



Zwischenbericht vom 11.11.2021

Lebenszyklusanalysen verschiedener Konzepte für 100 % solar beheizte Gebäude

100% solar LCA



Quelle: © Jenni Liegenschaften AG & synergieplus.ch



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK



Datum: 11.11.2021

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

OST – Ostschweizer Fachhochschule
SPF Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
www.spf.ch

Hochschule Luzern – Technik und Architektur
CCTES Competence Center Thermal Energy Storage
Technikumstrasse 21, 6048 Horw
www.hslu.ch/tes

Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik
Klosterzelgstrasse 2, 5210 Windisch
www.fhnw.ch/de/die-fhnw/hochschulen/ht

Autor/in:

Florian Ruesch, SPF OST, florian.ruesch@ost.ch
Michel Haller, SPF OST, michel.haller@ost.ch
Willy Villasmil, CCTES HSLU, willy.villasmil@hslu.ch
Stefan Roth, FHNW, stefan.roth1@fhnw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stephan Mathez, stephan.a.mathez@solarcampus.ch
Andreas Eckmanns, Andreas.Eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502285-01

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



Zusammenfassung

Die saisonale Speicherung von Wärme in 100 % solar beheizten Ein- oder Mehrfamilienhäusern ist bereits seit vielen Jahren machbar. Im Jahr 2021 wurde in Benzenschwil (AG/CH) das erste MFH mit saisonalem Wärmespeicher gebaut, welches an Stelle von solarthermischen Kollektoren eine Kombination von PV und Wärmepumpe verwendet. In diesem Projekt werden Konzepte mit einer solarthermischen, einer solar elektrischen und einer kombinierten Wärmeversorgung miteinander verglichen, wobei der ganze Lebenszyklus betrachtet wird. Das Projekt wurde im Sept. 2021 begonnen und läuft noch bis Ende 2023.

Summary

The seasonal storage of heat in 100 % solar heated single and multifamily buildings is already feasible nowadays. The first multifamily building with seasonal thermal energy storage that uses a combination of PV and heat pump instead of a solar thermal system has been built in Benzenschwil (AG/CH). In this project, concepts with solar thermal, solar electrical and combined solutions are compared, whereby the entire lifecycle of the system is considered. The project has started in Sept. 2021 and will run until 2023.

Abkürzungsverzeichnis

MFH	Mehrfamilienhaus
PV	Photovoltaik
WP	Wärmepumpe
CHF	Schweizer Franken
WRG	Wärmerückgewinnung
COP	Coefficient of performance



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	5
1.2	Motivation des Projektes.....	6
1.3	Projektziele	7
2	Vorgehen und Methode	8
2.1	Analyse von Messdaten:.....	8
2.2	Duschwasser WRG.....	8
2.3	Vergleich und Optimierung auf Basis von Simulationen	8
2.4	Lebenszyklusanalyse.....	8
3	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	9
3.1	Monitoring/Datenanalyse	9
3.2	Duschwasser WRG.....	9
4	Bewertung der bisherigen Ergebnisse	11
4.1	Monitoring/Datenanalyse	11
4.2	Duschwasser WRG.....	12
5	Weiteres Vorgehen	12
6	Nationale und internationale Zusammenarbeit	12
7	Kommunikation	12
8	Publikationen	12
9	Literaturverzeichnis	12



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Seit vielen Jahren werden in der Schweiz bereits Ein- und Mehrfamilienhäuser erstellt, welche mit Hilfe eines saisonalen Wasserspeichers zu 100 % mit Solarwärme versorgt werden. In den BFE Projekten OPTSAIS¹ und SensOpt² konnten Optimierungspotenziale durch eine verbesserte Regelung und die Integration von PV und Wärmepumpe in das System aufgezeigt werden.

