

Manuel, Hunziker, ZHAW Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen  
David, Sauter, ZHAW Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen  
Mario, Rosso, ZHAW Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen  
Joachim, Poppei, CSD Ingenieure AG  
Fabien, Cochand, CSD Ingenieure AG  
Markus, Hubbuch, ZHAW Kompetenzgruppe Immobilienmanagement  
Jürg, Rohrer, ZHAW Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

## **SolSeasStore - Saisonale Wärmespeicherung in städtischen Quartieren mit Erdwärmesonden**

*Zusammenfassung: In diesem vom Bundesamt für Energie (BFE) geförderten Projekt wurde untersucht, inwieweit eine Regeneration von Erdwärmesonden (EWS) in dicht besiedelten Gebieten mittels Solarthermie möglich ist, wenn ein gesamtes Wohnquartier durch Wärmepumpen mit EWS beheizt werden soll. Am Beispiel eines typischen Gebäudes mit herausfordernder Regeneration erfolgte zudem eine Betrachtung zusätzlicher Wärmequellen sowie des Stromverbrauches über 50 Jahre. Als Wärmequelle für die Regeneration wurden ungedeckte PVT- sowie Flachkollektoren verwendet. PVT-Fassadenanlagen, Luft-Wasser-Wärmeübertrager (LWWÜ) als auch die Gebäudekühlung dienten als zusätzliche Wärmequellen. Sofern grosse Gebäude mit hohem Wärmebedarf und verhältnismässig kleiner Dachfläche gleichmässig verteilt sind, ist eine nachhaltige Wärmeversorgung mit regenerativen EWS in suburbanen Quartieren mittels Solarthermie auf den Dächern möglich. In urbanen Quartieren hingegen, in denen Ansammlung grosser Gebäude zu erwarten sind, ist eine ausreichende und rein solarthermische Regeneration nicht möglich. Der Einsatz zusätzlicher Wärmequellen ist in diesen Fällen nötig, um den Regenerationsanteil bei grossen Gebäuden für einen nachhaltigen Betrieb ausreichend anzuheben.*

*Abstract: In this project, funded by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE), it was investigated to what extent a regeneration of borehole heat exchangers (BHE) in densely populated areas using solar thermal energy is possible if an entire residential district is to be heated with ground source heat pump systems. Based on a typical building with challenging regeneration, the potential of additional heat sources as well as the electricity consumption over 50 years was also analyzed. Uncovered PVT and flat-plate collectors were used as heat sources for the regeneration. PVT facade systems, air-water heat exchangers and the building cooling served as additional heat sources. Provided that large buildings with high heat demand and relatively small roof areas are evenly distributed, a sustainable heat supply with regenerative BHE and solar thermal energy on the roofs is possible in suburban residential districts. In urban residential districts, on the other hand, where clusters of large buildings are to be expected, a sufficient and purely solar thermal regeneration is not possible. In these cases, the use of additional heat sources is necessary to sufficiently increase the regeneration share in large buildings for sustainable operation.*

## 1. Einführung

Wärmepumpensysteme mit EWS sind eine bewährte Methode zur emissionsarmen Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Allerdings muss mit der zunehmenden Verbreitung von EWS ihr Einsatz sorgfältig geplant werden. Insbesondere in Gebieten mit dichter Erdwärmennutzung besteht die Gefahr einer langfristigen Unterkühlung des Erdreichs, wobei im Winter oft mehr Wärme entnommen wird, als im Sommer zurückfliessen kann [1]. Die daraus resultierende Abkühlung des Erdreichs verringert die Effizienz der Wärmepumpen (WP). In zwei Feldstudien in Zürich wurde festgestellt, dass insbesondere in dicht besiedelten Gebieten viele vorhandenen EWS als "deutlich unterkühlt" zu betrachten sind [2, 3]. Das Problem der Unterkühlung ist nicht auf Zürich beschränkt. Auch in Bern wurde ein Quartier exemplarisch analysiert [4] und auch international wird dem Thema Beachtung geschenkt [5, 6].

Eine mögliche Lösung ist die Regeneration der EWS, indem im Sommer z.B. mittels Solar Kollektoren überschüssige Wärme in das Erdreich eingebracht wird. Aufgrund der begrenzten Dachflächen in städtischen Quartieren müssten die Kollektoren mit der zunehmenden Nutzung von Photovoltaik (PV) konkurrieren. Diese "Konkurrenz" kann durch den Einsatz von photovoltaisch-thermischen Hybrid-Solarkollektoren (PVT-Kollektoren) entschärft werden, die auf der gleichen Fläche Wärme und Strom erzeugen.

In der Simulationsstudie SolSeasStore [7] wurde untersucht, wie weit die Regeneration von EWS in urbanen und suburbanen Wohnquartieren mit Solarthermie möglich ist, wenn das gesamte Quartier von Wärmepumpen mit EWS versorgt werden soll. Basierend auf zwei Wohnquartieren in der Stadt Zürich werden Modellgebäude mit typischer Dachfläche, typischem Wärmebedarf und typischen Nachbargebäuden definiert. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen [8], bei denen nur ein einzelner Gebäudetyp untersucht wurde, werden die gesamten Quartiere als eine Reihe von Modellgebäuden modelliert und die gegenseitige Beeinflussung zwischen den EWS verschiedener Nachbargebäude berücksichtigt. Der Wärmebedarf entspricht einem prognostizierten Wert für das Jahr 2035. Mittels Systemsimulationen wird die nötige Sondenlänge und Fläche der Kollektoren für die Wärmegewinnung ermittelt. Es werden ungedeckte, 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 (grosser Wärmebedarf bei gleichzeitig kleiner Dachfläche). Anhand dieses Gebäudes erfolgt eine Potenzialabschätzung zusätzlicher Wärmequellen für die EWS-Regeneration, sowie eine Abschätzung des erforderlichen Strombedarfs während 50 Jahren Betriebszeit.

