was dem Effekt einer zusätzlichen PVT-Fassade entspricht. Eine Verdoppelung der thermischen Leistung auf 40 kW führt noch zu einer Erhöhung des Regenerationsanteils auf 86 %. Bei einer weiteren Verdopplung auf 80 kW steigt der Regenerationsanteil nur noch um 2 % auf 88 % an. Die potenziell übertragbare Wärme kann nur noch sehr eingeschränkt an das Wärmeträgerfluid abgegeben werden.

Analog zu den PVT-Fassadenanlagen tritt auch der zusätzliche LWWÜ in Konkurrenz zur PVT-Anlage und reduziert deren Ertrag (Abbildung 44). Der spezifische jährliche Kollektorfeldertrag der PVT-Dachanlage reduziert sich beispielsweise von 830 kWh/m² auf rund 630, 505 und 490 kWh/m² bei einer thermischen Leistung des LWWÜ von 20, 40 und 80 kW. Der LWWÜ als zusätzliche Wärmequelle ist im vorliegenden Fall seriell vor die PVT-Dachanlage geschaltet. Damit wird die Temperaturdifferenz im WÜ des Solarkreislaufs und folglich auch der Anteil nutzbarer Solarwärme reduziert. Durch eine Parallelschaltung zur PVT-Anlage erhöht sich zwar die nutzbare Temperaturdifferenz am Wärmeübertrager, doch erfolgt auch eine Reduktion des Volumenstroms. Die Auswirkungen der Parallelschaltung auf den Netto-Wärmeentzug der EWS ist von der Volumenstromaufteilung (LWWÜ / PVT-Dachanlage) abhängig, jedoch generell negativ. Bei einer Aufteilung von 50 % steigt der spezifische jährliche Kollektorfeldertrag der PVT-Dachanlage um 30 % auf 655 kWh/m², jedoch sinkt der Ertrag aus dem LWWÜ aufgrund der Halbierung des Volumenstroms um 36 %. Der Netto-Wärmeentzug der EWS erhöht sich dabei um 83 % gegenüber der Serienschaltung. Mit einer Optimierung der Durchflüsse könnte der Ertrag des LWWÜ wohl noch etwas erhöht werden, was die generelle Aussage aber nicht verändert.

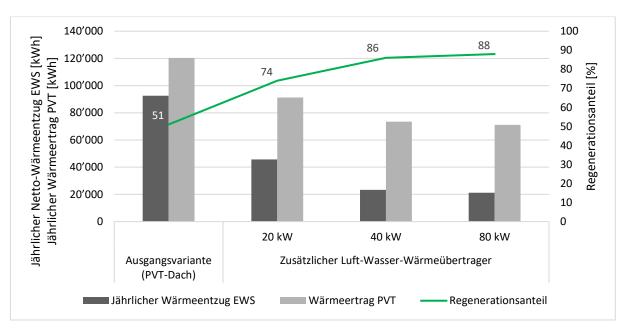


Abbildung 44: Jährlicher Netto-Wärmeentzug aus der EWS und jährlicher Wärmeertrag der PVT-Kollektoren für die Variante mit einer PVT-Dachanlage als Referenz und der Varianten mit einer PVT-Dachanlage und zusätzlichem LWWÜ mit 20, 40 oder 80 kW Nennleistung inkl. des prozentualen Regenerationsanteils.

3.10.3 Aktive und passive Kühlung

Es zeigt sich, dass die Abwärme aus der Gebäudekühlung im Fall der betrachteten Kühlbedarfe sowohl im aktiven wie auch im passiven Fall parallel zur Regeneration mittels PVT-Anlagen abgeführt und als Regenerationswärme genutzt werden kann. Erwartungsgemäss ist die Reduktion des Netto-Wärmeentzugs aus den EWS bei einer aktiven Gebäudekühlung aufgrund des zusätzlichen Stromeinsatzes bei der Kältemaschine grösser als im Fall einer passiven Kühlung. Der Unterschied liegt im vorliegenden Bereich des Kühlbedarfes jedoch im tiefen einstelligen Bereich, was in Bezug auf den Netto-Wärmeentzug aus den EWS vernachlässigbar ist. Die Resultate der Nutzung der aktiven und passiven Gebäudekühlung zur Regeneration der EWS sind in Abbildung 45 dargestellt. In Abhängigkeit des Kühlbedarfes kann der jährliche Netto-Wärmeentzug aus der EWS um bis zu 14 % reduziert werden. Auch bei dieser Massnahme ist erkennbar, dass aufgrund des höheren Temperaturniveaus in der EWS und dem reduzierten Volumenstrom am Wärmeübertrager zu den PVT-Kollektoren während der Kühlperiode, zu einer Reduktion des Wärmeertrags aus den PVT-Kollektoren führt (bis zu -7 %).

Bei der aktiven Kühlung wird das Regenerationspotenzial noch nicht vollständig ausgeschöpft. Durch eine Reduktion des Volumenstromes könnte die sekundärseitige Vorlauftemperatur der Kältemaschine von hier maximal 23 °C auf die verwendete Regenerationstemperatur von 30 °C oder höher gehoben werden. Dadurch erfolgt keine Temperaturreduktion im Fluid vor dem EWS-Eintritt, dafür eine Steigerung des Volumenstroms am Wärmeübertrager zur PVT-Anlage, wodurch insgesamt mehr Wärme zur Regeneration genutzt werden könnte. An dieser Stelle besteht sicherlich auch hinsichtlich einer dynamischen Steuerung ein gewisses Potenzial zur Steigerung des Regenerationsanteils. Die damit verbundene Reduktion der Effizienz der Kältemaschine führt in einem solchen Szenario jedoch zu einem Strommehrverbrauch, wobei dieser einerseits mehrheitlich durch die PVT-Anlage gedeckt werden dürfte und sich dieser andererseits an jenen einer konventionellen Kühlanlage (Umgebungsluft als Wärmesenke) annähert. Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss einer aktiven Gebäudekühlung auf die Regenrationsrate zu steigern, bestünde in der Pufferung der Abwärme in den Heizungspufferspeichern. Dadurch liesse sich die Konkurrenz zu den PVT-Kollektoren reduzieren und gleichzeitig die Regenerationszeit verlängern, indem die Pufferspeicher während der Nacht über die EWS rückgekühlt werden.

Auch bei einer passiven Kühlung ist eine solche Verallgemeinerung möglich. Die Abwärme kann in diesem Fall auf einem Temperaturniveau von 20 bis ca. 21.5 °C genutzt werden, was zu keiner nennenswerten Abkühlung des durch die PVT-Kollektoren erwärmten Fluids (< 22 °C) führt. Ein gesteigerter Kühlbedarf führt in diesem Fall zu einer Umverteilung bei der Wärmegewinnung, bedingt durch die Änderung des Volumenstroms.

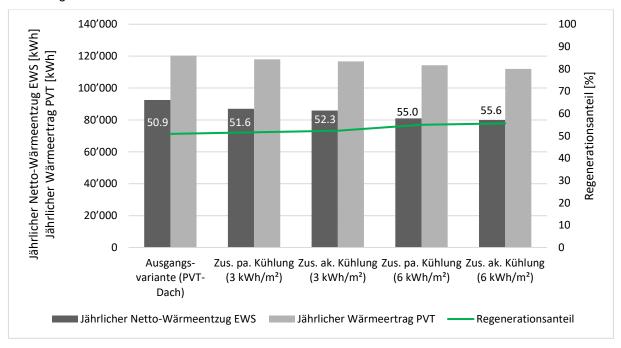


Abbildung 45: Jährlicher Netto-Wärmeentzug aus der EWS und jährlicher Wärmeertrag der PVT-Kollektoren für Varianten mit zusätzlicher Gebäudekühlung.

3.10.4 Vergleich mit kombinierten Regenerationsmassnahmen

Sowohl zusätzliche PVT-Fassaden als auch ein zusätzlicher 40 kW LWWÜ führen zu einer ähnlichen Reduktion des Netto-Wärmeentzugs aus den EWS um 76 % bzw. 75 % (Abbildung 46). Es wird ein Regenerationsanteil von rund 87 bzw. 86 % erreicht. Auf eine Darstellung der Resultate mit Gebäudekühlung als alleinige Regenerationsmassnahme wird aufgrund des geringen Effektes verzichtet. Analog zu den bisherigen Resultaten ist auch bei einer Kombination der betrachteten zusätzlichen Regenerationsmassnahmen ein abnehmender Grenznutzen in Folge der gegenseitigen Konkurrenz zu beobachten. Durch den zusätzlichen Wärmeeintrag der aktiven Kühlung beispielsweise erfolgt ein schnellerer Anstieg der EWS-Mitteltemperatur (+ 0.4 °C im Juli und August gegenüber Variante ohne Kühlung), wodurch die Einschaltbedingung für den LWWÜ und die PVT-Dachanlage seltener erfüllt sind. Dies führt beim LWWÜ zu einer Verkürzung der Einschaltdauer von rund 15 %, was den Wärmeentzug aus der Umgebungsluft wiederum um 17 % reduziert.

