

Flächenreduktionspotenzial solarthermisch unterstützter Erdwärmekollektoren zur Beheizung eines repräsentativen Mehrfamilienhauses mit 8 Wohneinheiten

Oliver Mercker, Fabian Hüsing, Oliver Kastner, Peter Pärisch

Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, www.isfh.de

Abstract

Die Reduktion des Energiebedarfs zur Wärmeversorgung von Gebäuden ist ein Ziel der nationalen Klimaschutzpolitik. Neben der Gebäudedämmung stellt die Steigerung der Effizienz der Anlagentechnik hierfür die wichtigste Einflussmöglichkeit dar. Der Einsatz erneuerbarer Energien erlaubt dabei primärenergetisch hocheffiziente Wärmeversorgungskonzepte. Die Umsetzung von regenerativen Versorgungskonzepten fällt demgegenüber weit hinter den Erwartungen zurück. Im Falle von Wärmepumpensystemen mit Erdwärmekollektoren (EWK) als Quelle liegt dies maßgeblich am sehr hohen Flächenbedarf – insbesondere im Mehrfamilienhausbereich. Der Beitrag zeigt auf, wie durch die solarthermische Regeneration des EWK eine deutliche Verringerung der notwendigen EWK-Fläche im Vergleich zur Auslegung nach der VDI Richtlinie 4640 Blatt 2 erreichbar ist. Für ein repräsentatives Mehrfamilienhaus mit 8 Wohneinheiten belegen dynamische Systemsimulationen in TRNSYS, dass die quellenseitige Einbindung von 50 m² Schwimmbadabsorber eine Reduktion der nötigen EWK-Fläche von über 800 m² auf zirka 400 m² und somit auf 50 % der Dimensionierung nach Norm erlaubt.

1. Einleitung

Etwa die Hälfte der rund 40 Mio. Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) befindet sich in Mehrfamilienhäusern (MFH) und somit auch ein Großteil der Bevölkerung sowie des damit verknüpften Bedarfs an Wärme für Heizung und Trinkwarmwasser (TWW) [Eff15]. Die energetische Sanierung von MFH spielt damit eine wichtige Rolle für den Klimaschutz. Neben der Sanierung der Gebäudehülle stellt der Einsatz effizienter Anlagentechnik einen zentralen Ansatz zur energetischen Sanierung von MFH dar, wobei die Einbeziehung regenerativer Energiesysteme, wie sie bspw. im vorliegenden Projekt untersucht wird, primärenergetisch besonders vorteilhaft sein kann.

Zugleich sind derzeit sowohl Geo- als auch Solarthermieanlagen im MFH-Bereich in der BRD nahezu marginalisiert. Am Beispiel des Flächenbedarfs von Erdwärmekollektoren (EWK) – bezogen auf die verfügbare Grundfläche pro Wohneinheit – ist nachvollziehbar, dass der Platzbedarf von erdreichgekoppelten Systemen im MFH nochmals kritischer ist als im Einfamilienhaus (EFH). Daher stellt sich die Frage, ob durch eine geeignete Kopplung von EWK mit Solarthermie (ST) im MFH eine ähnliche EWK-Flächenreduktion (von bis zu 50 % im Vergleich zur Dimensionierung nach VDI Richtlinie 4640 Blatt 2) wie im EFH erreichbar ist (siehe hierzu [Hüs18]).

Um die Übertragbarkeit von EFH-Simulationsergebnisse auf die Situation in MFH zu überprüfen, wurden gesonderte Skalierungsstudien durchgeführt. Die fehlende Übertragbarkeit der Ergebnisse hat dabei im Wesentlichen die folgenden Ursachen:

- **Skalierung des Trinkwarmwasserbedarfs:**

Das TWW-Zapfprofil des MFH (als Summe bzw. Überlagerung der individuellen TWW-Zapfprofile von acht Wohneinheiten) skaliert nicht linear mit der Anzahl der Bewohner*innen eines Gebäudes. Stattdessen kommen stochastische Effekte (oft ausgedrückt in Form der „Gleichzeitigkeit“ [Rec07]) zum Tragen. Diese beschreiben die Verstetigung des Zapfprofils mit zunehmender Anzahl der Bewohner*innen, mit Wirkung auf die Dynamik einer TWW-Anforderung im MFH im Vergleich zu derjenigen im EFH.

- **Skalierung des Heizwärmebedarfs:**
Aufgrund des mit der Gebäudegröße abnehmenden Anteils an Umhüllungsfläche pro Volumen (sowie pro Person) nimmt der Wohnflächen-spezifische Raumwärmebedarf mit der Gebäudegröße ab. Dadurch steigt der Anteil des TWW-Energiebedarfs am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes tendenziell. Dieser Effekt stellt sich auch durch eine verbesserte Gebäudedämmung ein.
- **Kapazitive Volumeneffekte des Arbeitsmediums:**
Ein weiterer Einfluss ist das abweichende Verhältnis von WP-Entzugsleistung zur Wärmekapazität des im Quellenkreis (bzw. in den EWK-Rohren) befindlichen Fluids, welches sich aus der Dimensionierung des EWK nach VDI 4640 und der WP-Auslegung anhand von TRNSYS-Simulationen ergibt. Dieses Verhältnis stellt eine Art Zeitkonstante dar, die angibt, wie lange es dauert, bis sich der WP-Betrieb merklich auf die Quellentemperatur auswirkt.
- **Wärmeversorgungskonzept:**
Hinzu kommt das abweichende Wärmeversorgungskonzept für das MFH, welches sich aus Erkenntnissen zur effizienten Wärmeversorgung von MFH im Projekt „MFH-re-Net“ ergab [Mer17]. Dies führt in der Folge zu anderen Anforderungen an die WP (Senktemperaturen und Senkodynamik) und somit auch an den EWK sowie die Solarkollektoren im MFH.
- **Nutzer*innenverhalten:**
Neben diesen systemtechnischen Aspekten, die sich auf die Vollbenutzungsstunden und die geordnete Jahresdauerlinie auswirken, kommt zusätzlich der sozio-ökonomische Aspekt hinzu, dass die Bewohner*innen einer Wohnung in MFH oftmals nicht gleich die Besitzer*innen sind, was sich bspw. bezüglich der Möglichkeit der (temporären) Nichteinhaltung der Komfortanforderungen auswirkt – ein Aspekt der in Simulationen ohnehin meist vernachlässigt wird.

Zur Untersuchung dieser Effekte wird ein repräsentatives MFH-Gebäudemodell verwendet, welches im Projekt „MFH-re-Net“ (FKZ: 03ET1194A) entwickelt wurde [Mer17]. Das betrachtete Gebäudemodell – einschließlich eines detailliert abgebildeten Wärmeverteilnetzes – wurde zu diesem Zweck mit einem Modell zur Erdwärmeversorgung mittels EWK und WP gekoppelt, welches ebenfalls am ISFH in dem Projekt „Terra-Solar-Quelle“ (FKZ: 03ET1275A) entwickelt wurde. Das Wärmeversorgungskonzept entspricht den Empfehlungen des Projekts „MFH-re-Net“ zur Gestaltung eines hocheffizienten Systems. Die für diesen Beitrag wichtigen Modelldetails werden im Abschnitt 2 erläutert. In Abschnitt 3 werden die Bewertungskriterien für die in Abschnitt 4 und 5 beschriebenen Simulationen vorgestellt. In Abschnitt 5 werden Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Beschränkungen des Solarkollektorbetriebs vorgestellt. Abschnitt 6 enthält ein Fazit sowie einen Ausblick auf mögliche Folgefragen.