## 2. Methodik

### Modellgebäude

Fünf exemplarische Gebäude für die beiden Quartiere, das urbane (in Zürich-Altstetten) und das suburbane (im Loorenquartier), wurden auf der Basis von Daten des Zürcher Gebäudeparkmodells [9] modelliert. Die Gebäude wurden nach der Energiebezugsfläche (EBF) kategorisiert, wobei die kleinste Kategorie (U1, S1) Einfamilienhäuser und die grösste (U5) grosse Wohngebäude mit 21 oder mehr Wohnungen repräsentiert. Das Präfix "U" steht für Gebäude im urbanen und "S" für Gebäude im suburbanen Quartier. In letzterem fehlen die Gebäude der "Grösse 5", weshalb das Gebäudemodell "S5" zwar in Tabelle 1 aufgeführt, im Folgenden jedoch nicht mehr vorkommt.

Die instationäre Wärmelast der Gebäude wurde in Polysun unter Verwendung des quasi-dynamischen Gebäudemodells mit einem Raumtemperatursollwert von 22 °C und einer Heizgrenze von 16 °C simuliert. Es wurde eine lineare Heizkurve mit einer Standard-Aussentemperatur von -8 °C verwendet. Das Heizsystem wurde als Fussbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C modelliert. Die jährlichen Wärmebedarfswerte der einzelnen Gebäude-Modelle sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es wurde eine Warmwasser-Solltemperatur von 50 °C vorgegeben. Bild 1 zeigt den hydraulischen Aufbau des verwendeten Modells in Polysun.

Gebäude-kategorie	EBF (m <sup>2</sup> )	Jährl. Wärmebedarf RW (kWh   kWh/m <sup>2</sup> )		Jährl. Wärmebedarf WW (kWh   kWh/m <sup>2</sup> )		Jährl. Wärmebedarf gesamt (kWh   kWh/m <sup>2</sup> )	
U1	180	14'800	82.2	2'400	13.3	17'200	95.6
S1		13'500	75.0	2'200	12.2	15'700	87.2
U2	360	26'500	73.6	6'400	17.8	32'900	91.4
S2		24'300	67.5	5'800	16.1	30'100	83.6
U3	640	42'700	66.7	12'600	19.7	55'300	86.4
S3		39'100	61.1	11'400	17.8	50'500	78.9
U4	1'420	86'200	60.7	27'200	19.2	113'400	79.9
S4		79'000	55.6	24'600	17.3	103'600	73.0
U5	4'980	238'300	47.9	80'700	16.2	319'000	64.1
S5		218'200	43.8	73'200	14.7	291'400	58.5

Tabelle 1: Jährlicher Wärmebedarf der verschiedenen Gebäudekategorien.

Die thermischen Kollektoren wurden so an die EWS gekoppelt, dass ihre Wärme je nach aktuellem Temperaturniveau und Wärmepumpenstatus entweder direkt als Wärmequelle oder zur Regeneration der EWS genutzt werden konnte. Als Referenz konnte auch der Normalbetrieb ohne Regeneration simuliert werden. Für die Simulation wurden die Wetterdaten für Zürich von Meteonorm 7.2. Die von Meteonorm 7.2 zur Verfügung gestellten Horizontdaten wurden miteinbezogen, die Abschattung im Nahbereich wurde jedoch vernachlässigt.

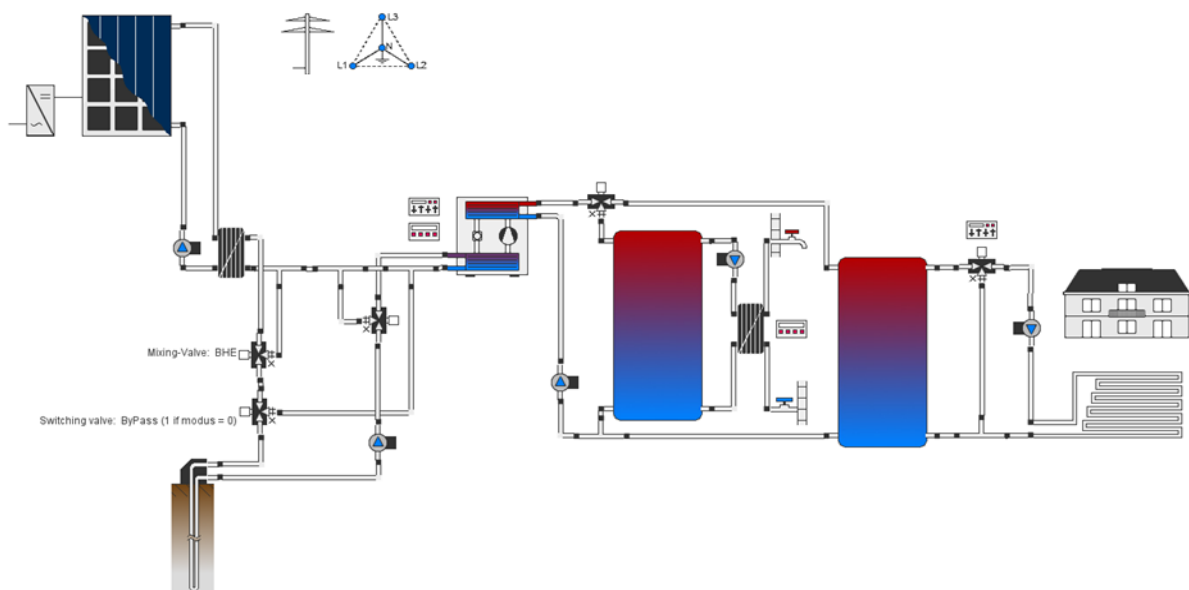


Bild 1: Hydraulischer Aufbau des Simulationsmodelles (Screenshot Polysun).