Die Kombinationen weiterer Wärmequellen führt entsprechend zu einer geringen Steigerung der Regenerationsanteile, wie aus Abbildung 46 ersichtlich wird. Ein zu PVT-Anlagen auf dem Dach und den Fassaden zusätzlicher LWWÜ beispielsweise führt noch zu einer weiteren Reduktion des Netto-Wärmeentzugs aus den EWS um 9 % resp. zu einer Steigerung des Regenerationsanteils von 87 auf 92 %. Wird zudem die Abwärme aus der Gebäudekühlung zur Regeneration genutzt, reduziert sich der Netto-Wärmeentzug um weitere 2 %.

Im Hinblick auf eine praktische Umsetzung spricht folglich viel für eine möglichst simple Lösung mit nur einer zusätzlichen Wärmequelle für die Regeneration. Aufgrund der technisch einfacheren und ökonomisch vorteilhafteren Realisierbarkeit bietet sich hier eine Lösung mit zusätzlichem LWWÜ an. Aufgrund der im Vergleich zu den Umwälzpumpen hohen elektrischen Leistungsaufnahme des LWWÜ ist mit

einem deutlich gesteigerten Stromverbrauch zu rechnen (siehe Abschnitt 3.10.5). Eine allenfalls vorhandene oder geplante Gebäudekühlung könnte in beiden Fällen jederzeit eingebunden werden. In Kombination mit einem LWWÜ ergäben sich durch die Konkurrenz der Wärmequellen (Abbildung 47) gar eine Reduktion dessen Stromverbrauchs (reduzierte Laufzeit).

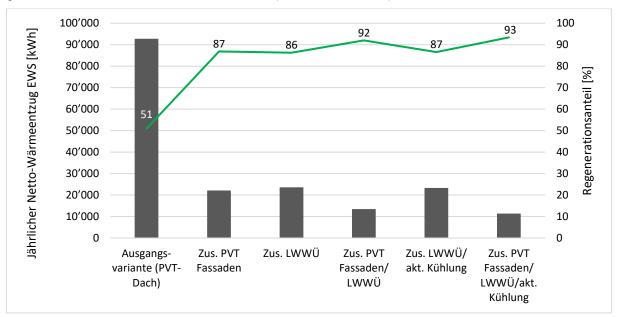


Abbildung 46: Übersicht über den jährlichen Netto-Wärmeentzug aus den EWS für die ausgewählten zusätzlichen Regenerationsmassnahmen und Kombinationen davon, inkl. den prozentualen Regenerationsanteilen.

Die Konkurrenz durch eine zunehmende Anzahl Wärmequellen ist in Abbildung 47 am Beispiel der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung des Gebäudes noch einmal verdeutlicht. Gegenüber der Ausgangsvariante mit einer PVT-Dachanlage, bei der ca. 32 % der Wärme effektiv aus dem Erdreich stammt, sind es bei der Variante mit einer PVT-Dachanlage und einem LWWÜ noch ca. 8 %. Diese Konkurrenz zwischen den Wärmequellen stellt sich folglich auch auf die Wärmequelle Erdreich ein. Die damit verbundene Reduktion im Wärmebezug aus dem Erdreich ist jedoch gewollt und wünschenswert. Bei der Variante mit allen Regenerationsmassnahmen in Kombination beträgt der Anteil aus dem Erdreich noch ca. 4 %.

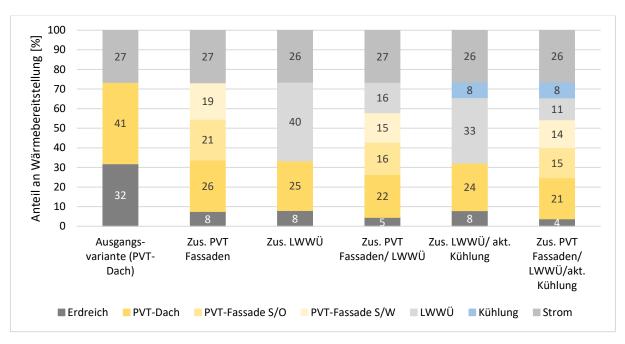


Abbildung 47: Prozentuale Anteile der verwendeten Wärmequellen an der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung.

3.10.5 Resultate Stromverbrauch

Die Untersuchung des Stromverbrauchs durch die zusätzlichen Regenerationsmassnahmen erfolgt anhand der Variante mit einer PVT-Dachanlage und zusätzlichem 40 kW LWWÜ. Die Wahl dieser Variante ist durch die verhältnismässig einfache technische Realisierbarkeit bei vergleichbarem Regenerationsanteil wie mit zusätzlichen PVT-Fassaden begründet. Es erfolgt ein Verglichen des Stromverbrauchs dieser Variante mit den Varianten ohne Regeneration sowie nur mit PVT-Dachanlage

Die elektrische Leistungsaufnahme des verwendeten 40 kW LWWÜ beträgt 1.5 kW und der fluidseitige Druckverlust beträgt rund 50 kPa (Kaltra GmbH, 2020). Die Spezifikationen sowie die elektrischen Leistungsaufnahmen der primärseitig eingesetzten Umwälzpumpen können der Tabelle 22 entnommen werden. Weil sich die Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe im Primärkreislauf aufgrund des variablen Volumenstroms bei der Regeneration ändert, wird diese bei maximalem und bei minimalem Volumenstrom aus den Datenblättern ermittelt (1.10/1.62 kW) und für die Berechnung des Stromverbrauches linear interpoliert. Es wird jeweils bei allen drei Varianten dieselbe Primärkreispumpe eingesetzt. Die fehlenden Druckverluste der beiden WÜ im Primärkreislauf der Variante ohne Regenerationsmassnahmen werden durch die Rohrreibungsverluste der fast doppelt so langen EWS kompensiert, wobei auch die elektrische Leistungsaufnahme der Primärkreispumpe bei gleichem Volumenstrom identisch ist. Der mit dem reduzierten Volumenstrom einhergehenden Reduktion des Reibungsverlustes wird nicht Rechnung getragen. Für die Fälle mit Regenerationsmassnahmen wird der Stromverbrauch dieser Pumpe daher überschätzt.

Tabelle 22: Spezifikationen der verwendeten Pumpen sowie die zur Auslegung benötigten Kennwerte.

	Förder- höhe (m)	Volumen- strom (I/h)	Länge Rohr- leitung (m)	Druckverlust durch WÜ (Pa)	Elektrische Leistungsauf- nahme (kW)
Pumpe LWWÜ	7.2	14'700	60	65'000	0.44
Pumpe PVT	3.9	4'350	260	12'000	0.08
Pumpe Primärkreis	5.6	4'350 bis 56'760	280	27'000	1.1 bis 1.62

Die entsprechenden Resultate des Stromverbrauchs sind in Abbildung 48 dargestellt. Erwartungsgemäss liegt der Stromverbrauch sämtlicher Varianten mit Regeneration initial über der Variante ohne Regeneration. Über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg bleibt dieser höher als bei der Variante ohne Regeneration. Der Grund dafür liegt in der Kürzung der EWS von ursprünglich 246 m auf 173 m im Fall einer Regeneration mittels PVT-Dachanlage oder 135 m beim Einsatz eines zusätzlichen LWWÜ. Weil die Entlastung der EWS durch Regenerationsmassnahmen während der Heizperiode eher gering ist, ist die Belastung der EWS bei gleichbleibender Heizlast entsprechend deutlich höher. Dies führt zu einer stärkeren und schnelleren Auskühlung des Erdreiches im Heizbetrieb. Zwar kann eine Stabilisierung der mittleren EWS-Temperatur (Mitteltemperatur zwischen Ein- und Austritt der EWS im Betrieb) erreicht werden, wie Abbildung 49 zeigt, deren Niveau ist jedoch zu niedrig, um ausreichende Effizienzgewinne beim Betrieb der WP zu erzielen. Insgesamt liegt der gesamte Stromverbrauch der Variante mit PVT-Dachanlage und LWWÜ (EWS:18 x 135 m) über 50 Jahre mit 3'870 MWh um rund 8.3 % höher als bei der Variante ohne Regeneration (3'570 MWh). Wird nur eine PVT-Dachanlage (EWS: 18 x 173 m) eingesetzt sind es rund 3.9 % mehr.

Würden die EWS hingegen nicht gekürzt, reduziert sich der Stromverbrauch der Variante mit PVT-Dachanlage und LWWÜ (EWS: 18 x 246 m) über 50 Jahre um rund 0.9 % auf rund 3'540 MWh, weil eine Stabilisierung der mittleren EWS-Temperatur auf deutlich höherem Niveau möglich ist (Abbildung 49). Dies entspricht einer Reduktion des Stromverbrauches um rund 8.5 % gegenüber der Variante mit gekürzten EWS. Die Effizienzgewinne beim Betrieb der WP überwiegen den Strommehrverbrauch der Pumpen und des LWWÜ bereits nach 15-20 Jahren.

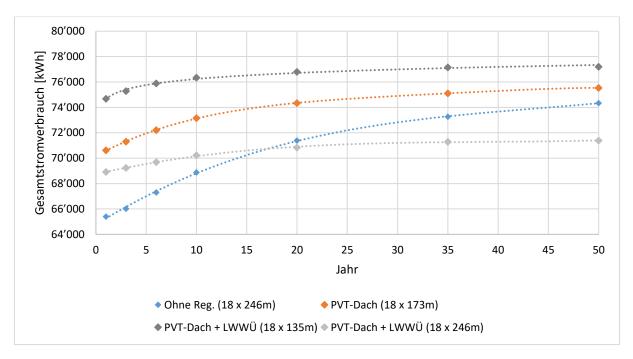


Abbildung 48: Stromverbrauch über 50 Betriebsjahre der Variante ohne Regenerationsmassnahme sowie mit PVT-Dachanlage und PVT-Dachanlage mit zusätzlichem LWWÜ mit gekürzten und originalen EWS-Längen.

