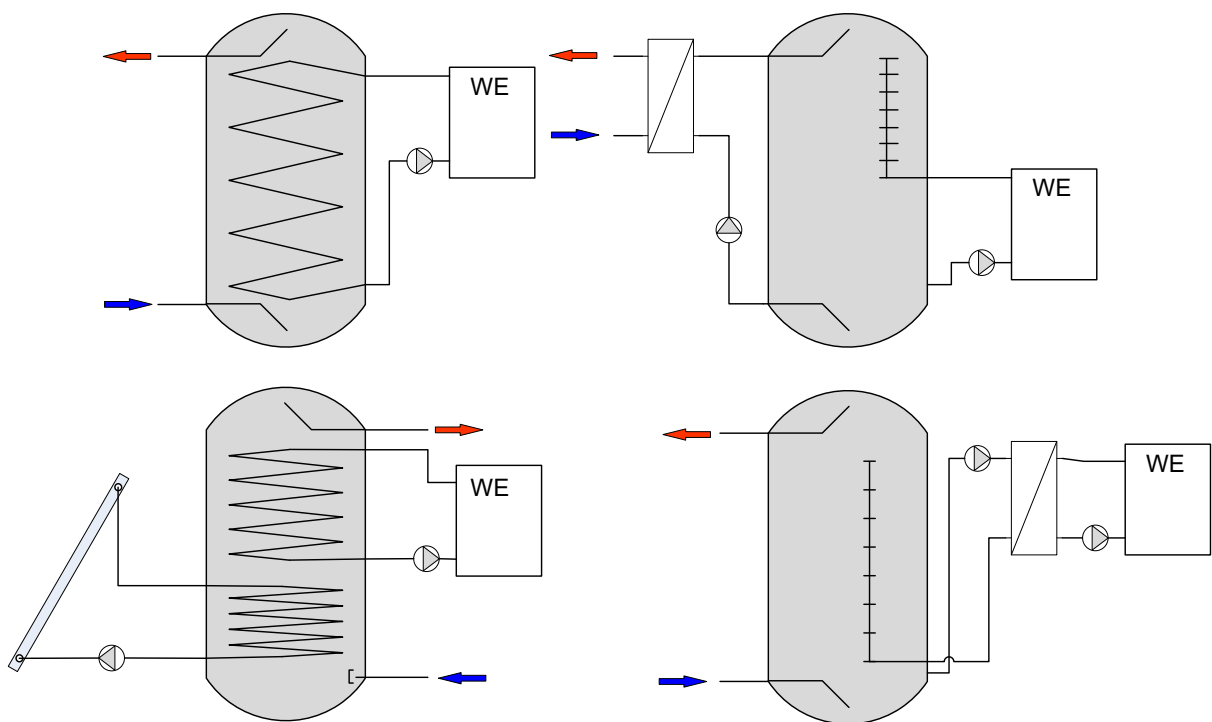




Schlussbericht vom 13.09.2021

DHWStrat

Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern



Quelle: © SPF 2021



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK



Datum: 31.08.2021

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

SPF Institut für Solartechnik
OST Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Autor/in:

Robert Haberl, SPF, robert.haberl@spf.ch
Ozan Türk, SPF, ozan.tuerk@spf.ch
Andreas Bohren, andreas.bohren@spf.ch
Michel Y. Haller, SPF, michel.haller@spf.ch

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com

BFE-Vertragsnummer: SI/500315-03

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



Zusammenfassung

Die Methode zur Bestimmung der thermischen Schichtung und exergetischen Effizienz von Kombispeichern aus dem Projekt StorEx wurde für die Messung von Warmwasserspeichern angepasst. Die neue Methode verwendet Zapfprofile aus der EN 16147, um die Schichtungseffizienz von Speichern unterschiedlicher Grösse zu prüfen, wobei die Grösse des Kollektorfeldes bei der Verwendung von Solarthermieanlagen an die Zapfprofile angepasst wird. Das resultierende Testverfahren wurde auf mehrere Warmwasserspeicher angewendet und die Resultate ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die Effizienz der Speicher und deren Einfluss auf die Betriebsweise der Nachheizung stark variiert. Ein sehr gut schichtendes Speicherkonzept erreichte nicht nur einen höheren Komfort und schaffte bessere hygienische Voraussetzungen, sondern spart in Kombination mit einer Wärmepumpe gegenüber einem anderen Speicher bis zu 40 % elektrische Energie ein. Diese Resultate unterstreichen die Notwendigkeit einer Bewertung der Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern, wie sie mit der hier vorgestellten Methode vorgenommen werden kann.

Résumé

La méthode de détermination de la stratification thermique et de l'efficacité exergetique issue du projet StorEx a été adaptée pour la caractérisation de réservoirs de stockage d'eau chaude. Des profils de consommation selon la norme EN 16147 sont utilisés avec la nouvelle méthode afin de vérifier l'efficacité de la stratification de stockages de différentes tailles. Dans le cas d'installations solaire thermiques, la surface du champ de capteur est adaptée au profil de consommation. La méthode de test résultante a été appliquée à différents réservoirs de stockage et les résultats analysés. Il en résulte que l'efficacité du stockage ainsi que son influence sur le fonctionnement du chauffage d'appoint varie fortement. En plus de contribuer à de meilleures conditions d'hygiène et d'améliorer le confort, un concept de stockage avec une très bonne stratification permet, comparé à un autre stockage d'économiser jusqu'à 40 % d'énergie électrique lorsque combiné avec une pompe à chaleur. Ce résultat souligne la nécessité d'évaluer l'efficacité de la stratification thermique des réservoirs de stockage comme cela peut se faire avec la méthode présentée ici.

Summary

The method for determining the thermal stratification of combi-storage tanks from the StorEx project was adapted for measuring domestic hot water storage tanks. The new method uses tapping profiles from EN 16147 to test the stratification efficiency of different sized storage tanks, matching the size of the collector array to the tapping profiles when using solar thermal systems. The resulting test procedure was applied to several tanks and the results were evaluated. It is shown that the efficiency of the storage tanks and their influence on the operation mode of the charging varies considerably. A very well stratified storage tank concept not only achieved higher comfort and created better hygienic conditions, but in combination with a heat pump saved up to 40 % electrical energy compared to another storage tank. These results underline the need for an evaluation of the stratification efficiency of domestic hot water storage tanks. This evaluation can be done in the future with the method presented here.



Take-home messages

- Die bewährte Methode zur Messung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern aus dem Projekt StorEx wurde angepasst für die Messung von Warmwasserspeichern.
- Die neue Methode verwendet WW-Zapfprofile aus der EN 16147, um die Schichtungseffizienz von Speichern unterschiedlicher Grösse zu prüfen.
- Die Methode ist für Speicher zur Kombination mit unterschiedlichen Wärmequellen – mit oder ohne Solarwärmeanlagen – geeignet.
- Resultate der Messungen zeigen deutliche Unterschiede der Schichtungseffizienz verschiedener Speicher und unterstreichen so die Notwendigkeit der Bewertung der Schichtungseffizienz.
- Ein sehr gut schichtendes Speicherkonzept erreichte nicht nur einen höheren Komfort und schaffte bessere hygienische Voraussetzungen, sondern spart in Kombination mit einer Wärmepumpe gegenüber einem anderen Speicher bis zu 40% elektrische Energie ein.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2	Motivation des Projektes.....	8
1.3	Projektziele	8
2	Testmethode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz	9
2.1	Allgemeine Grundlagen	9
2.1.1	Störung der Schichtung	9
2.1.2	Schichtungseffizienz von Kombispeichern	9
2.1.3	Prüfstand und Systemgrenzen	10
2.1.4	Bestimmung der Schichtungseffizienz	10
2.2	WW-Zapfprofil	11
2.3	Wärmeerzeuger	12
2.4	Kollektorfeld	13
2.5	Entropiebilanz des Vergleichssystems.....	14
2.6	Entropiebilanz des geprüften Systems.....	15
3	Ergebnisse und Diskussion	17
3.1	Ergebnisse der Schichtungstests.....	17
3.1.1	Geprüfte Speicher	17
3.1.2	Kennzahlen.....	18
3.1.3	Resultat Speicher #1	19
3.1.4	Resultate Speicher #2	22
3.1.5	Resultate Speicher #3	26
3.1.6	Resultate Speicher #4	29
3.2	Zusammenfassung und Vergleich der Testresultate.....	32
3.3	Diskussion Testmethode.....	36
4	Schlussfolgerungen und Fazit	39
5	Ausblick und zukünftige Umsetzung	39
6	Nationale und internationale Zusammenarbeit	39
7	Kommunikation	40
8	Publikationen	40
9	Literaturverzeichnis	41
	Annex A: Simulationen zur Bestimmung des Testprofils	42
	Annex B: Grafiken zu den Schichtungstests	45
	Annex C: Entropiebilanz des Vergleichssystems	50



Abkürzungsverzeichnis

EN	Europäische Norm
FWM	Frischwassermodul
SD	Solarer Deckungsgrad
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
WE	Wärmeerzeuger
WP	Wärmepumpe
WÜ	Wärmeübertrager
WW	Warmwasser
ZF	Zeitfenster



Symbolverzeichnis

Im Folgenden sind Symbole aufgeführt, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Die Symbole sind alphabetisch sortiert, zunächst nach lateinischen Buchstaben, anschliessend nach griechischen.

Symbole

m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	Kg/h
Q	Wärmemenge	kWh
s	spezifische Entropie	J/(kgK)
S	Entropie	J/K
t	Zeit	H
T	Temperatur	°C
ϑ	Temperatur	°C
Δ	Differenz	-
ζ	Effizienz	-

Indizes

a	Jährlich
i	Index
irr	irreversibel
KW	Kaltwasser
max	maximal
min	minimal
mix	gemischt
ms	gemessen
Sp	Speicher
str	Schichtung
Sol	Solarthermisch
sys	System
tot	total
VL	Vorlauf
wat	Wasser
WW	Warmwasser
24h	24 Stunden / Tag



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Im BFE Projekt StorEx (BFE-Vertragsnummer SI/500935-01) wurde eine Methode entwickelt, mit welcher die Schichtungseffizienz von "Kombispeichern" gemessen und mit einer Schichtungseffizienzanzahl von 0-100 % bewertet werden kann [1–3]. Dieses Verfahren hat sich inzwischen etabliert und ist unter anderem Voraussetzung für die Zulassung von Kombispeicher im Wärmepumpen-Systemmodul¹. Seit 2014 wurden bereits mehr als 50 Messungen an 25 verschiedenen Kombispeichern durchgeführt.

1.2 Motivation des Projektes

Auf Europäischer Ebene wird das Thema Speicherschichtung in den entsprechenden Beratungs- und Normierungsgremien diskutiert. International wird nach einer Lösung gesucht um die thermische Schichtung von Wärmespeichern generell zu bewerten.

Das am SPF entwickelte Verfahren zur Messung von Kombispeichern wurde dort diskutiert, es wurde jedoch als grosses Manko angesehen, dass es bisher nur für Kombispeicher zur Verfügung steht. Alternative "Schichtungskennzahlen", zum Beispiel basierend auf EN60379 oder EN12976-3, wurden ebenfalls diskutiert. Diese Alternativen sind jedoch nicht ausgereift und weisen erhebliche Mängel auf.

Die im Projekt StorEx entwickelte und bereits erfolgreich eingesetzte Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz ist generell auch für die Messung von Warmwasserspeichern (WW-Speicher) geeignet. Im vorliegenden Projekt wurde diese darauf angepasst und für diesen Einsatz getestet.

1.3 Projektziele

Ziel des Projektes ist die Erweiterung der Methode zur Bestimmung der Speicher-Schichtungseffizienz, welche im Projekt StorEx erarbeitet wurde, auf WW-Speicher, sowie die Anwendung der Methode an vier verschiedenen WW-Speichern.

Damit soll auch die Grundlage für die Verankerung der Schichtungseffizienz in den internationalen Normen gelegt werden. Dies ist nur dann möglich, wenn auch ein Verfahren für Warmwasserspeicher verfügbar ist.

Bei der Erweiterung der Methode sind einige Details und Anforderungen zu beachten:

- Die Repräsentativität des vorliegenden - für Kombisysteme ermittelten - Testprofils muss überprüft und mit hoher Wahrscheinlichkeit ein neues Profil für den Solarertrag ermittelt werden.
- Das WW-Zapfprofil sollte an gängige EU-Zapfprofile angepasst und das Verfahren weiter vereinfacht werden.
- Der Einfluss der neuen Legionellenvorschriften der SIA 385/1 (2020) auf die Durchführung der Messungen und das Testresultat muss berücksichtigt werden.



2 Testmethode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz

2.1 Allgemeine Grundlagen

2.1.1 Störung der Schichtung

Die Temperaturschichtung der Wasserspeicher stellt sich aufgrund von Schwerkraft und der temperaturabhängigen Dichte des Wassers automatisch ein. Diesem natürlichen Prozess wirken allerdings Ausgleichsprozesse entgegen, welche im Wesentlichen auf drei Ursachen zurückgeführt werden können:

- Wärmeleitung und Diffusion im Wasser und in den Speicher-Einbauten
- Mitreissende Strömung
- Impulsreiche Beladungen

Bei der direkten Speicherbe- und Speicherentladung verursachen vor allem die impulsreiche Beladung und die mitreissende Strömung eine Vermischung von Fluidpaketen unterschiedlicher Temperaturen.

Die mitreissende Strömung kann unterbunden werden, indem das Fluid bereits auf der richtigen Höhe – das heisst auf der Höhe die seiner Temperatur entspricht – in den Speicher eingebracht wird. Bei Verwendung eines internen Wärmeübertragers (WÜ) ist diese gezielte Beladung nur in sehr engen Grenzen möglich. Entsprechend müssen die Fluidpakete die aufgrund ihrer Dichte passende Position im Speicher erst einnehmen. Dabei werden auch Fluidpakete aus der Umgebung mitgerissen und mit der auftreibenden (oder absinkenden) Fluidfahne gemischt.

Eine direkte, d.h. nicht über interne Wärmetauscher erfolgende, Beladung mit hohen Volumenströmen verursacht Turbulenzen und Strömungswalzen im Speicher und kann damit auch eine bereits vorhandene Speicherschichtung zerstören. Der potenzielle Schaden für die Speicherschichtung, und die damit verbundene Reduktion der Effizienz eines Systems, ist dabei in der Regel beträchtlich höher als im Falle einer mitreissenden Strömung, die nur durch die Schwerkraft angetrieben wird.

2.1.2 Schichtungseffizienz von Kombispeichern

Die im Projekt StorEx entwickelte Methode zur Messung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern beruht auf einem 24-stündigen Prüfzyklus. Während des Prüfzyklus, der mehrmals wiederholt wird, werden dynamische Be- und Entladevorgänge des Speichers durch den Prüfstand durchgeführt. Dem Test sind Profile für die Heizlast eines Einfamilienhauses, ein Zapfprofil für den WW-Bedarf sowie Wetterdaten für die Simulation und Emulation eines Kollektorfeldes hinterlegt. Die Beladung über einen Wärmeerzeuger (Wärmepumpe) wird nach Bedarf und den im Speicher vorhandenen Temperaturen geregelt. Die genauen Details sind in der SPF Prüfvorschrift 86 [4] definiert.



2.1.3 Prüfstand und Systemgrenzen

Analog zur Messung von Kombispeichern wird auf dem Prüfstand der realitätsnahe Betrieb des WW-Speichers über die Emulation von Be- und Entladevorgängen nachgestellt. Dazu werden die nötigen Komponenten als Modell in der Prüfstandssoftware nachgebildet und aufgrund der dort berechneten Werte für Leistung, Temperatur und Massenstrom emuliert.

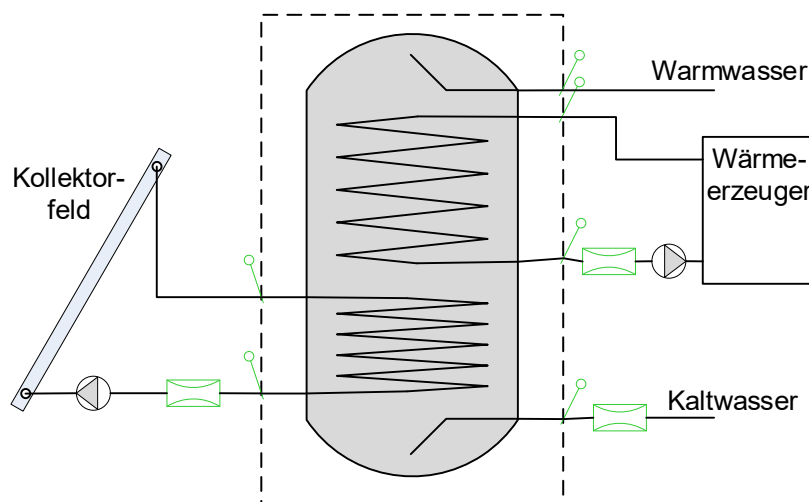


Abbildung 1: Innerhalb der gestrichelten Linien ist exemplarisch ein WW-Speicher dargestellt. Die Aufteilung von Arbeitsfluid und Frischwasser kann auch über eine andere Anordnung der Wärmeübertrager umgesetzt sein. Die Komponenten ausserhalb der gestrichelten Linien werden durch den Prüfstand emuliert.

