

TECHNO-ÖKONOMISCHE BEWERTUNG VON SAISONALEN WÄRMESPEICHERN - EIN SIMULATIONSBASIERTER ANSATZ

**Benjamin Schroeteler, Helene Sperle, Tom Felder, Marco Meier,
Matthias Berger, Jörg Worlitschek**

Hochschule Luzern, CC Thermische Energiespeicher, Technikumstrasse 21, 6048 Horw, Schweiz, +41 41 349 37 59, benjamin.schroeteler@hslu.ch, www.hslu.ch/tes

Kurzfassung:

In dieser Studie werden Heiz- und Brauchwarmwassersysteme mit saisonalen Wärmespeichern anhand einer umfassenden Lebenszyklusanalyse untersucht. Dabei werden die Kosten und die Umweltbilanz der verschiedenen Technologien betrachtet. In Abhängigkeit vom erwünschten solaren Deckungsgrad zeigen die verschiedenen Lösungen stark unterschiedliche Trends. Zudem konnte gezeigt werden, wie unterschiedlich sich der Energiebedarf bzw. der Isolationsstandard auf die einzelnen Systeme auswirkt.

Keywords:

Energiespeicherung, saisonale Wärmespeicher, Wärmeerzeugung, Erneuerbare Energien, Lebenszyklusanalyse, Lebenszykluskosten, Sektorkopplung, Dekarbonisierung

1 Einleitung

1.1 Motivation

In Schweizer Privathaushalten werden mehr als zwei Drittel der Energie in Form von Wärme verbraucht [1]. Um die Ziele der vom Bund beschlossenen Energiestrategie 2050 zu erreichen, wäre ein signifikanter Anteil dieses Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. Der Solarenergie wird hierbei ein großes Potential zugeschrieben, jedoch besteht die Herausforderung im Ausgleich des zeitlichen Missverhältnisses zwischen Sonneneinstrahlung und dem anfallenden Wärmebedarf. Saisonale Wärmespeicher können durch die Entkopplung von Produktion und Nachfrage die Integration von erneuerbaren Energien wesentlich begünstigen [2]. Bis heute besitzen Bauvorhaben von saisonalen Wärmespeichern in der Regel jedoch einen Forschungscharakter und die Investitionskosten sind entsprechend hoch.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsprojektes ist eine umfassende Lebenszyklusanalyse bezüglich Kosten (Life Cycle Cost, LCC) und Umweltauswirkungen (Life Cycle Assessment, LCA) von saisonalen thermischen Energiespeichersystemen.

Betrachtet werden Lösungen für die Bereitstellung von Warmwasser und Heizwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern. In enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern und Experten werden wirtschaftliche und technische Indikatoren der Systeme analysiert und anschließend zusammenfassend auf Grund ihrer Kosten und Umweltauswirkungen verglichen und bewertet.

So entsteht ein umfassender und einheitlicher Überblick von saisonalen thermischen Energiespeichern bezüglich deren ökonomischen und ökologischen Leistungsfähigkeit. Im hier vorgestellten Projektauszug liegt der Fokus auf der Erläuterung der Methodik und der Präsentation von ersten Zwischenresultaten.

2 Methodik

Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise für die Lebenszyklusuntersuchung aufgezeigt. Im Weiteren werden die betrachteten Technologien näher beschrieben.

2.1 Vorgehensweise

In dieser Studie werden zwei Arbeitsstränge verfolgt, einerseits die Technologiebeschreibung und die Kostenbetrachtung und andererseits das Life Cycle Assessment. Für die LCA werden die Bestandsdaten für die gesamte Lieferkette der Systemkomponenten von der Ecoinvent-Datenbank Version 3.6 verwendet [1].