2. Simulationsmodell und Randbedingungen

Das Gebäudemodell basiert auf dem Grundriss eines realen MFH in Hannover. Die geometrischen und bauphysikalischen Daten wurden so gewählt, dass sie denen eines typischen – das heißt eines am häufigsten anzutreffenden – MFH in der BRD entsprechen [Sta10, Die10]. Das Modellgebäude hat vier Etagen mit je zwei nebeneinander spiegelbildlich und übereinander identisch aufgebauten Wohneinheiten. Jede Wohneinheit hat zirka 65 m² Wohnfläche, die sich auf fünf beheizte Räume (Wohnzimmer, Kinderzimmer, Elternzimmer, Bad, Küche) und einen unbeheizten Flur aufteilen. Es werden jeweils zwei Personen pro Wohnung berücksichtigt [Sta10]. Zudem weist das verwendete Gebäudemodell einen unbeheizten Keller, ein unbeheiztes Treppenhaus und ein Flachdach auf. Die Bauweise bezieht sich auf eine Errichtung des Gebäudes in den 1960er Jahre, weshalb entsprechende Wandaufbauten und typische Konstruktionen dieser Zeit berücksichtigt sind [Log11, Den04, Böh99].

Die Beheizung des Gebäudes erfolgt über Radiatorheizkörper, die über einen im Keller stehenden zentralen Pufferspeicher mit Wärme versorgt werden. Die Beladung des Pufferspeichers übernimmt

eine WP, deren Quellenwärme im Modell durch einen EWK bereitgestellt wird. Die TWW-Bereitung erfolgt in dezentralen Wohnungsstationen nach dem Durchflussprinzip unter Verwendung von Wärme aus dem zentralen Pufferspeicher. Die Wärmeverteilungen des Zweileiternetzes vom Keller zu den Wohnungen verlaufen in Leitungsschächten (ehemalige Schornsteine), welche die übereinanderliegenden Wohnungen jeweils im Flur erschließen und die Heizkörper dann über ein Etagenringleitungsnetz innerhalb der Wohnung versorgen. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt den Grundriss einer Etage des Referenzgebäudes (*links*) sowie eine dreidimensionale Darstellung des MFH (*rechts*).

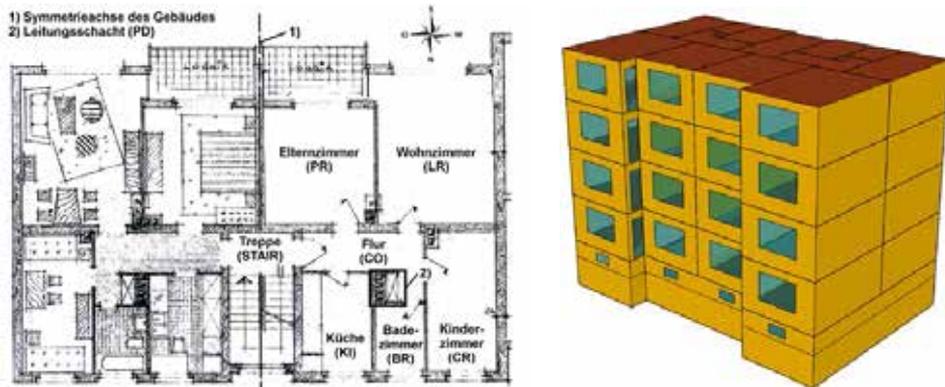


Abbildung 1: Grundriss einer Etage des betrachteten MFH (links) sowie 3D-Modell (rechts)

Das Gebäude wird stets im energetisch sanierten Zustand betrachtet, das heißt mit ausreichender EPS-Dämmung für Kellerdecke, Dach und Außenwand sowie neuen Fenstern – gemäß den Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV) aus dem Jahr 2014 (Höchstwerte von Bauteilen) [EnE14].

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Merkmale des simulierten MFH zusammengefasst. Weitere Details zum MFH-Modell enthält der frei verfügbare Abschlussbericht zum Projekt „MFH-re-Net“ [Mer17].

Tabelle 1: Zusammenstellung wesentlicher Merkmale des simulierten Gebäudes

Merkmal	Wert	Bemerkung
Etagen	4	Plus unbeheizter Keller
Wohnungen	8	-
Zimmer je Wohnung	5 (beheizt)	Plus unbeheizter Flur
Wohnfläche ¹⁾ je Wohnung	65,17 m ²	-
Personen ²⁾ je Wohnung	2	-
Sonstige Räume	Treppenhaus und Keller	Beide unbeheizt
Dachform	Flachdach	-
Baujahr	1960er	-
Standort / Klimadaten	Zürich	Typisches gemäßigtes, mitteleuropäisches Klima

- 1) Die angegebene Wohnfläche entspricht nicht der EnEV-Fläche sondern der tatsächlichen Grundfläche. Der Unterschied ist insbesondere dann zu beachten, wenn Vergleiche mit anderen Quellen angestellt werden.
- 2) Die Berücksichtigung der Personen erfolgt dabei stark vereinfacht in Form eines ganzjährig konstanten, internen Wärmegewinns von 3 W/m² gemäß [Log15].

Der TWW-Nutzwärmebedarf beträgt $12,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ [EnE14]. Die Raumsolltemperatur beträgt $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und wird ganzjährig angestrebt. Da jedoch keine aktive Kühlung erfolgt, können an wärmeren Tagen auch entsprechend höhere Raumtemperaturen auftreten. Ein Schema des simulierten Wärmeversorgungssystems ist in Abbildung 2 dargestellt.

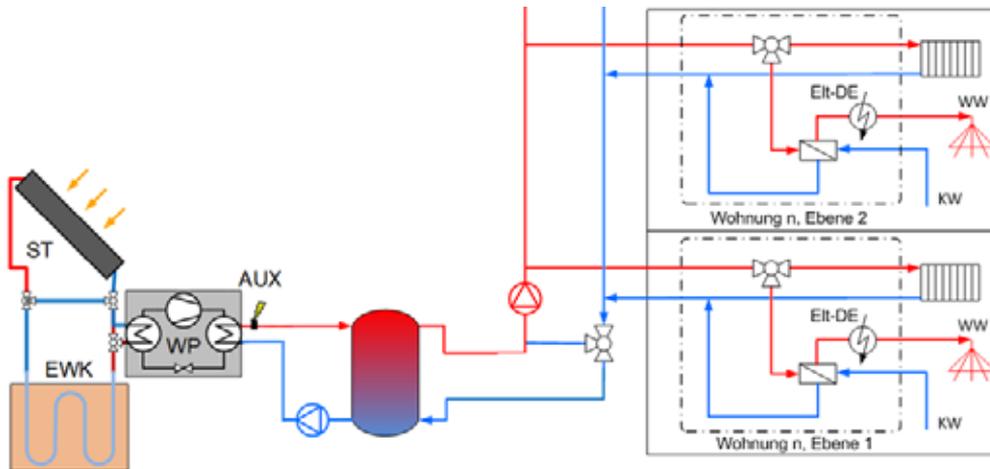


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kopplung des Wärmeversorgungssystems aus „Terra-Solar-WP“ mit dem MFH als thermische Last aus „MFH-re-Net“

Die erdreichgekoppelte WP mit einer Nennleistung von 18 kW ($\text{COP} = 5,4$ im Betriebspunkt B0/W29) beliefert einen 800 Liter Pufferspeicher, der die Schnittstelle zur thermischen Last des MFH darstellt.

Das Modell berücksichtigt außerdem die Nutzung solarthermischer Wärme zur thermischen Regeneration des EWK. Hierzu wird ein einfacher Schwimmbadabsorber verwendet, der mit Hilfe des TRNSYS-Types 203 simuliert wird. Der in diesem Type optional vorhandene PV-elektrische Modellzweig wird zu diesem Zweck hier abgeschaltet und der thermische Modellzweig wird wie folgt parametrisiert: $\eta_0 = 0,91$; $b_1 = 14,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $b_2 = 2,93 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ K})$; $b_u = 0,035 \text{ s}/\text{m}$, $c_{\text{eff}} = 34 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, der Quotient aus Emissions- und Absorptionsgrad des Absorbers beträgt $0,84/0,93$. Der Einfluss von Eisbildung auf der Absorberoberfläche wird nicht abgebildet. Der Type 203 kann vom ISFH kostenlos bezogen werden. Als Arbeitsfluid wird im Solarkollektor dieselbe Sole verwendet wie im EWK. Die solarthermische (ST) Wärme wird dem quellenseitigen Fluidkreislauf der WP hierfür nach dem Verdampferdurchlauf per Dreiwegeventil zugeführt. Durch diese Einbindung zirkuliert das solarthermisch erwärmte Arbeitsfluid stets zunächst durch den EWK. Die thermische Kapazität des EWK dämpft somit etwaige Temperaturspitzen aus dem Solarkollektor. Diese Konfiguration soll Überschreitungen der maximal zulässigen Verdampfer Eintrittstemperatur auf Seiten der WP vermeiden.