Jeder Gebäudekategorie wurden typische Werte für die Gesamtdachfläche, die nutzbare Dachfläche, den Dachneigungswinkel und die Dachausrichtung (Abweichung von Süden) zugeordnet. Die typischen Werte ergaben sich aus der Aggregation von Dachgeometriedaten von Sonendach.ch für die gleiche Auswahl von Gebäuden, die für die Ermittlung der typischen Wärmebedarfswerte verwendet wurde. Die nutzbare Dachfläche wurde durch Multiplikation der Gesamtdachfläche mit einem Ausnutzungsgrad ermittelt. Letzterer ist eine Zahl zwischen null und eins, die durch manuelle Analyse der möglichen Kollektorkonfiguration für 20 zufällig ausgewählte Dächer jeder Kategorie ermittelt wurde. Weitere Einzelheiten zur Bestimmung des Ausnutzungsgrades sind in einer separaten Veröffentlichung [10] zu finden. Für die Simulationen wurden der unverglaste PVT-Kollektortyp "DualSun Spring 310M unisolated" und das generische Modell der verglasten Flachkollektors "Flachkollektor, sehr gut" aus der Polysun-Datenbank verwendet. Die Kollektoren haben eine Bruttofläche von 1.65 m<sup>2</sup> bzw. 2 m<sup>2</sup>. Tabelle 2 zeigt die typischen Dachdaten und die mögliche Anzahl Kollektoren für jede Gebäudekategorie. Bei der Ableitung der typischen Dachgeometrie wurde nicht zwischen urbanen und suburbanen Gebäuden unterschieden.

Gebäudekategorie	Netto-Dachfläche (m <sup>2</sup> )	Neigung (°)	Ausrichtung (°)	Mögl. Anzahl PVT-Kollektoren	Mögl. Anzahl Flachkollektoren
U1, S1	39	28	60	24	19
U2, S2	57	28	60	35	28
U3, S3	95	25	70	58	47
U4, S4	136	20	80	82	68
U5	245	20	80	148	122

Tabelle 2: Typische Dachgeometrie und maximal mögliche Anzahl Kollektoren pro Gebäudekategorie.

### Modellierung des Einflusses von benachbarten Erdwärmesonden

Um den Kühleffekt der benachbarten EWS zu modellieren, wurde für jedes Gebäudemodell ein typisches Nachbargebäude und ein typischer Abstand aus den Gebäudeparkdaten ermittelt. Der Einfluss einer einzelnen benachbarten EWS kann durch  $\Delta T = 1/4 \pi \lambda \cdot Q \cdot EI(D^2/4at)$  bestimmt werden, wobei  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Bodens,  $Q$  die spezifische Wärmeentnahme der benachbarten EWS,  $EI(x)$  das exponentielle Integral  $\int_0^\infty 2^{-u}/uR$ ,  $D$  der Abstand zwischen den EWS,  $a$  die thermische Leitfähigkeit des Bodens und  $t$  die Betriebszeit ist. Für  $\lambda$  wurde ein Wert von 2.4 W/(m·K) und für  $a$  ein Wert von 106 m<sup>2</sup>/s verwendet. Die Kühlwirkung aller benachbarten EWS wurde überlagert und die sich daraus ergebende reduzierte Bodentemperatur wurde zur Berechnung der erforderlichen EWS-Länge mit dem Softwaretool "EWS" verwendet. Eine niedrigere Bodentemperatur erfordert eine längere EWS, was wiederum den spezifischen Wärmeentzug  $Q$  und damit den Einfluss auf die Nachbar-EWS reduziert. Diese Berechnung wurde so lange wiederholt, bis keine nennenswerten Änderungen mehr zu beobachten waren. Die Ergebnisse dieser Iteration sind in Tabelle 3 dargestellt. Da S2 und S3 jeweils gleich häufig S2 und S4 als Nachbarn hatten, wurden für beide die Untervarianten a und b für beide eingeführt.

Gebäude- kategorie	Typischer Nachbar	Typischer Anzahl Nachbarn	Typische Distanz (m)	Erforderliche Anzahl EWS	Erforderliche Länge der EWS (m)
U1	U4	3	34	1	282
U2	U4	4	35	2	350
U3	U4	3	30	2	312
U4	U1	4	34	5	284
U5	U2	3	36	18	295
S1	S2	4	34	1	216
S2a	S2	3	34	2	209
S2b	S4	3	34	2	245
S3a	S2	3	37	3	228
S3b	S4	3	37	3	269
S4	S4	2	38	5	312

*Tabelle 3: Typische Nachbargebäude und erforderliche EWS-Dimensionierung (ohne Regeneration) pro Gebäudekategorie.*

### Simulationsprozess

Da sich die Dimensionierung der EWS auf die Regeneration auswirkt und umgekehrt, wurde die benötigte Anzahl Kollektoren und die erforderliche Länge der EWS iterativ ermittelt. Zuerst wurde der monatliche Wärmeentzug ohne Regeneration mit einer Simulation in Polysun mit der vom eingebauten Assistenten vorgeschlagenen Standard-EWS-Dimensionierung ermittelt. Ausgehend von diesen Monatswerten wurde der Einfluss der Nachbar-EWS und der entsprechend angepassten EWS-Dimensionierung ermittelt, wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben. Anschliessend wurde eine weitere Polysun-Simulation durchgeführt, diesmal mit Regeneration. Die Anzahl der Kollektoren wurde so gewählt, dass der Regenerationsanteil so nahe wie möglich an 100 % liegt. Falls die Dachflächen die Kollektorzahl begrenzen, waren Werte von weniger als 100 % möglich. Mit den neuen monatlichen Wärmeentnahmewerten wurde eine weitere EWS-Dimensionierung, die wiederum die Grundlage für eine neue Polysun Simulation war, durchgeführt. Dies wurde so lange wiederholt, bis keine nennenswerten Änderungen in Bezug auf die EWS-Länge nicht mehr zu beobachten waren. Mit dem endgültigen EWS-Design und der maximal möglichen Anzahl an Kollektoren wurde eine weitere Polysun-Simulation durchgeführt.