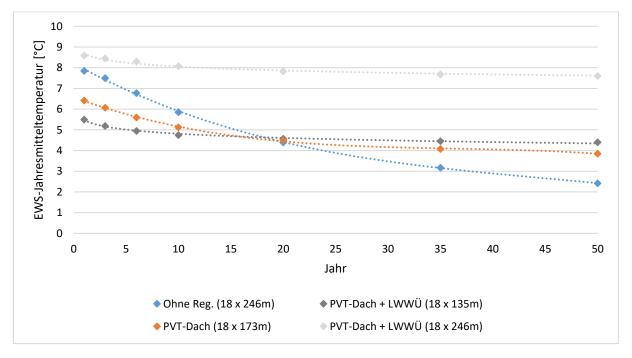


Abbildung 49: Entwicklung der EWS-Jahresmitteltemperatur über 50 Jahre Betriebszeit für die Variante ohne Regenerationsmassnahme sowie mit PVT-Dachanlage und PVT-Dachanlage mit zusätzlichem LWWÜ mit gekürzten und originalen EWS-Längen.

Die saisonale Verteilung des prozentualen Strommehrverbrauchs der Variante mit PVT-Dachanlage und LWWÜ relativ zur Variante ohne Regeneration wird in Abbildung 50 gezeigt. Die Kürzung der EWS führt nicht nur während dem Sommer, sondern auch während der Wintermonate zu einem Strommehrverbrauch. Erst nach rund 50 Jahren kann im Winter ein Minderverbrauch festgestellt werden. Im Ge-

gensatz dazu sind aufgrund der höheren Quellentemperatur und somit höheren Effizienz der WP langfristig Stromeinsparungen während der Heizperiode von bis zu 10 % möglich, wenn die EWS nicht gekürzt werden. Zudem können während der Wintermonate Dezember bis Februar rund 3 bis 7 %, während der Übergangsmonate Oktober und März gar rund 10 % des benötigten gesamten Strombedarfs des Heizsystems durch die PVT-Anlage direkt gedeckt werden. Zudem speisen die PVT-Anlagen auch im Winter stark benötigten Strom ins öffentliche Netz ein. Damit könnte im Hinblick auf die dringend erforderliche Dekarbonisierung des Energiesystems ein wichtiger Beitrag geleistet werden, da sich die erneuerbare Stromproduktion während der Wintermonate als Herausforderung darstellt. Dieser Beitrag kann durch eine Steuerungsoptimierung sicherlich noch gesteigert werden. Mögliche Ansätze dazu werden bei Sauter et al., (2020) diskutiert.

Ein Grossteil des zusätzlich für die Regeneration erforderlichen Stromes wird in allen Fällen durch die PVT-Anlage gedeckt. 80 bis 90 % des Strombedarfes kann direkt durch die eigene Produktion bereitgestellt werden.

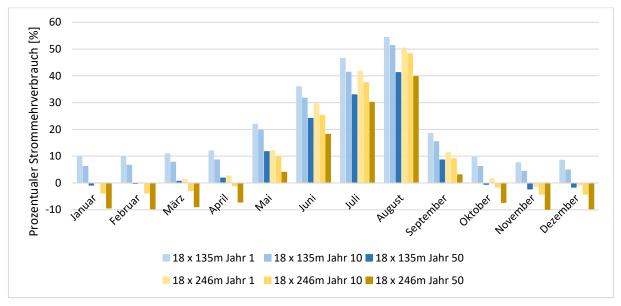


Abbildung 50: Prozentualer Strommehrverbrauch der Variante mit einer PVT-Dachanlage und einem LWWÜ mit Sondenlängen von 135 bzw. 246 m gegenüber einer Variante ohne Regenerationsmassnahmen für die Betriebsjahre 1, 10 und 50.

4 Schlussfolgerungen und Fazit

4.1 Regenerationspotential in urbanen und suburbanen Quartieren

Die Wärmeversorgung von Wohnquartieren allein mit Wärmepumpen, Erdwärmesonden und Regeneration mit PVT-Kollektoren als Dachanlage ist in suburbanen Quartieren grundsätzlich möglich. Grössere Gebäude in suburbanen Quartieren stellen jedoch eine Herausforderung dar. Sollten sie konzentriert und nah beieinander auftreten, was im untersuchten Beispielquartier nicht der Fall war, sind lokale Engpässe zu erwarten. In urbanen Quartieren ist eine nachhaltige Wärmeversorgung auf diesem Weg nicht überall zu erreichen. Durch die Verwendung zusätzlicher Regenerationsmassnahmen wie PVT-Fassadenanlagen oder LWWÜ kann jedoch auch in herausfordernden Fällen eine nachhaltige Regeneration der EWS (Regenerationsanteil > 85 % und langfristige Stabilisierung der mittleren EWS-Temperatur) erreicht werden. Die Integration des gleichzeitigen Betriebs einer Gebäudekühlung (aktiv oder passiv) als zusätzliche Wärmequelle ist möglich, deren Effekt auf den Regenerationsanteil ist jedoch gering, wobei Potenzial bei der Steuerung bestünde. Stattdessen kann beispielsweise die Betriebszeit eines zusätzlichen LWWÜ und damit der Stromverbrauch reduziert werden.

Wenn statt PVT-Kollektoren Flachkollektoren verwendet werden, ist mit der gleichen Dachfläche mehr Regeneration möglich. So wird für die Regeneration 20 bis 40 % weniger Dachfläche benötigt. Sowohl für den PVT-Fall als auch für den Flachkollektor-Fall stellen die grossen Gebäude U4, S4 und U5 aufgrund der geringen Dachfläche bezogen auf den Wärmebedarf, eine grosse Herausforderung für die vollständige Regeneration dar. Während bei Gebäude S4 mit Flachkollektoren 100 % Regeneration gerade noch möglich ist, gibt es in allen anderen Fällen bei den grossen Gebäuden Regenerationsdefizite. Auch bei der Verwendung von Flachkollektoren dürften zusätzliche Fassadenanlagen oder gegebenenfalls die Installation eines LWWÜ diese reduzieren und einen nachhaltigen Betrieb der EWS auch bei hoher Verwendungsdichte ermöglichen. Bei Verwendung von Flachkollektoren ist theoretisch in der Summe über alle Gebäude auch im urbanen Quartier eine vollständige Regeneration möglich. Dies würde aber Lösungen erfordern, um die Überschüsse der kleinen Gebäude den grossen zugänglich zu machen. Ein Nahwärmeverbund wäre hier eine theoretisch denkbare, wenn auch sehr aufwändige Möglichkeit.

Bei Verwendung von PVT auf dem Dach werden rund 1.8 m² Dachfläche pro MWh Wärmebedarf benötigt, um vollständig regenerieren zu können. Bei Verwendung von Flachkollektoren sind dafür rund 1.2 m² erforderlich. Es handelt sich hierbei lediglich um eine grobe «Faustformel», die sich dafür eignet, in Quartieren Bereiche auszumachen, die für Regeneration gut geeignet sind.

Obwohl die Verwendung von Flachkollektoren mehr Regeneration ermöglicht als die Verwendung von PVT-Kollektoren, ist diese Lösung keinesfalls überlegen. Mit PVT kann ein grosser Teil des eigenen Strombedarfs für die Wärmebereitstellung erzeugt werden. In der Variante «Flachkollektoren» reicht die Nutzung der gesamten verbleibenden Dachfläche für PV bei weitem nicht aus, um in der Jahresbilanz genügend Elektrizität für die Wärmebereitstellung zu erzeugen. Bei Verwendung von PVT kann hingegen in der Jahresbilanz mehr PV-Strom erzeugt werden, als für die Wärmebereitstellung benötigt wird. Obwohl in dieser Arbeit primär Möglichkeiten zur Deckung des Wärmebedarfs im Fokus stehen, ist auch der Stromerzeugung grosse Beachtung zu schenken. Elektrizität kann einfacher transportiert und flexibler eingesetzt werden als Wärme. Der lastgerechte Autarkiegrad für die Wärmebereitstellung liegt allerdings auch im PVT-Fall bei den meisten Gebäuden unter 20 %. Hauptgrund dafür ist, dass die WP hauptsächlich im Winter betrieben wird, wenn wenig PV-Strom zur Verfügung steht. Die Verwendung einer intelligenten Wärmepumpensteuerung und/oder eines Batteriespeichers würde es ermöglichen, zumindest der Tag-Nacht-Verschiebung von Stromerzeugung und -bedarf entgegenzuwirken.

Solarthermische Absorber oder andere einfache, unabgedeckte Kollektoren können eine kostengünstige Alternative zu PVT-Kollektoren mit ähnlicher thermischer Leistungsfähigkeit sein. Allerdings fehlt auch bei dieser Lösung die Möglichkeit, eigenen Strom zu erzeugen.