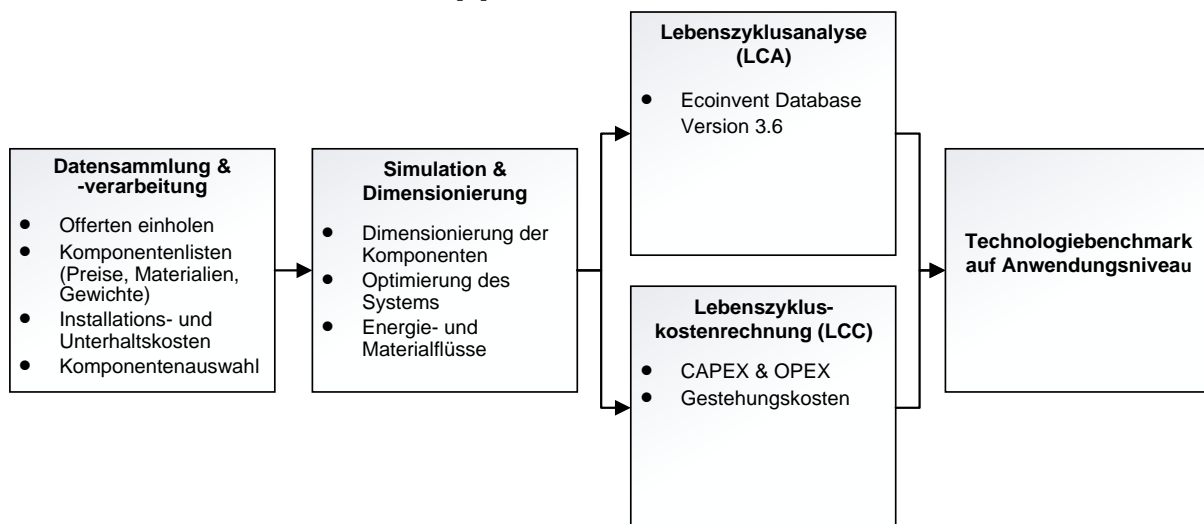


Abbildung 1: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise

Grundlage für die Berechnung der LCC und der LCA ist das Zusammentragen der nötigen Daten zu den einzelnen Anlagensystemen. Dies beinhaltet in einem ersten Schritt das Einholen von Offerten und Komponentenlisten bei entsprechenden Anbietern, was einen enormen Zeitaufwand darstellt. In einem zweiten Schritt werden für definierte Szenarien Heizsysteme (inkl. Brauchwarmwasser, BWW) mit der Simulationssoftware Polysun ausgelegt. Die daraus resultierenden Energieflüsse sowie die Komponentenlisten stellen die Basis für die LCC- und LCA-Berechnung dar.

2.2 Rahmenbedingungen

Simulationssoftware

Für die Simulation und Auslegung der Systeme wurde die Software Polysun® (Version 11.2) verwendet. Polysun ist eine Simulations- und Planungssoftware für gebäudeintegrierte Energiesysteme. Die Software enthält einen aktuellen Katalog bestehend aus Komponenten verschiedener Heizungs- und BWW-Systeme sowie verschiedene Gebäudestandards. Die in Polysun verwendeten Wetterdaten stammen von Meteonorm der Firma Meteotest AG.

Gebäude

Bei den betrachteten Gebäuden handelt es sich um ein neues und ein renoviertes Einfamilienhaus. Basierend auf der SIA-Norm 380/1 [2] wurden die Wärmedurchgangskoeffizient (U-Werte) 12 und 25 $W/(K \cdot m^2)$ gewählt, was zu einem jährlichen Nutzwärmebedarf von 15 kWh/m^2 (SFH15) und 60 kWh/m^2 (SFH60) führt. Die Soll-Raumtemperatur beträgt 21 °C bzw. 20 °C in der Nacht. Der tägliche Warmwasserbedarf ist mit 200 Liter bei 50 °C definiert. Dies entspricht gemäß SIA-Norm 382/2 [3] einem durchschnittlichen Dreipersonenhaushalt. In nachfolgender Tabelle sind die wichtigsten Eckwerte der beiden Gebäudetypen ersichtlich. Beide Gebäudetypen haben ein Niedertemperaturheizungssystem (Vorlauf- 35 °C und Rücklauf-temperatur 30 °C).

Tabelle 1: Übersicht der definierten Gebäude SFH15 und SFH60

	SFH15	SFH60
Standort	Bern (CH)	
Energiebezugsfläche	140 m ²	
Gebäudestandard	SFH Neubau	SFH renoviert
	U-Wert: 12 $\frac{W}{K \cdot m^2}$	U-Wert: 25 $\frac{W}{K \cdot m^2}$
Jährlicher Heizwärmebedarf	2'250 kWh	9000 kWh
	15 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	60 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
Jährlicher BWW-Bedarf	3'500 kWh (200 l/Tag, 50°C)	
Totaler jährlicher Wärmebedarf	5'750 kWh	12'500 kWh

Als Auslegegröße der einzelnen Systeme werden verschiedene solare Deckungsgrade (Solar Coverage Ratio, SCR) verwendet. Gemäß Energie Schweiz [4] können für die Warmwassererwärmung mit reiner Solarthermie jährliche solare Deckungsgrade von 60% erreicht werden. Für höhere Deckungsgrade gewinnt ein saisonaler Pufferspeicher an Bedeutung. Demzufolge wurden als Zielgrößen für diese Studie solare Deckungsgrade von 60 bis 90% definiert.

Für die folgenden Betrachtungen wurde die Systemgrenze so gewählt, dass jeweils das Heizsystem (alle Komponenten, inkl. Planung, Lieferung, Vorbereitung, Montage und Inbetriebnahme) bis zum Punkt der Wärmeübergabe an die Verteilung enthalten ist.