Der Prüfling besteht aus einem Speicher inklusive der nötigen WÜ und ggf. der Hydraulik welche für das Umschalten von Be- oder Entladungen eingesetzt wird. Abbildung 1 zeigt exemplarisch einen WW-Speicher (innerhalb der gestrichelten Linien) und die durch den Prüfstand emulierten Komponenten. Dabei ist der Betrieb jeder Komponente abhängig von der Temperatur im Speicher:

- Die Beladung über den Wärmeerzeuger (WE) wird durch die Temperatur im Speicher und die gewählte Solltemperatur geregelt.
- Die Kollektorkreispumpe wird nach der Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektoraustritt und dem Speicher gesteuert. Im Betrieb ist die Vorlauftemperatur der Kollektoren, respektive des Kollektorkreises, abhängig von der Austrittstemperatur aus dem Speicher.
- Die Dauer der WW-Zapfungen wird durch einen Energie-Sollwert und die aus dem Speichersystem zur Verfügung gestellte Temperatur bestimmt. Bei hoher WW-Temperatur wird der Energie-Sollwert früher erreicht als bei tiefer Temperatur.

2.1.4 Bestimmung der Schichtungseffizienz

Jede Mischung von Fluiden mit verschiedenen Temperaturen hat, genau wie Wärmeausgleichsprozesse jeglicher Art, eine (messbare) Entropieproduktion zur Folge. Diesen Umstand macht sich die hier dokumentierte Methode zur Bestimmung der



Schichtungseffizienz zunutze, welche sich an der im Projekt StorEx [1,2] entwickelten und bereits vielfach auf Kombispeicher angewendeten [3] Methode orientiert. Hierfür wird die Entropieproduktion des Speicher-Systems $\Delta S_{irr,ms}$ während dem realitätsnahen Betrieb gemessen.

Aus der, während dieses Prüfzyklus gemessenen, Entropieproduktion wird die Schichtungseffizienz (ζ_{str}) als dimensionslose Grösse bestimmt. Dazu wird die gemessene Entropieproduktion ins Verhältnis zur Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers $\Delta S_{irr,mix}$ gesetzt:

Formel 1

$$\zeta_{str} = 1 - \frac{\Delta S_{irr,ms}}{\Delta S_{irr,mix}}$$

Die so ermittelte Schichtungseffizienz beschreibt, wie gut der Speicher seine Aufgabe im Vergleich zu einem vollständig durchmischten Speicher (worst case) „erledigt“. Ein perfekt schichtendes System würde eine Schichtungseffizienz von 100 % erreichen. Ein völlig durchmischter Speicher 0 %.

2.2 WW-Zapfprofil

In der EN 16147: 2017 [5] sind 24-h Lastprofile für den WW-Bezug definiert. Der energetische Sollwert der Profile variiert von 0.345 kWh bis zu 93.52 kWh für einen Tag, der höchste Solldurchsatz einer einzelnen Zapfung variiert von 2 l/min bis zu 96 l/min. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in der Norm definierten Profile.

Tabelle 1: Übersicht der Zapfprofile der EN 16147:2017.

Bezeichnung	Q_{tot} [kWh]	\dot{V}_{max} [l/min]
3 XS	0.345	2
XXS	2.100	2
XS	2.100	3
S	2.100	5
M	5.845	6
L	11.655	10
XL	19.070	10
XXL	24.530	16
3XL	46.760	48
4XL	93.520	96



In den Profilen ist der Zeitpunkt für die Zapfungen, der Solldurchsatz, die nutzbare Wassertemperatur sowie die Höchsttemperatur² enthalten, wobei die nutzbare Temperatur im Bereich zwischen 10 °C und 40 °C liegt und die Höchsttemperatur von 55 °C jeweils nur an wenigen Zapfungen pro Tag definiert wird³. Der Sollwert des einströmenden Kaltwassers ist mit 10 °C definiert.

Für die Messung der Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern kann eines der Profile gewählt werden (je nach Volumen/Schüttleistung des geprüften Speichers), wobei das Profil L mit 11.655 kWh pro Tag als Standardprofil Anwendung findet.

Während der Messung wird entsprechend dem Zeitpunkt und dem gewählten Zapfprofil das Kaltwasser bei gefordertem Massenstrom auf eine Temperatur von 10 °C konditioniert. Aus der Differenz zum austretenden Warmwasser wird die Wärmeleistung berechnet, welche aufkumuliert wird zur gezapften Energie ab dem Zeitpunkt des Erreichens der nutzbaren Wassertemperatur. Die Zapfung wird beendet, wenn der Energie-Sollwert erreicht ist.

2.3 Wärmeerzeuger

Die Beladung des Speichers über den WE erfolgt – in Anlehnung an eine Beladung durch Wärmepumpe (WP)⁴ - mit einer fixen Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von 5 K. Der Massenstrom ist Abhängig von der gewählten Leistung des WE. Für eine 8 kW WP resultieren somit 1.4 m³/h. Für grössere oder auch kleinere Leistungen wird der Massenstrom entsprechend skaliert. Am aktuell für die Messung der Schichtungseffizienz genutzten Prüfstand ist der maximal mögliche Massenstrom 2.7 m³/h, was einer Heizleistung von 16 kW entspricht.

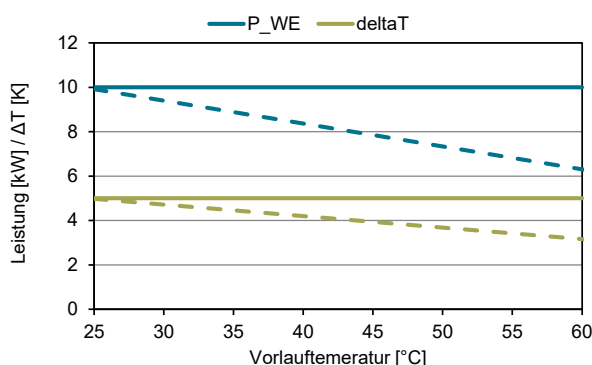


Abbildung 2: Leistung und Temperaturdifferenz des WE in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur. Gestrichelt: Berechnungen aus StorEx. Durchgezogene Linien: Vereinfachungen im Projekt DHWStrat.

² Während einer Wasserentnahme mindestens zu erreichende Wassertemperatur, die als Mittelwert über der Wasserentnahme berechnet wird.

³ Die Einhaltung dieser Höchsttemperatur wird in der EN 16147 nicht gefordert. Stattdessen wird angenommen, dass im Fall des Nichterreichens der Höchsttemperatur die fehlende Temperaturdifferenz von einem zusätzlichen elektrischen Widerstandsheiz erzeugt wird.

⁴ Die Wärmepumpe wurde als Referenz-Wärmeerzeuger gewählt, weil sie am sensibelsten auf mangelhafte Speicherschichtung reagiert, und weil ihr im Rahmen der Energiestrategie der Schweiz bei der Warmwasserbereitung eine weit bedeutendere Rolle attestiert wird als den Verbrennungs-Wärmeerzeugern.



Durch diese vereinfachte Emulation des WE fallen die Berechnungen zur Ermittlung von Leistung und Austrittstemperatur wie in Abbildung 2 dargestellt weg, wodurch die Umsetzung am Prüfstand erleichtert wird.

2.4 Kollektorfeld

Für die Simulation und Emulation des Solarertrages werden die Standard-Leistungsdaten für einen Flachkollektor aus dem IEA SHC Task 32 verwendet, die bereits im Projekt StorEx zur Anwendung kamen. Die Leistungs-Kenndaten sind in Tabelle 2 ersichtlich. Es wird eine Süd-Orientierung mit 45° Neigung angenommen.

Tabelle 2: Kollektorfeld-Kennwerte für die Simulation und Emulation, bezogen auf die Aperturfläche.

η_0 [-]	a_1 [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	a_2 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$]	$C_{\text{eff,spec}}$ [$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
0.8	3.5	0.015	7000

Ein 24-h Profil mit der generierten Wärmeleistung des oben beschriebenen Kollektors pro m^2 Kollektorfeld vor Abzug der thermischen Verluste in Abhängigkeit der Wetterdaten ist dem Test hinterlegt. Dieser Wert ist nur abhängig von Parametern, welche bereits vor dem Test bekannt sind (Einstrahlung, IAM, Kollektor-Kennwerte) und nicht von der Betriebstemperatur. Ein Profil für die Einstrahlung wurde für die Messung von WW-Speichern in einer Simulationsstudie neu erstellt. Die Randbedingungen und Resultate der Simulationen sind in Annex A beschrieben. Das resultierende Profil ist in Abbildung 3 dargestellt.

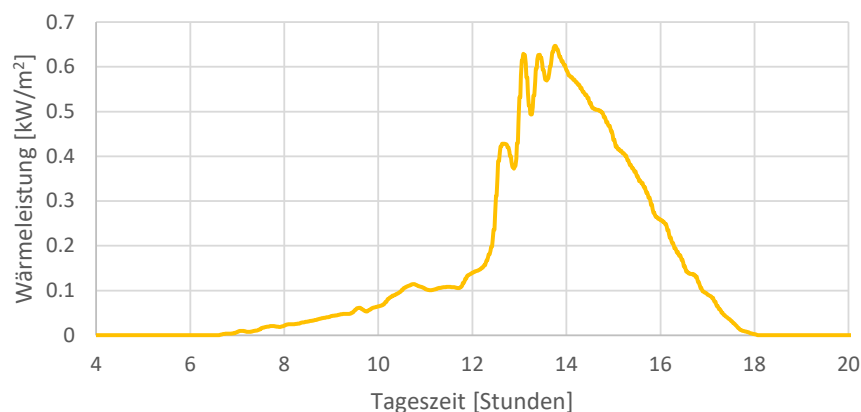


Abbildung 3: Generierte Wärmeleistung pro m^2 Kollektorfeld vor Abzug der thermischen Verluste am Testtag.

Im Simulationsmodell muss dann lediglich die Kombination aus Betriebstemperatur und der Verlustleistung an die Umgebung berechnet werden. Die Differenz aus der Kollektortemperatur und der Speichertemperatur wird als Kriterium zum Betrieb der Kollektorkreispumpe verwendet. Die Grösse des Kollektorfeldes ist abhängig vom gewählten WW-Zapfprofil des Tests. In Tabelle 3 ist die Aperturfläche für die verschiedenen Zapfprofile dargestellt.



Tabelle 3: Aperturfläche des emulierten Kollektorfeldes für die Messung mit verschiedenen WW-Zapfprofilen.

Zapfprofil	Aperturfläche
[-]	[m ²]
L	5.0
XL	8.2
XXL	10.5

2.5 Entropiebilanz des Vergleichssystems

Zur Bestimmung der Schichtungseffizienz wird die Entropieproduktion eines völlig durchmischten Speichers ($\Delta S_{irr,mix}$) benötigt. Im einfachsten Fall besteht diese aus der Differenz aus Be- und Entladung:

Formel 2
$$\Delta S_{irr,mix} = \Delta S_{WW} - S_{60^\circ C}$$

Für die Beladung des völlig durchmischten Speichers wird angenommen, dass die Wärmelieferung immer der höchsten Temperatur entspricht, welche für das Erreichen der Soll-Temperatur des Speichers erforderlich ist, wofür in diesem Falle auf Grund der Vorgaben der SIA 385/1:2020 [6] 60 °C eingesetzt wird. Die dabei zu liefernde Wärmemenge entspricht der Last, also dem Wärmebedarf für Warmwasser. In Realität müssen zusätzlich die thermischen Verluste des Speichers gedeckt werden. Da die Entropieverluste die mit Wärmeverluste einhergehen jedoch bei der Entropieproduktion des gemessenen Systems abgezogen werden⁵, wird diese Entropieänderung auch beim Referenzsystem nicht ausgewiesen. Somit gilt:

Formel 3
$$S_{60^\circ C} = Q_{WW} / (273.15K + 60K)$$

Die abgeführte Entropie über den WW-Bezug wird mit der spezifischen Entropie $s(\vartheta)$ zwischen der Temperatur des eintretenden Kaltwassers und der geforderten Temperatur des WW von 50 °C gerechnet:

Formel 4
$$\Delta S_{WW} = \sum_i m_{WW,i} \cdot [s(T_{KW}) - s(T_{WW})]$$

Die Entropieproduktion aus Be- und Entladung sowie die Bilanz bzw. die resultierende Entropieproduktion des völlig durchmischten Speichers ist für verschiedene Zapfprofile in Abbildung 4 dargestellt. Für das Zapfprofil L, das in leicht abgewandelter Form bereits für die

⁵ Würde man die Entropie-Verluste die mit den Wärmeverlusten einhergehen nicht abziehen von der gemessenen Entropieänderung des Speichers, so würde dies schlecht isolierte Speicher begünstigen, da ein hoher Wärmeverlust die gemessene Entropieänderung des Speichers reduziert – und damit das Resultat verfälscht.



Messung von Kombispeichern Anwendung findet und einer gesamten WW-Energie von 11.655 kWh, ist die Entropieproduktion $\Delta S_{irr,mix} = 12.75 \text{ kJ/K}$.

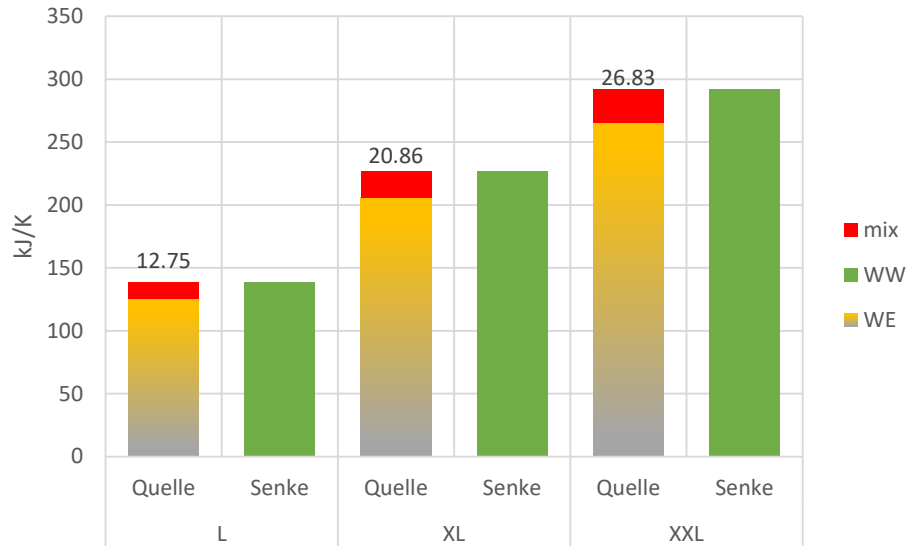


Abbildung 4: Zugeführte (WE) und abgeführte (WW) Entropie in Abhängigkeit des verwendeten Zapfprofils.

2.6 Entropiebilanz des geprüften Systems

In der Messung des Systems sind verschiedene Messstellen zur Bestimmung der Entropieproduktion notwendig. Zur Bestimmung der Entropie aus der Be- und Entladung wird eine Messung der Temperaturen und Volumen- bzw. Massenströme an den Systemgrenzen (Abbildung 5) durchgeführt.

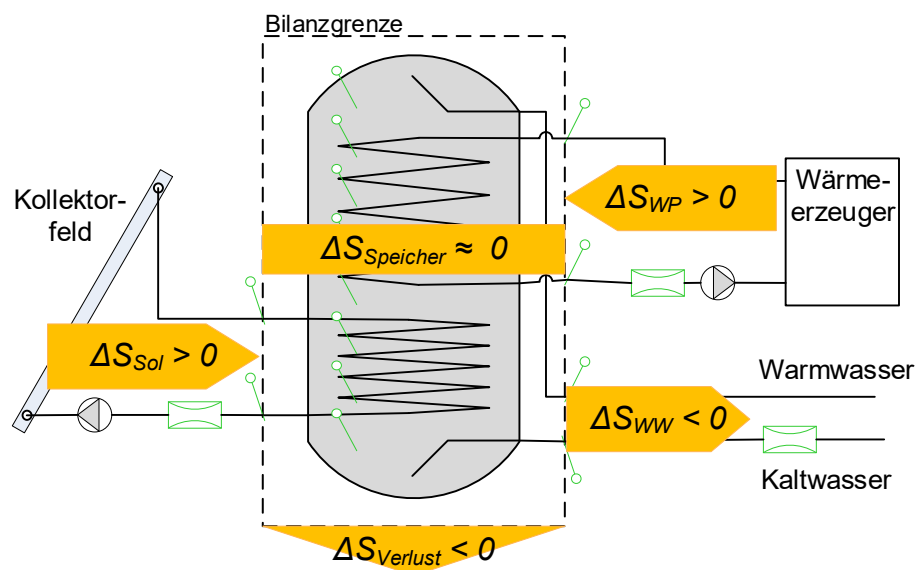


Abbildung 5: Entropieänderungen während des 24-h Testzyklus.