Die Hydraulik hat einen massgeblichen Einfluss auf die Regeneration, insbesondere bei Verwendung von PVT oder anderen Kollektoren auf tiefem Temperaturniveau. Wird sichergestellt, dass der kaltseitige Rücklauf der WP direkt auf den Kollektor (bzw. dessen Wärmeübertrager) geführt werden kann, kann deutlich mehr Wärme aus der Umgebungsluft genutzt werden.

4.2 Stromverbrauch anhand eines Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration

Die zusätzliche Betriebszeit der Umwälzpumpen und gegebenenfalls zusätzliche LWWÜ führen zu einem Strommehrverbrauch durch die Regeneration der EWS. Deren Ausmass ist massgeblich von der Energieeffizienz und damit der Wahl der Komponenten abhängig. Besonders bei LWWÜ findet sich eine enorme Spannweite in Bezug auf die elektrische Leistungsaufnahme. Erfolgt eine durch die Regeneration ermöglichte Kürzung der EWS, sinkt zudem die Effizienz der WP aufgrund sinkender Temperaturen der Wärmequelle. Langfristig führt dies folglich zu einem Strommehrverbrauch insbesondere auch während der Wintermonate. In Anbetracht der dringend erforderlichen Dekarbonisierung des Energiesystems ist dies problematisch. Die erneuerbare Produktion von Winterstrom stellt eine Herausforderung dar.

Mit ungekürzten EWS sinkt der Stromverbrauch eines mittels PVT-Dachanlage und zusätzlichem LWWÜ regenerierten EWS-Heizungssystem bereits nach 15 bis 20 Jahren unter jenen eines konventionellen nicht regenerierten EWS-Systems. Grund dafür ist die Stabilisierung der mittleren EWS-Temperatur auf einem deutlich höheren Niveau. Dabei erfolgt nicht nur eine Reduktion des Gesamtstromverbrauchs über 50 Jahre, sondern auch des Winterstromverbrauchs. Bereits nach dem ersten Betriebsjahr sinkt dieser unter jenen des nicht regenerierten Systems. Langfristig kann der Stromverbrauch während der Heizperiode damit gegenüber einem unregenerierten System um bis zu 10 % reduziert werden.

In beiden Fällen fällt der Hauptteil des Mehrverbrauches während der Sommermonate an. Aufgrund der meist zeitgleichen Stromproduktion durch die PVT-Kollektoren (Eigenproduktion von 80-90 %) stellt dies ein ungleich geringeres Problem dar wie ein gesteigerter Winterstrombedarf. Im Falle einer Regeneration mittels Flachkollektoren, muss der gesamte Strommehrverbrauch im Sommer über das Netz gedeckt werden.

4.3 Dachausnutzung in der Praxis

Die in dieser Studie verwendeten Dach-Ausnutzungsgrade zwischen 0.43 und 0.57 sind das Resultat einer konsequenten hypothetischen Belegung und stellen somit eine eher hohe Einschätzung der nutzbaren Dachflächen dar. In der Praxis gibt es, insbesondere bei Flachdächern von neuen, nachhaltig geplanten Bauten, oft konkurrierende Interessen der Flächennutzung. Neben dem Platzbedarf für technische Anlagen für Kühlung, Lüftung, Fassadenwartung etc. und für Dachfenster werden Flachdächer auch zunehmend für Dachbegrünungen¹⁸ oder «Urban Gardening» genutzt. Eine Erkenntnis dieser Studie ist, dass für die Regeneration von EWS in vielen Fällen die «rigorose» Nutzung der gesamten verfügbaren Dachfläche erforderlich ist und andere Nutzungen der Dächer in diesem Fall in den Hintergrund rücken müssten. Bei Nutzung von PVT kann auf der gleichen Fläche neben der Wärme für die Regeneration auch Strom bereitgestellt werden. Wenn Teile des Dachs anderweitig genutzt werden sollen, ist die Verwendung von Flachkollektoren zu prüfen, da dies eine geringere Fläche erfordert. Die Kehrseite der Medaille ist der Wegfall der Eigenstromproduktion auf der gleichen Fläche.

¹⁸ Richtig geplant, sind Dachbegrünungen prinzipiell mit PV, PVT- und Flachkollektoren vereinbar. Allerdings werden dabei i.d.R. grosse Abstände zwischen dem Modul-/Kollektorreihen vorgesehen. Wo Dachbegrünungen mit der sehr dichten Belegung, wie sie in dieser Studie betrachtet wird, vereinbar ist, steht einer gemeinsamen Nutzung selbstverständlich nichts im Weg.

4.4 Konkrete Empfehlungen für die Praxis:

- Weitreichende Areale oder ganze Quartiere mit EWS und WP als alleinige Wärmeversorgung können umgesetzt werden, wenn ausreichend Regeneration ermöglicht wird.
- Für kleine bis mittlere Wohngebäude ist eine vollständige Regeneration mit PVT i.d.R. möglich, wenn die Dachflächen einer durchschnittlichen Eignung gemäss Sonnendach.ch für die Belegung mit Kollektoren genügen.
- Es müssen kritische Gebiete, die i.d.R. aus der Konzentration von grossen Gebäuden bestehen, identifiziert werden. In diesen Bereichen müssen zusätzliche Wärmequellen für die Regeneration verfügbar gemacht werden. Andernfalls müsste auf ein anderes Heizsystem umgestellt werden.
- Bei grösseren MFH und bei Grossbauten ist zu prüfen, ob eine Regeneration mit PVT ausreichend ist. Im Bedarfsfall sind zusätzliche Regenerationsquellen wie beispielsweise PVT-Fassadenanlagen oder LWWÜ vorzusehen.
- Wo möglich ist eine Regeneration mit PVT-Kollektoren einer Lösung mit Flachkollektoren vorzuziehen, da damit ein wesentlich grösserer Teil des Wärmepumpenstroms selbst hergestellt werden kann. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der drohenden Winterstromlücke (Rüdisüli et al., 2019) ein nicht zu vernachlässigender Vorteil der PVT.
- Wenn möglich ist auf die Reduktion der EWS-Länge infolge der Regeneration zu verzichten.
 Die damit ermöglichte Reduktion des Winterstromverbrauches leistet einen potenziell erheblichen Beitrag zur Dekarbonisierung des Energiesystems.
- Für eine erste Abschätzung der benötigten für Solarenergie geeigneten Dachflächen kann die grobe Regel «1.8 m² pro MWh jährlicher Wärmebedarf für PVT und 1.2 m² pro MWh für Flachkollektoren» beigezogen werden.

5 Ausblick und weitere Forschungsfragen

In dieser Studie wurde gezeigt, dass eine Regeneration von EWS in Quartieren mit PVT oder Flachkollektoren möglich ist. Bei grossen Gebäuden und hohen Wärmebedarfsdichten in Quartieren ist der Einsatz zusätzlicher Wärmequellen wie beispielsweise PVT-Fassadenanlagen oder LWWÜ erforderlich, um einen ausreichenden Regenerationsanteil für einen nachhaltigen Betrieb (langfristige Stabilisierung der mittleren EWS-Temperatur) zu erreichen. Je nach Dimensionierung der EWS fällt der dafür erforderliche Stromverbrauch unterschiedlich hoch aus. Neben der noch offenen Frage nach der optimalen EWS-Länge in Bezug auf den Stromverbrauch und dessen saisonalen Verteilung stellt sich auch die Frage nach dem ökonomischen Optimum. Durch die Kürzung der EWS lassen sich Investitionen reduzieren, was im Gegenzug zu erhöhten Betriebskosten führt. Für konkrete Aussagen und Empfehlungen sind diesbezüglich Folgeuntersuchungen angezeigt. Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsrechnung würde Aufschluss über das wirtschaftliche Optimum geben. Die Beiträge von EWS-Länge, Kollektorzahl und Ertrag durch eigenproduzierten Strom sollten gegeneinander abgewogen werden, so dass für unterschiedliche Beispielgebäude ein klares Verständnis der wirtschaftlichen Zusammenhänge entsteht und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Selbstverständlich soll neben den ökonomischen Aspekten weiterhin die Energieeffizienz und der energetische Selbstversorgungsgrad berücksichtigt werden. Allenfalls muss auch eine Abwägung zwischen Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz gemacht werden.

Ein weiteres Feld für vertiefte Untersuchungen stellt bei einer Betrachtung des Gesamtsystems auf Stufe Gebäude (und allenfalls auch Quartier) die Optimierung der Steuerungen und der Hydraulik dar. In den vorliegenden Simulationsresultaten ist der lastgerechte Autarkiegrad, also der Anteil des Stromverbrauchs des Heizsystems, der durch selbst erzeugten Solarstrom gedeckt wird, mit den bisher be-

trachteten Steuerungen vergleichsweise tief. Eine Optimierung der Steuerung in Richtung Eigenverbrauchssteigerung verspricht diesbezüglich ein grosses Potential. Beim Einsatz von PVT-Kollektoren besteht neben dem elektrischem auch ein thermisches Potenzial, welches sich wiederum in der Systemeffizienz bemerkbar machen wird. Ebenfalls wäre es interessant zu untersuchen, ob und wie die Hydraulik noch optimiert werden kann. So ist in dieser Studie beispielsweise die Nutzung der solarthermischen Wärme für die WW-Vorerwärmung gänzlich aussenvor gelassen worden. Weiter könnten z.B. Heizpufferspeicher genutzt werden, um die Abwärme einer aktiven Gebäudekühlung im Tagesverlauf zu puffern. Dadurch würde die Abwärme der Kühlung nicht mehr in Konkurrenz zu anderen Wärmequellen treten. Durch die so verlängerte Regenerationszeit könnte der Regenerationsanteil bei gleichbleibendem Wärmeangebot erhöht werden. Mit immer billiger werdenden Batterien könnte der damit einhergehende Stromverbrauch während der Nacht gedeckt und der lastgerechte Autarkiegrad erhöht werden.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt beinhaltete die Teilnahme am IEA SHC Task 60 «PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems». Das Projektteam bedankt sich herzlich beim BFE für die Möglichkeit zur Teilnahme und die damit einhergehenden fruchtbaren Diskussionen.