### Zusätzliche Wärmequellen für Gebäude mit herausfordernder Regeneration

Aufgrund der im Verhältnis zur EBF und dem Wärmebedarf kleinen nutzbaren Dachfläche bei grossen Gebäuden wurde gezeigt, dass die ausschliessliche Regeneration mittels PVT-Dachanlagen für einen nachhaltigen Betrieb der EWS schwieriger sein wird als bei kleineren Gebäuden. Das Verhältnis von nutzbarer Dachfläche zum gesamten Wärmebedarf ist bei grösseren Gebäuden der Kategorie U5 um rund 66 % kleiner als bei U1 Gebäuden. 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 aber hohem Wärmebedarf. Zur Untersuchung zusätzlicher Wärmequellen wurde folglich aus den Gebäuden der Kategorie U5 ein Beispielgebäude erstellt, welches stellvertretend für Gebäude steht, bei denen eine Regeneration der EWS herausfordernd sein dürfte. Die Eckwerte dieses Gebäudes sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

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

*Tabelle 4: Eckwerte des definierten Beispielgebäudes mit herausfordernder EWS-Regeneration und des Beispielgebäude U5.*

Ergänzend zur Regeneration mittels PVT-Kollektoren auf dem Dach, wurden weitere Wärmequellen für die Regeneration betrachtet. Es erfolgte eine Abschätzung des Potenzials naheliegender Möglichkeiten, wie zusätzlicher Kollektorfelder an geeigneten Fassaden, der Nutzung von Abwärme aus der aktiven sowie passiven Gebäudekühlung und dem Einsatz eines LWWÜ (20, 40 und 80 kW thermische Nennleistung).

Die durchschnittlich nutzbare Fassadenfläche wurde anhand einer Stichprobe der Gebäude aus der Kategorie U5 bestimmt. Alle nach Süden ausgerichteten Fassadenflächen (S/O und S/W) wurden ab dem 2. OG betrachtet. Unter Einbezug der Verschattung durch nahegelegene markante Objekte in südlicher Richtung ergab sich ein mittlerer Belegungsfaktor von 0.23 für die S/O-Fassade und 0.25 für die S/W-Fassade.

Der Simulationsprozess orientiert sich weitgehend am beschriebenen Ablauf für die Regeneration mittels PVT- oder Flachkollektoren, weshalb auch diese Simulationen unter Berücksichtigung von Nachbareffekten erfolgten. 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 wurden keine zusätzlichen Regenerationsmassnahmen bereitgestellt, auch wenn deren Regenerationsanteil unter 100 % lag.

### **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 kürzere EWS-Länge möglich. Dadurch stellt sich bei gleichbleibender Entzugsleistung im Heizbetrieb eine tiefere Quelltemperatur ein, wodurch die Effizienz der WP sinkt. Weiter erhöht die Erschliessung zusätzlicher Wärmequellen den Stromverbrauch weiter. Um den Strombedarf der zusätzlichen Regenerationsmassnahmen einzuordnen, erfolgte ein Vergleich der zielführendsten Regenerationsvariante (geringster konstruktiver Aufwand und Regenerationsanteil > 80 %) mit der Ausgangsvariante (PVT-Dachanlage) und einem konventionellen EWS-System ohne Regeneration. Verglichen wurde der Stromverbrauch des primärseitigen Kreislaufes inkl. WP als auch der WP separat. Die Sekundärseite wurde vernachlässigt, weil diese über sämtliche Varianten identisch ist. Ebenfalls vernachlässigt wurde der Strombedarf für die Gebäudekühlung.

### 3. Ergebnisse

#### Regeneration mit ungedeckten PVT-Kollektoren

Bild 2 zeigt die mögliche Regeneration für jede Gebäudekategorie, wenn ungedeckte PVT-Kollektoren verwendet werden. Die Balken auf der linken Seite zeigen jeweils den Fall, in dem nur die erforderliche Anzahl von Kollektoren verwendet wird, während die Balken auf der rechten Seite den Fall mit der maximalen Anzahl von Kollektoren zeigen. Die grauen Balken stellen den Bruttowärmeentzug und die orangen Balken den Nettowärmeentzug dar. Ein Nettowärmeentzug von Null bedeutet 100 % Regeneration und ein positiver Nettowärmeentzug bedeutet weniger als 100 % Regeneration. Es ist zu erkennen, dass bei den grösseren Gebäuden U4, U5 und S4 eine vollständige Regeneration nicht möglich ist, selbst wenn die maximale Kollektorzahl verwendet wird. Bei den kleineren Gebäuden ist eine vollständige Regeneration möglich, jedoch werden bei Verwendung der maximalen Kollektorenzahl keine nennenswerten Regenerationsüberschüsse erzeugt. Dies bedeutet, dass auf dem Gebiet des Quartiers nicht genug Wärme für eine vollständige Regeneration vorhanden ist, selbst wenn man davon ausgeht, dass es möglich ist, die Überschusswärme zwischen den Gebäuden zu "teilen".