Für die Temperaturmessungen werden paarweise kalibrierte 4-Leiter Pt100 Tauchfühler verwendet. Die Ermittlung der Massenströme erfolgte nach dem Coriolis-Prinzip (Wärmepumpe und Kollektoren), respektive nach dem magnetisch-induktiven Prinzip (WW). Aus diesen Messdaten kann die Entropie der Be- und Entladung nach Formel 5 und Formel 6 bestimmt werden:

Formel 5
$$\dot{S} = \dot{m} \cdot [s(\vartheta_{in}) - s(\vartheta_{out})]$$

Formel 6
$$\Delta S = \sum_i \dot{S}_i \cdot \Delta t$$

Zur Berechnung der Entropieänderung durch die Speicherverluste sowie die Speicheränderung müssen die Verluste selbst und auch die Speichertemperatur bekannt sein. Diese Temperatur ist allerdings weder über die Zeit noch über die Position konstant. Deshalb werden mehrere Temperaturen über die Höhe des Speichers mittels eines Fühlerbandes gemessen. Aus diesen Temperaturen wird sowohl der Mittelwert über die Höhe des Speichers jeweils zu Beginn und Ende der 24-h Testsequenz $\vartheta_{Sp,Start}$ und $\vartheta_{Sp,Ende}$ berechnet, als auch der Mittelwert über die Zeit $\overline{T_{Sp,24h}}$. Die Berechnung der Entropie der Verluste erfolgt dann nach Formel 7, die Berechnung der Entropie der Speicheränderung nach Formel 8:

Formel 7
$$\Delta S_{Verlust} = \frac{Q_{Verlust}}{T_{Sp,24h} + 273.15K}$$

Formel 8
$$\Delta S_{Speicheränderung} = m_{Sp} \cdot [s(\vartheta_{Sp,End}) - s(\vartheta_{Sp,Start})]$$

Aus den einzelnen Termen kann die Entropieproduktion des getesteten Speichers auf Grund der in Abbildung 5 dargestellten Entropiebilanz nach Formel 9 berechnet werden:

Formel 9
$$\Delta S_{irr,ms} = -(\Delta S_{WW} + \Delta S_{Verlust} + \Delta S_{Speicheränderung} + \Delta S_{WP} + \Delta S_{Sol}) > 0 \frac{J}{K}$$



3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnisse der Schichtungstests

3.1.1 Geprüfte Speicher

Im Projekt DHWstrat wurden vier unterschiedliche Warmwasserspeicher geprüft. In Abbildung 6 sind die verschiedenen Speicher schematisch dargestellt.

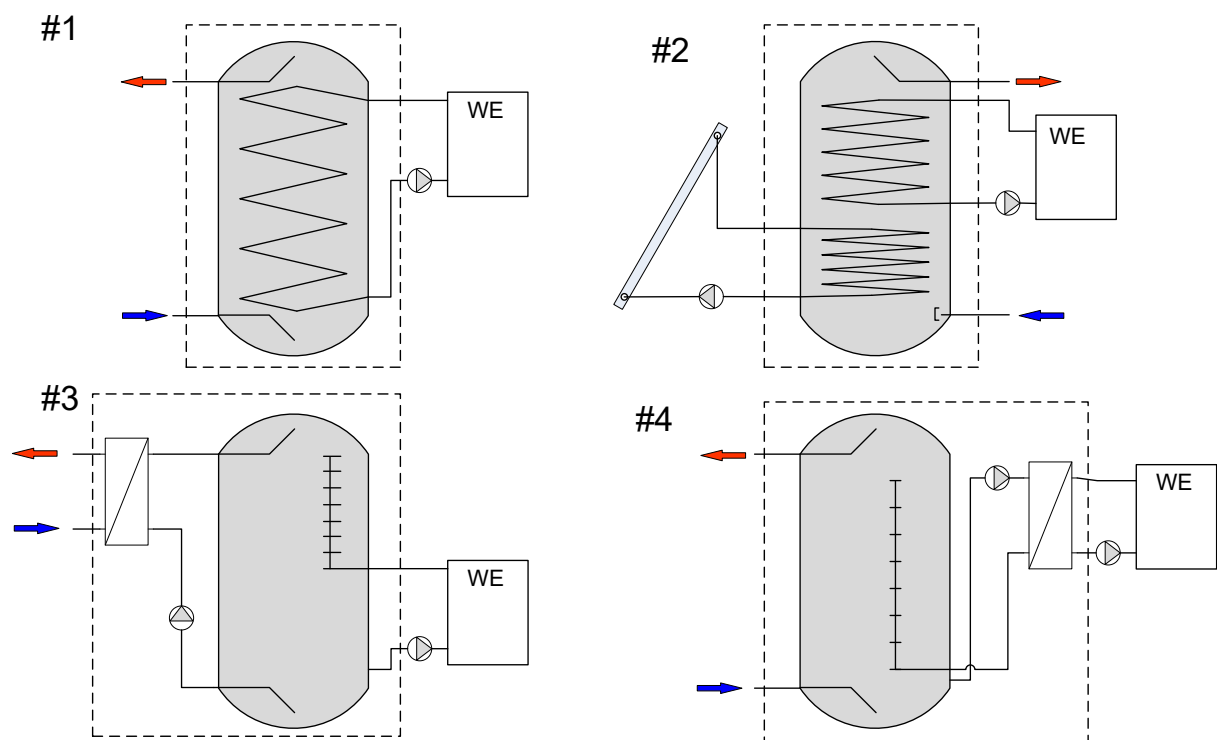


Abbildung 6: Schemata und Einbindung der geprüften Speicher.

Speicher #1

Speicher #1 ist ein WW-Speicher mit einem Volumen von 200 l. Zur Beladung des Speichers ist ein WÜ über die gesamte Höhe des Speichers mit einer Oberfläche von 2.5 m² integriert. Kaltwassereintritt sowie Warmwasseraustritt sind jeweils über ein Bogenrohr realisiert, um das volle Volumen des Speichers nutzen zu können.

Speicher #2

Speicher #2 ist ein WW-Speicher mit einem Volumen von 780 l. Zur Beladung des Speichers sind zwei WÜ integriert. Der WÜ im oberen Teil zur Beladung durch die Wärmepumpe hat eine Oberfläche von 5 m² und lässt unter dem Klöpperboden ein Reservevolumen frei. Im unteren Teil befindet sich ein WÜ für die Solarwärme mit einer Oberfläche von 2 m². Der WW Austritt ist über ein Bogenrohr realisiert, der Kaltwassereintritt ist mit einem Prallblech ausgestattet.



Speicher #3

Speicher #3 ist ein Pufferspeicher mit einem Volumen von 1000 l in Kombination mit einem externen Frischwassermodul (FWM). Die Beladung erfolgt über einen Speicheranschluss in der oberen Hälfte des Speichers mit einer internen Schichteinrichtung.

Speicher #4

Speicher #4 ist ein Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 200 l. Zur Beladung des Speichers wird ein externer WÜ (Plattenwärmetauscher) verwendet. Das über den Plattenwärmeübertrager aufgeheizte Fluid wird mit einer Schichteinrichtung von unten in den Speicher geführt. Die Messung wurde mit einer auf einen Durchsatz von 1000 kg/h ausgelegten Schichteinrichtung und mit einer auf einen Durchsatz von 2000 kg/h ausgelegten Schichteinrichtung durchgeführt. Kaltwassereintritt sowie WW Austritt sind jeweils über ein Bogenrohr realisiert, um das volle Volumen des Speichers nutzen zu können.

3.1.2 Kennzahlen

Als Resultate werden die Energie- und Entropiewerte dargestellt, die an den in Abbildung 5 bzw. Abbildung 6 eingezeichneten Systemgrenzen bestimmt wurden, sowie die daraus berechnete Schichtungseffizienz.

Weiterhin werden Temperaturen im Speicher gezeigt. Diese wurden entweder über Anlegefühler, die äquidistant über die Speicherhöhe an der Speicherwand verteilt sind, gemessen oder über äquidistant verteilte Tauchfühler in den Fällen, in denen kein Zugang zur Speicherwand möglich war. Die Bezeichnung der Temperaturfühler lautet TS1 (am Speicher unten) bis zu TS8 (am Speicher oben).

Aus den Temperaturen zur Be- und Entladung der Speicher wurde eine nach Leistung gewichtete Temperatur bestimmt. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe wird nach Formel 10 bestimmt. Die Bestimmung der Temperaturen für die Solarwärme sowie für den WW-Bezug erfolgt analog.

Formel 10

$$\overline{T}_{WP,VL} = \frac{\sum(T_{WP,VL,i} \cdot \dot{Q}_{WP,i})}{\sum \dot{Q}_{WP,i}}$$



3.1.3 Resultat Speicher #1

Übersicht

Insgesamt wurden vier verschiedene Messungen mit Speicher #1 durchgeführt. Diese beinhalten je zwei Messungen mit einem WE mit 6 und mit 10 kW Leistung. Für beide WE-Leistungen wurde ein Test mit und ein Test ohne die Vorgabe von Zeitfenstern (ZF) für die Warmwasserbereitung durchgeführt. Die Position der WW-Sensoren sowie Ein- und Ausschalttemperaturen wurden so gewählt, dass die maximale Vorlauftemperatur des WE ausgenutzt wurde. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die gewählten Randbedingungen.

Tabelle 4: Randbedingungen der Messungen an Speicher #1.

Test	Zapfprofil	WE	ZF	Pos WW ein	T WW ein	Pos WW aus	T WW aus
	-	kW	-	0 - 1	°C	0 - 1	°C
I	L	10	Ja	0.6	50	0.6	54
II	L	10	Nein	0.6	50	0.6	54
III	L	6	Ja	0.6	50	0.6	54
IV	L	6	Nein	0.6	50	0.6	54

Resultate

In Tabelle 5 sind die Resultate aus jeweils drei aufeinanderfolgenden Tagen der Messungen unter verschiedenen Randbedingungen zu sehen. Energetisch unterscheiden sich die Messungen vor allem durch die Verluste: Die Messungen mit Vorgabe von WW-Zeitfenstern haben deutlich geringere (-25 %) Wärmeverluste an die Umgebung als die Messungen ohne Zeitfenster. Grund dafür ist die jeweils resultierende Speichertemperatur, die im Mittel bei den Messungen ohne Zeitfenster deutlich höher ist.

Tabelle 5: Resultate der Messungen an Speicher #1: Energie in kWh.

Test	WW	WE	Speicheränderung	Verluste
	kWh	kWh	kWh	kWh
I	11.66	12.74	0.02	1.07
II	11.66	13.07	0.00	1.41
III	11.66	12.76	0.05	1.06
IV	11.66	13.12	-0.01	1.47

Die resultierende Entropieproduktion ist in Tabelle 6 zu sehen. Auch die Entropieproduktion im Speichersystem fällt in Tests ohne die Vorgabe von WW-Zeitfenstern um 8-9 % höher aus als in Tests mit WW-Zeitfenstern.



Tabelle 6: Resultate der Messungen an Speicher #1: Entropie in kJ/K; Total = interne Entropieproduktion.

Test	WW kJ/K	WP kJ/K	Speicheränderung kJ/K	Verluste kJ/K	Total kJ/K
I	-137.65	144.62	-0.19	-12.39	5.61
II	-138.10	147.86	0.01	-15.85	6.08
III	-137.80	145.48	-0.61	-12.35	5.28
IV	-138.11	148.81	0.06	-16.50	5.74

Die resultierende Schichtungseffizienz der Messungen ist in Abbildung 7 dargestellt.

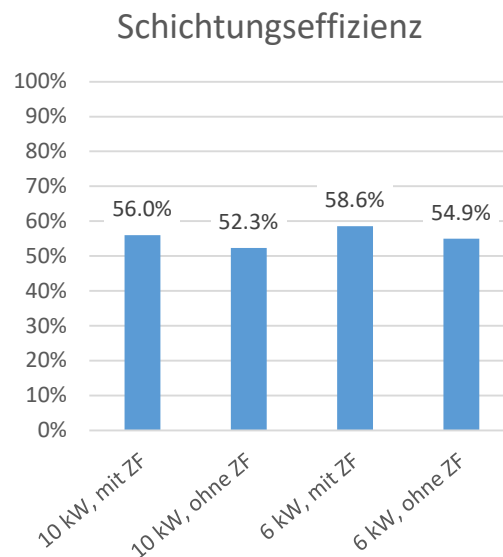


Abbildung 7: Schichtungseffizienz der Messungen an Speicher #1.

Die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen sowie die mittlere Speichertemperatur ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Resultate der Messungen an Speicher #1: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen sowie die mittlere Speichertemperatur in °C.

Test		\overline{T}_{WW} °C	$\overline{T}_{WP,VL}$ °C	$\overline{T}_{Sol,VL}$ °C	Speicher °C
I	L-10kW-mitZF	53.3	46.4	-	36.3
II	L-10kW-ohneZF	50.9	47.6	-	48.1
III	L-6kW-mitZF	52.5	45.4	-	34.6
IV	L-6kW-ohneZF	51.0	47.1	-	48.1



Spezielle Beobachtungen

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen einen Ausschnitt aus Test II. Zu sehen ist die Beladung des Speichers und zeitgleiche WW-Zapfungen, die dann auftreten können, wenn der WE keine Begrenzung durch die Vorgabe von Zeitfenstern hat. Es ist deutlich zu sehen, dass die Temperatur im Speicher oben zu Beginn der Beladung stark absinkt. Während dem gleichzeitigen WW Bezug beträgt die Vorlauftemperatur im WW noch etwa 47 °C. In der WW-Zapfung direkt im Anschluss an die Beladung ist die maximal mögliche Vorlauftemperatur im WW zu erkennen: Diese beträgt etwas weniger als 55 °C direkt nach dem Beladevorgang.

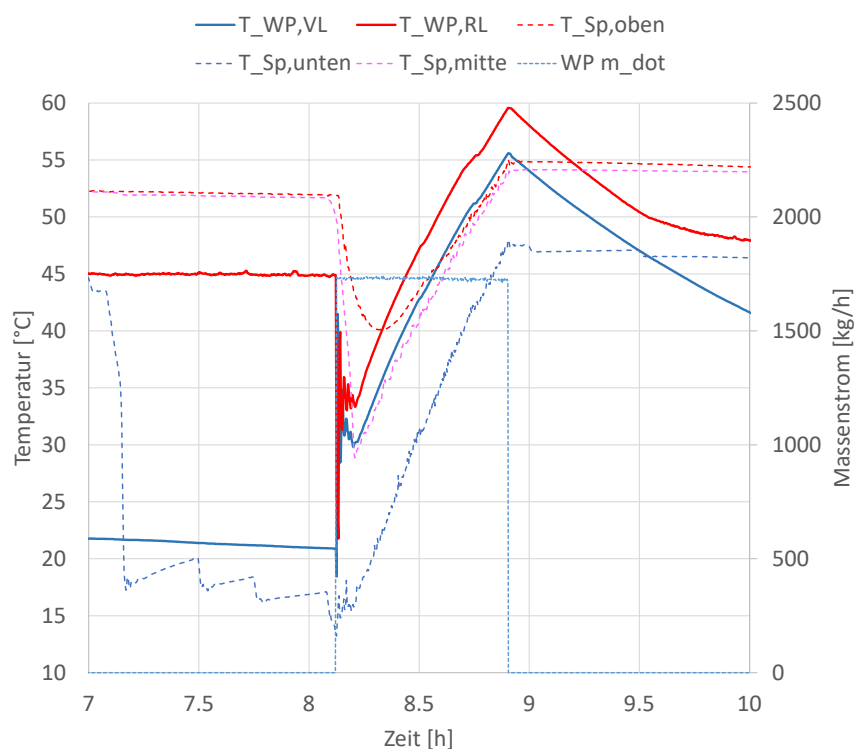


Abbildung 8: Detail der Messung: Beladung über den Wärmeerzeuger.

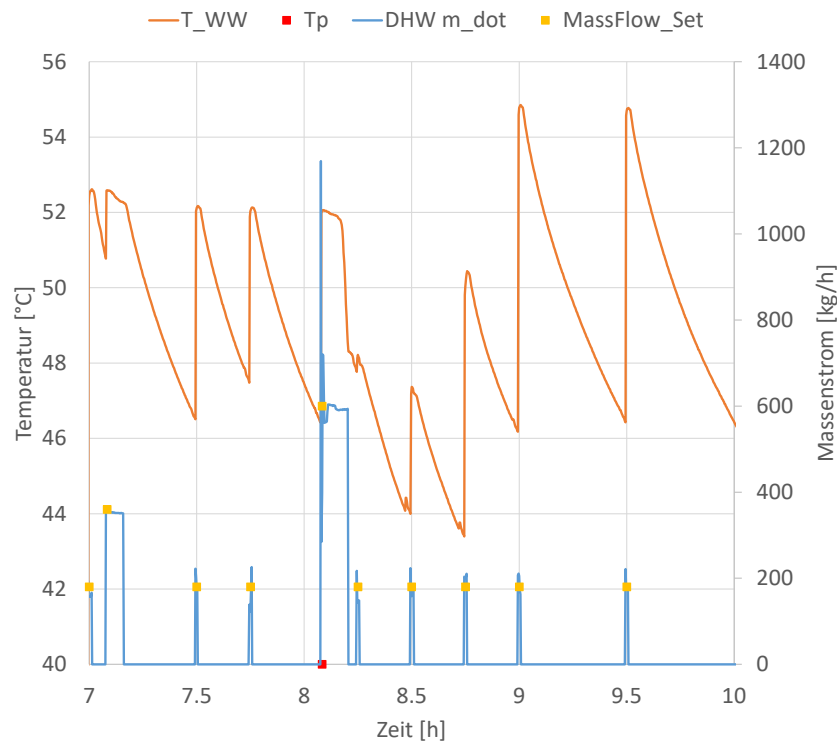


Abbildung 9: Detail der Messung: Warmwasserbezug während einer zeitgleichen Beladung.