7 Literaturverzeichnis

- Bayer, G., Sturm, T., & Steininger, M. (2014). Energieflüsse in Bürogebäuden—(NEWID IST) [Bericht]. Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik ÖGUT. https://www.oegut.at/downloads/pdf/e_newid-endbericht.pdf
- Bundesamt für Energie. (o. J.). Wie viel Strom oder Wärme kann mein Dach produzieren? sonnendach.ch. Abgerufen 17. Oktober 2019, von https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/sonnendach/
- Bundesamt für Landestopografie. (o. J.). *Geo.admin.ch* [Geoportal]. geo.admin.ch das Geoportal des Bundes. Abgerufen 17. September 2020, von https://www.geo.admin.ch/de/home.html
- Bundesamt für Statistik. (o. J.). *Energiebereich: Heizsystem und Energieträger*. Abgerufen 23. Mai 2019, von https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bau-wohnungswesen/gebaeude/energiebereich.html
- Bundesamt für Statistik. (2019a, April 16). *Statistik der Schweizer Städte 2019: Wohnfläche, Belegungs- und Wohndichte*. https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.8046640.html
- Bundesamt für Statistik. (2019b, Oktober 10). *Durchschnittliche Wohnfläche pro Bewohner nach Ge-bäudekategorie und Bauperiode*. https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.9767724.html
- Cremers, J., Jobard, X., Palla, N., & Schoch, C. (2015). How to Integrate Hybrid Collectors in Buildings to Optimise Performance. 31th International PLEA Conference ARCHITECTURE IN (R)EVO-LUTION. https://www.researchgate.net/publication/301560991_How_to_Integrate_Hybrid_Collectors_in_Buildings_to_Optimise_Performance?_sg=yzNSpl3gJB2qMfl0xMggjdFn4Bu-cR1-zRqT7BdVdSe-TquB-AVUOijH_6HRd7G4V8dlfB-bg5CINR6WEcLHS-RTVIOEc
- Dott, R., Genkinger, A., Kobler, R., Alimpic, Z., Hubacher, P., Afjei, T., & FAKTOR Verlag AG. (2018). Wärmepumpen Planung, Optimierung, Betrieb, Wartung.
- DualSun. (2019a). *DualSun Spring—A revolutionary hybrid solar panel*. https://aumada.com.sg/wp-content/uploads/2020/11/DualSun-EN-Datasheet-Spring.pdf
- DualSun. (2019b, Mai 10). *How do DualQuickFit interpanel connectors work?* DualSun. http://academy.dualsun.com/hc/en-us/articles/360005304199
- Fasci, M. L., & Lazzarotto, A. (2019, Juli 24). *A novel model for the estimation of thermal influence of neighbouring borehole heat exchangers*. European Geothermal Congress 2019, Den Haag.
- Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (Hrsg.). (2007). *Dubbel—Taschenbuch für den Maschinenbau* (22. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Grundfoss. (2021). *Grundfoss—Product Center*. https://product-selection-classic.grundfos.com/front-page.html?custid=GMA&qcid=1405279702
- Hartmann, C., & Jakob, M. (2016). *Methodik zur Berechnung der kantonalen CO2-Emissionen im Ge-bäudebereich auf Basis des Gebäude- und Wohnungsregisters (GWR)*. ECOSPEED AG, im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.
- Hoval Schweiz AG. (2021). Plattenwärmeübertrager zur Systemtrennung.
- IPCC (Hrsg.). (2000). Emissions scenarios: Summary for policymakers;a special report of IPCC Working Group III\$Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- K2 Systems GmbH. (2020, August). *K2 Base* [Onlinetool]. K2 Base. https://base.k2-systems.com/ Kaltra GmbH. (2020). *Mistral Series—Dry Coolers*.
- Klauser, D. (2016). Solarpotentialanalyse fur Sonnendach.ch. Bundesamt für Energie (BFE).
- Konferenz Kantonaler Energiedirektoren. (2014). Energieverbrauch von Gebäuden [Fact Sheet].

- Konferenz Kantonaler Energiedirektoren. (2015). *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich* (MuKEn): Ausgabe 2014, deutsche Version. Haus der Kantone.
- Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren. (2016). Ökobilanzdaten im Baubereich—2009/1:2016. Bundesamt für Bauten und Logistik (BBL).
- Kriesi, R. (2017). Analyse von Erdwärmesondenanlagen: Abschätzung des Anteils unterkühlter Erdwärmesonden von Anlagen, die vor Einführung der SIA 384/6 erstellt wurden [Schlussbericht]. Kriesi Energie GmbH, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, EnergieSchweiz. https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/geothermie/_jcr_content/par/tabs/items/tab/tabpar/externalcontent.external.exturl.pdf/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvODg3Mi5wZGY=.pdf
- Kriesi, R., Wagner, R., & Mégel, T. (2018). *Bewertung älterer Erdsonden in der Stadt Zürich*. Kriesi Energie GmbH, im Auftrag der Stadt Zürich, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik.
- Meier, B., Vogler, C., Moser, C., & Dettli, R. (2018). Überprüfung der Schweizer Klimaziele nach dem 1.5-Grad-Bericht des Weltklimarats [Schlussbericht]. econcept AG.
- Minder, S., Hefti, R., Ettlin, N., & Weisskopf, T. (2016). *Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung und Marktpositionierung*. Weisskopf Partner GmbH im Auftrag von EnergieSchweiz.
- Mojic, I., Luzzatto, M., Haller, M., Lehman, M., Benz, M., & van Velsen, S. (2018). *ImmoGap: Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäuser* [Schlussbericht]. SPF Institut für Solartechnik. https://www.minergie.ch/media/501469_haller_sb_immogap.pdf
- Persdorf, P., Ruesch, F., & Haller, M. Y. (2015). RegenOpt: Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: Energetische und ökonomische Analysen [Schlussbericht]. Institut für Solartechnik SPF, im Auftrag der Stadt Zürich, Fachstelle Energieund Gebäudetechnik.
- Polysun (11.3). (Version 11.3). [Computer software]. Vela Solaris. http://www.velasolaris.com
- Poppei, J., Diem, S., & Pérus, M. (2017). Erdwärmesonden in dicht bebautem Gebiet Abklärung von Konsequenzen und mindernden Faktoren anhand von Fallbeispielen [Schlussbericht]. AF-Consult Switzerland AG, im Auftrag des Bundesamts für Energie, EnergieSchweiz.
- Poppei, J., & Masset, O. (2017). *Grenzabstände bei Erdwärmesonden—Untersuchungen zu neuen Bemessungs- und Planungsgrundlagen* [Schlussbericht]. AF-Consult Switzerland AG, im Auftrag der Stadt Zürich, Amt für Hochbauten.
- Poppei, J., & Schwarz, R. (2010, 19.11). Gegenseitige Beeinflussung oberflächennaher Geothermieanlagen – Instrumente zum Management (knapper werdender) Ressourcen. Der Geothermiekongress 2010, Karslruhe.
- Poppei, J., Wilhelm, C., Gischig, V., & Hess, M. (2019). Überprüfung der Auslegungskennwerte zur strategischen Planung von Erdwärmesonden: Anwendungsbeispiele des grundstücksflächenbezogenen Wärmeentzugs. CSD Ingenieure AG, im Auftrag des Bundesamts für Energie, EnergieSchweiz.
- Prinzing, M., Berthold, M., & Bertsch, S. (2019). *Ausblick auf mögliche Entwicklungen von Wärme-pumpen-Anlagen bis 2050* [Bericht]. Bundesamt für Energie (BFE). https://pubdb.bfe.ad-min.ch/de/publication/download/9999
- Ramschak, T. (2020). Existing PVT systems and solutions. IEA SHC. https://www.solarthermal-world.org/sites/default/files/news/file/2020-07-01/iea-shc-task60-a1-existing-pvt-systems-and-solutions.pdf
- Rogenhofer, L., & Leumann, P. (2018). V0697 Zürich, Tièchestrasse 51-57—Vergleich verschiedener Energieerzeugungskonzepte in vier Mehrfamilienhäusern [Schlussbericht]. Bundesamt für