Offerten

Die Informationen für die Investitionskosten stammen aus verschiedenen Quellen. Für Wassertanks wurden zehn Offerten und Referenzobjekte verwendet, für Eisspeicher sechs, Erdspeicher drei und für Erdwärmesonden derer zwölf.

Kennzahlen

Der solare Deckungsgrad SCR wird wie folgt berechnet:

$$SCR = \frac{Q_{sol}}{Q_{sol} + E_{cs}}$$

Wobei: Q_{sol} Solarer Wärmeeintrag ins System
 E_{cs} Energiebezug zusätzliche Wärmequelle

Der solare Deckungsgrad setzt sich aus dem Quotienten von solarem Energieeintrag und dem gesamten Energieinput in das System zusammen. Beim Eisspeichersystem beinhaltet die zusätzliche Wärmequelle den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe und den Nettoenergieeintrag des Bodens in den Eisspeicher. Entsprechend wurde für das Erdspeicher- und Erdwärmesondensystem die zusätzliche Wärmequelle definiert. Diese besteht aus dem elektrischen Bedarf der Wärmepumpe und der Nettoentzugsenergie aus dem Erdspeicher/Sonde. Beim Wassertanksystem entspricht die zusätzliche Wärmequelle dem Energieinput der Sekundärheizung (Pelletheizung).

2.3 Kostenberechnung

Die finanziellen Kennzahlen sind nach der dynamischen Methode der SIA Norm 480 [5] ermittelt. Dabei werden die Gestehungskosten pro Nutzeinheit für ein definiertes Referenzszenario auf einen Referenzzeitpunkt diskontiert. Für das Referenzszenario müssen die Betrachtungsperiode, der Kalkulationszinssatz und der Referenzzeitpunkt definiert werden. In Tabelle sind die relevanten Parameter und Annahmen für das Referenzszenario aufgeführt.

Tabelle 2: Parameter und Annahmen Referenzszenario

Parameter	Referenzszenario	Quelle
Technische Lebensdauer der Komponenten	Eisspeicher: 50 Jahre Wasserspeicher: 50 Jahre Erdwärmesonden: 50 Jahre Erdspeicher: 50 Jahre Kollektoren: 25 Jahre Hydraulik: 25 Jahre Wärmepumpe: 15 Jahre Pelletofen: 15 Jahre Elektroinstallationen: 15 Jahre	[5], [6], Herstellerangaben
Wirtschaftliche Betrachtungsdauer	50 Jahre	
Energiepreise	Stromtarif: 18 Rp/kWh Pelletpreis: 8 Rp/kWh	[6], [7]
Kalkulationszinssatz (nominal)	3 %	
Inflation	0 %	
Preissteigerung Energiepreis	0 %	
Förderung	Wird für das Referenzszenario nicht miteinbezogen	

Die Informationen für die Investitionskosten stammen aus verschiedenen Quellen, wobei gemäß Tabelle 2 darauf geachtet wurde, dass jeweils für eine Technologie mehrere Quellen zur Verfügung stehen. Ferner sind die jährlichen Unterhaltskosten der einzelnen Systeme relevant. Für die Solarkollektoren werden pauschal Wartungskosten von 150 CHF/a angenommen [8]. Laut Herstellerangaben belaufen sich die Unterhaltskosten des Wassertanksystems auf 200 CHF/a. Für Eisspeichersysteme (inkl. Wärmepumpe und exkl. Solarkollektoren) werden Serviceabonnements zwischen 150 CHF/a und 500 CHF/a offeriert [6]. Für das Referenzszenario wurde ein Instandhaltungsbetrag von 350 CHF/a definiert und für das Erdspeichersystem ein Serviceabonnement von 550 CHF/a. Gemäß Herstellerangaben betragen die jährlichen Unterhaltskosten für das Erdwärmesondensystem 250 CHF/a.

Laut SIA 480 sind die Wärmegestehungskosten (LCOE) wie folgt zu berechnen:

$$LCOE = \frac{I + B_q - B_W + B_A}{B_N} \text{ [CHF/MWh]}$$

Wobei I die Summe der Investitionskosten pro Nutzungsdauer, B_q den Barwert der Ersatzinvestitionen, B_W den Barwert des Restwertes, B_A den Barwert der jährlichen Ausgaben und B_N die Summe der geschaffenen Nutzeinheit (MWh) darstellt.

2.4 Technologiebeschreibung

Es werden vier verschiedene saisonale thermische Energiespeichersysteme betrachtet. Die Auswahl beschränkt sich auf solarthermische Systeme. Im Folgenden sind die Anlagensysteme genauer beschrieben.

2.4.1 Wassertanksystem

Das Wassertanksystem besteht aus einem innenaufgestellten sensiblen Kombispeicher, welcher über Solarkollektoren beladen wird, sowie einem Pelletofen für die Spitzenabdeckung.