Das gezeigte Verhalten wird auch durch die mittlere WW-Temperatur verdeutlicht: In den Messungen mit Vorgabe von WW-Zeitfenstern wurde im Durchschnitt die höhere und vor allem eine konstante Vorlauftemperatur des WW geliefert. Dies bei gleichzeitig im Mittel tieferer Vorlauftemperatur der Wärmepumpe.

3.1.4 Resultate Speicher #2

Übersicht

Es wurden zwei Messungen mit Speicher #2 durchgeführt, jeweils mit einer 10 kW WP sowie einem Kollektorfeld. Test I wurde mit dem Zapfprofil XL und entsprechend mit einer Kollektorfläche von 8.2 m² durchgeführt, Test II mit dem Profil XXL und 10.5 m² Kollektorfläche. In Test I wurden Zeitfenster für die Warmwasserbereitung vorgegeben. In Test II wurden die Zeitfenster aufgehoben, um die WW-Temperatur von 50 °C zu jedem Zeitpunkt einhalten zu können.

Tabelle 8: Randbedingungen der Messungen an Speicher #2.

Test	Zapfprofil	WE	ZF	Pos WW ein/aus	T WW ein/aus	Pos Sol ein/aus	Hyst Sol ein/aus
	-	kW	-	0 - 1	°C	°C	°C
I	XL	10	Ja	0.6	48/51	0.25	7/1
II	XXL	10	Nein	0.6	46/50	0.25	7/1



Resultate

In Tabelle 9 sind die Resultate der Messungen an Speicher #2 in kWh dargestellt. Der WW-Bedarf von 19 kWh bzw. 24 kWh wurde in beiden Fällen vollständig mit einer Temperatur > 50 °C gedeckt. Durch den um ca. 30 % höheren WW-Bezug stieg sowohl der Energieeintrag durch die Wärmepumpe als auch derjenige durch das (grössere) Kollektorfeld in Test II.

Tabelle 9: Resultate der Messungen an Speicher #2: Energie in kWh.

Test	WW kWh	WE kWh	Sol kWh	Speicheränderung kWh	Verluste kWh
I	19.07	7.11	13.08	-0.29	1.41
II	24.42	10.34	15.88	0.25	1.55

Die resultierende Entropieproduktion ist in Tabelle 10 zu sehen. Auch die Entropieproduktion im Speichersystem fällt im Test mit grösserem WW-Bedarf sowie ohne die Vorgabe von WW-Zeitfenstern um mehr als 50 % höher aus als im ersten Test.

Tabelle 10: Resultate der Messung an Speicher #2: Entropie in kJ/K.

Test	WW kJ/K	WE kJ/K	Sol kJ/K	Speicheränderung kJ/K	Verluste kJ/K	Total kJ/K
I	-225.27	78.27	151.95	3.42	-16.23	7.86
II	-288.65	113.94	183.26	-2.96	-17.81	12.22

Die resultierende Schichtungseffizienz der Messungen ist in Abbildung 10 dargestellt.

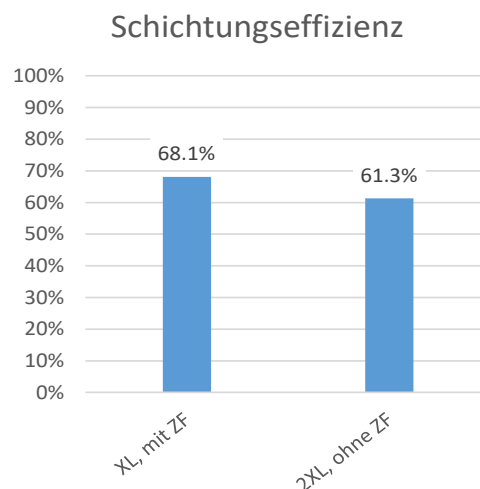


Abbildung 10: Schichtungseffizienz der Messungen an Speicher #2.



Die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen sowie die mittlere Speichertemperatur ist in Tabelle 11 dargestellt. Die nach Leistung gewichtete, mittlere Vorlauftemperatur der Wärmepumpe betrug in Test I 56.3 °C und in Test II 57.1 °C bei einer maximalen Vorlauf-temperatur von 60 °C.

Tabelle 11: Resultate der Messungen an Speicher #2: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen sowie die mittlere Speichertemperatur in °C.

Test	$\overline{T_{WW}}$ °C	$\overline{T_{WP,VL}}$ °C	$\overline{T_{Sol,VL}}$ °C	Speicher °C
I	52.9	56.3	41.1	38.5
II	53.4	57.1	43.9	40.9

Spezielle Beobachtungen

In Abbildung 11 ist ein Ausschnitt aus Test I zu sehen. Es handelt sich um eine Beladung des oberen Speicherteils zu Beginn des Zeitfensters von 16:00 bis 18:00 Uhr. Die Speichertemperatur zu diesem Zeitpunkt ist relativ hoch (TS8 = Speicher oben, TS2 = Speicher unten). Dennoch muss über die Wärmepumpe eine Beladung stattfinden um die WW-Solltemperatur von 50 °C zu gewährleisten. In dieser Konstellation ist eine deutliche Überhöhung der WP-Vorlauftemperatur gegenüber der Speichertemperatur zu sehen. Die Temperatur am Sensor zur Regelung der Nachheizung steigt nur langsam. Die Wärmepumpe schaltet schliesslich ab, da die maximale Vorlauftemperatur von 60 °C erreicht wird. Während der Stillstandszeit der Wärmepumpe steigt die Temperatur am Sensor weiter an und übersteigt schliesslich die Ausschaltbedingung von 51 °C am Sensor.

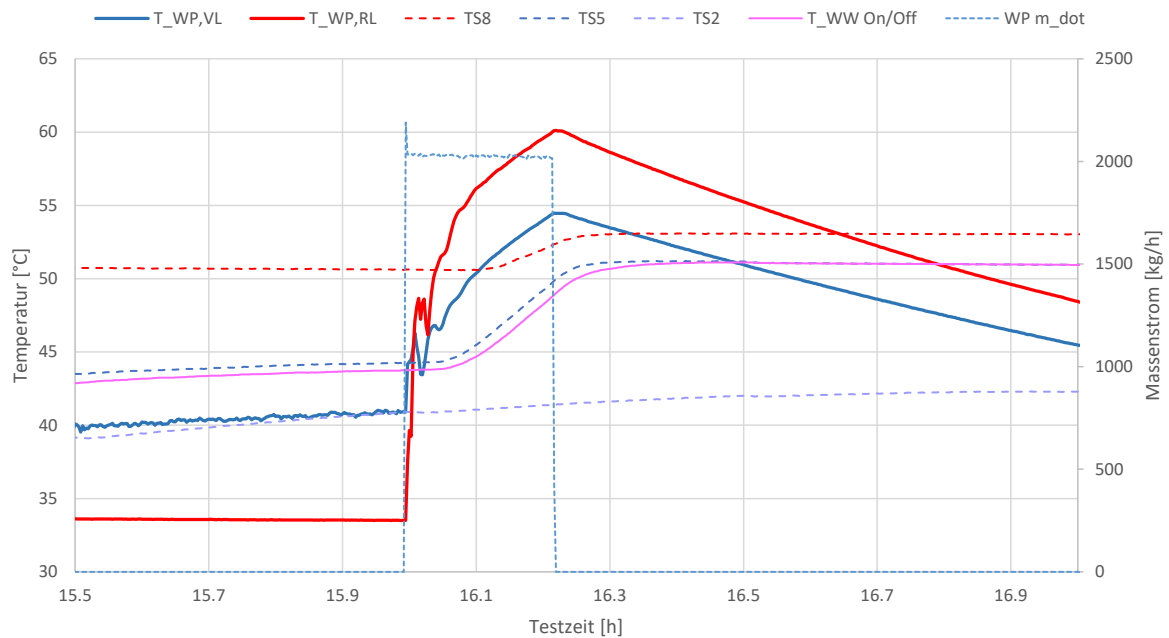


Abbildung 11: Ausschnitt aus der Messung von Speicher #2 / Test I. Es wird die Beladung des Speichers durch die Wärmepumpe während des Zeitfensters von 16:00 bis 18:00 Uhr gezeigt.

In Abbildung 12 ist die Beladung aus demselben Test während des Zeitfensters von 06:00 bis 08:00 Uhr zu sehen. Der oben beschriebene Effekt des Abschaltens der WP bei Erreichen der Vorlauftemperatur von 60 °C mit verzögerter Reaktion des WW-Sensors ist hier ebenfalls zu beobachten. Während des Zeitfensters fand eine zweite Beladung nach einem grösseren WW-Bezug statt, die durch das Ende der Freigabezeit vorzeitig beendet wurde. In beiden Ladevorgängen, genau wie in der oben gezeigten Beladung am Nachmittag, fällt ein weiteres Detail positiv auf: Die Temperatur im Speicher oben bleibt während der Beladung immer hoch. Es findet kein "Herunterreißen" der Temperaturen oben statt. Verantwortlich dafür ist sehr wahrscheinlich die Position des internen WÜ, der ein genügend grosses Reservevolumen oberhalb der Wärmetauscherfläche frei lässt.

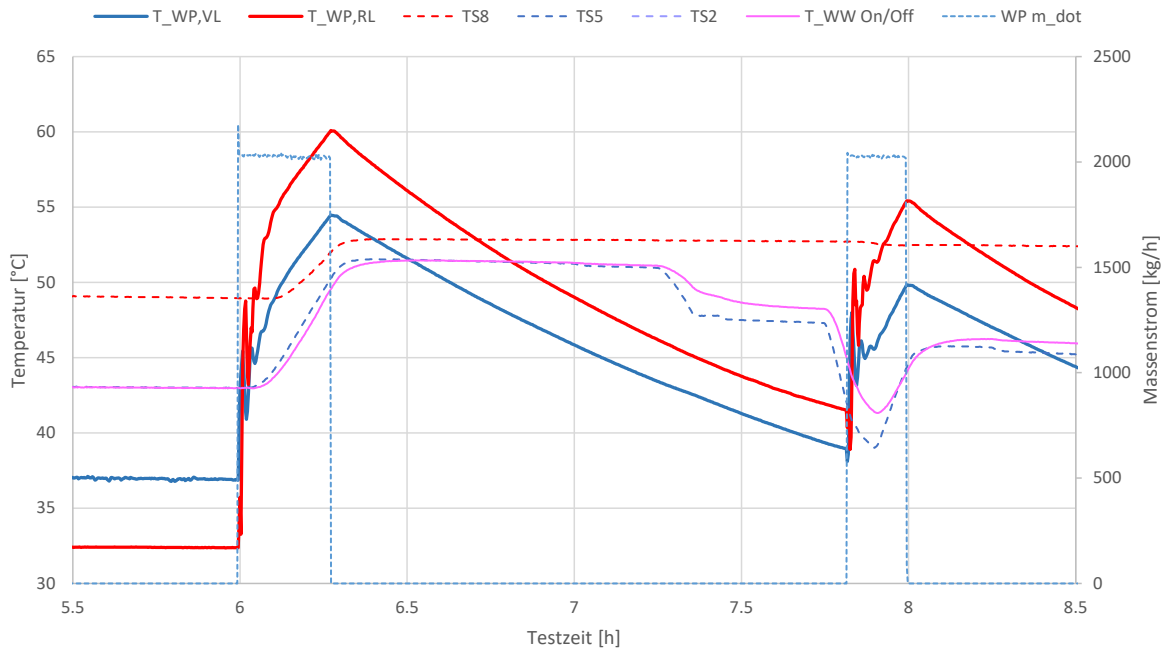


Abbildung 12: Ausschnitt aus der Messung von Speicher #2 / Test I. Es wird die Beladung des Speichers durch die Wärmepumpe während des Zeitfensters von 06:00 bis 08:00 Uhr gezeigt.

3.1.5 Resultate Speicher #3

Übersicht

Mit Speicher #3 wurde nur eine Messung durchgeführt. Die Beladung erfolgte über eine 15 kW WP mit Vorgabe von WW-Zeitfenstern. Es wurde das WW-Profil XL verwendet. In Tabelle 12 sind die Randbedingungen der Messung zu sehen.

Tabelle 12: Randbedingungen der Messung an Speicher #3.

Test	Zapfprofil	WE	ZF	Pos WW ein	T WW ein	Pos WW aus	T WW aus
	-	kW	-	0 - 1	°C	0 - 1	°C
I	XL	15	Ja	0.7	53	0.35	53

Resultate

In Tabelle 13 sind die Resultate der Messung in kWh zu sehen. Auffällig ist ein deutlich höherer Energieeintrag zur Beladung durch die WP als der Verbrauch durch WW. Die grosse Differenz kann nicht durch eine Änderung des Energieinhalts des Speichers erklärt werden, sondern nur durch thermische Verluste des Systems.



Tabelle 13: Resultate der Messungen an Speicher #3: Energie in kWh.

Test	WW	WE	Speicheränderung	Verluste
	kWh	kWh	kWh	kWh
I	19.07	24.13	-0.02	5.08

In Tabelle 14 sind die Resultate der Messung in kJ/K zu sehen. Die im System auftretende Entropieproduktion entspricht mit 11.49 kJ/K fast der Hälfte der Entropieproduktion eines völlig durchmischten Speichers (24.64 kJ/K, vgl. Annex C: Entropiebilanz des Vergleichssystems).

Tabelle 14: Resultate der Messung an Speicher #3: Entropie in kJ/K.

Test	WW	WP	Speicheränderung	Verluste	Total
	kJ/K	kJ/K	kJ/K	kJ/K	kJ/K
I	-225.35	270.31	0.22	-56.67	11.49

Die resultierende Schichtungseffizienz der Messungen ist in Abbildung 13 dargestellt.

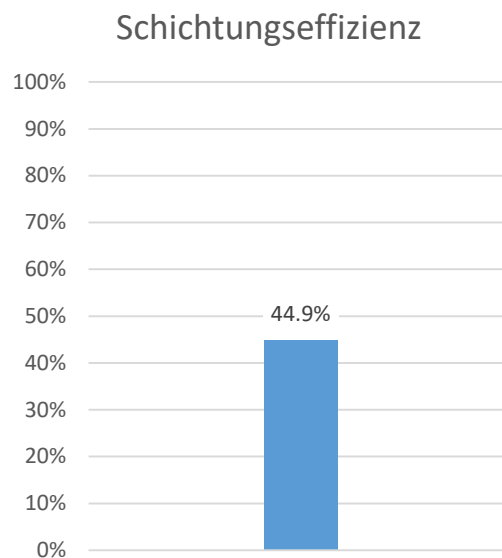


Abbildung 13: Schichtungseffizienz der Messung an Speicher #3.

Die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe betrug im Test > 50 °C bei einer mittleren Speichertemperatur von 49.5 °C (vgl. Tabelle 15).



Tabelle 15: Resultate der Messungen an Speicher #3: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen sowie die mittlere Speichertemperatur in °C.

Test	$\overline{T_{WW}}$ °C	$\overline{T_{WP,VL}}$ °C	$\overline{T_{Sol,VL}}$ °C	Speicher °C
I	51.0	50.2		49.5

Spezielle Beobachtungen

In Abbildung 14 ist der Verlauf eines Testtages der Messung an Speicher #3 dargestellt. Darin sind die Temperaturen der Anlegefühler an der Speicherwand (gepunktete Linien), die Ein- und Austrittstemperatur der Emulation der Wärmepumpe sowie der Durchfluss der Wärmepumpe zu sehen. Auffällig ist der Verlauf der Temperaturen an den Fühler zur Messung der Vor- und Rücklaufemperatur der Wärmepumpe. Diese Sensoren sind nahe am Speicher angebracht und die Verbindungen sind jeweils mit einem Siphon ausgestattet. Dennoch sinkt die Temperatur im Vorlauf direkt nach dem Beladevorgang. Dies ist ein Hinweis auf eine ungewollte Zirkulation in den hydraulischen Anschlüssen, welche möglicherweise durch ein falsch eingebundenes Expansionsgefäß verursacht wird. Weiterhin ist ein Absinken der Temperaturen an den Anschlüssen der Wärmepumpe nach WW-Zapfungen mit grösserem Volumen (z.B. um 7:45 Uhr und 20:45 Uhr) zu erkennen.