Eine zentrale elektrische Nachheizung (AUX) erfolgt nur, wenn die Quellentemperaturen der WP unter $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ sinken. Dieses Vorgehen entspricht einer bivalent-alternativen Betriebsweise.

Im Quellenkreis treten die in Tabelle 2 aufgeführten Betriebszustände auf. Der Schwimmbadabsorber kann bei ausreichendem Temperaturniveau in den Quellenkreis hydraulisch zugeschaltet werden und wird dann stets mit seinem Nennmassenstrom \dot{m}_{ST} von $50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h})$ betrieben. Im EWK ist der Massenstrom abhängig vom aktuellen Betriebszustand der WP: Ist die WP in Betrieb, wird der EWK mit dem Nennmassenstrom der WP \dot{m}_{WP} von $3800 \text{ kg}/\text{h}$ durchströmt; Liegt Solarertrag vor, aber kein Wärmebedarf, so wird der EWK mit dem Nennmassenstrom des Solarkollektors durchströmt und dabei thermisch regeneriert. Die maximale Eintrittstemperatur in den EWK ist stets auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$ begrenzt.

Tabelle 2: Betriebszustände der bivalenten Wärmequelle

Betriebsmodus	Systemzustand		Massenstrom/Steuersignal		
	Solarangebot	Wärmebedarf	ST	EWK	WP
Aus	0	0	0	0	0
Regeneration	1	0	\dot{m}_{ST}	\dot{m}_{ST}	0
Monovalente Quelle	0	1	0	\dot{m}_{WP}	1
Bivalente Quelle	1	1	\dot{m}_{ST}	\dot{m}_{WP}	1

Das Vorliegen von nutzbarem Solarangebot wird anhand der Temperaturdifferenz ΔT_{ein} zwischen der Solarkollektortemperatur $T_{Solarkollektor}$ und der Austrittstemperatur des EWK $T_{EWK,aus}$ nach Gleichung (1) ermittelt. Ab einer Temperaturdifferenz ΔT_{ein} von 3 K kann die Solarwärme genutzt werden:

$$\Delta T_{ein} = T_{Solarkollektor} - T_{EWK,aus} > 3 \text{ K} \quad (1)$$

Fällt die Temperaturdifferenz unter einen Wert von $\Delta T_{aus} = 1 \text{ K}$, wird der Solarkollektor nicht mehr durchströmt. Für den Fall, dass die Austrittstemperatur des Erdwärmekollektors nur 1 K höher als die minimale Quellentemperatur der WP von -5 °C liegt, bedeutet dies, dass die Erdwärmequelle nahezu erschöpft ist. Dann wird die nötige Temperaturdifferenz für den Betrieb des Solarkollektors gemäß Gleichung (2) weiter abgesenkt.

$$T_{EWK,aus} \leq -4 \text{ °C} \rightarrow \Delta T_{ein} = T_{Solarkollektor} - T_{EWK,aus} > 1 \text{ K} \quad (2)$$

Bei Erschöpfung der Erdwärmequelle erfolgt die Wärmeversorgung durch eine elektrische Widerstandsheizung. Es zeigt sich, dass dieser Betriebszustand durch den Solarkollektor selbst bei kalter Witterung vermieden werden kann. Eine minimale Kollektortemperatur, z. B. 0 °C zur Vermeidung von Frost, ist – sofern nicht explizit darauf hingewiesen wird – in den Simulationen nicht implementiert. Der Phasenwechsel des Niederschlags oder des Kondensats auf den Solarkollektoren von flüssig nach fest wird nicht simuliert, da zurzeit kein geeignetes Modell in TRNSYS existiert.

Durch den Vergleich der Solarkollektortemperatur zur Austrittstemperatur des EWK ist sichergestellt, dass dem Erdreich tatsächlich Wärme zugeführt wird. Alternativ wäre es auch möglich den Solarkollektor in Betrieb zu nehmen, sobald dem Quellenkreis Wärme zugeführt wird (hier nicht betrachtet). Bezugstemperatur wäre dann die Austrittstemperatur aus dem Verdampfer der Wärmepumpe.

Die Vorlauftemperatur des Zweileiternetzes wird (sofern nicht anders angegeben) so eingestellt, dass ein Minimalwert von 40 °C zur TWW-Bereitung eingehalten wird. Wenn die Anforderungen der Raumheizung über diesen Minimalwert (genannt: „Sockeltemperatur“) hinausgehen, dann folgt die Vorlauftemperatur des Zweileiternetzes der Heizwärmeanforderung. Die temporär erforderliche Zusatzheizung zur Erwärmung von TWW auf 45 °C Zapf temperaturniveau wird durch dezentrale elektrische Heizstäbe in den Wohnungsstationen nachgeliefert. Dieses Wärmeversorgungskonzept stellt ein primärenergetisches Optimum (für nicht-regenerative Versorgungskonzepte) dar, da die nicht nutzbaren Wärmeverteilungsverluste minimiert werden (siehe [Mer17]). Zudem bieten sich gute Anknüpfungspunkte für die (primärenergetisch noch vorteilhaftere) regenerative Versorgung über eine zentrale WP, da geringe Netztemperaturen eingestellt werden können – auch ohne Fußbodenheizung.

Die Dimensionierung des EWK bezieht sich auf den Verlegeabstand der Erdkolektorrohre dx und die Gesamtfläche des Erdkolektors A_{EWK} . Diese erfolgt hier gemäß dem Gründruck von Blatt 2 der VDI Richtlinie 4640 aus dem Jahr 2015. Die Simulationen beschränken sich hier auf die Berücksichtigung einer einzigen Bodenart mit einer mittlerer Wärmeleitfähigkeit, die an die Bodenart „Lehm“ gemäß VDI 4640-2 angelehnt ist und folgende Eigenschaften hat: Wassergehalt 28 Vol.-%; Wärmeleitfähigkeit $1,52 \text{ W/(m K)}$ und Wärmekapazität 1218 J/(kg K) im ungefrorenen Zustand; Wärmeleitfähigkeit $2,35 \text{ W/(m K)}$ und Wärmekapazität 865 J/(kg K) im gefrorenen Zustand; sowie eine Rohdichte von

1815 kg/m³. Für die Berechnungen wird zudem die Klimazone 13 zu Grunde gelegt sowie ein Wärmebedarf des sanierten MFH am Standort Zürich von 22,3 MWh/a für die Raumheizung und 8110 kWh/a für die TWW-Bereitung. Für den vorliegenden Fall einer laminaren Durchströmung der 32 mm PE-Rohre des EWK ergibt sich eine notwendige EWK-Fläche von 844,44 m², was bei dem gewählten Rohrabstand von 0,52 m einer Gesamtröhrlänge von 1623,93 m entspricht.