- Energie BFE. https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/energie/pilotprojekte/PP6_Erdsonden_WP_Konzepte.pdf
- Rohrer, J. (2019, April 25). Netto-Null bis 2030: Die Klimabewegung hat recht! Südostschweiz, 16.
- Roost, M., Ménard, M., Lehman, M., Ott, W., & Sitzmann, B. (2018). WP-GAP: Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpe die Rolle der Betreiber [Schlussbericht]. Bundesamt für Energie (BFE). https://www.econcept.ch/media/projects/downloads/2018/11/2018_WP-GAP_MFH_mit_WP_Rolle_der_Betreiber_U5GOhUx.pdf
- Rüdisüli, M., Teske, S. L., & Elber, U. (2019). Impacts of an Increased Substitution of Fossil Energy Carriers with Electricity-Based Technologies on the Swiss Electricity System. *Energies*, 12(12), 2399. https://doi.org/10.3390/en12122399
- Sauter, D., Hunziker, M., Schubert, M., Sperr, N., Koch, M., & Rohrer, J. (2020). *L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe* [Schlussbericht]. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, im Auftrag des Bundesamtes für Energie. https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=65363&Load=true
- Settembrini, G., Domingo-Irigoyen, S., Heim, T., Jurt, D., Zakovorotni, A., Seerig, A., Zweifel, G., & Menti, U.-P. (2017). *ClimaBau—Planen angesichts des Klimawandels*. Bundesamt für Energie (BFE).
- SIA. (2015). *Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik*. SIA. http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/sia%202024/d/2015/D/Product
- Solar-Ripp GmbH. (2020, Oktober 27). *Foto-Galerie*. https://de.store.solarripp.com/foto-galerie/Vela Solaris AG. (2018). *Polysun Simulation Software: Benutzerhandbuch*. Vela Solaris AG.
- Viessmann Werke GmbH. (2020, Oktober 27). *Vitofriocal Eisspeicher-System*. https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/waermepumpe/eis-energiespeicher/eisspeichersystem.html
- Wallbaum, H., Heeren, N., Jakob, M., Martius, G., & Gross, N. (2010). Gebäudeparkmodell—Vorstudie der Erreichbarkeit der Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft für den Gebäudepark der Stadt Zürich. [Schlussbericht]. ETH Zürich. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000113514
- Wilo Schweiz AG. (2016). Grundlagen der Pumpentechnik.
- Witte, H. J. L. (2018, April). A Novel Tool for Assessing Negative Temperature Interactions between Neighbouring Borehole Heat Exchanger Systems. 14th International Conference on Energy Storage, EnerSTOCK 2018, Adana, Turkey.
- Zenhäusern, D., Bamberger, E., Baggenstos, A., & Häberle, A. (2017). *PVT Wrap-Up: Energiesys-teme mit Photovoltaisch- Thermischen Solarkollektoren* [Schlussbericht]. Bundesamt für Energie (BFE). https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/9455

8 Anhang

8.1 Charakterisierung der Kollektoren

8.1.1 PVT-Kollektor

Tabelle 23: Leistungskennwerte des PVT-Kollektors Spring 310M non-insulated von DualSun (Polysun, Version 11.3)

Aperturfläche	1.650	[m ²]
Bruttofläche	1.650	[m ²]
Eta0	0.664	[-]
ε/α	0.000	[-]
bu	0.019	[s/m]
b1	11.020	[W/m²K]
b2	4.802	[Ws/m³K]

8.1.2 Flachkollektor

Tabelle 24: Leistungskennwerte des generischen Kollektormodells «Flachk.,sehr gut» (*Polysun*, Version 11.3)

Aperturfläche	1.800	[m ²]
Bruttofläche	2.000	[m ²]
Eta0 (laminar)	0.8	[-]
Eta0 (turbulent)	0.850	[-]
A1 (ohne Wind)	3.000	[W/m²K]
A1 (mit Wind)	3.300	[W/m²K]
A2	0.010	[W/m ² K ²]

8.1.3 Solarthermischer Absorber

Tabelle 25: Leistungskennwerte des solarthermischen Absorbers SLK-S der Firma Viessmann (Polysun, Version 11.3)

Aperturfläche	2.544	[m ²]
Bruttofläche	2.560	[m ²]
Eta0 (laminar)	0.066	[-]
Eta0 (turbulent)	0.702	[-]
A1 (ohne Wind)	32.639	[W/m²K]
A1 (mit Wind)	3.589	[W/m²K]
A2	0.850	[W/m²K²]

Tabelle 26: Leistungskennwerte des solarthermischen Absorbers SolarRipp (*Polysun*, Version 11.3)

Aperturfläche	1	[m ²]
Bruttofläche	1	[m ²]
Eta0 (laminar)	0.082	[-]
Eta0 (turbulent)	0.9	[-]
A1 (ohne Wind)	13	[W/m²K]
A1 (mit Wind)	4.410	[W/m²K]
A2	0.85	[W/m ² K ²]

8.2 Nutzbare Fassadenflächen beim Beispielgebäude mit herausfordernder EWS-Regeneration

Tabelle 27: Übersicht über die Flächen und PVT-Belegungsfaktoren der Südfassaden der Gebäude, welche im Bereich von ±20 % um den Heizwärmebedarf des Beispielgebäudes U5 streuen. Die drei Gebäude des Typs «Hochhäuser» sind separat im oberen Bereich der Tabelle aufgelistet.

EGID-Nr.	Anzahl Ge- schosse		Süd-Ost				Süd-West			
		Fassade	Fassade/ EBF	PVT	Bele- gungs- faktor	Fassade	Fassade/ EBF	PVT	Bele- gungs- faktor	
	[-]	[m²]	[-]	[m ²]	[-]	[m²]	[-]	[m ²]	[-]	
161986	10	600	0.183	230	0.38	500	0.153	130	0.26	
161993	9	560	0.190	220	0.39	430	0.146	100	0.23	
162072	13	740	0.145	210	0.28	530	0.104	280	0.53	
Mittelwert		633	0.173	220	0.35	487	0.134	170	0.34	
162180	4	460	0.073	70	0.15	130	0.021	60	0.46	
162193	4	300	0.071	40	0.13	190	0.045	50	0.26	
162208	5	270	0.106	60	0.22	130	0.051	60	0.46	
162808	6	230	0.076	120	0.52	400	0.133	100	0.25	
162891	5	230	0.043	110	0.48	340	0.063	20	0.06	
162894	5	160	0.064	80	0.50	210	0.084	10	0.05	
162897	5	0	0.000	0	0.00	210	0.084	10	0.05	
163698	5	170	0.046	50	0.29	200	0.054	20	0.10	
2365727	4	120	0.047	50	0.42	340	0.133	60	0.18	
302021670	6	800	0.094	0	0.00	730	0.086	0	0.00	
3169392	5	200	0.042	50	0.25	0	0.000	0	0.00	
3169854	4	330	0.064	130	0.39	570	0.111	50	0.09	
9001388	4	290	0.033	10	0.03	170	0.019	60	0.35	
Mittelwert		274	0.058	59	0.26	278	0.068	38	0.18	

Tabelle 28: Maximale Anzahl an PVT-Kollektoren, die nach Berücksichtigung der Nahverschattung durch Gebäude und Bäume an den beiden südlich ausgerichteten Fassaden der sechs Gebäude des Typs «Hochhäuser» Platz finden.

EGID-Nr.	Anzahl Ge- schosse		Süd-Ost					Süd	-West	
		Nutz- bare Flä- che	Unver- schat- tete Flä- che	Bele- gungs- faktor (korr)	Max. PVT- Kollekt- oren		Nutz- bare Flä- che	Unver- schat- tete Flä- che	Bele- gungs- faktor (korr)	Max. PVT- Kolle- ktoren
	[-]	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]		[m ²]	[m ²]	[-]	[-]
161986	10	230	135	0.23	81		130	80	0.16	48
161987	10	230	135	0.23	81		130	100	0.22	60
161993	9	220	125	0.22	75		100	70	0.16	42
162069	11	210	201	0.27	121		280	114	0.22	69
162070	11	210	103	0.14	62		280	160	0.30	96
162072	13	210	200	0.27	121		280	245	0.46	148
Mittel- wert	11	218	150	0.23	90		200	128	0.25	77

8.3 Beschreibung der zusätzlichen Regenerationsmassnahmen

8.3.1 PVT-Kollektoren an Fassade

In Abbildung 51 ist der hydraulische Aufbau des Systems mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und an der S/O- und der S/W-Fassade als Regenerationsmassnahme dargestellt. Die Anzahl möglicher PVT-Kollektoren sowie deren Ausrichtung wurde, wie in Abschnitt 2.9.3 beschrieben, festgelegt. Die verschiedenen PVT-Felder (Dach, S/W-Fassade und S/O-Fassade) werden separat angesteuert und bei möglichem Wärmegewinn einzeln zugeschaltet. Als Einschalttemperaturdifferenz sind 6 K zwischen der Kollektoraustrittstemperatur und der Austrittstemperatur aus dem Verdampfer der WP (bei Wärmeentzug) bzw. der Mitteltemperatur der Erdwärmesonde (bei der Regeneration) festgelegt. Die Ausschalttemperaturdifferenz beträgt 2 K. Der Durchfluss im Primärkreis der WP beträgt während dem Heizbetrieb das Doppelte des Durchflusses im Sekundärkreis der WP. Bei der Regeneration der Erdwärmesonde wird der Durchfluss so geregelt, dass die Temperatur-Spreizung über der Erdwärmesonde jeweils 4 K beträgt. Die obere sowie die untere Grenze des Durchsatzes werden dabei anhand der minimalen bzw. der maximalen Anzahl an im Betrieb befindlichen PVT-Kollektoren bestimmt. Der spezifische Durchsatz der Fassaden-Kollektorfelder wird ebenfalls auf 30 I/(h*m²) Aperturfläche festgelegt (siehe Abschnitt 2.4.1). Auch wenn nur eine PVT-Anlage in Betrieb und der Durchfluss durch die EWS relativ niedrig wird, ist mit einer turbulenten Strömung in den EWS zu rechnen. Die Reynoldszahl beträgt bei minimalem Volumenstrom durch die EWS rund 2'625 und ist somit oberhalb der kritischen Reynoldszahl von 2'300 für Rohrströmungen (Feldhusen & Grote, 2007). Somit kann von einer ausreichend guten Wärmeübertragung ausgegangen werden.