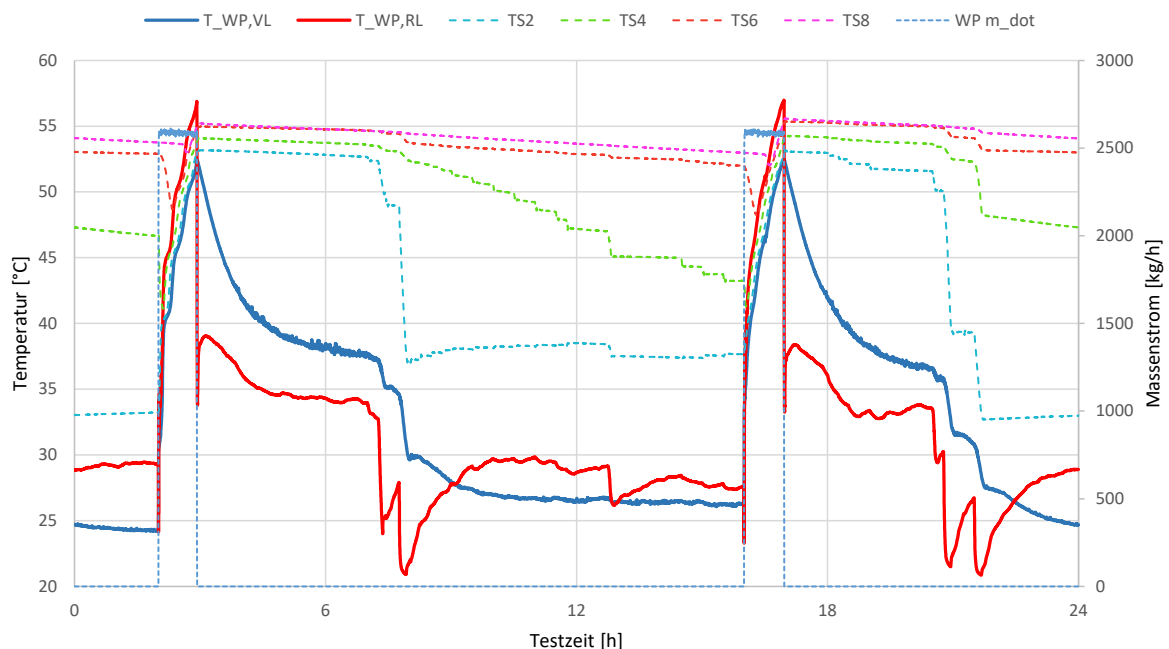


Abbildung 14: Verlauf eines Testtages im Test des Speicher #3 / Test I. Dargestellt sind die Temperaturen der Anlegefühler an der Speicherwand (gepunktete Linien), die Ein- und Austrittstemperatur der Emulation der Wärmepumpe sowie der Durchfluss der Wärmepumpe.



In Abbildung 15 werden die WW-Temperatur nach dem Austritt aus dem FWM, die Temperatur im Speicher oben sowie der WW-Durchsatz während einer Serie von Zapfungen mit verschiedenen Zapfmengen gezeigt. Das FWM wurde mit einer Solltemperatur von 51 °C parametrisiert, um die geforderten 50 °C sicher einhalten zu können. Es ist deutlich zu sehen, dass das FWM nur bei längeren Zapfungen auf diese Solltemperatur regelt, bei kurzen WW-Bezügen erreicht die Austrittstemperatur des FWM fast die zur Verfügung stehende Temperatur im Speicher. Ursache dafür ist eine hohe Drehzahl der primärseitigen Pumpe, die erst mit genügend Zeit auf eine kleinere Drehzahl geregelt werden kann. Entsprechend sind die Rücklauftemperaturen zum Speicher hoch mit dem Resultat der in Abbildung 14 zu sehenden hohen Temperaturen im unteren Teil des Speichers.

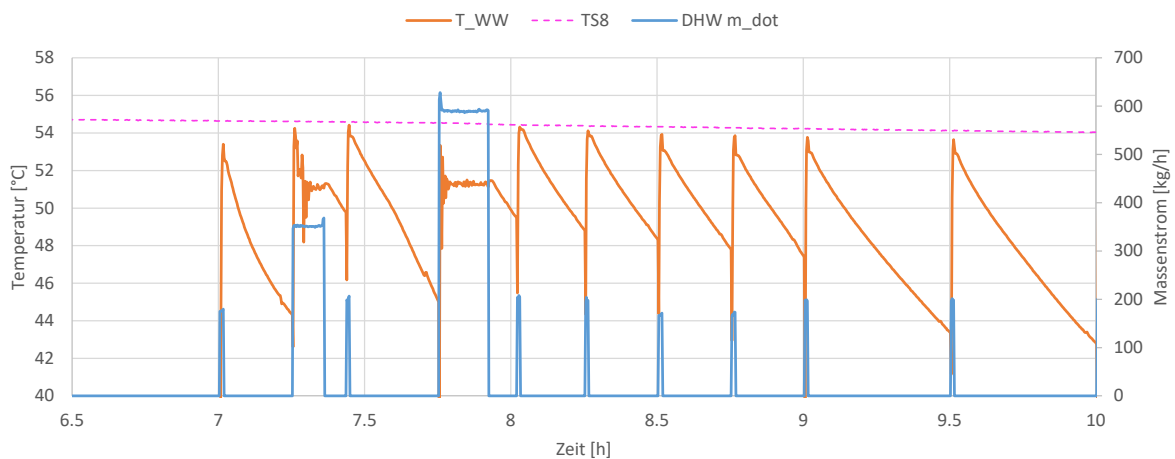


Abbildung 15: Ausschnitt aus der Messung des Speicher #3 / Test I. Dargestellt ist die WW-Temperatur nach dem sekundärseitigen Austritt aus dem FWM, die Temperatur im Speicher oben sowie der WW-Durchsatz während einer Serie von Zapfungen mit verschiedenen Zapfmengen.

3.1.6 Resultate Speicher #4

Übersicht

Insgesamt wurden zwei Messungen mit Speicher #4 durchgeführt. Die Randbedingungen sind in Tabelle 16 dargestellt. Beide Messungen wurden ohne die Vorgabe von WW-Zeitfenstern und ohne Solarwärme durchgeführt. In Test I wurde eine 6 kW WP emuliert, in Test II eine 10 kW WP.

Tabelle 16: Randbedingungen der Messungen an Speicher #4.

Test	Zapfprofil	WE	ZF	Pos WW ein	T WW ein	Pos WW aus	T WW aus	$\dot{m}_{Sol,spez}$
	-	kW	-	0 - 1	°C	0 - 1	°C	kg/(m ² h)
I	L	6	Nein	0.75	50	0.75	57	40
II	L	10	Nein	0.75	50	0.75	57	31



Resultate

Die Resultate der Messungen sind in Tabelle 17 dargestellt. In beiden Messungen wurden ca. 13 kWh Wärme geliefert um den Bedarf von je 12 kWh für WW zu decken.

Tabelle 17: Resultate der Messungen an Speicher #4: Energie in kWh.

Test	WW kWh	WE kWh	Speicheränderung kWh	Verluste kWh
I	11.66	13.44	0.03	1.76
II	11.66	13.42	-0.01	1.77

Die resultierende Entropieproduktion ist in Tabelle 18 zu sehen. Die Entropieproduktion ist mit beiden emulierten WP-Leistungen sehr tief.

Tabelle 18: Resultate der Messungen an Speicher #4: Entropie in kJ/K.

Test	WW kJ/K	WP kJ/K	Speicheränderung kJ/K	Verluste kJ/K	Total kJ/K
I	-138.30	155.90	-0.29	-19.47	2.16
II	-137.83	155.35	0.14	-19.61	1.93

Die resultierende Schichtungseffizienz der Messungen ist in Abbildung 16 dargestellt. In Test I beträgt die Schichtungseffizienz 85.7 %, in Test I 87.2 %.

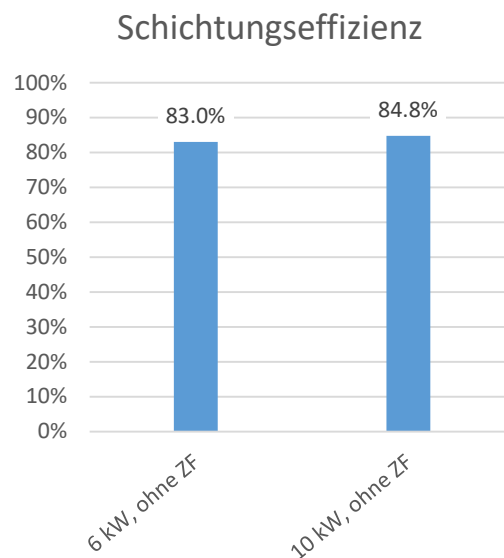


Abbildung 16: Schichtungseffizienz der Messungen an Speicher #4.



Die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe betrug in Test I lediglich 41.8 °C, in Test II 41.9 °C (vgl. Tabelle 19). Die gelieferte Warmwassertemperatur betrug jeweils deutlich über 54 °C.

Tabelle 19: Resultate der Messungen an Speicher #4: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen sowie die mittlere Speichertemperatur in °C.

Test	$\overline{T_{WW}}$ °C	$\overline{T_{WP,VL}}$ °C	$\overline{T_{Sol,VL}}$ °C	Speicher °C
I	54.5	41.8	-	52.9
II	54.6	41.9	-	52.5

Spezielle Beobachtungen

Durch die Beladung des Speichers mit einem externen WÜ und einer Schichteinrichtung im Speicher konnte die Wärmelieferung durch die WP mit sehr gutem Schichtverhalten in den Speicher eingebracht werden. In Abbildung 17 sind die Temperaturen im Speicher während eines Beladevorgangs zu sehen. Dabei wird deutlich, dass im oberen Teil die Temperatur konstant hoch bleibt, während der untere Teil des Speichers kontinuierlich aufgeheizt wird.

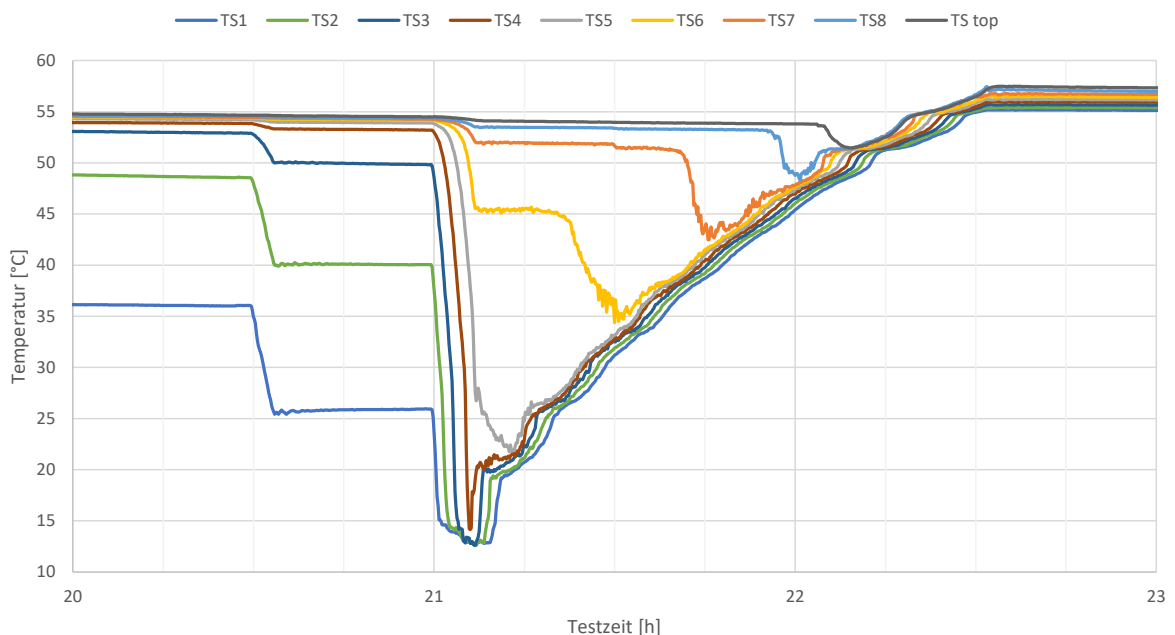


Abbildung 17: Ausschnitt aus der Messung von Speicher #4 / Test I. Dargestellt ist die Speichertemperatur während einer Beladung durch die Wärmepumpe.

In Abbildung 18 ist ein Energie-Temperatur Diagramm der Messung zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass die WP über sehr lange Zeit mit tiefer Rücklaufemperatur betrieben wird. Die WW-Lieferung erfolgt praktisch durchgehend bei einer Temperatur > 54 °C.

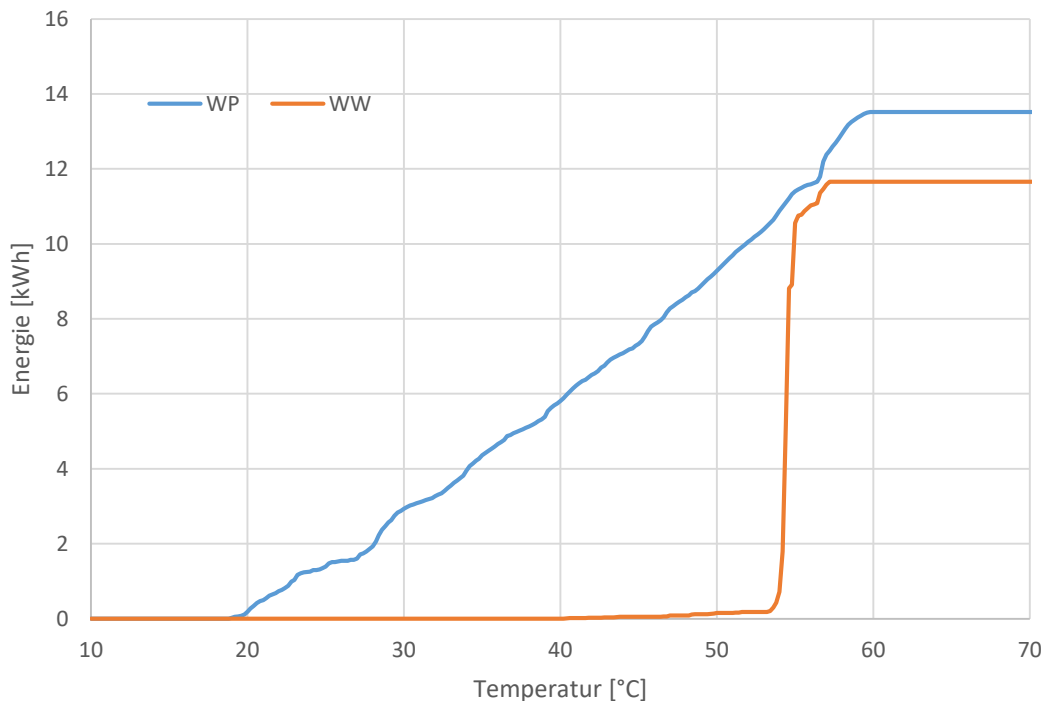


Abbildung 18: Energie-Temperatur Diagramm der Messung von Speicher #4 / Test I.

3.2 Zusammenfassung und Vergleich der Testresultate

In Abbildung 19 ist eine Zusammenfassung der Resultate der geprüften Speicher zu sehen.

Speicher #1 erreichte Schichtungseffizienzen zwischen 60 % und 65 %. Als Problematisch stellte sich die Platzierung des internen WÜ heraus. Dieser füllt das gesamte Volumen des Speichers aus und führt zur Durchmischung des Speicherinhalts zu Beginn der Beladung. Dadurch kann die geforderte WW-Solltemperatur von 50 °C nicht durchgehend gewährleistet werden.

Speicher #2 erreichte eine Schichtungseffizienz von 68 % im Test mit dem Zapfprofil XL. Die Beladung durch Solarwärme über einen WÜ im unteren Teil des Speichers hebt die Temperatur im Speichervolumen an, allerdings ohne die geforderte Solltemperatur für die WW-Bereitung zu gewährleisten. Deshalb muss die WP den oberen Teil auf hohem Temperaturniveau beladen, wobei die maximale Vorlauftemperatur der WP erreicht wird bevor das Ausschaltkriterium der Beladung erreicht ist.

Speicher #3 erreicht eine Schichtungseffizienz von lediglich 45 %. Als Ursache der niedrigen Schichtungseffizienz werden zum einen hohe Rücklauftemperaturen des verwendeten FWM bei kurzen WW-Zapfungen und zum anderen Zirkulationseffekte über die externe Hydraulik vermutet. Die Verluste des Speichers mit 5 kWh/d bzw. 7.2 W/K waren mehr als doppelt so hoch als in den Messungen der übrigen Speicher mit Verlusten im Bereich von 2.1 bis 3.2 W/K.



Speicher #4 zeigte ein sehr gutes Schichtungsverhalten bei der Beladung durch einen externen WÜ in Kombination mit einer Schichteinrichtung im Speicher. Es wurde trotz des kleinen Volumens von 200 l eine durchgehend sehr hohe WW-Temperatur gewährleistet bei gleichzeitig tiefer mittlerer Temperatur der Beladung. Die Schichtungseffizienz betrug im Test mit 6 kW und 10 kW WP 83 % bzw. 85 % und übertrifft damit das Ergebnis der anderen Speicher bei weitem.