Die Kopplung von WP und Pufferspeicher erfolgt über einen Speicheranschluss in einer festen Höhe von 95 % des Speichers und einen weiteren Speicheranschluss in einer festen Höhe von 50 % (an der unteren Grenze des Bereitschaftsvolumens). Die WP-Regelung sorgt dafür, dass das Bereitschaftsvolumen stets mindestens die gewünschte Vorlauftemperatur $T_{VL,Soll}$ des Zweileiternetzes bedienen kann. Fällt die Temperatur in 50 % Speicherhöhe unter die $T_{VL,Soll}$ des Netzes, wird die WP so lange betrieben, bis an dieser Stelle wieder die $T_{VL,Soll}$ plus eine Übertemperatur von 5 K auftreten. Die Maximaltemperatur im Speicher wurde auf 65 °C festgelegt. Fällt die Temperatur in 95 % Speicherhöhe unter die $T_{VL,Soll}$ des Netzes, dann wird der zentrale Heizstab (AUX) aktiviert, solange bis an dieser Stelle wieder die $T_{VL,Soll}$ plus eine Übertemperatur von 5 K eingestellt ist. Die Speicherentladung erfolgt über einen Anschluss in 100 % Speicherhöhe und einen Rücklauf in 0 % Speicherhöhe.

3. Bewertungskriterien

Die Analyse der im kommenden Abschnitt 4 vorgestellten Simulationsergebnisse erfordert geeignete Kriterien. Für Wärmepumpensysteme mit geothermischer Wärmequelle sind dabei zwei Aspekte zu bewerten: die Effizienz der Wärmeversorgung und die nachhaltige Nutzung der Wärmequelle.

Zur Bestimmung der Effizienz wird die Systemjahresarbeitszahl JAZ_{sys} betrachtet. Diese setzt die Nutzwärme (für die Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung) ins Verhältnis zur dafür aufgewendeten elektrischen Energie (für den Betrieb des Kompressors, der elektrischen Nachheizung, der Fluidpumpen und des Reglers). Sie entspricht der im Task44 definierten Bilanzgrenze „SHP+“ (vgl. [Pär13]) und berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$JAZ_{sys} = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{Stromverbrauch}} = \frac{\int (\dot{Q}_{RH} + \dot{Q}_{TWW}) dt}{\int (P_{WP_{Komp}} + P_{Nachheiz} + P_{Pumpen} + P_{Regler}) dt} \quad (3)$$

Zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung der Wärmequelle sind bezogen auf EWK insbesondere Gefriervorgänge im Erdreich zu betrachten. Abbildung 3 zeigt schematisch die zu erwartende Eisbildung bei Betrieb eines EWK im Winter.

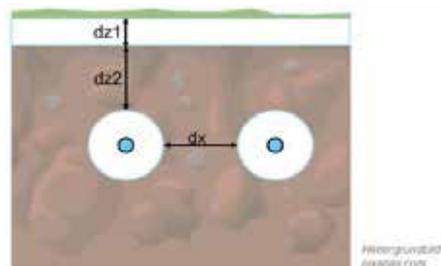


Abbildung 3: Frostzustände im Umfeld der Rohre eines Erdwärmekollektors

Neben dem Frost an der Oberfläche (Dicke $dz1$) kann sich am EWK Eis um die Kollektorrohre ausbilden. Zwei Zustände sind in diesem Zusammenhang als kritisch zu betrachten und müssen daher im Betrieb ausgeschlossen werden:

- Kollidiert der Oberflächenfrost ($dz1$) in vertikaler Richtung mit dem Kollektorfrost ($dz2 = 0$) sind Hebungen an der Erdoberfläche zu erwarten.

- Ist das Frostgebiet um die Kollektorrohre horizontal geschlossen, während kein Oberflächenfrost vorliegt ($dx = 0$ & $dz1 = 0$) wird die Versickerung von Niederschlägen behindert. In diesem Fall droht eine Verschlämmung des Bodens.

Zur Auswertung wird das Auftreten dieser Frostzustände in Stunden pro Jahr betrachtet. Sowohl die zur Berechnung der Systemjahresarbeitszahl benötigten Energiemengen, als auch die Ausbreitung gefrorener Gebiete im Erdreich werden im Verlauf der Simulationsstudien als Auswertegrößen aufgezeichnet und zur Berechnung der Kennzahlen genutzt.

4. Parameterstudie mit Schwimmbadabsorber

Um das Potenzial zur Verringerung der Erdwärmekollektorfläche A_{EWK} (als Produkt aus EWK-Rohrlänge und –Rohranzahl sowie deren Verlegeabstand) im MFH zu bestimmen, wurden zunächst Simulationen mit unterschiedlich dimensionierten EWK-Systemen ohne solarthermische Unterstützung durchgeführt. Diese stellen eine Referenz dar und zeigen auf, ab welchen Kombinationen von A_{EWK} und Verlegeabstand ein Anlagenbetrieb ohne das Auftreten kritischer Frostzustände möglich ist. Die EWK-Dimensionierung nach VDI Richtlinie 4640 Blatt 2 wird hierbei als obere Grenze betrachtet.

Daran anschließend werden die Simulationen mit solarthermischer Unterstützung erläutert. Die Solar Kollektorfläche A_{ST} wird dabei an den Erkenntnissen zum EFH ausgerichtet (siehe [Hüs17]).

Simulationen ohne solarthermische Unterstützung als Referenz

Abbildung 4 zeigt zunächst die Systemjahresarbeitszahlen der Simulationen ohne Schwimmbadabsorber für unterschiedliche A_{EWK} und Verlegeabstände. Die schwarze Raute markiert den Datenpunkt, der zur Simulation des EWK gehört, welcher gemäß VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 ausgelegt ist. Die roten Dreiecke zeigen an, dass bei den Simulationen im Jahresverlauf kritische Frostzustände auftreten, die eine zentrale elektrische Wärmeversorgung temporär erforderlich machen.

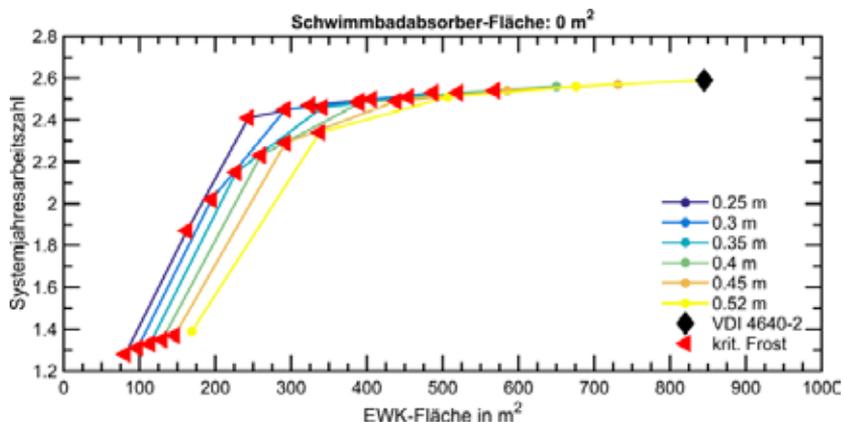


Abbildung 4: Systemjahresarbeitszahl nicht-regenerierter EWK-Systeme für unterschiedliche EWK-Flächen und Verlegeabstände der EWK-Rohre

Die JAZ_{sys} der WP-Systeme ohne solarthermische Unterstützung im MFH sind mit Werten im Bereich von 2,4 bis 2,6 deutlich geringer als im EFH, wo JAZ_{sys} von 3,5 bis 3,9 erreicht werden (siehe bspw. [Hüs18]). In einigen Fällen, bei denen Erschöpfungszustände des Erdreichs erreicht werden, fällt die JAZ_{sys} sogar bis auf 1,2 ab. Der Hauptgrund für die Systemeffizienzunterschiede zwischen MFH und EFH liegt in den unterschiedlichen Heizsystemen, besonders in der minimal erforderlichen Vorlauftemperatur $T_{VL,min}$ von 40 °C und der darauf noch aufzuschlagenden Übertemperatur zur Beladung des zentralen Pufferspeichers im MFH.