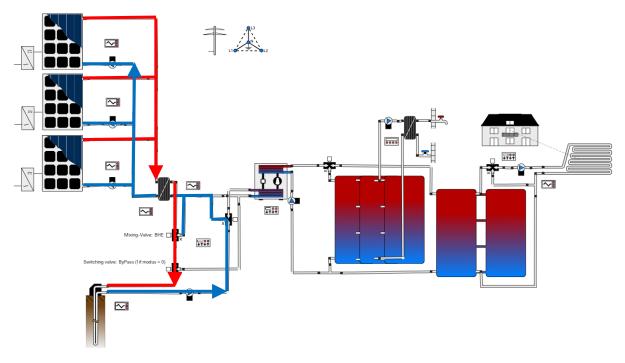


Abbildung 51: Hydraulischer Aufbau der Variante mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und an der S/O- und S/W-Fassade inkl. eingezeichneter Fliessrichtung im Falle der Regeneration der EWS.

8.3.2 Luft-Wasser-Wärmeübertrager

Als weitere Möglichkeit zur Regeneration der EWS wird ein LWWÜ als Rückkühler, der entweder neben oder auf dem Dach der jeweiligen Gebäude installiert werden kann, betrachtet. In Abbildung 52 ist der hydraulische Aufbau des Systems mit PVT-Kollektoren auf dem Dach sowie einem zusätzlichen LWWÜ als Regenerationsmassnahmen dargestellt. Der verwendete LWWÜ hat abhängig von seiner Leistung (20, 40 oder 80 kW) einen Nenndurchsatz von 4'800 l/h, 14'700 l/h oder 18'900 l/h. Der gleiche Volumenstrom wird, während dem Heizbetrieb aus dem Primärkreislauf der WP abgezweigt und im WÜ vorgewärmt, bevor eine weitere Erwärmung durch die PVT-Kollektoren bzw. eine Rückführung in die EWS stattfindet. Im Regenerationsfall wird bei genügend hoher Aussenlufttemperatur der komplette Volumenstrom des Primärkreislaufs der WP über den LWWÜ geführt und vorgewärmt. Als Einschalttemperaturdifferenz sind 6 K zwischen der Kollektoraustrittstemperatur und der Austrittstemperatur aus dem Verdampfer der WP (bei Wärmeentzug) bzw. der Mitteltemperatur der Erdwärmesonde (bei der Regeneration) festgelegt. Die Ausschalttemperaturdifferenz beträgt 2 K.

Der LWWÜ soll aufgrund der Lärmemissionen des Ventilators jeweils nur von 07:00 Uhr bis 22:00 Uhr betrieben werden. Da während der Nacht nur ein vernachlässigbar kleiner Anteil der Wärme durch den LWWÜ gewonnen wird, ist der Einfluss dieser Begrenzung nicht nennenswert.

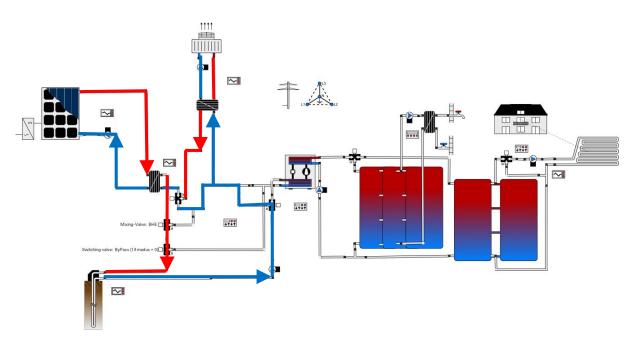


Abbildung 52: Hydraulischer Aufbau der Variante mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und einem LWWÜ inkl. eingezeichneter Fliessrichtung im Falle der Regeneration der EWS.

8.3.3 Abwärme aus aktiver und passiver Gebäudekühlung

Die Gebäudekühlung ist vereinfacht mittels Verbrauchsprofil und vordefiniertem Kühlbedarf modelliert. Bei einer Vorlauftemperatur von 20 °C ist eine Rücklauftemperatur von 23 °C angenommen. Die abgeführte Raumwärme wird in einem Speicher gepuffert und über das Kühlsystem abgeführt. Als Kaltwasser-Speicher wird der bestehende Warmwasser-Pufferspeicher des Heizsystems mit einem Volumen von 3000 I genutzt. Im Modell ist zur Vereinfachung der Steuerung ein separater, aber identischer Speicher eingesetzt. Sobald die unterste Schicht des Kaltwasser-Speichers eine Temperatur von 19 °C übersteigt, wird dieser rückgekühlt. Damit steht stets genügend kaltes Wasser zur Verfügung, um die 20 °C Vorlauftemperatur zu mischen. Die Rückkühlung des Speichers kann dabei parallel zur Regeneration des Erdwärmesonde durch die PVT-Kollektoren bzw. den LWWÜ stattfinden, indem nur ein Teil des Volumenstroms aus der Erdwärmesonde abgezweigt und durch den Speicher geleitet wird.

Passive Kühlung: In Abbildung 53 ist der hydraulische Aufbau des Systems mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und passiver Kühlung des Gebäudes als Regenerationsmassnahmen dargestellt. Bei der passiven Kühlung wird zur Rückkühlung des Kaltwasser-Speichers kaltes Fluid aus der EWS durch einen Wendel-Wärmeübertrager im Tank geleitet, erwärmt und wieder zurück in die EWS geleitet, bis die unterste Schicht im Tank eine Temperatur von 15 °C unterschreitet. Der Volumenstrom zur Rückkühlung des Speichers wird abhängig vom Kühlbedarf auf 4000 und 8000 l/h gesetzt. Um die Abwärme aus der Kühlung ans Erdreich abgeben zu können, darf die Temperatur im nahen Erdreich durch die parallele Regeneration mittels PVT-Kollektoren oder LWWÜ nicht zu stark steigen. Daher wird bei dieser Variante die Regenerationstemperatur am Eintritt in die EWS auf 22 °C begrenzt. In einem Temperaturbereich von ± 2 °C konnten dabei keine signifikanten Änderungen bei der Kühlleistung festgestellt werden.

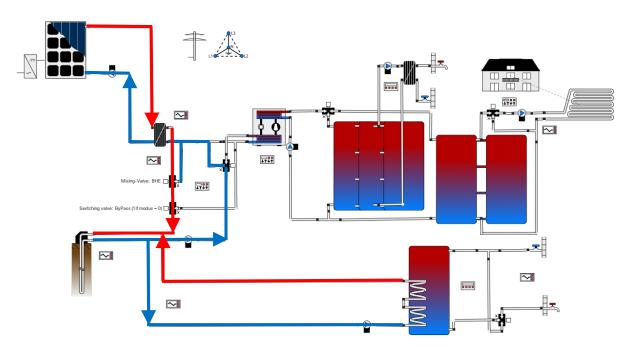


Abbildung 53: Hydraulischer Aufbau der Variante mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und einer passiven Gebäudekühlung inkl. eingezeichneter Fliessrichtung im Falle der Regeneration der EWS.

Aktive Kühlung: In Abbildung 54 ist der hydraulische Aufbau des Systems mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und aktiver Kühlung des Gebäudes als Regenerationsmassnahmen dargestellt. Im Falle der aktiven Kühlung, wird der Kaltwasser-Speicher über die WP bis auf minimal 4 °C heruntergekühlt, wobei die dabei erzeugte Wärme im Kondensator der WP zur Regeneration der Erdwärmesonde genutzt wird. Wiederum zur Vereinfachung der Steuerung wird eine zweite baugleiche WP eingesetzt. Weil die aktive Kühlung und die Gebäudebeheizung bzw. Warmwasser-Erwärmung in der Praxis über die gleiche (reversible) WP erfolgt, kann der Kaltwasser-Speicher nur rückgekühlt werden, wenn die WP zur Warmwasser-Erwärmung nicht in Betrieb ist. Die WP für den Kühlbetrieb wird in Teillast (50 %) betrieben. Dabei liegt der COP im Betriebspunkt W24/W5 bei 4.36.