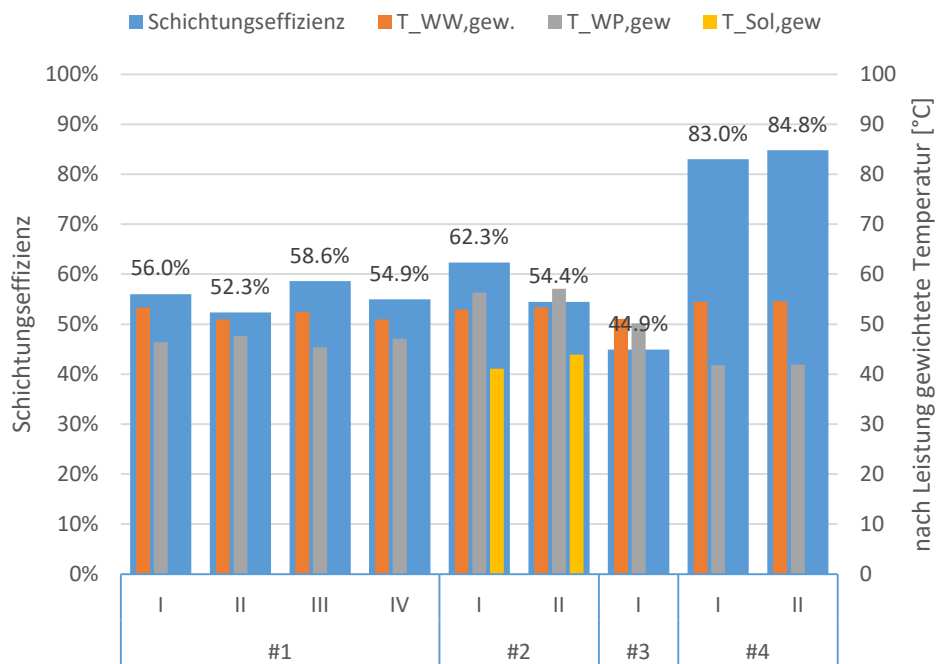


Abbildung 19: Zusammenfassung der Resultate aus den Messungen der vier Speicher.

Basierend auf der mittleren, nach Leistung gewichteten Vorlauftemperatur der emulierten WP aus den einzelnen Messungen wurde eine durchschnittliche Arbeitszahl der Wärmepumpe zur Beladung der Speicher berechnet. Als WP wurde die im Projekt StorEx verwendete Luft-Wasser WP mit einer linearen Abhängigkeit des COP von der Vorlauftemperatur verwendet. In Abbildung 20 ist der COP in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur für eine Aussentemperatur von 2.5 °C (Bedingungen der Testsequenz für Kombispeicher) und für 12.9 °C (mittlere Aussentemperatur der Testsequenz für WW-Speicher) dargestellt. Die eingezeichneten Punkte im Diagramm repräsentieren die, den jeweiligen mittleren Vorlauftemperaturen der Messungen entsprechenden COP-Werte und verdeutlichen die grosse Bandbreite aus den Messungen.

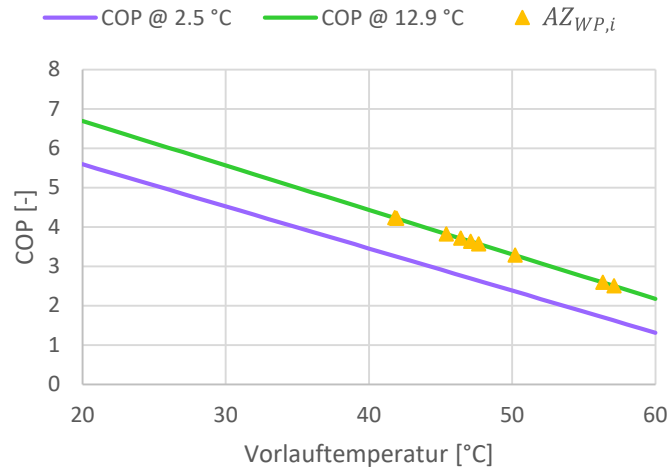


Abbildung 20: COP in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur bei verschiedenen Aussentemperaturen.

Anhand der ermittelten Arbeitszahlen wurde jeweils ein Bedarf an elektrischer Energie für die WP abgeschätzt. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 20 und Abbildung 21 zu sehen. Bei identischem WW-Profil weisen die Messungen an Speicher #1 einen um 15 % höheren Strombedarf aus als die Messungen an Speicher #4, wobei zu bedenken gilt, dass die gelieferte WW-Temperatur des effizienteren Speichers #4 um bis zu 3.5 K höher war als im Speicher #1, der in einigen WW-Bezügen die geforderte Vorlauftemperatur von 50 °C nicht erreichen konnte. Insgesamt ist es doch sehr beachtlich, dass Speicher #4 insgesamt die höchsten Warmwasser-Temperaturen liefert, obwohl bei diesem Speicher die geringsten Temperaturen für den Vorlauf der Speicher-Beladung gemessen wurden. Auch die System-Arbeitszahl ist mit 3.7 von allen Speichern ohne Solar am höchsten. Die Unterschiede in den System-Arbeitszahlen lassen erwarten, dass die elektrische Einsparung dieses Speichers gegenüber Speicher 1 (gleiches Zapfprofil) 15% beträgt, gegenüber Speicher 3 (grösseres Zapfprofil) sogar 42%, bei gleichzeitig höherem Komfort.



Tabelle 20: Abschätzung von COP und Arbeitszahl.

Speicher		#1				#2		#3	#4	
Test		I	II	III	IV	I	II	I	I	II
Profil		L	L	L	L	XL	XXL	XL	L	L
Solar		Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
P_{WP}	[kW]	10	10	6	6	10	10	15	6	10
ZF	[-]	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
ζ_{str}	[%]	56.0	52.3	58.6	54.9	62.3	54.4	44.9	83.0	84.8
$\overline{T_{WP,VL}}$	[°C]	46.4	47.6	45.4	47.1	56.3	57.1	50.2	41.8	41.9
$\overline{T_{WW}}$	[°C]	53.3	50.9	52.5	51.0	52.9	53.4	51.0	54.5	54.6
AZ_{WP}	[-]	3.7	3.6	3.8	3.6	2.6	2.5	3.3	4.2	4.2
$W_{el,WP}$	[kWh]	3.4	3.7	3.3	3.6	2.7	4.1	7.4	3.2	3.2
AZ_{Sys}	[-]	3.4	3.2	3.5	3.2	7.0	5.9	2.6	3.7	3.7

Aus dem abgeschätzten elektrischen Energiebedarf der WP und dem tatsächlich gelieferten WW wurde jeweils eine Arbeitszahl des Speichersystems ermittelt. Diese ist naturgemäss in den Messungen mit solarthermischen Anlagen mit deutlichem Abstand am höchsten. Unter den Speichern ohne Solarthermie reicht die Bandbreite der Resultate von 2.6 (Speicher #3) bis zu 3.7 (Speicher #4).

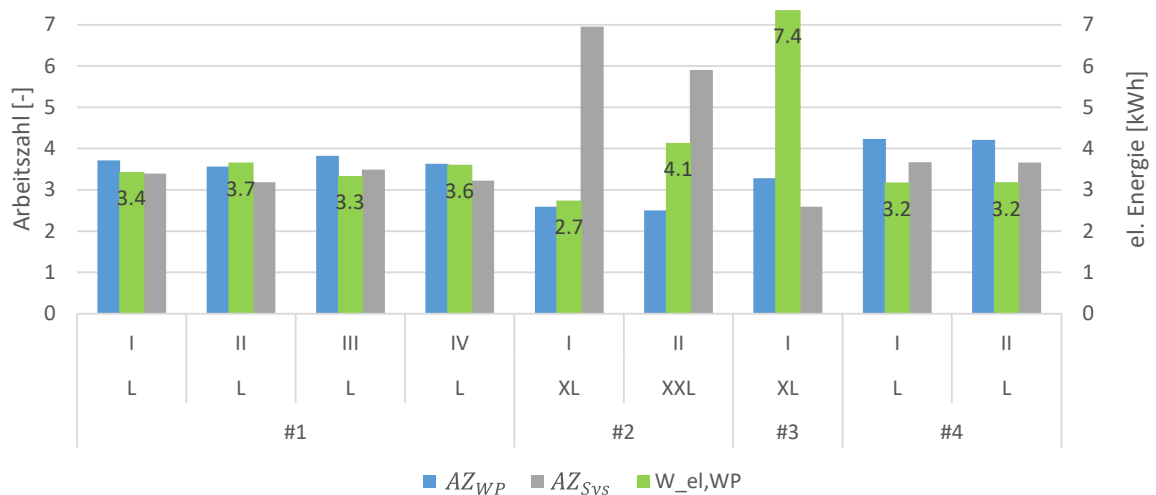


Abbildung 21: Abschätzung der Arbeitszahl und des Bedarfs an el. Energie.



3.3 Diskussion Testmethode

WW Temperaturen

In der EN 16147, welche den elektrischen Energiebedarf eines Wärmepumpen-Warmwassersystems ermittelt, werden Zapfprofile für den WW-Bezug inklusive der zu erreichenden Solltemperaturen definiert. In diesen Profilen wird in der überwiegenden Zahl der einzelnen Zapfungen eine Temperatur von 25 °C gefordert, gefolgt von Zapfungen mit 40 °C als Sollwert und wenigen Bezügen mit 55 °C. Bei Nicht-Erreichen der Solltemperatur während der wenigen Bezüge mit 55 °C wird ein zusätzlicher Energiebedarf einer Widerstandsheizung berechnet und auf den Verbrauch addiert. Entsprechend wird das tatsächliche Erreichen der Temperatur also nicht explizit gefordert. Dadurch gibt es für Hersteller bisher keinen Anreiz, hohe Temperaturen im Speicher anzustreben.

Die hier vorliegende Testmethode zur Messung der Schichtungseffizienz hat zum Ziel, einen realitätsnahen Betrieb des Warmwasserspeichers zu gewährleisten. Zur besseren Kompatibilität mit europäischen Normen wurden die Zapfprofile der EN 16147 übernommen. Allerdings wird hier in Anlehnung an die Solltemperatur an der Entnahmestelle aus den Legionellenvorschriften der SIA 385/1 eine Austrittstemperatur > 50 °C gefordert.

Das Erreichen von 55 °C wurde dagegen bei keinem der geprüften Speicher unter Simulation und Emulation eines WE mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 60 °C erreicht.

Verbrühungsschutz

Im WW-Emulator des Prüfstandes ist keine Emulation der Warmwasserarmaturen vorgesehen. Diese Vereinfachung gegenüber der bisherigen Methode zur Messung der Schichtungseffizienz resultiert aus den Vorgaben in den Zapfprofilen der EN 16147. Für solare WW-Anlagen ist jedoch ein Verbrühungsschutz aus Sicherheitsgründen nötig. Der korrekte Umgang mit diesem Thema kann Diskussionen auslösen.

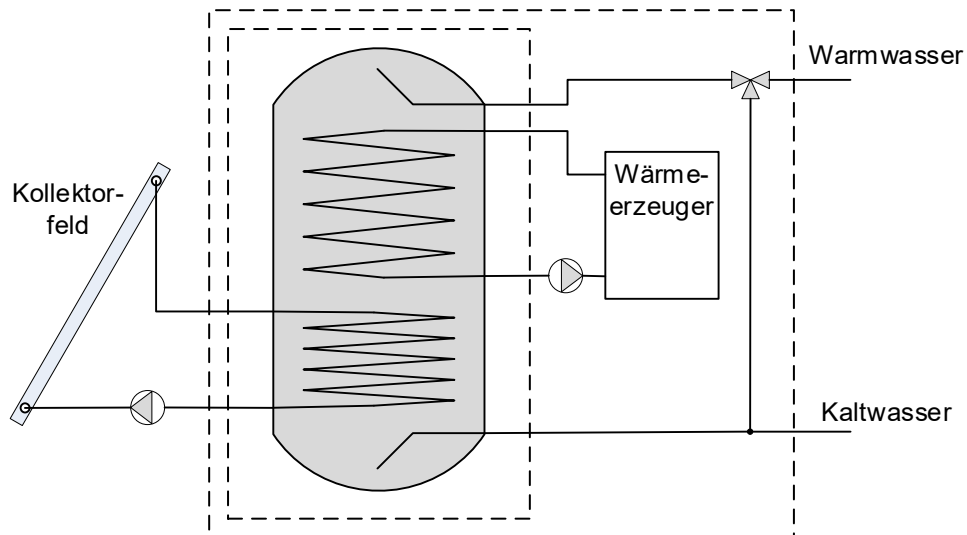


Abbildung 22: Schema einer solaren WW-Anlage mit Verbrühungsschutz im Vorlauf des WW-Teils.

Wärmeerzeuger

Die Methode zur Messung der Schichtungseffizienz zielt bisher auf die Kombination mit Wärmepumpen und die für Wärmepumpen typischen hohen Massenströmen ab. Es stellt sich die Frage, ob in diesem Punkt mehr Spielraum geschaffen werden soll. So könnte zum Beispiel anstatt eines fixen ΔT des WE auch die Kombination aus Massenstrom und ΔT für den Hersteller frei wählbar gemacht werden. Auf diese Weise hätten auch Speicher, deren Wärmeübertrager auf andere Randbedingungen als Wärmepumpen optimiert sind, die Chance auf ein gutes Ergebnis. Für den Kunden wäre es dennoch ein transparentes Vorgehen: Der Speicher könnte aufgrund des Einsatzzweckes aus einer Liste von Modellen ausgewählt werden. Diese Anpassungen können mit der vorliegenden Methode sofort umgesetzt werden.

Neben den fixen Bedingungen für Massenstrom und Temperaturspreizung des WE sind auch verschiedene Varianten der Modulation denkbar. Dazu kommt zum einen eine Modulation des Massenstroms zum Erreichen einer Vorlaufsolltemperatur und zum anderen eine Leistungsmodulation des WE in Frage. Diese Anpassungen sind in der vorliegenden Methode schwieriger umzusetzen und bedürfen vorher noch einer genauen Abklärung über die Relevanz verschiedener Ladestrategien.

Relevanz der Zapfprofile

Der Tagesenergiewert $Q_{WW,24h}$ der Zapfprofile von 3XS bis 4XL beträgt 0.345 kWh bis 93.52 kWh. Aus der EN 16147 [5] kann aus diesen 24 h Profilen und einer Berechnungsformel für den jährlichen Bedarf an el. Energie zum Betrieb der Wärmepumpe auch ein jährlicher Wärmebedarf $Q_{WW,a}$ abgeleitet werden:

$$\text{Formel 11} \quad Q_{WW,a} = 0.6 \cdot 366 \cdot Q_{WW,24h}$$

Die Profile repräsentieren jeweils die maximale Belastungssituation im Feld, d.h. der entsprechende Speicher liefert diese Menge WW nur an wenigen Tagen im Jahr. Der Faktor



0.6 in der Gleichung bedeutet, dass damit gerechnet wird, dass im Schnitt 40 % weniger Wasser bezogen wird als im Profil getestet.

Für Minergiegebäude wird der Wärmebedarf für Warmwasser mit $75 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{a})$ angenommen. Entsprechend repräsentiert das Profil 3XS den Wärmebedarf einer Wohnfläche von 3.6 m^2 . Die Profile (S – XS) mit dem geringsten WW-Bezug entsprechen somit eher Ein-Zimmer-Wohnsituationen oder Einzelentnahmestellen und sind deshalb nicht von hoher Relevanz für Speicherschichtungsprüfungen. Das Profil M repräsentiert ein Wohngebäude bzw. eine Wohnung mit einer Energiebezugsfläche von 61.6 m^2 . Relevante Grössen für den Einsatz in Einfamilienhäusern wären die Grössen L ($\triangleq 122.8 \text{ m}^2$) bis XXL ($\triangleq 258.6 \text{ m}^2$). Grössere Profile sind für Speicher zum Einsatz in Mehrfamilienhäusern geeignet. Hier ist der limitierende Faktor für die Messung am aktuellen Prüfstand der maximal mögliche Massenstrom, sowie der Platzbedarf der zu prüfenden Speicher. Die Profile 3XL und 4XL sind momentan am SPF nicht anwendbar.

Dimensionierung des Kollektorfeldes

Die Dimensionierung des Kollektorfeldes wurde an die Wahl des Zapfprofiles geknüpft. Auf diese Weise kann jeweils ein realistisches Temperaturniveau bzw. ein typischer Betrieb des Speichers gewährleistet werden.

Entropieproduktion der Kollektoren

Die Verwendung von Kollektoren verschlechtert das Resultat der Schichtungseffizienz von Kombispeichern zur Raumwärmeversorgung und Warmwasserbereitung. Dies ist in der Methode selbst begründet: Die Kollektoren liefern eine höhere Temperatur als später für die Raumheizung gefordert wird. Entsprechend steigt die Entropieproduktion im System an.