Im Jahr 2021 wurde in Benzenschwil (AG) nun das erste vollständig solar beheizte Mehrgenerationenhaus mit saisonalem Wasserspeicher gebaut, welches keine thermischen Kollektoren, sondern nur PV-Module und eine Wärmepumpe nutzt. Die gesamte Hülle eines Anbaus wurde zu diesem Zweck mit PV-Modulen ausgestattet. In dem Objekt wird der Wärmespeicher nach dem Beladen durch die Wärmepumpe mit Elektroheizstäben weiter erhitzt, um eine möglichst grosse Wärmemenge einzuspeichern. Diese Systeme mit PV-Modulen weisen nicht nur eine 100 % Deckung des Wärmebedarfs auf, sondern können auch einen substantziellen Teil des Bedarfes für den Haushaltsstrom selber erzeugen.

Zusätzlich wurde im Projekt SensOpt durch eine vereinfachte Modellierung ein grosses Potenzial der Duschwasserwärmerückgewinnung zur Reduktion des Warmwasserverbrauches aufgezeigt, was auch eine erhebliche Reduktion des saisonalen Speichervolumens ermöglicht. In diesem Projekt soll dieses Potential genauer analysiert und es sollen unterschiedliche Varianten der Duschwasserwärmerückgewinnung verglichen werden. Diese Einbindungsvarianten werden mit den drei Konzepten a) Solarthermie, b) Solarthermie, PV + WP, c) PV + WP + Heizstab kombiniert und über den gesamten Lebenszyklus ökonomisch und ökologisch verglichen.



Abbildung 1: Links: MFH Huttwil mit solarthermischer Energieerzeugung auf dem Dach. Rechts: MFH Anbau Benzenschwil mit photovoltaischer Energieerzeugung auf der gesamten Gebäudehülle. Beide Gebäude nutzen einen saisonalen Wasserspeicher. Quellen: Jenni Liegenschaften AG & synergieplus.ch



1.2 Motivation des Projektes

Der Ersatz von fossilen Wärmeerzeugern in Wohngebäuden ist ein entscheidender Faktor zum Erreichen der nationalen Klimaziele. Im Vordergrund steht der Ersatz fossiler Heizungen durch Wärmepumpen, welche oft mit Photovoltaikanlagen ergänzt werden. Eine starke Forcierung dieses Konzeptes erzeugt zwar mehr als genug elektrische Energie in den Sommermonaten, erhöht aber den Bedarf an elektrischer Energie im Winter. Wie eine dadurch vergrösserte Winterlücke bei der Stromversorgung "gefüllt" werden soll ist noch weitgehend ungeklärt. So resultiert zum Beispiel im Basisszenario der Energieperspektiven 2050+ des Bundes³ ein Winter-Defizit von 9 TWh, für welches in diesem Szenario die Deckung über Importe vorgesehen ist. Bereits heute ist die CO₂-Belastung der im Winter verbrauchten elektrischen Energie um Faktor vier höher als im Sommer. Aus diesem Grund hat auch die im Winter eingesparte kWh Strom derzeit einen um den Faktor vier höheren Einfluss auf die CO₂-Bilanz als im Sommer, wobei sich dieser saisonale Unterschied mit der fortschreitenden Elektrifizierung des Wärmesektors und dem Ausstieg aus der Kernenergie noch deutlich verstärken könnte. Bezahlbare Lösungen zur saisonale Speicherung sind daher ein Schlüsselement für die Energieversorgung der Zukunft. Die grosstechnische saisonale Speicherung von elektrischer Energie in Speicherkraftwerken weist Kosten über 10 Rp./kWh⁴ auf und die saisonale Speicherung in Gebäuden mittels Batterien ist ca. um das Zehnfache teurer (> 1 CHF/kWh) und somit sehr weit von einer wirtschaftlichen Umsetzbarkeit entfernt. Mit grossen Wasserspeichern kann aber Wärme bereits heute für einzelne Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) saisonal gespeichert werden, wobei die Kosten für die Wärmespeicherung bei ca. 15-25 Rp./kWh⁴ liegen.