Neben den bereits genannten quantitativen Unterschieden zeigt sich jedoch ein ähnlicher qualitativer Kurvenverlauf der JAZ_{sys} der studierten Systeme in EFH und MFH. Das heißt, dass eine Zweiteilung der einzelnen Kurven zu beobachten ist: Jeweils ein „linker Teil“, wo durch Erschöpfung des Erdreichs in relevantem Umfang zentraler elektrischer Nachheizbedarf besteht und die JAZ_{sys} stark abfällt; und ein „rechter Teil“, wo mit zunehmender A_{EWK} ein degressiver Anstieg der JAZ_{sys} auftritt.

Für Simulationen ohne Erschöpfungszustände ist mit gleicher A_{EWK} nur eine geringe Steigerung der JAZ_{sys} durch kleinere Verlegeabstände festzustellen. Bei knapp dimensionierter A_{EWK} ($< 550 \text{ m}^2$) treten durch verringerte Verlegeabstände häufiger kritische Frostzustände auf. Dieses Verhalten deckt sich mit den Beobachtungen am EFH.

Abbildung 4 zeigt überdies, dass eine Dimensionierung des EWK nach VDI Richtlinie 4640 Blatt 2 prinzipiell einen Anlagenbetrieb ohne kritische Frostzustände sicherstellt. Dabei wird ein deutlicher Sicherheitsaufschlag in der A_{EWK} vorgesehen, was einen problemlosen WP-Betrieb auch in „harten Wintern“ garantiert. Eine Reduktion der A_{EWK} ist daher bei geringeren Verlegeabständen auch ohne eine solare Regeneration möglich, wengleich dies die Robustheit des Wärmeversorgungssystems gegenüber veränderten Wärmelasten und Klimabedingungen verringert.

Simulationen mit solarthermischer Unterstützung

In einem zweiten Schritt wurden nun Simulationen unter Berücksichtigung solarthermischer Gewinne durchgeführt. Dabei wurden unterschiedlichen Kombinationen von Erdkollektorfläche A_{EWK} , Verlegerohrabstand und Solarkollektorfläche A_{ST} zu Grunde gelegt, um herauszufinden, welche Reduktion der A_{EWK} durch den Einsatz der solarthermischen Unterstützung – in Form eines simplen Schwimmbadabsorbers – unter den angenommenen Randbedingungen maximal realisierbar ist.

Auf der Grundlage spezifischer Werte für die Solarkollektorfläche (bezogen auf die Entzugsleistung des EWK), die im EFH eine Halbierung der A_{EWK} bei gleicher Effizienz erlauben, wird für das Modell-MFH ein Schwimmbadabsorber mit einer Fläche von $A_{ST} = 75 \text{ m}^2$ bestimmt. Dieser Wert dient hier als Maximalwert für die Untersuchungen. Die in den MFH-Simulationen berücksichtigten Solarkollektorflächen betragen 25, 50 und 75 m^2 bzw. rund 1,6; 3,1 und $4,7 \text{ m}^2$ pro Person.

In Abbildung 5 sind die JAZ_{sys} dieser Simulationen zusammengefasst. Die schwarze Raute entspricht einer EWK-Dimensionierung nach VDI Richtlinie 4640 Blatt 2, kombiniert mit einem 25 m^2 großen Schwimmbadabsorber. Die roten Dreiecke kennzeichnen wieder die Simulationen in denen kritische Frostzustände auftreten. Auch die Skalierung des Diagramms entspricht derjenigen aus Abbildung 4.

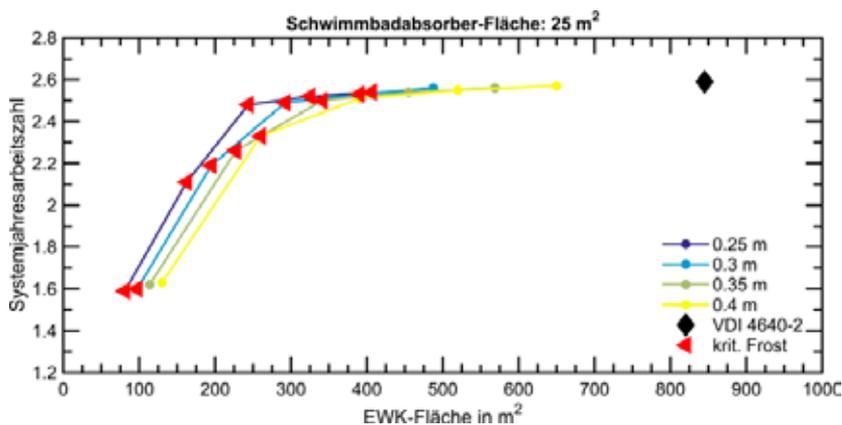


Abbildung 5: Systemjohresarbeitszahl eines EWK-Systems mit 25 m^2 Schwimmbadabsorber-Fläche für unterschiedliche EWK-Flächen und Verlegeabstände

Ein Vergleich mit den JAZ_{sys} des Systems ohne solare Regeneration zeigt, dass die kritischen Frostzustände bereits mit 25 m² Schwimmbadabsorber bei vergleichbar kleineren Erdkollektorflächen A_{EWK} (< 400 m²) und Verlegeabständen auftreten und die Jahresarbeitszahl JAZ_{sys} ansteigt (besonders für kleine A_{EWK}). Dieser Effekt ist auf die Anhebung der energetisch gewichteten Verdampferemperatur und die Vermeidung von zentralem Heizstabbetrieb zurückzuführen. Dies entspricht qualitativ den analogen Ergebnissen für das EFH (siehe [Hüs18]).

In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind schließlich die JAZ_{sys} der Simulationen mit 50 m² bzw. 75 m² A_{ST} für unterschiedliche A_{EWK} und Verlegeabstände dargestellt. Den nach VDI dimensionierten EWK kennzeichnet in beiden Abbildungen die schwarze Raute. Rote Dreiecke zeigen das Auftreten kritischer Frostzustände an. Die Skalierung der Diagramme entspricht derjenigen aus Abbildung 4.

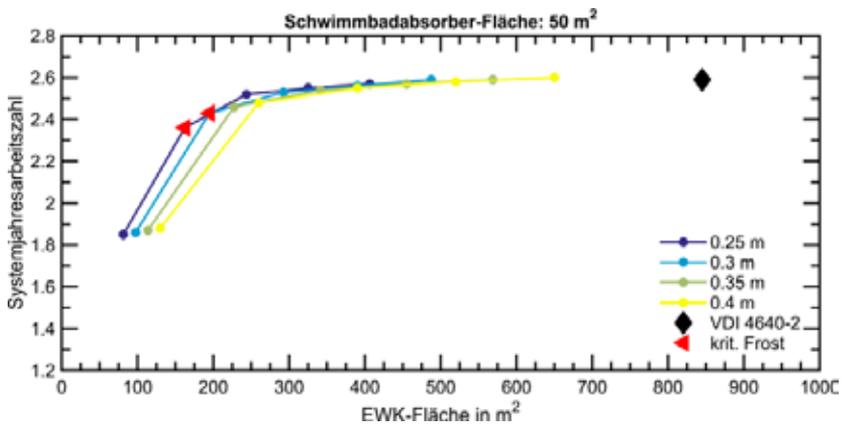


Abbildung 6: Systemjahresarbeitszahl eines EWK-Systems mit 50 m² Schwimmbadabsorber-Fläche für unterschiedliche EWK-Flächen und Verlegeabstände

Neben einer geringfügigen Steigerung der JAZ_{sys} bei knapp dimensionierten EWK zeigt Abbildung 6, dass bereits 50 m² Schwimmbadabsorber ausreichen um bei kleinen EWK-Flächen (< 200 m²) kritische Frostzustände fast vollständig zu vermeiden. Mit 50 m² Solarthermie wird somit nahezu eine Halbierung der A_{EWK} von 850 m² auf 500 m² bei gleicher JAZ_{sys} von 2,6 realisiert: 50 m² Schwimmbadabsorberfläche ersetzen also zirka 350 m² EWK-Fläche. Wird eine geringe Verschlechterung der JAZ_{sys} auf 2,5 in Kauf genommen, ist sogar eine Reduktion um 550 m² auf 300 m² möglich.