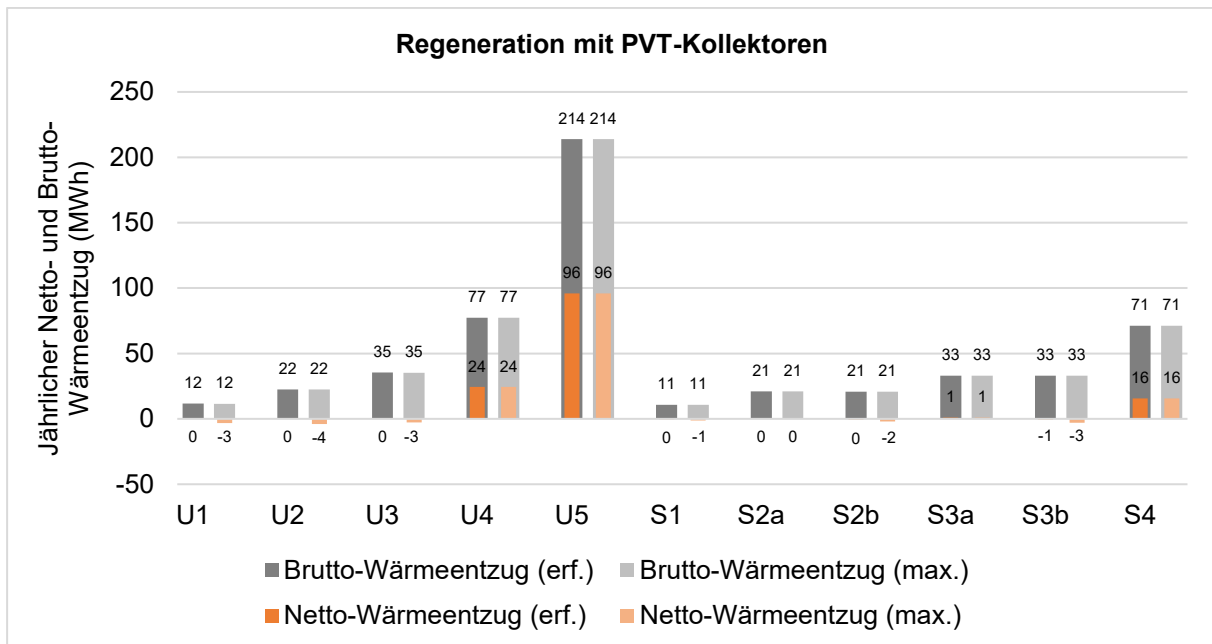


Bild 2: Jährlicher Netto- und Brutto-Wärmeentzug der EWS pro Gebäudekategorie bei einer Regeneration mit einer PVT-Dachanlage. Links mit der für eine vollständige Regeneration erforderlichen Kollektorzahl, rechts mit der maximal möglichen Kollektorzahl.

### Regeneration mit Flachkollektoren

Bild 3 zeigt die mögliche Regeneration bei Verwendung von Flachkollektoren. Ein beträchtliches Regenerationsdefizit ist nur bei dem grossen Gebäude U5 vorhanden. Wenn die maximale Anzahl von Kollektoren verwendet wird, weisen viele der Gebäudekategorien Regenerationsanteile von weit über 100 % auf, insbesondere im suburbanen Quartier.

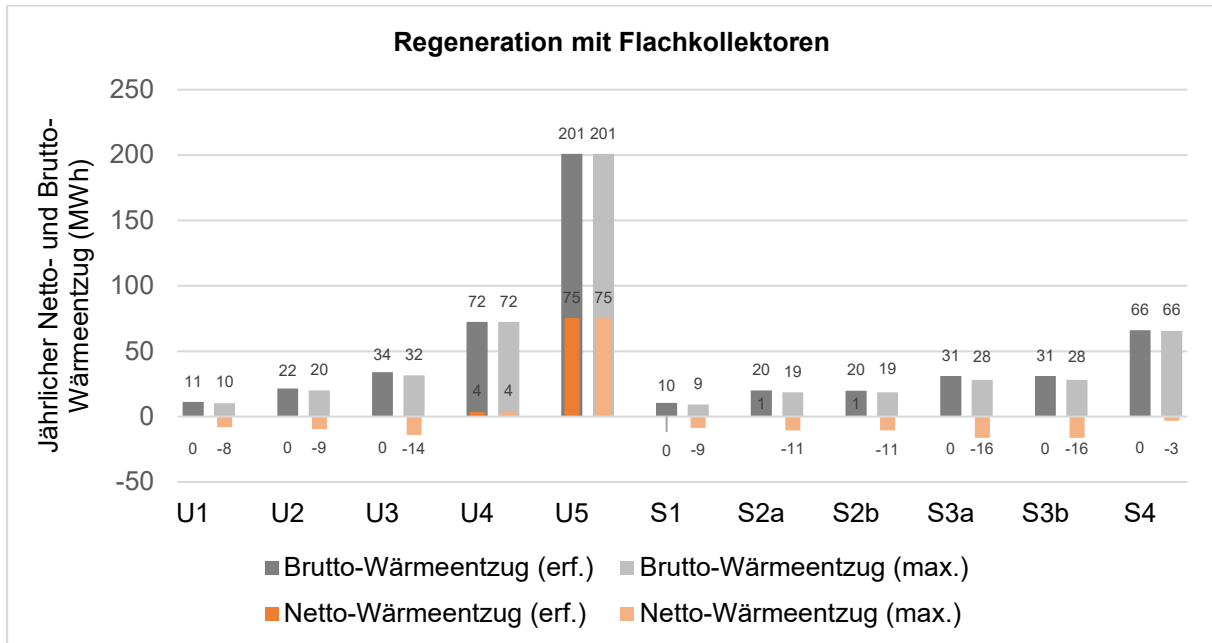


Bild 3: Jährlicher Netto- und Brutto-Wärmeentzug der EWS pro Gebäudekategorie bei Regeneration mit Flachkollektoren. Links mit der für eine vollständige Regeneration erforderlichen Kollektorzahl, rechts mit der maximal möglichen Kollektorzahl.

### Erforderliche Dachfläche für eine vollständige Regeneration

Bild 4 zeigt die mögliche Regeneration in Abhängigkeit vom Verhältnis der nutzbaren Dachfläche und dem jährlichen Wärmebedarf für PVT-Kollektoren und Flachkollektoren. Jeder Datenpunkt entspricht einem Modellgebäude. Für beide Kollektortypen lässt sich eine recht gute lineare Anpassung erzielen. Wie erwartet ist die mögliche Regeneration für eine bestimmte Dachfläche bei Flachkollektoren grösser als bei PVT-Kollektoren. Um eine Regeneration von 100 % zu erreichen, sind pro MWh jährlichen Wärmebedarfs etwa 1,8 m<sup>2</sup> unbedeckte PVT-Kollektoren oder etwa 1,2 m<sup>2</sup> Flachkollektoren auf der Dachfläche erforderlich. Oder, um es anders auszudrücken, bei der Verwendung von Flachkollektoren wird rund ein Drittel weniger Dachfläche für eine vollständige Regeneration benötigt als bei unabgedeckten PVT-Kollektoren.