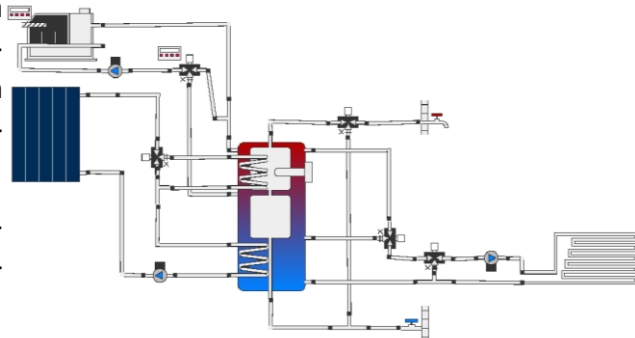


Abbildung 2: Systemübersicht Wassertank

In der folgenden Tabelle ist die Dimensionierung der wichtigsten Komponenten für ausgewählte solare Deckungsgrade aufgeführt. Dabei basiert die Auslegung und Kostenberechnung auf vordefinierten Systemen des Herstellers (inkl. Paketpreise).

Tabelle 2: Dimensionierung Wassertanksystem

	SCR [%]	Wassertankvolumen [m ³]	Solarkollektorfläche [m ²]	Kesselleistung Pelletheizung [kW]	BWW-Speicher [l]
SFH15	62.7	1.9	15.8	8.0	190.0
	71.5	2.6	14.0		190.0
	82.4	3.9	24.8		190.0
	91.4	15.3	50.4		215.0
SFH60	57.0	9.4	30.0	8.0	205.0
	70.9	15.3	50.4		215.0
	81.4	31.9	75.6		230.0
	89.3	31.9	110.0		230.0

2.4.2 Eisspeichersystem

Ein Eisspeicher besteht aus einem hohlen Betonzylinder, der komplett im Erdreich vergraben wird. Der Eisspeicher ist an den Außenseiten nicht isoliert. Im Inneren befinden sich je ein Regenerations- und Entzugswärmeübertrager in welchen eine frostsichere Sole zirkuliert. Der Eisspeicher wird als Quelle für die Wärmepumpe verwendet und über die Solarthermieanlage

und über den Wärmeeintritt vom Erdreich regeneriert. Mit der Nutzung der Kristallisationsenergie des Phasenübergangs (flüssig-fest) kann das Volumen des Eisspeichers deutlich kleiner als ein vergleichbarer sensibler Wärmespeicher ausgelegt werden. Zusätzlich kann die Solarthermie zur Direktnutzung für Heiz- bzw. BWW verwendet werden. In nachfolgender Tabelle sind die Kennwerte der wichtigsten Systemkomponenten aufgeführt.

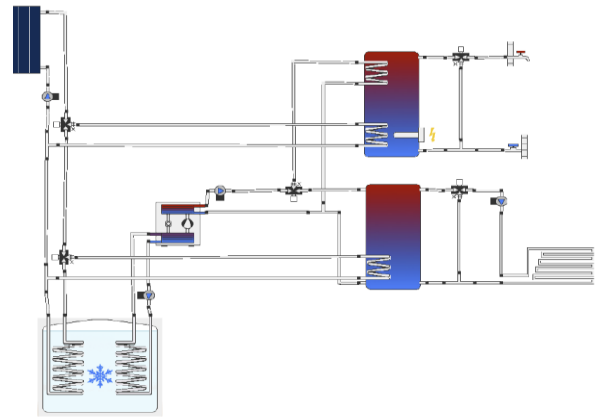


Abbildung 3: Systemübersicht Eisspeicher

Tabelle 3: Dimensionierung Eisspeichersystem

	SCR [%]	Eisspeicher-volumen [m ³]	Solkollektor-fläche [m ²]	Heizleistung WP [kW]	BWW-Speicher [l]	Puffer-Speicher [l]
SFH15	62.2	6.3	4.1			
	70.1	5.9	6.1			
	79.7	5.4	8.0	5.0	400.0	500.0
	91.7	3.6	20.0			
SFH60	60.1	18.0	6.1			
	72.1	15.5	10.1			
	80.5	12.7	20.4	5.0	400.0	500.0
	87.0	6.4	65.1			

2.4.3 Erdspeichersystem

Der Erdspeicher besteht bis zu einer Tiefe von ca. 1,5 m aus mehreren Schichten Erdreich, in denen Leitungen aus Polyethylen verlegt sind. Der Erdspeicher wird über die mit Soleflüssigkeit gefüllten Leitungen durch die Solarenergie be- bzw. entladen. Seitlich und an der Oberfläche ist der Erdspeicher mit XPS-Platten gedämmt. Der Erdspeicher dient als Energiequelle für die Wärmepumpe. Zusätzlich kann die Solarthermie direkt als Wärmepumpenquelle oder zur Direktnutzung im Kombispeicher verwendet werden. In dieser Studie wird der kleinste offerierte Erdspeicher (150 m³ Volumen) für die Betrachtung des Einfamilienhauses verwendet.