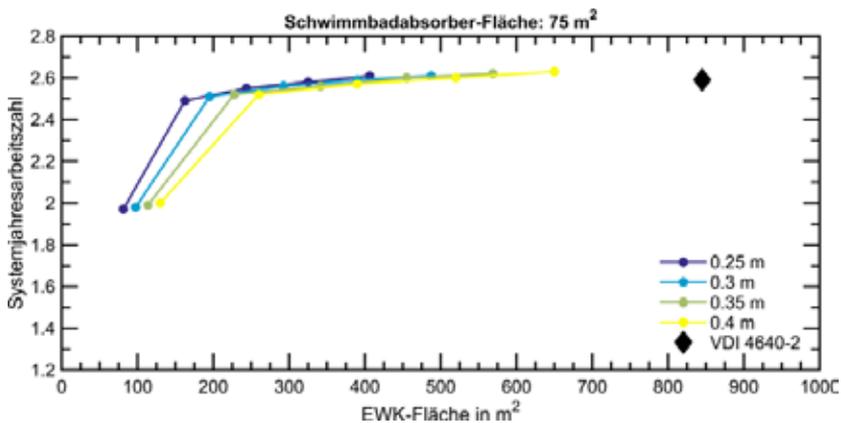


Abbildung 7: Systemjahresarbeitszahl eines EWK-Systems mit 75 m² Schwimmbadabsorber-Fläche für unterschiedliche EWK-Flächen und Verlegeabstände

Eine zum EFH analog dimensionierte solarthermische Unterstützung durch hier 75 m² Schwimmbadabsorber, wie sie in Abbildung 7 zu Grunde liegt, sorgt – neben einer weiteren leichten Steigerung der JAZ_{sys} und dem vollständigen Vermeiden kritischer Frostzustände – dafür, dass eine Reduzierung der A_{EWK} von 850 m² (ohne Regeneration) auf rund 260 m² (mit Regeneration) möglich ist. Diese Fläche entspricht damit nur noch einem Drittel des Wertes nach VDI 4640 bei gleicher JAZ_{sys} von 2,6. Das bedeutet, dass 75 m² Schwimmbadabsorberfläche hier zirka 500 m² EWK-Fläche substituieren. Somit prognostiziert die vorliegende MFH-Studie ein Erdkollektorflächenreduktionspotenzial durch solarthermische Regeneration (unter der Voraussetzung verringerter Verlegeabstände) von 60%, was 10% mehr sind als für die EFH-Studie ermittelt wurde [Hüs18].

Steigerung der Systemjahresarbeitszahl

Die bis dato niedrigen Jahresarbeitszahlen JAZ_{sys} der WP-Systeme im MFH im Bereich von 2,4 bis 2,6 sind vorrangig auf die relativ hohen Vorlauftemperaturenanforderungen sowie entsprechende Speicher- und Verteilverluste im betrachteten MFH zurückzuführen. Neben der Mindestvorlauftemperatur von 40 °C ist zudem zu beachten, dass die Kondensatorwärme der WP nicht direkt an das Zweileiternetz abgegeben wird, sondern zur Beladung eines zentralen Pufferspeichers genutzt wird. Somit ergibt sich hier noch ein zusätzlicher Aufschlag für die Temperaturanforderung an die WP, wodurch insgesamt stets eine Kondensatoraustrittstemperatur von mindestens 50 °C erforderlich ist.

Unter der Annahme einer mittleren Verdampfertemperatur von 3 °C und einer mittleren Kondensatortemperatur von 50 °C resultieren ein mittlerer Temperaturhub von 47 K sowie ein CARNOT-Wirkungsgrad von 6,9. Ausgehend von diesem theoretischen Maximum würde eine WP mit einem angenommenen Gütegrad von 45 % eine Arbeitszahl von 3,1 erreichen. Hinzu kommen dann noch Wärmeverluste von Pufferspeicher und Wärmeverteilsystem sowie elektrische Bedarfe sämtlicher Pumpen, Regler und Heizstäbe, womit die oben genannte Spanne der JAZ_{sys} von 2,4 bis 2,6 als durchaus realistisch einzuschätzen ist.

Um höhere JAZ_{sys} zu erreichen, wurde daher untersucht, welche Auswirkung eine weitere Absenkung der (minimalen) Vorlauftemperatur des Zweileiternetzes nach sich zieht. Da, neben der wünschenswerten Verringerung der (nicht nutzbaren) Wärmeverteilverluste des Netzes sowie der Steigerung der JAZ der WP, auch eine Steigerung des dezentralen elektrischen Nachheizbedarfs (vgl. [Mer17]) in den Wohnungsstationen zu erwarten ist, war nicht vorhersehbar, welcher Effekt im Einzelfall überwiegt.

In den dafür durchgeführten Simulationen wurden die A_{EWK} mit 570 m² und der Verlegeabstand mit 0,35 m (zirka 65 % der VDI-Dimensionierung) konstant gehalten und die minimale Vorlauftemperatur des Netzes in 5 K-Schritten von 40 °C auf 30 °C abgesenkt – wobei jeweils eine Variante ohne und eine Variante mit 25 m² Schwimmbadabsorber betrachtet wurden. Die resultierenden Heizkurven und das Prinzipschaltbild der Wohnungsstation(en) sind in der nachfolgenden Abbildung 8 dargestellt.

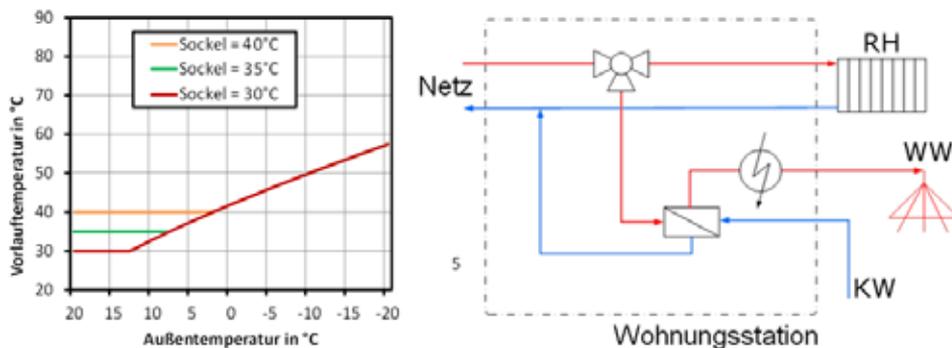


Abbildung 8: Verlauf der Vorlauftemperatur des Zweileiternetzes im MFH über der Außentemperatur (links); Schematische Darstellung der Energieflüsse in einer Wohneinheit (rechts)

Der Einfluss dieser Anpassung der Vorlauftemperaturanforderungen des Heizungsnetzes ist anhand der Jahresarbeitszahl der WP JAZ_{WP} in Abbildung 9 dargestellt. Das rote Dreieck markiert dabei eine Simulation, bei welcher kritische Frostzustände auftreten. Die dunklere Linie zeigt die Simulation mit 25 m^2 Schwimmbadabsorber, die hellere Linie markiert diejenigen Simulationen ohne Solarthermie.