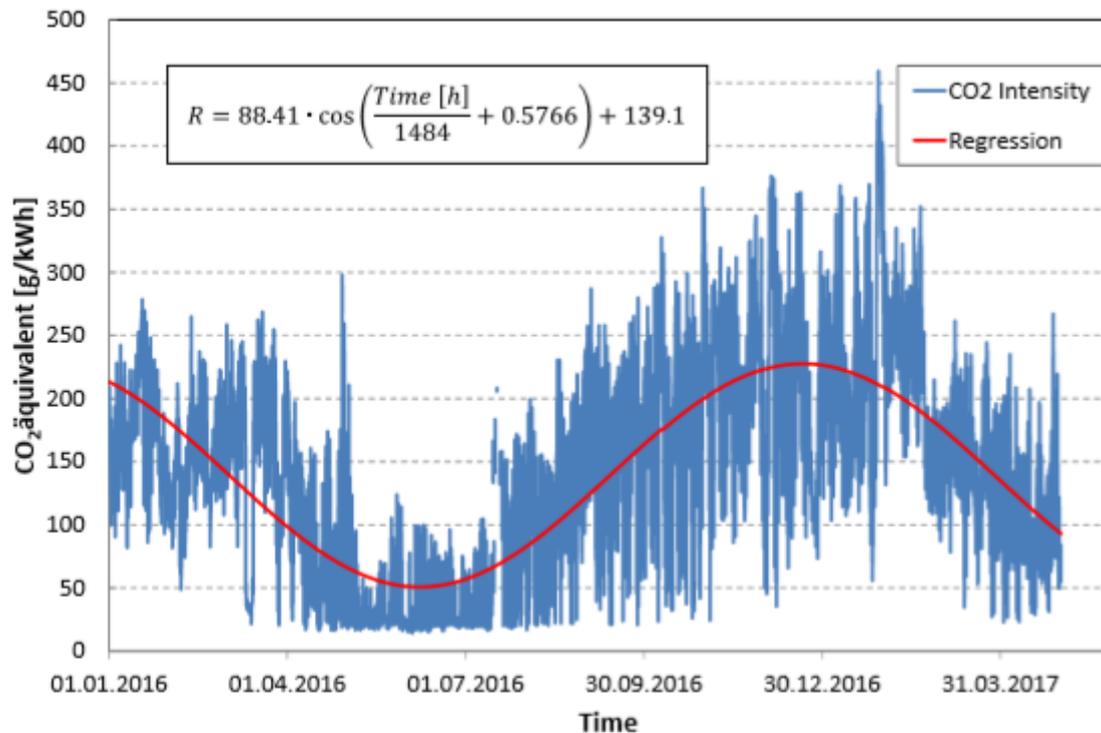


Abbildung 2: CO₂-Belastung des schweizerischen Netzstromes für ein Jahr. Quelle: ⁵ nach Daten von www.electricitymap.org⁵

1.3 Projektziele

Das Projekt hat das Ziel die Kosten und Umweltbelastung für 100% solar beheizte MFH weiter zu senken und somit die Verbreitung solcher Wärmeerzeugungssysteme voranzutreiben. Dazu werden folgende Teilziele angestrebt:

- Aufzeigen und Vergleichen von Energieströmen in zwei real gebauten MFH mit saisonalem Wasserwärmespeicher.
- Energiebilanz und Ökobilanzierung des gesamten Lebenszyklus der unterschiedlichen Ansätze von 100 % solar beheizten MFH mit saisonalem Wärmespeicher. Die 100 % solaren MFH werden mit weiteren gängigen Heizsystemen verglichen.
 - Design-/Dimensionierungsvorschläge für 100 % solar beheizte MFH mit minimaler Umweltbelastung über den gesamten Lebenszyklus.
- Analyse der Integration von Duschwasser-WRG ins 100 % solar Konzept.
 - Einbindungsvorschlag
 - Quantifizierung des Einflusses auf die Systemdimensionierung und die Kosteneinsparungen.