In nachfolgender Tabelle sind die Kennwerte der wichtigsten Systemkomponenten aufgeführt.

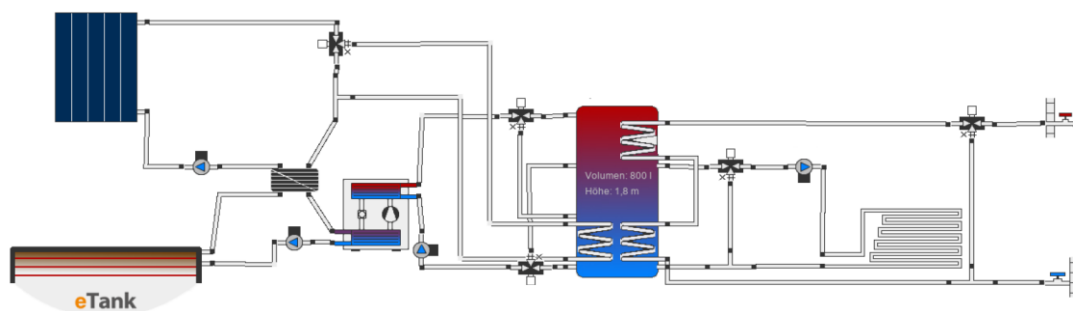


Abbildung 4: Systemübersicht Erdspeicher

Tabelle 4: Dimensionierung Erdspeichersystem

	SCR [%]	Erdspeicher- volumen [m ³]	Solarkollektor- fläche [m ²]	Heizleistung WP [kW]	BWW- Speicher [l]
SFH15	60.2	150.0	4.1	6.0	800.0
	67.0		5.1		
	80.0		8.2		
	90.4		15.3		
SFH60	62.0	150.0	7.2	6.0	800.0
	71.3		9.3		
	81.1		13.4		
	89.4		24.2		

2.4.4 Erdwärmesondensystem

Das Erdwärmesondensystem besteht aus einer konventionellen Erdsonde und einer Sole/Wasser-Wärmepumpe. Die Erdsonde und das umliegende Erdreich werden als Wärmespeicher genutzt. Durch die Solarthermieanlage wird die Erdsonde regeneriert. Zusätzlich kann die Solarthermie direkt für Heizung bzw. BWW genutzt werden. In nachfolgender Tabelle ist die Dimensionierung der wichtigsten Komponenten für verschiedene solare Deckungsgrade aufgeführt.

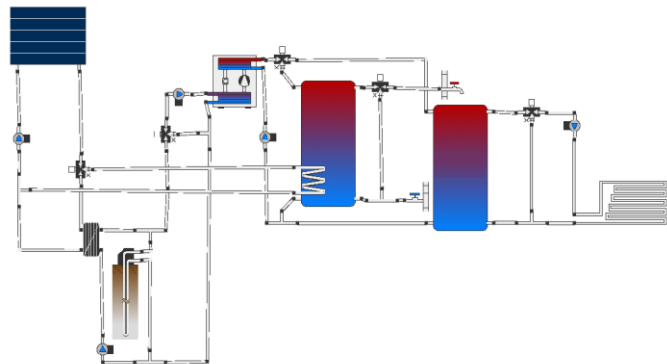


Abbildung 5: Systemübersicht Erdwärmesonde

Tabelle 5: Dimensionierung Erdwärmesondensystem

	SCR [%]	Länge Erdwärmesonde [m]	Solarkollektor- fläche [m ²]	Heizleistung WP [kW]	BWW- Speicher [l]	Puffer- Speiche [l]
SFH15	54.3	90.0	4.1	7.0	300.0	300.0
	69.3		5.1	7.0	300.0	
	80.0		8.2	9.0	600.0	
	87.2		16.4	9.0	900.0	
SFH60	58.1	180.0	8.2	9.0	600.0	300.0
	70.6		10.3		600.0	
	80.0		12.3		600.0	
	84.1		24.6		900.0	

3 Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt die Aufteilung der Investitionskosten auf die Hauptkomponenten der einzelnen Technologien. Dabei wurde jeweils das Szenario mit einem solaren Deckungsgrad von 80 % verwendet.