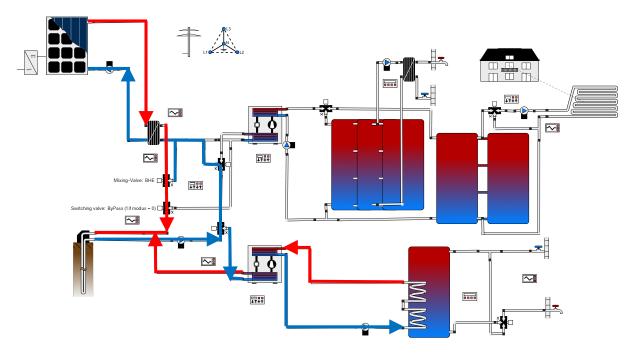


Abbildung 54: Hydraulischer Aufbau der Variante mit PVT-Kollektoren auf dem Dach und einer aktiven Gebäudekühlung inkl. eingezeichneter Fliessrichtung im Falle der Regeneration der EWS.

8.4 Netto-Entzugsenergie der verschiedenen Fälle

8.4.1 PVT

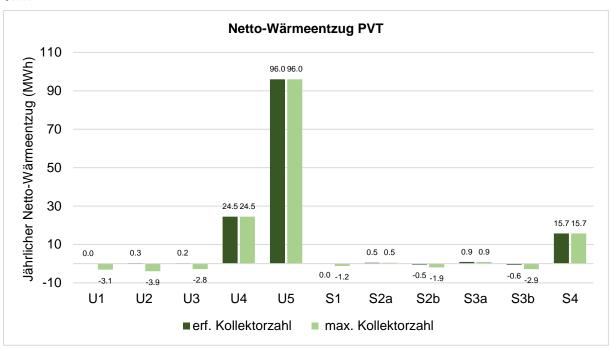


Abbildung 55: Netto- Wärmeentzug pro Gebäude bei Regeneration mit PVT. Links (dunkel) erforderliche Kollektorzahl, rechts (hell) maximal mögliche Kollektorzahl.

8.4.2 Flachkollektoren

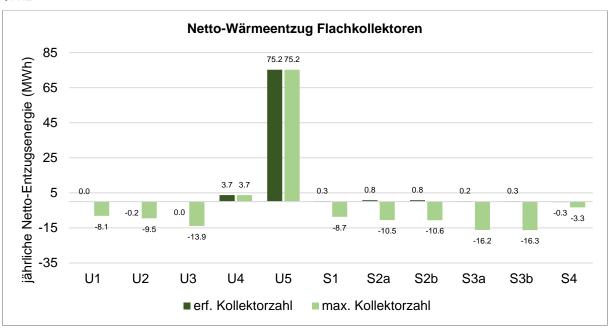


Abbildung 56: Netto- Wärmeentzug pro Gebäude bei Regeneration mit Flachkollektoren. Links (dunkel) erforderliche Kollektorzahl, rechts (hell) maximal mögliche Kollektorzahl.

8.5 Quartierweise Betrachtung von Regenerationsdefizit / -überschuss

8.5.1 PVT

Tabelle 29: Quartierweise Betrachtung des Regenerationsdefizits bzw. Überschusses bei Regeneration mit PVT-Kollektoren. Jedes Quartier wird verglichen mit der gesamten Netto-Wärmeentzug des Quartiers, wenn nicht regeneriert wird.

			erforderliche	Kollektorzahl	maximale K	Collektorzahl
	Beispielgebäude	Anzahl Ge- bäude im Quartier	Netto- Wärme-ent- zug pro Ge- bäude (kWh)	Netto- Wärme-ent- zug im Quar- tier (kWh)	Netto- Wärme-ent- zug pro Ge- bäude (kWh)	Netto- Wärme-ent- zug im Quar- tier (kWh)
	U1	119	38	4'506	-3'138	-373'372
	U2	174	305	53'110	-3'942	-685'840
	U3	336	187	62'722	-2'791	-937'643
Urban	U4	261	24'465	6'385'271	24'465	6'385'271
D Gr	U5	48	96'018	4'608'842	96'018	4'608'842
	Gesamt			11'114'451		8'997'258
	Ohne Regenera- tion			58'921'394		58'921'394
	Reduktion durch Regeneration			-81 %		-85 %
	S1	45	-16	-701	-1'193	-53'665
	S2a	18	482	8'679	482	8'679
	S2b	21	-499	-10'484	-1'942	-40'791
an a	S3a	6	931	5'586	931	5'586
Suburban	S3b	7	-609	-4'262	-2'856	-19'994
Su	S4	17	15'743	267'625	15'743	267'625
	Gesamt			266'443		167'440
	Ohne Regenera- tion			3'493'401		3'493'401
	Reduktion durch Regeneration			-92 %		-95 %

8.5.2 Flachkollektoren

Tabelle 30: Quartierweise Betrachtung des Regenerationsdefizits bzw. Überschusses bei Regeneration mit Flachkollektoren. Jedes Quartier wird verglichen mit dem gesamten Netto-Wärmeentzug des Quartiers, wenn nicht regeneriert wird.

			erforderliche	Kollektorzahl	maximale K	Collektorzahl
	Beispielgebäude	Anzahl Ge- bäude im Quartier	Netto- Wärme-ent- zug pro Ge- bäude (kWh)	Netto- Wärme-ent- zug im Quar- tier (kWh)	Netto- Wärme-ent- zug pro Ge- bäude (kWh)	Netto- Wärme-ent- zug im Quar- tier (kWh)
	U1	119	19	2'231	-8'111	-965'205
	U2	174	-168	-29'253	-9'490	-1'651'209
	U3	336	-40	-13'569	-13'892	-4'667'788
Urban	U4	261	3'713	969'154	3'713	969'154
Urb	U5	48	75'224	3'610'773	75'224	3'610'773
	Gesamt			4'539'336		-2'704'275
	Ohne Regenera- tion			58'921'394		58'921'394
	Reduktion durch Regeneration			-92 %		-105 %
	S1	45	308	13'877	-8'667	-390'026
	S2a	18	761	13'707	-10'502	-189'045
	S2b	21	766	16'084	-10'598	-222'553
S	S3a	6	237	1'420	-16'157	-96'941
Suburban	S3b	7	275	1'926	-16'264	-113'847
Suk	S4	17	-271	-4'613	-2'369	-40'278
	Gesamt			42'401		-1'052'690
	Ohne Regenera- tion			3'653'401		3'653'401
	Reduktion durch Regeneration			-99 %		-129 %

8.6 Netzeinspeisung und -bezug auf Stufe Beispielgebäude

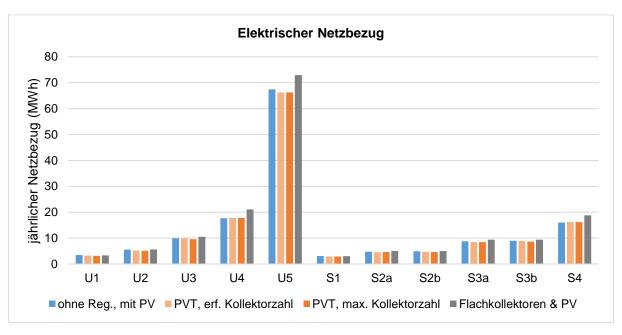


Abbildung 57: Jährlicher elektrischer Netzbezug der Beispielgebäude mit verschiedenen Lösungen zur Regeneration.

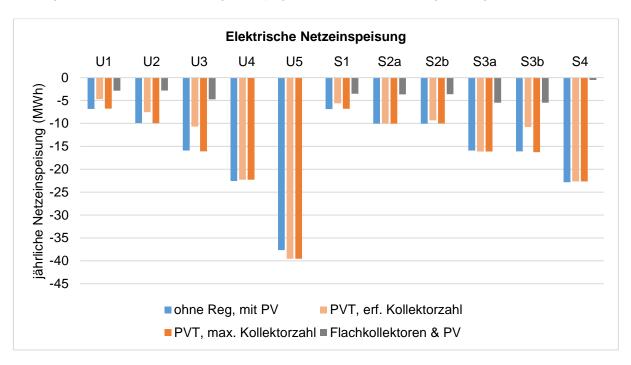


Abbildung 58: Jährliche elektrische Netzeinspeisung der Beispielgebäude mit verschiedenen Lösungen zur Regeneration.

8.7 Spezifische Erträge der verwendeten PV-Module sowie PVT- und Flachkollektoren

Tabelle 31: Spezifische elektrische (AC) und thermische Erträge der verwendeten PV-Module sowie PVT- und Flachkollektoren für die in Abschnitt 2.10 beschriebenen Regenerationsmassnahmen und die verschiedenen Beispielgebäude.

		Nur PV	PVT (erforderlich)		PVT (maximal)		Flachkollektoren (erforderlich)
Beispiel- gebäude	Einstrah- lung (kWh/m²)	Elektrisch (kWh/m²)	Elektrisch (kWh/m²)	Thermisch (kWh/m²)	Elektrisch (kWh/m²)	Thermisch (kWh/m²)	Thermisch (kWh/m²)
U1	1'221	192	195	527	192	456	833
U2	1'220	193	190	601	195	553	837
U3	1'190	192	194	529	194	506	779
U4	1'166	188	189	528	189	528	759
U5	1'164	188	191	649	191	649	818
S1	1'221	192	192	418	191	379	749
S2a	1'220	193	193	445	193	445	837
S2b	1'220	193	198	505	194	488	838
S3a	1'190	192	192	430	192	430	806
S3b	1'190	192	191	489	193	469	806
S4	1'166	188	189	537	189	537	760