2 Vorgehen und Methode

2.1 Analyse von Messdaten:

Durch das Projekt SensOpt und die Messkampagne des Mehrgenerationenhauses Benzenschwil bestehen bereits Monitoringsysteme und Messdaten der MFH in Huttwil und Benzenschwil. Diese Infrastrukturen wird durch das hier beantragte Projekt über die ursprünglich vorgesehene Messzeit weiterbetrieben und die Daten werden so aufbereitet, dass sie miteinander verglichen werden können. Es wird erwartet, dass im ersten Winter beim Mehrgenerationenhaus Benzenschwil noch Anpassungen und Optimierungen der Regelung vorgenommen werden und dass durch Einzug und Bauaustrocknung noch beträchtliche Abweichungen zum "normalen" Energieverbrauch bestehen. Im hier beantragten Projekt wird die Weiterführung des Monitorings und die Auswertung des zweiten Betriebsjahres durchgeführt, wobei die Daten des ersten Jahres ebenfalls im Projekt verwendet werden können.

2.2 Wärmerückgewinnung aus Duschwasser

Eine Studienarbeit an der OST kam zum Ergebnis, dass durch dezentrale Duschwasser-WRG ein grosses Potenzial zur Einsparung von Speichervolumen und Kosten erzielt werden kann. Dies allerdings auf der Basis einer sehr vereinfachten Modellierung. In diesem Projekt werden Wärmeverluste und Zeitverzögerungen in die Modellierung miteinbezogen und unterschiedliche Einbindungsvarianten der Duschwasser-WRG betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass eine Modellierung der Leitungen und der WRG-Wärmetauscher innerhalb der Jahressimulationen nicht zielführend ist. Die meisten Effekte wirken sich lediglich in die ersten 10-30 s einer Zapfung aus und können innerhalb des für Jahressimulationen in TRNSYS typischen Zeitschrittes von 2 min nicht ausreichend abgebildet werden. Aus diesem Grund wurde eine zeitschrittbasierte Modellrechnung mit Sekundenzeitschritt in Excel aufgesetzt. Diese wurde mit einer Temperaturmessung einer realen Messung abgeglichen und erlaubt eine Quantifizierung von Wärmeverlusten und Verzögerungen. Die Übertragung dieser Resultate in die Jahressimulation wurde aber noch nicht vorgenommen. Die Arbeiten dazu wurden begonnen, werden aber erst im Frühjahr 2022 fertiggestellt.

2.3 Vergleich und Optimierung auf Basis von Simulationen

Bestehende Simulationsdecks in der Simulationsumgebung TRNSYS dienen als Basis zur Abbildung der Systemvariante mit ausschliesslich photovoltaischer Solaranlage ohne solarthermische Kollektoren. Mit den Simulationen wurde noch nicht begonnen, diese Arbeiten sind für 2022 vorgesehen.

2.4 Lebenszyklusanalyse

Die Software Simapro, basierend auf der Ecoinvent Datenbank von ESU services, wird verwendet um die Umweltbelastung der einzelnen Varianten zu vergleichen. Dabei kommen unterschiedliche Indikatoren zum Einsatz. Diese Arbeiten wurden noch nicht begonnen und sind erst für 2023 vorgesehen.



3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Monitoring/Datenanalyse

Im vorgängigen Projekt SensOpt konnten für das MFH Huttwil die Daten des ersten Winters (2020/2021) aufgenommen und ausgewertet werden. Dabei war allerdings nur eine der acht Wohnungen bewohnt und die Analysen haben daher nur bedingt Aussagekraft. Für die Messperiode im folgenden Winter (2021/2022) sind vier der acht Wohnungen verkauft. Für den zweiten Winter der Messperiode in diesem Projekt wird eine vollständige Auslastung erwartet.