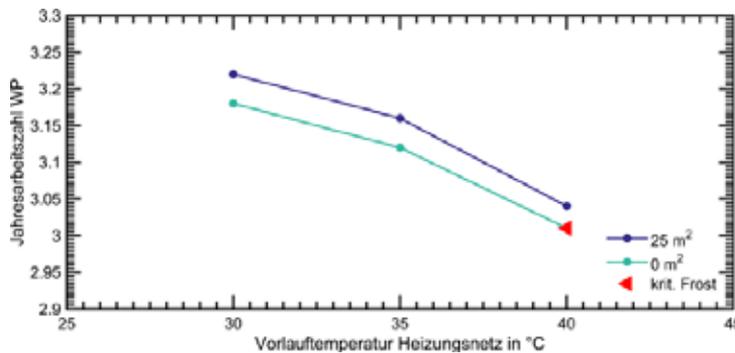


Abbildung 9: Verlauf der Jahresarbeitszahl der WP in Abhängigkeit der minimalen Heizungs-vorlauftemperatur mit 25 m^2 und ohne solarthermische Unterstützung

Wie der Abbildung 9 zu entnehmen ist, steigt die JAZ_{WP} mit sinkender Vorlauftemperatur des Heizungsnetzes – erwartungsgemäß – an. Sowohl mit als auch ohne ST sind Steigerungen der JAZ_{WP} von etwa 0,2 zu verzeichnen, wenn die Mindestvorlauftemperatur um 10 K gesenkt wird. Außerdem ist ersichtlich, dass durch den Einsatz der Solarthermie eine weitere Steigerung der JAZ_{WP} bewirkt wird, was auf die Anhebung der mittleren Verdampfertemperatur durch die solare Regeneration des EWK zurückzuführen ist. Am Beispiel der beiden Simulationen mit $T_{VL,min}$ von 40 °C ist zudem zu erkennen, dass durch den Einsatz von 25 m^2 Solarthermie kritische Frostzustände vermieden werden können, die bei dem nicht regenerierten System noch auftreten (rotes Dreieck). Ein Vergleich der nicht regenerierten Systeme untereinander zeigt wiederum, dass auch eine Absenkung der Netztemperatur dazu führen kann, dass kleinere A_{EWK} betrieben werden können, ohne kritische Frostzustände zu erreichen.

Die Abhängigkeit der Systemjahresarbeitszahl JAZ_{sys} von der minimalen Vorlauftemperatur des Zweileiternetzes ist in Abbildung 10 dargestellt. Das rote Dreieck markiert die Simulation mit kritischen Frostzuständen. Die dunkle Linie stellt die solar unterstützten Systeme dar, während die hellere Linie die EWK-Systeme ohne Solarthermie markiert. Im Vergleich zur Abbildung 9 wurde die Skalierung der Abszisse angepasst, da die absoluten Werte der JAZ_{sys} stets niedriger sind als die Werte der JAZ_{WP} .

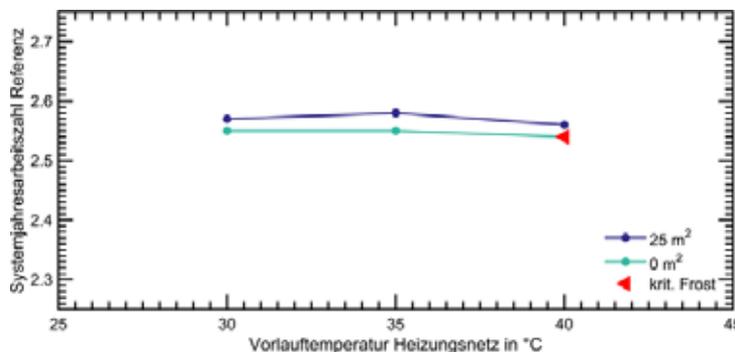


Abbildung 10: Verlauf der Systemjahresarbeitszahl in Abhängigkeit der minimalen Heizungs-vorlauftemperatur der WP mit 25 m^2 und ohne solarthermische Unterstützung

Sowohl die Simulationen mit als auch ohne ST zeigen einen geringen Einfluss der Netztemperaturabsenkung auf die JAZ_{sys} . Die gegenläufigen Effekte der Senkung der Netzverluste und der Steigerung der JAZ_{WP} auf der einen Seite sowie des steigenden dezentralen elektrischen Nachheizenergiebedarfs auf der anderen Seite liegen somit in einer ähnlichen Größenordnung (beim vorliegenden System).

5. Einfluss des Solarkollektormodells auf die Ergebnisse

Für die Systemsimulationen in der Simulationsumgebung TRNSYS wird der am ISFH entwickelte Type 203 zur Abbildung des ungedeckten Solarkollektors verwendet. Das hinterlegte Modell berücksichtigt den Einfluss von Kondensation und Eisbildung allerdings nur sehr eingeschränkt. Um eine Abschätzung des Einflusses der diesbezüglichen Modelleinschränkung auf das prognostizierte Gesamtergebnis zu erhalten, werden abgestufte „Worst-Case“-Szenarien untersucht. Dazu wird der Solarkollektor in der kalten Jahreszeit zur Regeneration des EWK nicht mehr eingesetzt, falls in der Systemsimulation die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- **Worst Case 1:** Keine Solarwärmegewinne, falls die Verdampferaustrittstemperatur der WP $T_{evap,out}$ unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fällt.
- **Worst Case 2 (abgestuft):** Keine Solarwärmegewinne, falls die Eintrittstemperatur in den Solarkollektor $T_{coll,in}$ unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ fällt.

Diese Annahmen sind durch die isolierende Wirkung bzw. Absorptionseigenschaften von gefrierendem Niederschlag auf dem Kollektorabsorber motiviert sowie der Bedeutung der Phasenwechselvorgänge für die Betriebscharakteristik des Schwimmbadabsorbers.

In Abbildung 11 sind die Auswirkungen der „Worst-Case“-Annahmen bezüglich der simulierten Solarwärmegewinnung dargestellt: Die Jahressummen der Solarerträge eines 75 m^2 Schwimmbadabsorbers (linke Diagrammachsen) und die sich damit ergebenden Anzahlen von Betriebsstunden mit kritischen Frostzuständen im Boden (rechte Diagrammachsen), jeweils für zwei EWK-Systemgrößen $98\text{ m}^2 A_{EWK}$ (a) und $260\text{ m}^2 A_{EWK}$ (b). Beide Diagramme zeigen auch die jeweilige Simulation ohne Einschränkung des Solarkollektormodells als Referenzfall (Ref) eingetragen

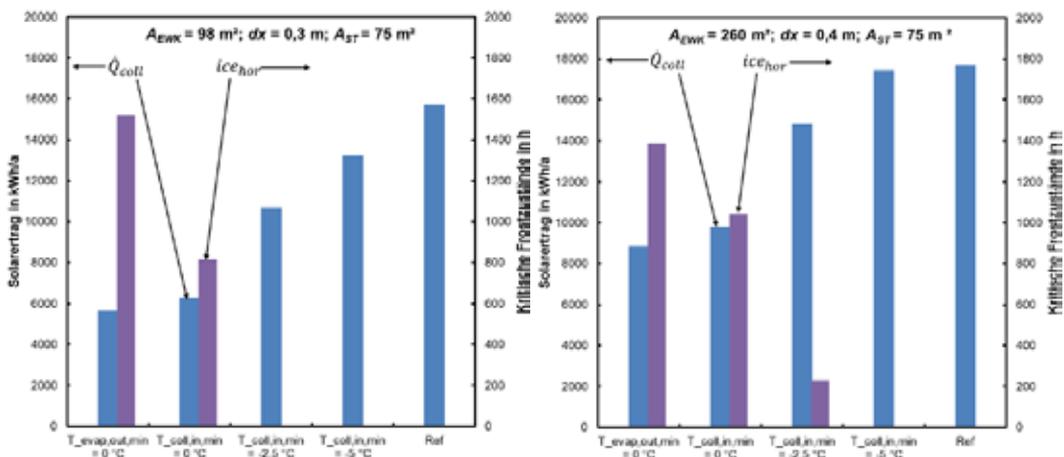


Abbildung 11: Solarertrag und kritische Frostzustände für unterschiedliche Einschränkungen des Solarkollektorbetriebs für den Fall einer $A_{EWK} = 98\text{ m}^2$ (a) und $A_{EWK} = 260\text{ m}^2$ (b)

Die Abschätzungen zeigen, dass das „Worst Case 1“-Szenario für den Fall einer Erdkollektorfläche $A_{EWK} = 98\text{ m}^2$ den Solarertrag auf knapp 6000 kWh/a reduziert (Abbildung 11-a). Nur geringfügig höher liegen die Erträge im Fall des „Worst Case 2“-Szenario und einer minimalen Kollektoreintrittstemperatur $T_{coll,in} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. In beiden Fällen treten dadurch signifikante kritische Frostzustände auf. Eine

Abmilderung des „Worst Case 2“-Szenarios durch Limitierung der Solarkollektoreintrittstemperatur $T_{coll,in}$ auf $-2,5\text{ °C}$ bzw. -5 °C erlaubt wiederum graduell höhere Erträge und die kritischen Frostzustände im Untergrund bleiben aus. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Fall einer Erdkollektorfläche $A_{EWK} = 260\text{ m}^2$. Wie man in Abbildung 11-b erkennt, ist die Bildung von kritischen Frostzuständen unter den getroffenen Annahmen in diesem Fall etwas stärker.