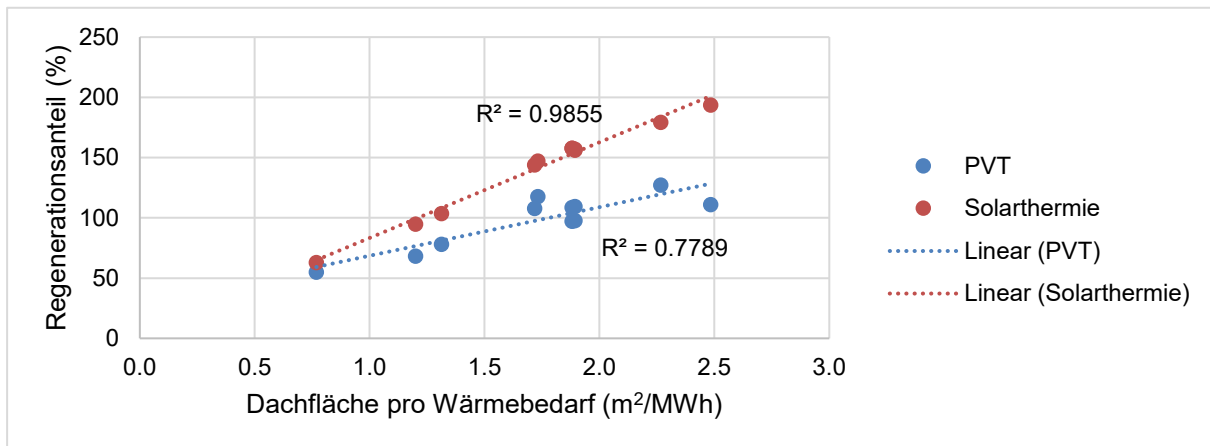


Bild 4: Möglicher Regenerationsanteil in Abhängigkeit der nutzbaren Dachfläche pro Wärmebedarf bei Verwendung maximaler Kollektorzahl von PVT- bzw. Flachkollektoren (Solarthermie).

### Zusätzliche Wärmequellen für Beispielgebäude mit herausfordernder Regeneration

Sowohl zusätzliche PVT-Fassaden (S/O und S/W) als auch ein zusätzlicher 40 kW LWWÜ führen zu einer ähnlichen Reduktion des Netto-Wärmeentzugs aus den EWS um 76 % bzw. 75 % (Bild 5). 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. Die Kombinationen weiterer Wärmequellen führt entsprechend zu einer geringen Steigerung der Regenerationsanteile, wie aus Bild 5 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 % gegenüber der Ausgangsvariante.

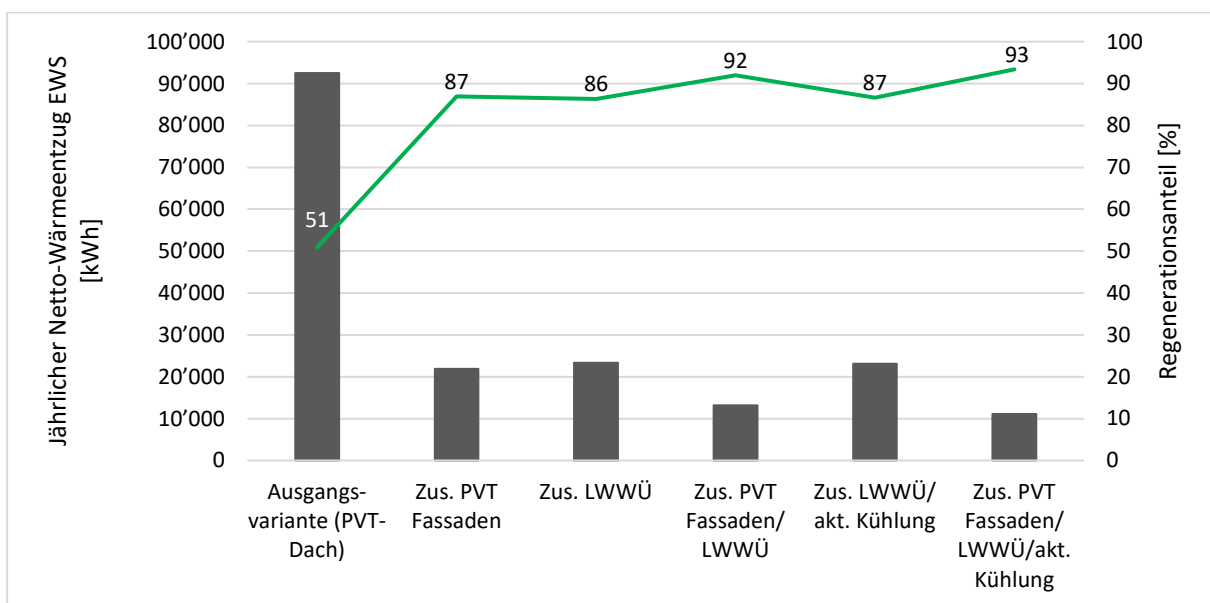


Bild 5: Jährlicher Netto-Wärmeentzug aus den EWS für ausgewählte zusätzliche Regenerationsmassnahmen und Kombinationen davon, inkl. den prozentualen Regenerationsanteilen.

### Stromverbrauch Regenerationsmassnahmen

Die Untersuchung des Stromverbrauchs durch die zusätzlichen Regenerationsmassnahmen erfolgte 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 erfolgte ein Vergleich des Stromverbrauchs dieser Variante mit dem der Varianten ohne Regeneration sowie mit einer PVT-Dachanlage.