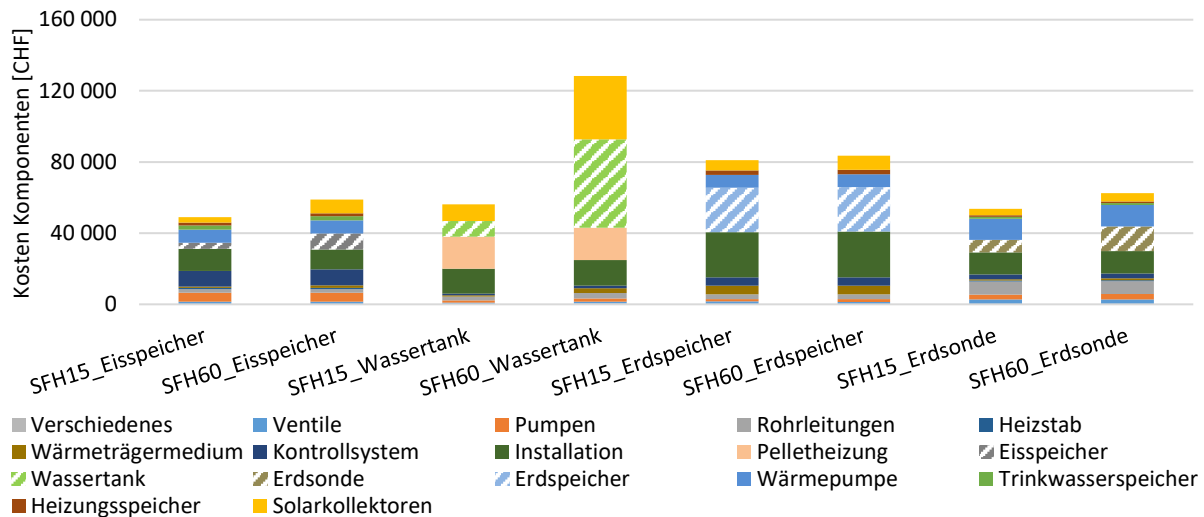


Abbildung 6: Aufteilung der Investitionskosten auf die Hauptkomponenten

Gut sichtbar werden die relativ hohen Investitionskosten des Wassertanks für das SFH60. Diese entstehen hauptsächlich durch die hohen Kosten des Wasserspeichers und der vergleichsweise großen, benötigten Solarkollektorfläche. Weiter ist beim Wassertanksystem eine Pelletheizung zur Spitzenabdeckung installiert, welche Zusatzkosten verursacht. Bei den übrigen Systemen variieren die Investitionskosten geringfügiger zwischen SFH15 und SFH60. Die Komponentenkosten des Erdspeichersystems liegen deutlich über denen des Erdsonden- bzw. Eisspeichersystems. Dies ist auf die relativ hohen Installations- (Aushub) und Speicherkosten (Dämmung, Verlegung der Rohrleitungen) zurückzuführen.

In Abbildung 7 sind die anfallenden Investitionskosten über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bei verschiedenen solaren Deckungsgraden dargestellt. Diese umfassen die Neu- und Ersatzinvestitionskosten und sind entsprechend der Lebensdauer der Komponenten um den Restwert korrigiert. Die Investitionskosten sind ohne mögliche Fördergelder berechnet.

Für hohe solare Deckungsgrade (> 80 %) weisen das Eisspeicher- und das Erdwärmesondensystem die tiefsten Investitionskosten (über den Betrachtungszeitraum) für das SFH15 und SFH60 auf. Dagegen liegen die Kosten des Wassertanksystems für das SFH60 deutlich höher und weisen eine starke Zunahme mit höheren solaren Deckungsgraden auf. Beim SFH15 stellt der Erdspeicher bezüglich Investition die teuerste Option dar. Dies ist auf das überdimensionierte Volumen des Speichers zurückzuführen, wobei derzeit jedoch keine kleinere Ausführung am Markt erhältlich ist.

In Abbildung 8 sind die jährlichen Ausgaben (Unterhalt und Energiekosten) für das Referenzszenario über den gesamten Zeithorizont aufgeführt. Mit zunehmenden solarem Deckungsgrad nehmen die jährlichen Ausgaben aller Systeme ab. Die höchsten Unterhaltskosten weisen die Systeme mit Service-Abos auf (Erd- und Eisspeicher). Die jährlichen Ausgaben nehmen mit zunehmendem Wärmebedarf zu.