Das Mehrgenerationenhaus Benzenschwil wurde fertiggestellt und war bereits seit Okt. 2021 fast vollständig vermietet. Das Wärmeerzeugungssystem ist bereits fertiggestellt und in Betrieb. Alle Sensoren sind ebenfalls bereits montiert. Die Inbetriebnahme, Kontrolle und Optimierung der Messdatenerfassung und der Steuerung finden laufend statt. Der reguläre Betrieb wird allerdings zu einem Zeitpunkt starten, der keine vollständige Aufzeichnung der Heizperiode 2021/22 mehr zulassen wird.

3.2 Duschwasser-WRG

Direkte Duschwasser WRG ist vor allem in Holland verbreitet. Es gibt aber auch Produkte aus Kanada, Portugal, Deutschland und der Schweiz. Die Wärmerückgewinnung wird dabei entweder in der Duschrinne oder im Fallstrang eingebracht. Die Systemeinbindung kann dabei auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- A Sowohl das Kaltwasser, welches zur Duscharmatur fließt, als auch das Kaltwasser, welches zum Wärmeerzeuger oder Boiler nachfließt, werden vorgewärmt. Bei dieser Einbindung kann am meisten Energie rückgewonnen werden und Herstellerangaben beziehen sich meistens auf diese Einbindungsart. (gängige Bezeichnung: Layout A)
- B Duschrinnen werden typischerweise lediglich zur Vorwärmung des Kaltwassers verwendet, welches während des Duschvorgangs zur Armatur fließt. Durch die höhere Kaltwassertemperatur muss dann weniger Warmwasser beigemischt werden und es wird weniger Warmwasser gebraucht. (gängige Bezeichnung: Layout B)
- C Bei einer zentralen Einbindung kann auch nur die Vorwärmung des Kaltwasserzuflusses zum Warmwasserspeicher oder Erwärmer möglich sein. Durch die erhöhte Kaltwassertemperatur wird in diesem Fall weniger Energie benötigt um die Warmwasser Solltemperatur zu erreichen. (gängige Bezeichnung: Layout C)

In Tabelle 1 wird ein Überblick über verfügbare Produkte und deren Effizienz gegeben. Dabei handelt es sich meist um Produkte für eine Duscheinheit, deren Effizienz bei einem Volumenstrom von 8 l/min⁶ ermittelt wurde. Von der Firma Q-Blue B.V. und Powerpipe SA sind Produkte für mehrere Duschen erhältlich. Das Passivhaus Institut Darmstadt testet diese bei 20 l/min. Mit einer Ausnahme wird bei allen in Darmstadt getesteten Produkten eine Totzeit von 5 s angegeben.



Tabelle 1: Übersicht unterschiedlicher Hersteller/Produkte für die Duschwasser-WRG.

EINBINDUNG	HERSTELLER	STEADY STATE EFFIZIENZ LAYOUT A [%]
DUSCHRINNEN	Joulia sa	41-60 ¹
	Dutch Solar Systems BV	42-54 ¹
	Wagner Solar GmbH	42-54 ¹
	Herwig-Energie BV	50 ¹
	ZYPHO	34 ¹
FALLSTRANG	Q-Blue B.V.	57-78 ¹
	Dutch Solar Systems BV	67 ¹
	Wagner Solar GmbH	67 ¹
	ZYPHO	64 ¹
	Powerpipe	33-64 ²

¹ Getestet am Passivhaus Institut Darmstadt

² Herstellerangaben

Duschrinnen können in einem Mehrfamilienhaus wohl nur zur Vorwärmung des Kaltwassers "zur Armatur" (Layout B) sinnvoll eingebunden werden. Produkte welche im Fallrohr eingebunden werden, können ebenfalls zur Vorwärmung des Kaltwasserzuflusses zum Speicher eingesetzt werden (effizienteres Schema A). Durch die längeren Kaltwasserleitungen vom zentralen Fallrohr bis zu den einzelnen Duschen treten aber zusätzliche Verzögerungen auf.