In der Methode zur Messung der Schichtungseffizienz für WW-Speicher wurden andere Rahmenbedingungen gewählt. Durch die Kollektoren erfolgt hier eine Vorwärmung des für die Solaranlage reservierten Teils. Durch den WE muss dann der obere Teil noch auf die nötige Temperatur zur WW-Bereitung angehoben werden. Mit der Kombination aus den hinterlegten Wetterdaten führte dies in den hier gezeigten Messungen zu insgesamt tieferen Beladetemperaturen als im Betrieb ohne Solarwärme. Ob dieser, für die Schichtungseffizienz wichtige Effekt sich auch beim Test mit Low-Flow Kollektoren einstellt muss noch überprüft werden.



4 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Methode zur Messung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern wurde für die Messung von Warmwasserspeichern mit und ohne Solarthermie angepasst und vereinfacht. Die Vereinfachungen betreffen die Berechnung der Wärmepumpe bzw. der Nachheizung sowie die Warmwasser-Zapfprofile. Die aus der EN 16147 bekannten Zapfprofile wurden für die Messung übernommen und so eine Kompatibilität mit internationalen Standards geschaffen.

Die Testmethode wurde auf vier verschiedene Speicher mit unterschiedlichen Konzepten und Grössen angewendet. Die Resultate der Messungen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen und legen somit Schwachstellen der Speicher offen, die andernfalls unentdeckt bleiben würden. Die Unterschiede zwischen den Speichern sind dabei deutlich höher, als dies vom Projektteam antizipiert wurde.

Auf Grund der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass ein Speicherkonzept mit guter Speicherschichtung (zum Beispiel Speicher 4) nicht nur einen höheren Komfort und eine höhere Sicherheit gegenüber Legionellen (weniger Wasser im kritischen Temperaturbereich dank besserer Schichtung) gewährleistet, sondern gleichzeitig auch zu einer signifikanten Einsparung an Endenergie führt. In Kombination mit einer Wärmepumpe kann diese Einsparung bis zu 40 % der elektrischen Energie betragen.

Die durchgeführten Messungen belegen die Einsetzbarkeit der Methode anhand eines breiten Spektrums an Speicherkonzepten und Speichergrössen, wobei die objektive Beurteilung der getesteten Speicher aufgrund der Schichtungseffizienz konsistent ist mit dem errechneten elektrischen Energiebedarf, welcher bei Beladung durch eine Wärmepumpe zu erwarten ist.

Somit kann die Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz über die Entropieproduktion zukünftig auch für Warmwasserspeicher angewendet werden.

5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Resultate der Messung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern werden auf der Homepage des SPF mit einem Factsheet sowie einem Zertifikat publiziert. Analog zu diesen Daten sollte perspektivisch ein ähnliches Factsheet für Warmwasserspeicher erstellt und ebenso publiziert werden.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

National arbeitet das SPF mit der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (FWS) und der Zertifizierungsstelle des Wärmepumpen-Systemmoduls zusammen. Es besteht dort bereits ein Austausch über die Möglichkeiten, auch reine WW-Speicher auf ihre Schichtungseffizienz hin zu prüfen.



Auf internationaler Ebene gibt es ein grosses Interesse an diesem Thema. Insbesondere wurde auch der Wunsch geäussert, das Thema Schichtung in der laufenden Revision der Lot1 und Lot2 Ecodesign und Energylabelling⁶ aufzunehmen. Diese Revision ist allerdings schon sehr weit fortgeschritten. Da aber noch kein international anerkanntes Verfahren zur Bewertung der Schichtungseffizienz etabliert ist, wird das Thema wahrscheinlich erst bei der nächsten Revision wieder aufgegriffen.

Im Rahmen des Solar Keymark Networks wurden zwei kleine Projekte zur Untersuchung möglicher Verfahren zur Bewertung der Schichtungseffizienz unterstützt. Eines der Verfahren ist das SPF Verfahren, das andere Verfahren wird von einem deutschen Labor unterstützt. Die beiden Verfahren wurden im März 2021 im Rahmen des 30. Solar Keymark Network Meetings vorgestellt und die entsprechenden Berichte veröffentlicht^{7,8}. In einer kleineren Expertenrunde sollen die Verfahren eingehend verglichen und weiter bearbeitet werden. Abhängig vom Ergebnis ist dann geplant, entweder eine der bestehenden Speichernormen zu erweitern, oder allenfalls auch ein neues Normierungsprojekt zu eröffnen. Allerdings gibt es dafür noch keine Finanzierung und die Bewertung der Speicherschichtung betrifft verschiedene Normierungsgremien. Darum ist nicht mit einer sehr schnellen Lösung zu rechnen. Eine Europäische Norm wäre jedoch Voraussetzung, damit das Thema in der nächsten Revision von Ecodesign und Energylabelling aufgenommen wird.

7 Kommunikation

Bisher sind noch keine öffentlichen Kommunikationen zu diesem Projekt erfolgt.

8 Publikationen

Bisher sind noch keine Publikationen zu diesem Projekt erfolgt.

⁶ <https://www.ecoboiler-review.eu/index.html>

⁷ [SKN N0571R0 SPF-PV86-2.4-SE-SCF OT](#)

⁸ [SKN N0573R0 SCF10 Stratification Report1 HD](#)



9 Literaturverzeichnis

- [1] Haller MY, Haberl R, Persdorf P, Reber A. StorEx – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik; 2015.
- [2] Haller MY, Haberl R, Persdorf P, Reber A. Stratification Efficiency of Thermal Energy Storage Systems – A new KPI based on Dynamic Hardware in the Loop Testing - Part I: Test Procedure. Energy Procedia 2018;155:188–208. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.056>.
- [3] Haller MY, Haberl R, Reber A. Stratification efficiency of thermal energy storage systems – A new KPI based on dynamic hardware in the loop testing - Part II: Test results. Energy and Buildings 2019;202:Article 109366. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109366>.
- [4] Haberl R, Reber A, Haller MY. Schichtungseffizienz - SPF – Prüfvorschrift Nr. 86 2017. https://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/spf/Testing/Speicherschichtung/SPF-PV86-SE-Ver2.2.pdf (accessed November 15, 2019).
- [5] European Committee for Standardization (CEN). EN 16147: 2017 Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Prüfungen, Leistungsbemessung und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser n.d.
- [6] SIA 385/1: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen 2020.
- [7] Haller M. Die neue SIA 385/1 zu Trinkwasser in Gebäuden. HK-Gebäudetechnik 2021.



Annex A: Simulationen zur Bestimmung des Testprofils

Randbedingungen:

Simulation einer WW-Solaranlage in TRNSYS

Wetterdaten: CCT-Datensatz

Kollektor: Vereinfachte Kollektorsimulation aus StorEx

Speicher: Variiert zw. 300 l bis zu 1200 l

Zapfprofil: L bis XXL

Kollektorfläche:

Zapfprofil		Aperturfläche
[-]	[kWh/d]	[m ²]
L	11.66	5.0
XL	19.07	8.2
XXL	24.53	10.5

Formel 12

$$F_{Sol} = 1 - \frac{Q_{WP}}{Q_{WW}}$$

Formel 13

$$SD = \frac{Q_{Sol}}{Q_{Sol} + Q_{WP}}$$

Resultate Jahressimulation

Die Simulation mit 5 m² Kollektorfläche und dem Profil L (11.66 kWh/d) führt zu einem solaren Deckungsgrad (SD) von 48 % bzw. zur Deckung von 41 % des Nutzwärmebedarfs über Solarwärme (F_{sol}).

Der verhältnismässig tiefe SD erklärt sich aus der Charakteristik des verwendeten, täglich wiederholten WW-Profiles. Dieses ist repräsentiert eine maximale Belastungssituation und nicht den durchschnittlichen Tagesbedarf (vgl. Kapitel 3.3, "Relevanz der Zapfprofile").

Abbildung 23 zeigt die tägliche Speicheränderung und den SD auf Tagesbasis aus der Simulation. Der Tag 270 aus der Jahressimulation ist zum einen repräsentativ für den solaren Jahres-Deckungsgrad und weist zum anderen keine Speicheränderung am Tageswechsel auf. Das heisst, dass an diesem Tag der Energieinhalt des Speichers zu Beginn und Ende des Tages nahezu identisch ist.

Eine Simulation desselben Systems mit mehrfacher Wiederholung dieses Tages zeigt, dass auch in der Testsequenz-Simulation ein repräsentativer Deckungsgrad resultiert und die Speicheränderung pro Tag praktisch null ist.

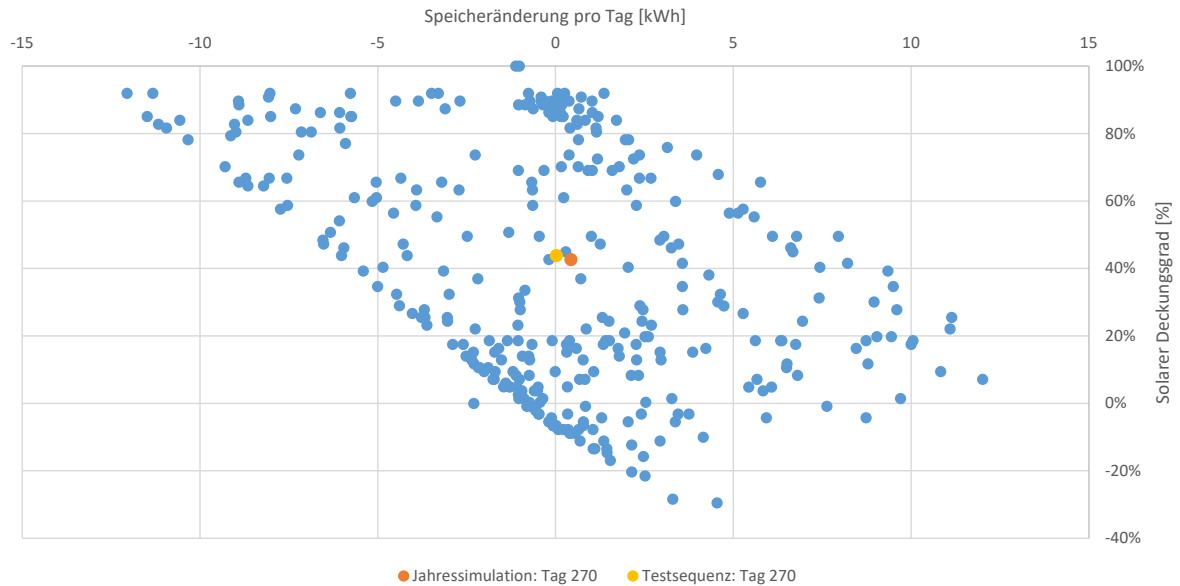


Abbildung 23: Tagesauswertung der Simulation mit 400 l WW-Speicher, 5 m² Kollektorfläche und Zapfprofil L.

Abbildung 24 stellt die Resultate aus der Jahressimulation denjenigen einer mehrfachen Wiederholung des Testtages gegenüber. Das Verhältnis aus Solarwärme zur Wärmelieferung der Nachheizung ist praktisch identisch.

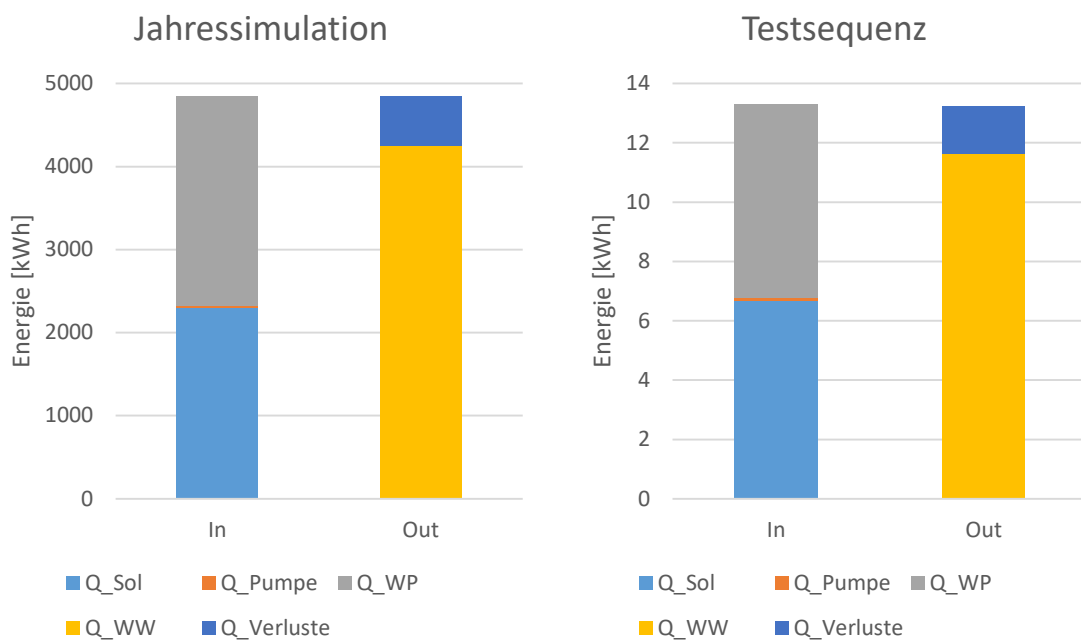


Abbildung 24: Resultate der Jahressimulation eines solaren Warmwassersystems und der Testsequenzsimulation desselben Systems.



Variationen der Speichergrösse

Zur Kontrolle ob der ausgewählte Testtag auch für andere Speichergrössen repräsentativ ist wurde eine Variation von Zapfprofilen mit entsprechender Kollektorfläche und Speichergrössen durchgeführt. Dazu wurden jeweils Simulationen als Jahressimulationen und Testsequenzsimulationen durchgeführt. Abbildung 25 zeigt die Tageswerte der Wärmelieferung durch die Solaranlage und die Wärmepumpe aus der Testsequenz über den jeweiligen Tagesmittelwerten der Jahressimulationen.

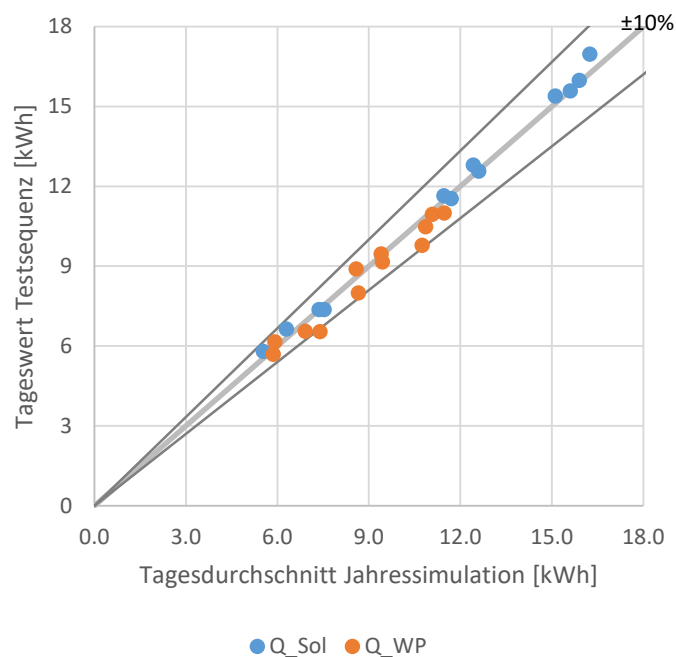


Abbildung 25: Vergleich von Solarertrag und Zusatzwärme aus Jahressimulationen und der Testsequenz.



Annex B: Grafiken zu den Schichtungstests

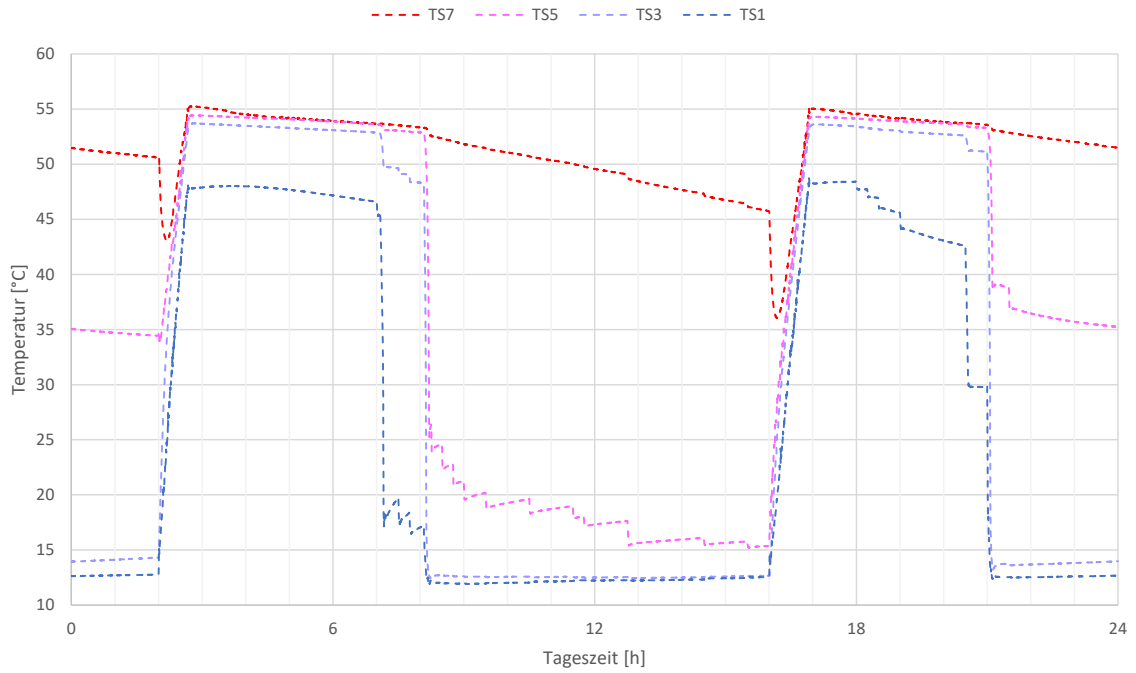


Abbildung 26: Temperaturverlauf der Messung von Speicher #1 / Test I.