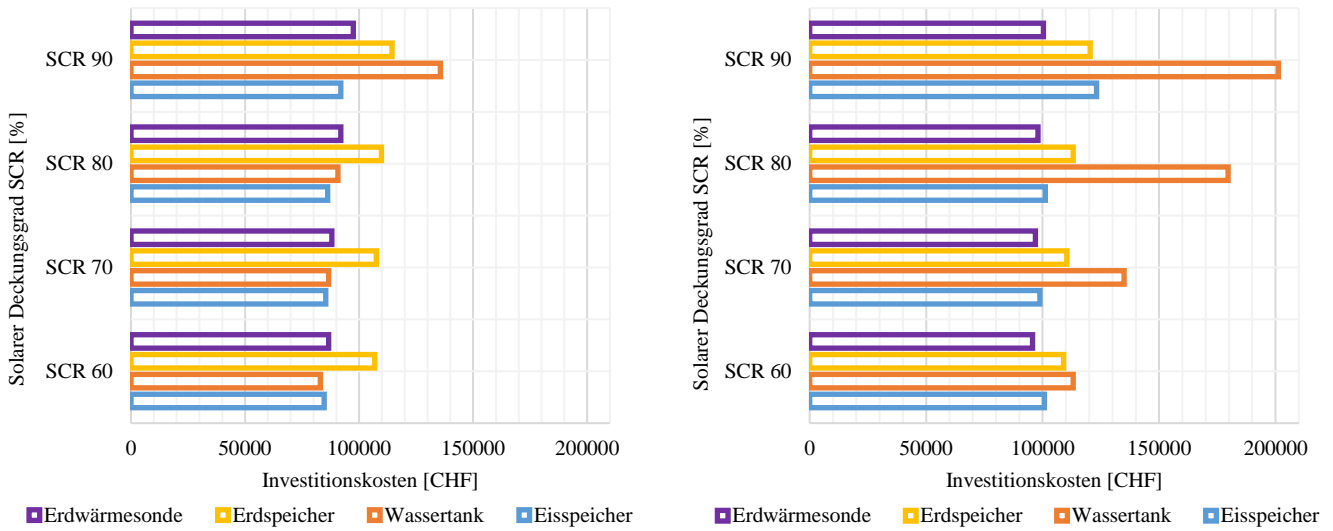


Abbildung 7: Investitionskosten über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, links SFH15 und rechts SFH60

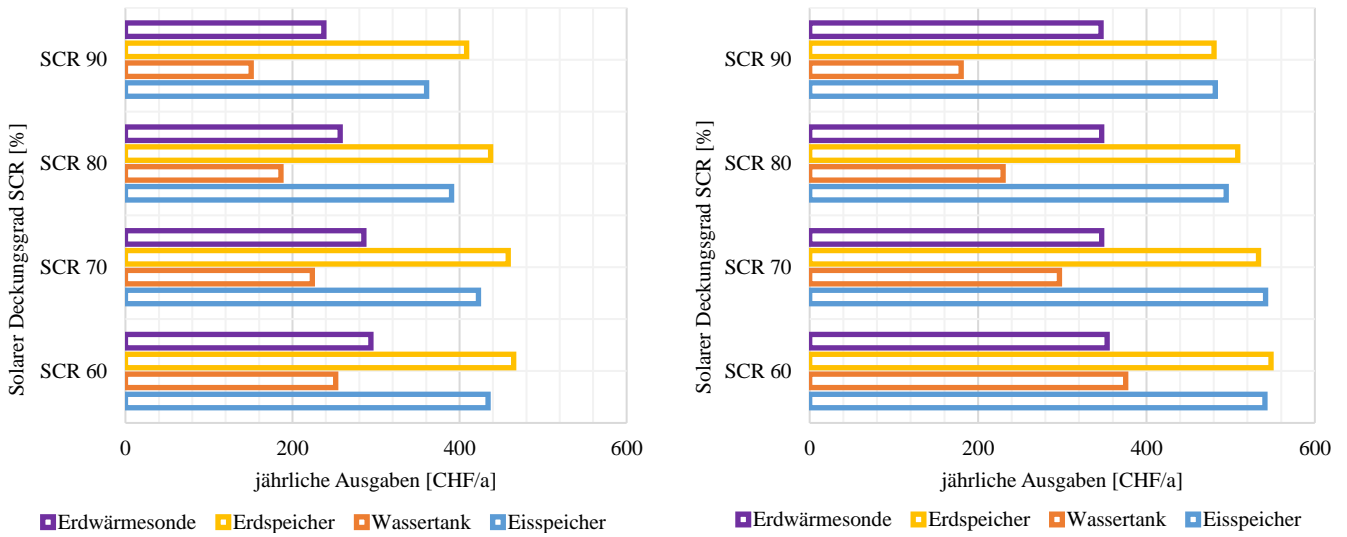


Abbildung 8: Jährliche Ausgaben über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, links SFH15 und rechts SFH60