1.1.1 Modellierung einzelner Duschvorgänge

Die Verluste und Verzögerungen, welche sich aufgrund von Leitungen zwischen Dusche und der Platzierung der WRG einstellen, spielen sich innerhalb von kurzen Zeitintervallen ab. Diese können in einer Jahressimulation (mit typischerweise 2 min Zeitschritten) nicht im Detail modelliert werden. Da die Rahmenbedingungen aber bei jedem Duschvorgang sehr ähnlich sind, kann ein einzelner Duschvorgang im Detail untersucht werden. Die Resultate können dann auf die Jahressimulation übertragen werden.

Eine vereinfachte Zeitschrittrechnung für eine einzelne Zapfung mit Sekundenzeitschritten wurde durchgeführt, wobei Leitungslängen und eine Verzögerung des Duschwassers bis zum Erreichen des WRG-Wärmetauschers mit einkalkuliert wurden. Diese Modellierung konnte mit einer realen Messung verglichen werden. Als reale Messung standen Resultate einer WRG mit zentralem Fallstrang der Firma Wagner Solar GmbH mit einer zertifizierten Effizienz von 56% zur Verfügung. Dabei wurde aber lediglich die gezapfte Temperatur und der Volumenstrom aufgezeichnet, wobei die Duscharmatur über eine integrierte Thermostatregelung verfügte. Während der Messung wurde aus dem kalten Zustand zuerst 6 Minuten mit einer Einstellung von ca. 38 °C gezapft (Volumenstrom 7.8 l/min) um die Verzögerung des Warmwasseranstieges zu messen. Danach wurden weitere 6 Minuten



lediglich Kaltwasser gezapft um den Temperaturverlauf nach der WRG zu quantifizieren. Installiert waren 12 m und 14 m Kalt- und Warmwasserleitung (DN 22 und 15 gemischt).

In Abbildung 3 wird der gemessene Verlauf der Zapftemperatur mit dem modellierten Verlauf verglichen. Aufgrund einer vereinfachten Modellierung der Thermomischarmatur (perfekte Regulierung ohne Verzögerung) bestehen Abweichungen beim Temperaturanstieg. Die erste Stufe des Temperaturabfalls nach der Umschaltung auf Kaltwasser konnte realistisch modelliert werden, die weiteren Stufen die sich in der Modellierung zeigen konnten in der Realität nicht mehr deutlich gemessen werden. Zusätzlich wird in der Grafik die modellierte Effizienz der WRG dargestellt.

Nach dieser Modellierung kann eine WRG-Effizienz für unterschiedlich lange Duschvorgänge berechnet werden. Diese beträgt nach dem Einfluss von Verlusten und Verzögerungen für einen Duschvorgang von 2 Minuten 36 % und bei 5 Minuten 39 %.