Die Abschätzungen zeigen, dass bei der Auslegung einer integrierten geothermisch/solarthermischen Versorgungslösung, die solare Gewinne durch unabgedeckte Solarkollektoren verwertet, die Effekte von Kondensat- und Eisbildung auf dem Solarkollektor nicht vernachlässigt werden sollten. Eine quantitative Abbildung dieser Effekte ist heute mit Hilfe von TRNSYS-Modellen jedoch noch nicht möglich. Um diese Lücke zu schließen, muss zunächst das Simulationsmodell für unabgedeckte Kollektoren verbessert werden, was eine Aufgabe der zukünftigen wissenschaftlichen Arbeit am ISFH darstellt.

6. Fazit und Ausblick

Die Simulationen zu den solar unterstützten, erdreichgekoppelten WP in MFH mit Wohnungsstationen und dezentraler elektrischer Nachheizung haben gezeigt, dass sich die Erkenntnisse aus den EFH-Simulationen weitgehend auch auf ein repräsentatives MFH übertragen lassen. Konkret zeigen die Simulationsergebnisse, dass im MFH sogar mehr als eine Halbierung der EWK-Fläche bei gleicher Systemeffizienz – gemessen anhand der Systemjahresarbeitszahl JAZ_{sys} – möglich ist, sofern eine ausreichende solarthermische Regeneration des EWK realisiert wird. Kritische Frostzustände können selbst bei stark unterdimensionierten EWK vollständig vermieden werden, wenn eine entsprechende solarthermische Regeneration des EWK mittels Schwimmbadabsorberfläche erfolgt. Im untersuchten Fall betrug die erforderliche solarthermische Kollektorfläche zirka 75 m^2 .

Die Simulationen zeigen, dass erst ab einer Verringerung der Erdwärmekollektorfläche A_{EWK} auf etwa ein Viertel im Vergleich zur Auslegung nach VDI Richtlinie 4640 Blatt 2 in relevantem Umfang Erschöpfungszustände des Erdkollektors auftreten. Dies ist auf die große Wärmekapazität des Fluids im EWK (bzw. im Quellenkreis insgesamt) zurückzuführen, die in einem mittleren Betriebszyklus der WP mit ihrer durchschnittlichen Verdampferleistung ausreicht, um ein Absinken der Verdampfer Eintrittstemperatur unter -5 °C sicher zu vermeiden. Aus dem Verhältnis der Wärmekapazität im Quellenkreis zur WP-Entzugsleistung lässt sich eine Zeitkonstante bilden, die noch näher zu untersuchen ist.

Darüber hinaus zeigt sich, dass eine Absenkung der Wärmeversorgungsnetztemperaturen – oder allgemein: Senktemperaturanforderungen – eine weitere Reduktion der A_{EWK} erlaubt, wobei gleichzeitig die Wärmeverteilungsverluste gesenkt und die Jahresarbeitszahl der WP gesteigert werden – sofern eine dezentrale elektrische Nacherwärmung die Absenkung der Netztemperaturen ermöglicht.

Als eine zentrale Aufgabe für weiterführende Betrachtungen kann die Entwicklung erweiterter Solarkollektormodelle benannt werden. Das für die vorgestellten Untersuchungen verwendete Modell eines unverglasten Solarkollektors (Type 203, siehe [Ber11]) berücksichtigt die Schmelzenthalpie des gefrierenden Wassers auf seiner Oberfläche und die einhergehende Veränderung der optischen und konvektiven Kennwerte nicht.

Für die vorgestellten Ergebnisse wurde keine Beschränkung der minimalen Kollektoreintrittstemperatur vorgeben. Simulationen mit einer solchen Beschränkung zur Vermeidung von Eisbildung am Solarkollektor zeigen geringere Solarerträge und entsprechend gemindertes Flächenreduktionspotential für den Erdwärmekollektor. Eine detailliertere Analyse der Zusammenhänge ist nötig. Ein möglicher Ansatz zur Einstellung optimierter Betriebstemperaturniveaus in den Komponenten des Quellenkreises (Solar- und Erdwärmekollektor, sowie Verdampfer der WP) können separat kontrollierte Kreise und Massenströme sowie geregelte Beimischungen sein.

7. Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“ wurde (in Kooperation mit der Firma tewag-Technologie-Erdwärmeeinrichtungen-Umweltschutz GmbH und dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. durchgeführt und) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen FKZ 03ET1275A aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.“

8. Literaturverzeichnis

- [Ber11] **Bertram, E.; Kirchner, M.; Rockendorf, G.; Stegmann, M.:** *Solarthermie2000plus: Solare Gebäudewärmeversorgung mit unverglasten photovoltaisch-thermischen Kollektoren, Erdsonden und Wärmepumpen für 100% Deckungsanteil.* Projektabschlussbericht Teilprojekt B, Institut für Solarenergieforschung Hameln, Emmerthal (2011)
- [Böh99] **Böhmer, H.:** *k-Werte alter Bauteile.* RKW-Verlag, Eschborn (1999)
- [Den04] **Deutsche Energie-Agentur:** *Energetische Bewertung von Bestandsgebäuden.* Berlin (2004)
- [Die10] **Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D.:** *Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand.* Darmstadt (2010)
- [Eff15] **Effenberger, K.-H.:** *Projektbericht - Entwicklungsdynamik EFH - Arbeitsbaustein 4: Differenzierung der EFH-Bestände.* Leibniz Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden (2015)
- [EnE14] **EnEV 2014 – die neue Energieeinsparverordnung.** URL: http://www.enev-online.com/enev_2014_volltext/index.htm, Zuletzt abgerufen am 21.02.2017
- [Hüs17] **Hüsing, F.; Mercker, O.; Hirsch, H.; Steinweg, J.:** *Solare Regeneration von Erdwärmekollektoren – Reduzierter Flächenbedarf bei hoher Effizienz.* Tagungsbeitrag zum 27. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein (2017)
- [Hüs18] **Hüsing, F.; Mercker, O.:** *Energieversorgung im Einfamilienhaus mittels Wärmepumpe, horizontalen Erdwärmekollektoren und photovoltaisch-thermischen Solarkollektoren.* Tagungsband zur RET.Con 2018, Nordhausen (2018)
- [Log11] **Loga, T.; Diefenbach, N.; Born, R.:** *Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden.* Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt (2011)
- [Log15] **Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.:** *Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden.* Zweite erweiterte Auflage, Institut für Wohnen & Umwelt, Darmstadt (2015)
- [Mer17] **Mercker, O.; Arnold, O.:** *Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilverluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern.* Projektabschlussbericht, Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Emmerthal (2017)
- [Pär13] **Pärisch, P.; Mercker, O.; Warmuth, J.; Tepe, R.; Bertram, E.; Rockendorf, G.:** *Investigations and model validation of a ground-coupled heat pump for the combination with solar collectors.* Applied Thermal Engineering 62 (2014), 375-381

- [Rec07] **Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E.:** Taschenbuch für Heizung und Klima. Oldenbourg Industrieverlag, München (2007)
- [Sta10] **Statistisches Bundesamt:** *Mikrozensus Zusatzerhebung*. Wiesbaden (2010)