Erwartungsgemäss liegt der Stromverbrauch sämtlicher Varianten mit Regeneration initial über der Variante ohne Regeneration (Bild 6). Über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg bleibt dieser jedoch höher als bei der Variante ohne Regeneration. Würde hingegen auf eine Kürzung der EWS verzichtet, reduziert sich der aufsummierte 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. Dies entspricht einer Reduktion des Stromverbrauches um rund 8.5 % gegenüber der Variante mit gekürzten EWS. Die Effizienzgewinne beim Betrieb der WP überwiegen in diesem Fall den Strommehrverbrauch der Pumpen und des LWWÜ bereits nach 15-20 Jahren.

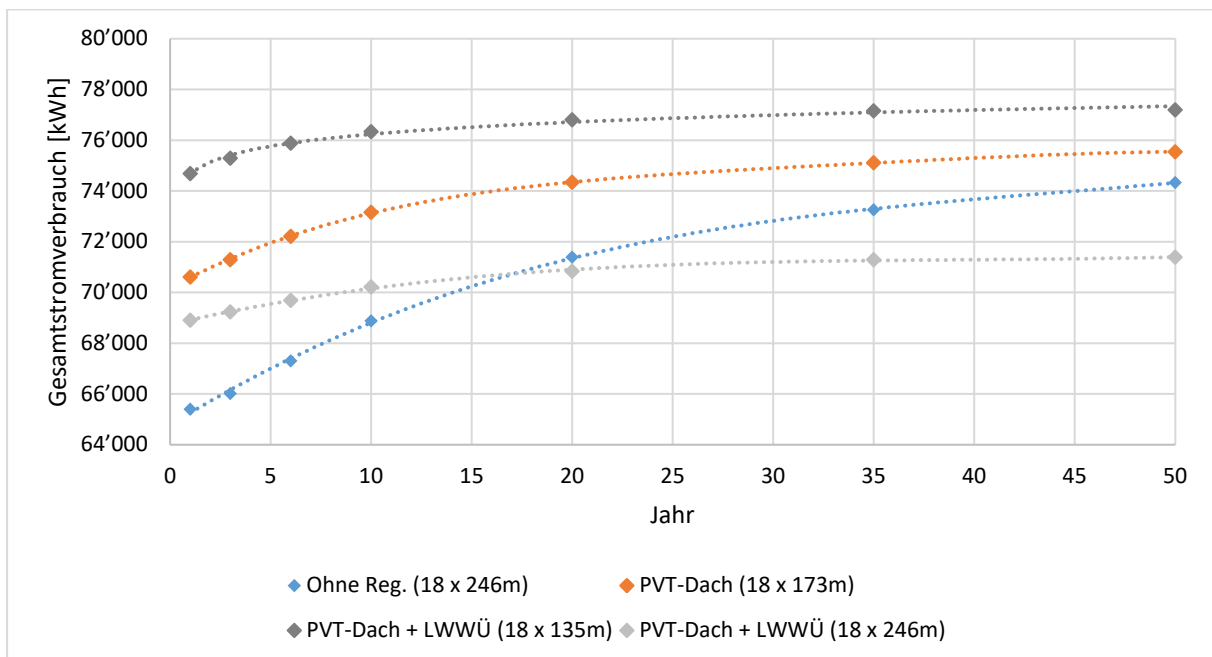


Bild 6: Stromverbrauch über 50 Betriebsjahre der Variante ohne Regenerationsmassnahme sowie mit PVT-Dachanlage und PVT-Dachanlage mit zusätzlichem LWWÜ mit gekürzten und originalen EWS-Längen.

Die saisonale Verteilung des prozentualen Strommehrverbrauchs der Variante mit PVT-Dachanlage und LWWÜ relativ zur Variante ohne Regeneration wird in Bild 7 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 Gegensatz 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. 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. Je nach Variante beträgt der Deckungsgrad 80 bis 90 %.

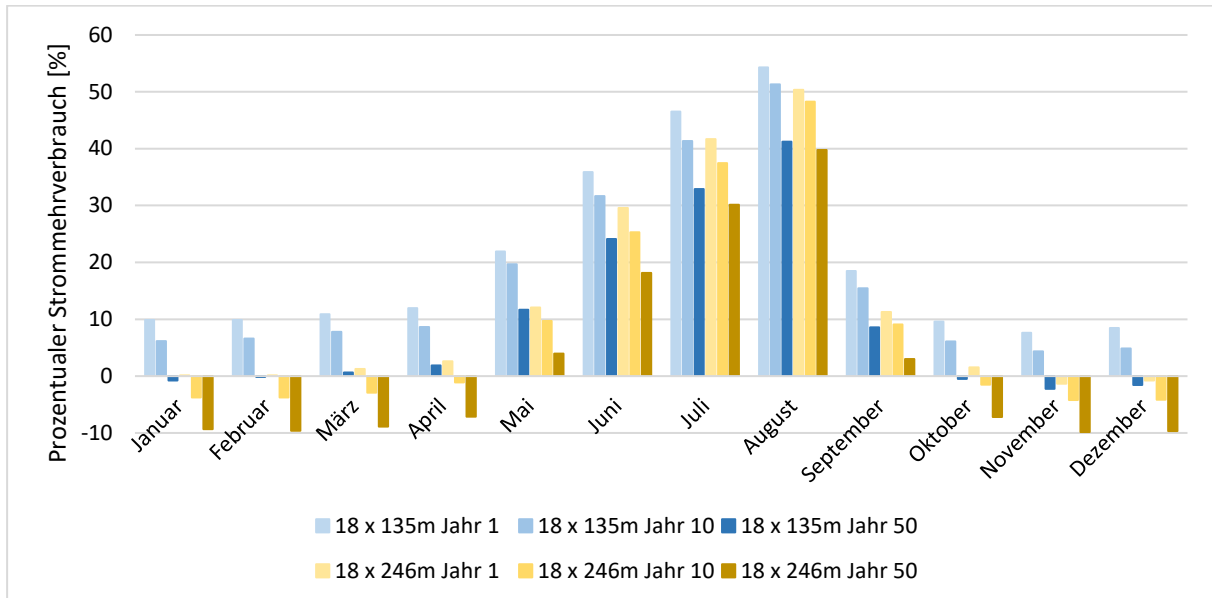


Bild 7: Prozentualer Strommehrverbrauch der Variante mit einer PVT-Dachanlage und einem LWWÜ mit EWS-Längen von 135 bzw. 246 m gegenüber einer Variante ohne Regenerationsmassnahmen für die Betriebsjahre 1, 10 und 50.