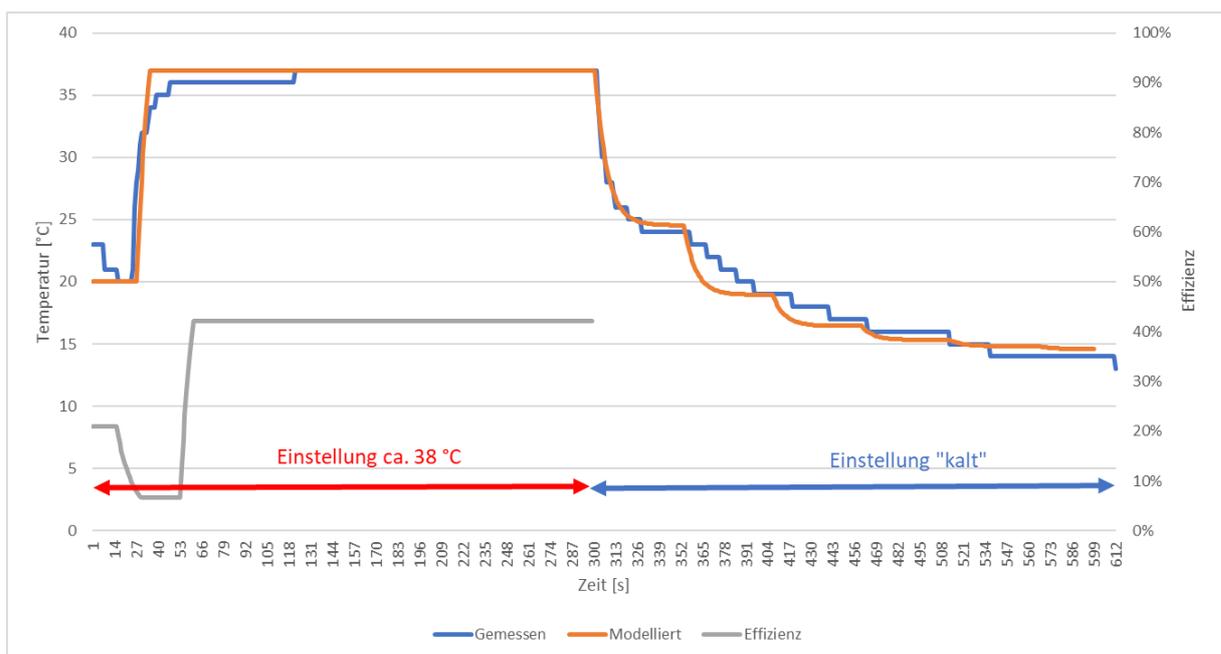


Abbildung 3: Vergleich von gemessener und modellierter Zapftemperatur und der entsprechenden Effizienz der WRG.

4 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Wie im Projektplan vorgesehen, haben Arbeiten zum Monitoring, zur Datenanalyse und zur Duschwasser WRG begonnen.

4.1 Monitoring/Datenanalyse

Ein Kick-off Meeting mit allen beteiligten Partnern hat am 15. Okt in Benzenschwil stattgefunden. Dabei konnten die Arbeiten zum Monitoring der beiden 100% solar beheizten Häuser in Huttwil und Benzenschwil besprochen und zwischen den beiden wissenschaftlichen



Partnern HSLU und FHNW koordiniert werden. Ebenfalls wurde die Zusammenarbeit, der Zeitplan und das weitere Vorgehen besprochen.

4.2 Duschwasser-WRG

Eine Recherche zu unterschiedlichen Produkten, sowie das Beschaffen von Messdaten und Modellen zur Duschwasser-WRG hat stattgefunden. Eine Zeitschrittmodellierung lieferte erste Resultate zur Reduktion der WRG-Effizienz durch Verluste und Verzögerungen.

5 Weiteres Vorgehen

Das Projekt läuft erst seit wenigen Monaten und kann voraussichtlich planmässig fortgesetzt werden.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Projektteam arbeiten zwei Unternehmen und drei Fachhochschulen zusammen.

7 Kommunikation

Es wurden noch keine Resultate kommuniziert.

8 Publikationen

Es wurden noch keine Publikationen veröffentlicht.

9 Literaturverzeichnis

1. Willy Villasmis, Marcel Troxler, Reto Hendry & Jörg Worlitschek. OPTSAIS – Exergetic and Economic Optimization of Seasonal Thermal Energy Storage Systems. (2019).



2. Lichtensteiger, F., Battaglia, M., Ruesch, F. & Haller, M. Y. Vollständig solar beheizte MFH mit saisonalem Wasserspeicher, Solarthermie, PV und Wärmepumpe. in *21. Brenet Status-Seminar 2020: Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt* (2020).
3. Kirchner, A. & et al. *Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht*. (2020).
4. Haller, M. & Ruesch, F. *Fokusstudie «Saisonale Wärmespeicher – Stand der Technik und Ausblick»*. <https://speicher.aeesuisse.ch/de/fokusstudien> (2019).
5. Weber, R. & Baldini, L. High temperature seasonal borehole thermal energy storage for effective load shifting and CO2 emission reduction. in 1201–1209 (2018).
6. Passivhaus Institut, D. Kriterien und Algorithmen für die Zertifizierte Passivhaus-Komponente: Duschwasser Wärmerückgewinnung. (2020).