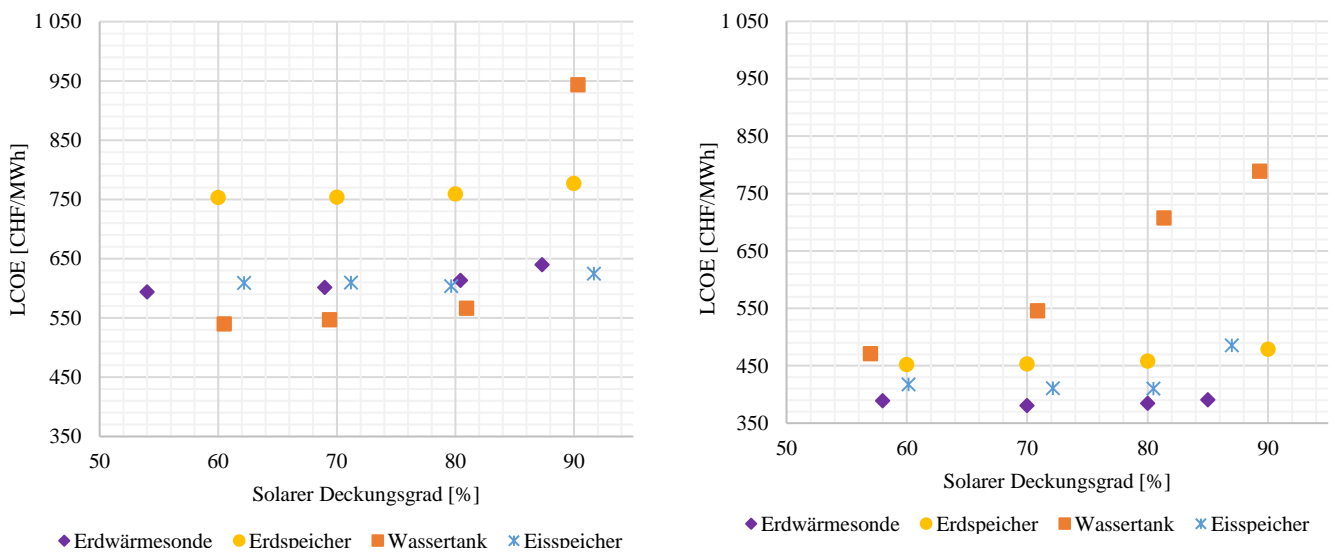


Abbildung 9: LCOE über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, links SFH15 und rechts SFH60

3.1 Wärmegestehungskosten

Für die Berechnung der Wärmegestehungskosten (LCOE) werden die Barwerte aller Ausgaben für das Referenzszenario durch die Summe der produzierten Energieeinheiten (MWh) dividiert. Die Resultate sind in Abbildung 9 dargestellt. Für das SFH15 und solare Deckungsgrade unter 90 % weist das Wassertanksystem die tiefsten LCOE auf. Dagegen liegen die LCOE des Erdspeichersystems deutlich höher. Für das SFH60 weist das Wassertanksystem die höchsten LCOE auf. Das Erdwärmesondensystem hat die tiefsten LCOE über alle betrachteten solaren Deckungsgrade.

3.2 Schlussfolgerung

Mit der in dieser Studie verwendeten Methodik können unterschiedliche Heiz- und BWW-Systeme bezüglich ihrer LCC miteinander verglichen werden. Dabei wurden Systeme mit einem saisonalen thermischen Speicher betrachtet. Als Auslege- und Vergleichsgröße wurde der solare Deckungsgrad verwendet. Die LCOE der einzelnen Systeme sind abhängig vom betrachteten Energiebedarf und vom solarem Deckungsgrad. Mit zunehmendem Energiebedarf sinken die LCOE für die untersuchten Systeme.

3.2.1 Ausblick

Um eine umfassende Lebenszyklusuntersuchung der saisonalen Energiespeichersysteme zu erhalten, werden neben den Kosten zukünftig auch die Umweltauswirkung untersucht. Die hier betrachtete Auslegung der Systeme basiert auf Herstellerinformationen und wird weiter optimiert. Weiter werden neue Systeme (Photovoltaik + Wärmepumpe + Wärmespeicher) ins Portfolio aufgenommen. Ergänzend werden Sensitivitäten der Wärmegestehungskosten bezüglich Strompreis, Förderbeitrag und Kalkulationszinssatz untersucht.

Quellen

- [1] B. Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>. [Accessed: 27-Jan-2020].
- [2] SIA, "SIA Norm 380/1 - Thermische Energie im Hochbau," Zürich, 2016.
- [3] SIA, "SIA Norm 382/2 - Klimatisierte Gebäude - Leistungs- und Energiebedarf," Zürich, 2011.
- [4] EnergieSchweiz, "Grundlagen für thermische Sonnenenergie-nutzung," *Bundesamt für Energ.*, 2015.
- [5] SIA, "Sia Norm 480:2004 - Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau," Zürich, 2004.
- [6] S. Minder, R. Hefti, N. Ettlín, and T. Weisskopf, "Eisspeicher-Wärmepumpen- Anlagen mit Sonnenkollektoren," *energieschweiz*, 2016.
- [7] B. für Statistik, "Landesindex der Konsumentenpreise," 2020. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/su-d-05.02.11>. [Accessed: 27-Jan-2020].
- [8] M. Ménard and L. Mattei, "Erhöhung der Quellentemperatur von Wärmepumpen," *Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik Schlussbericht*, pp. 1–32, 2011.