#### 4. Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine vollständige Wärmeversorgung aus solarthermisch regenerierten EWS in suburbanen Quartieren grundsätzlich möglich ist, solange die grossen Gebäude nicht konzentriert und dicht beieinanderstehen. In urbanen Quartieren können nur die kleineren Gebäude durch solarthermische Wärme vom Dach vollständig regeneriert werden. Die meist grosse Anzahl grösserer Gebäude, die oft dicht beieinanderstehen, erschwert eine rein solarthermische Regeneration, da die Dachflächen im Vergleich zum Wärmebedarf meist klein sind. Soll das gesamte Quartier mit EWS-Wärmepumpensystemen beheizt werden, müssen zusätzliche Wärmequellen, wie z.B. PVT-Fassadenanlagen, LWWÜ und/oder Abwärme aus der Gebäudekühlung, erschlossen werden. Damit kann auch bei Gebäuden mit herausfordernden Regenerationsbedingungen ein Regenerationsanteil von mehr als 80 % erreicht werden.

Die zusätzliche Betriebszeit der Umwälzpumpen und gegebenenfalls des zusätzlichen LWWÜ bei der Regeneration der EWS führen zu einem Strommehrverbrauch. Dessen Ausmass ist massgeblich von der Effizienz und damit der Wahl der Komponenten abhängig. Besonders bei LWWÜ findet sich eine grosse 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.

*Weil der Strombedarf bei der Regeneration meist zeitgleich mit der solaren Stromproduktion durch die PVT-Kollektoren (Deckungsgrad von 80-90 %) auftritt, stellt der Strombedarf der Regeneration 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.*

*Vergleicht man die Eignung von unabgedeckten PVT-Kollektoren mit Flachkollektoren, benötigen letztere etwa ein Drittel weniger Dachfläche zur Regeneration. Erstere ermöglichen jedoch die gleichzeitige Erzeugung von photovoltaischem Strom auf derselben Dachfläche. Bei der Bewertung der verschiedenen Kollektortypen für die Regeneration sollte dieser Aspekt nicht vernachlässigt werden. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund der zunehmenden Beliebtheit von Wärmepumpensystemen, welche die Nachfrage nach nachhaltigem Strom insbesondere im Winter, wenn Strom aus PV knapp ist, erhöhen wird.*

*Weitere Forschung ist erforderlich, um den Nutzen zusätzlicher Wärmequellen für die Regeneration von grossen Gebäuden mit begrenzter Dachfläche zu bewerten. Wenn PVT-Kollektoren eingesetzt werden, ist beispielsweise ein bivalenter Betrieb mit den PVT-Kollektoren als eigenständige Wärmequelle während der Übergangsmomente zu prüfen. Weiter könnte die Nutzung des Gebäudes als thermischen Speicher und eine Verschiebung der Wärmeproduktion von der Nacht in den Tag mittels intelligenter Steuerung Potenzial erschliessen. Neben thermischem Potenzial bestünde damit zudem die Möglichkeiten, den Grad der elektrischen Autonomie zu erhöhen und damit den Bedarf an Strom aus dem Netz zu reduzieren.*

## Quellen

- [1] J. Poppei und R. Schwarz: Gegenseitige Beeinflussung oberflächennaher Geothermieanlagen - Instrumente zum Management (knapper werdender) Ressourcen, Der Geothermiekongress, 2010.
- [2] R. Kriesi: Analyse von Erdwärmesondenanlagen, Bundesamt für Energie BFE, 2017.
- [3] R. Kriesi und R. Wagner: Bewertung älterer Erdsonden in der Stadt Zürich, Stadt Zürich, 2018.
- [4] J. Poppei, C. Wilhelm, V. Gischig und M. Hess: Überprüfung der Auslegungskennwerte zur strategischen Planung von Erdwärmesonden: Anwendungsbeispiele des grundstücksflächen-bezogenen Wärmeentzugs, Bundesamt für Energie BFE, 2019.
- [5] H.J.L. Witte: A novel tool for assessing negative temperature interactions between neighbouring borehole heat exchanger systems, 14th International Conference on Energy Storage, 2018.
- [6] M.L. Fasc und A. Lazzarotto: A novel model for the estimation of thermal influence of neighbouring borehole heat exchangers, European Geothermal Congress 2019: The Hague, 2019.
- [7] D. Sauter, M. Hunziker, J. Poppei, F. Cochand, M. Hubbuch, N. Moro und J. Rohrer: SolSeasStore – Saisonale Wärmespeicherung in städtischen Quartieren mit Erdwärmesonden, Bundesamt für Energie BFE, 2020.
- [8] P. Persdorf, F. Ruesch und M. Haller: RegenOpt - Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen, Stadt Zürich, 2015.
- [9] H. Wallbaum, N. Heeren, M. Jakob und G. Martius: Gebäudeparkmodell Büro-, Schul- und Wohngebäude. Vorstudie zur Erreichbarkeit der Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft für den Gebäudepark der Stadt Zürich, Stadt Zürich, 2010.
- [10] N. Moro, D. Sauter, S. Strebel und J. Rohrer: Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW, 2021.