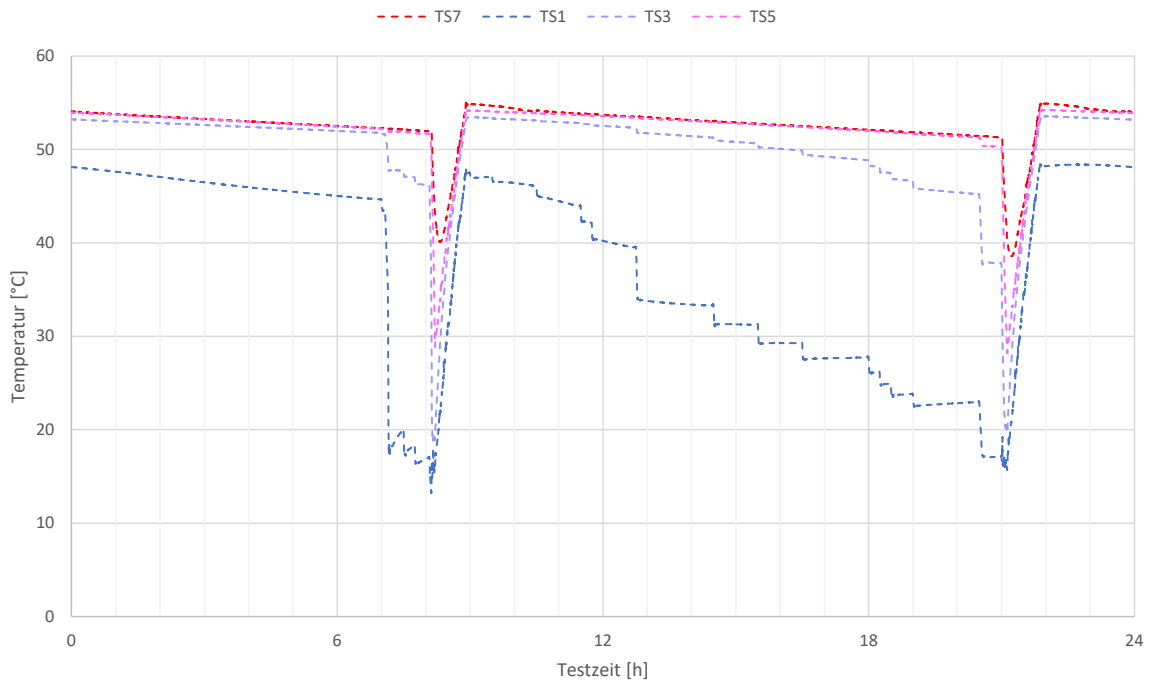


Abbildung 27: Temperaturverlauf der Messung von Speicher #1 / Test II.

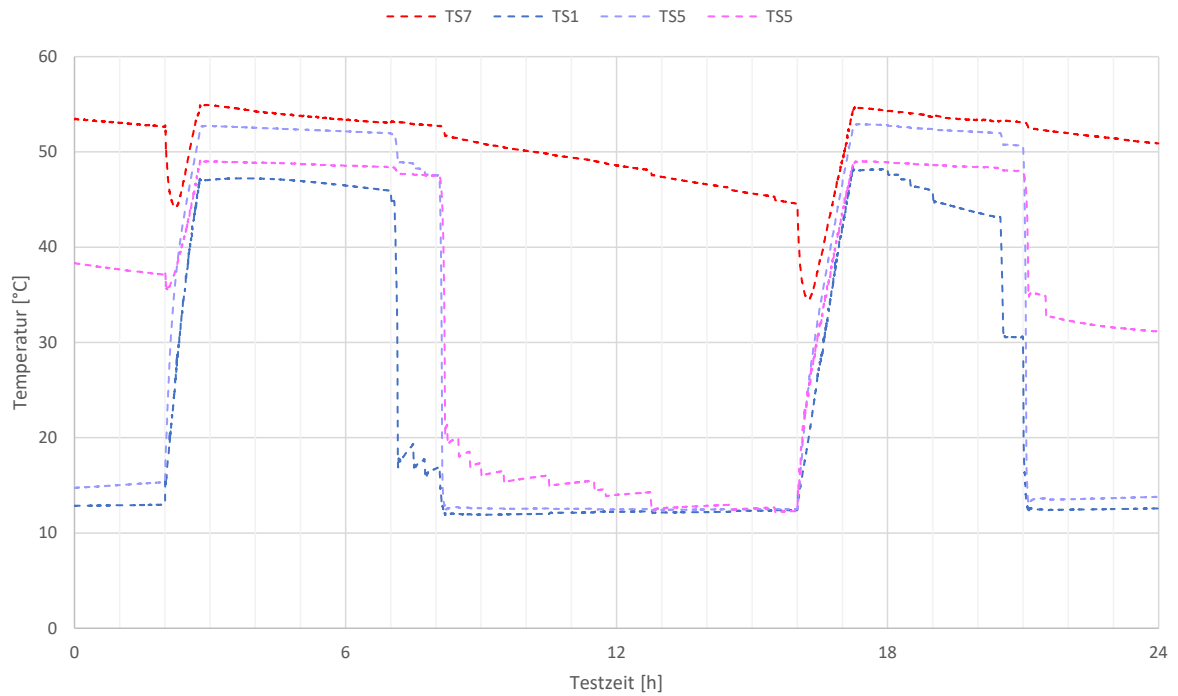


Abbildung 28: Temperaturverlauf der Messung von Speicher #1 / Test III.

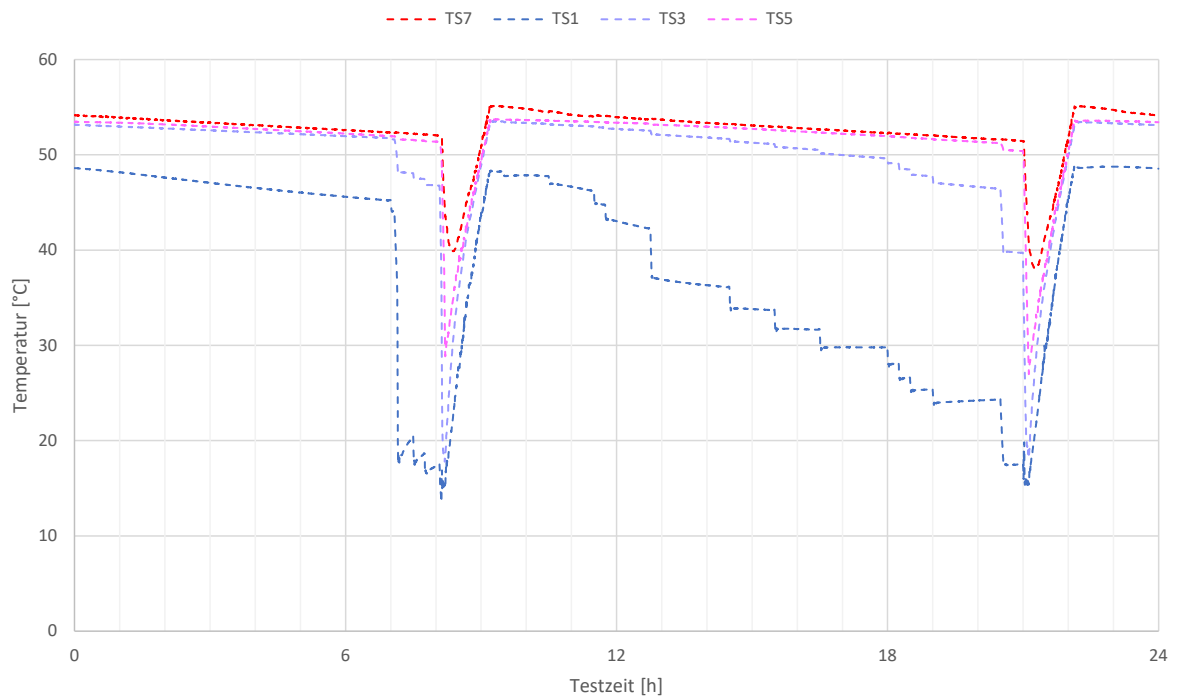


Abbildung 29: Temperaturverlauf der Messung von Speicher #1 / Test IV.

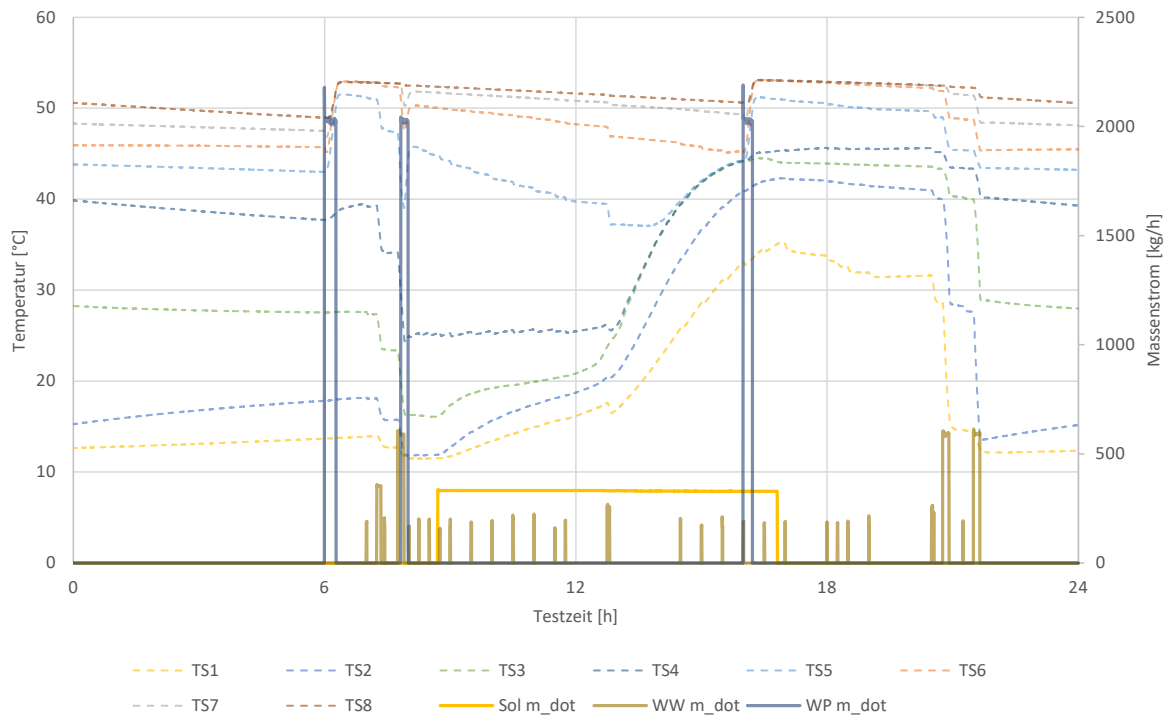


Abbildung 30: Verlauf der Messung von Speicher #2 / Test I.

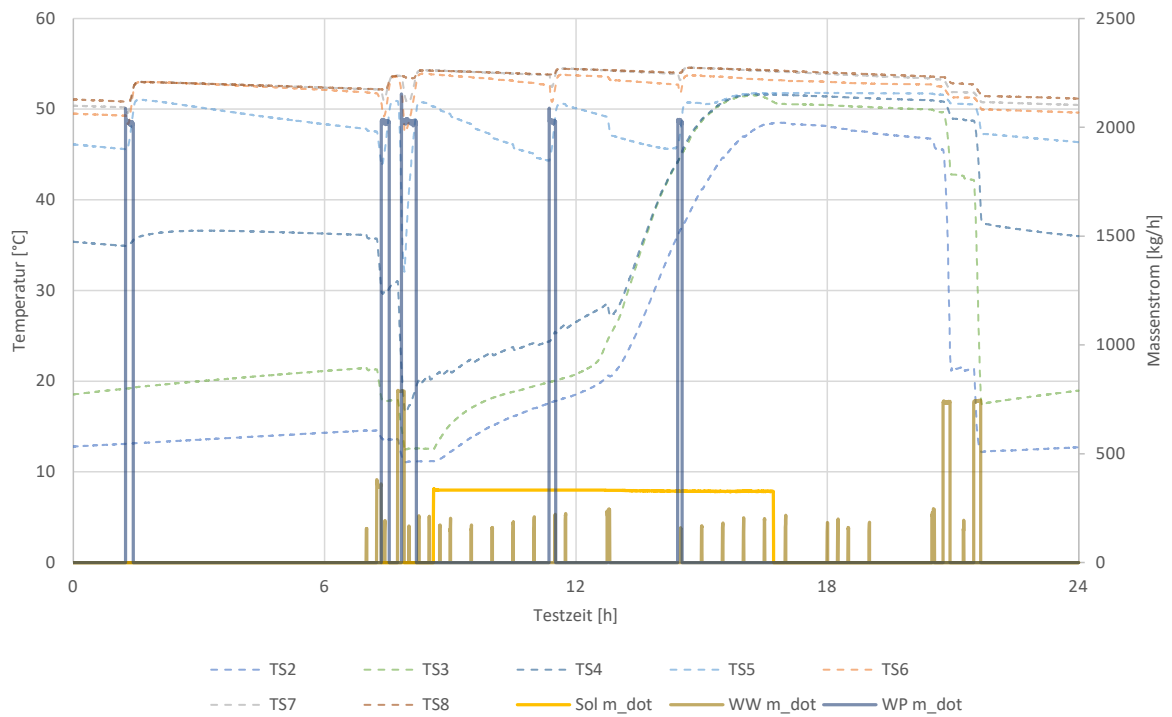


Abbildung 31: Verlauf der Messung von Speicher #2 / Test II.

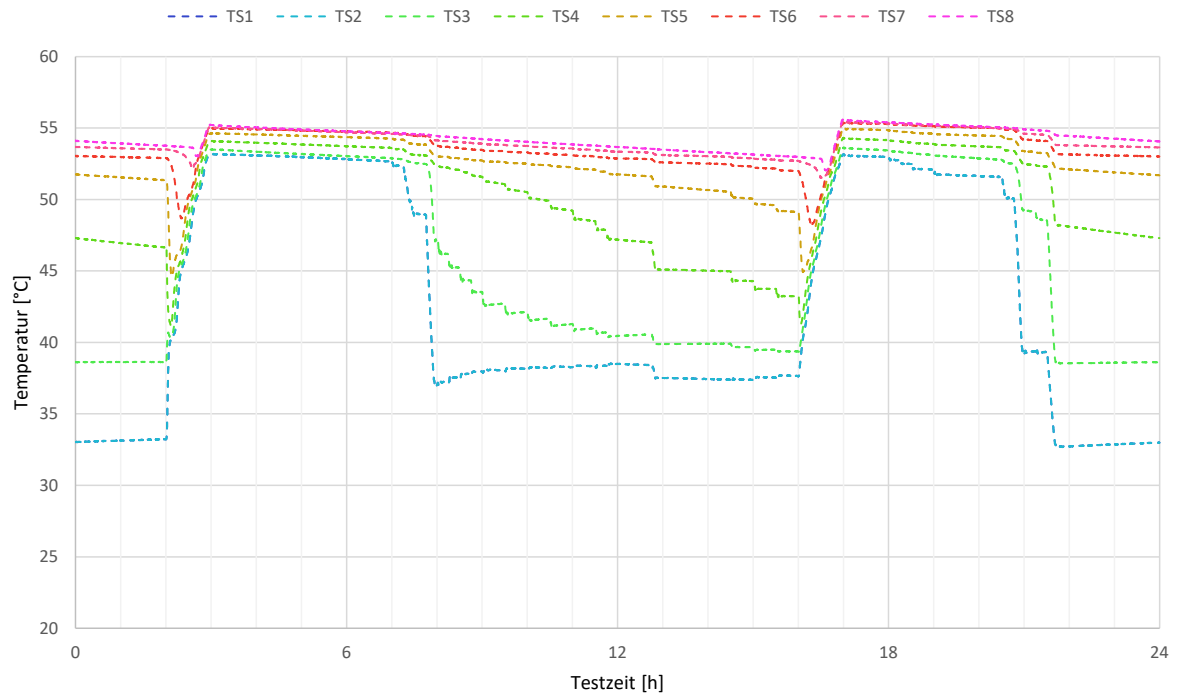


Abbildung 32: Verlauf der Messung von Speicher #3 / Test I.

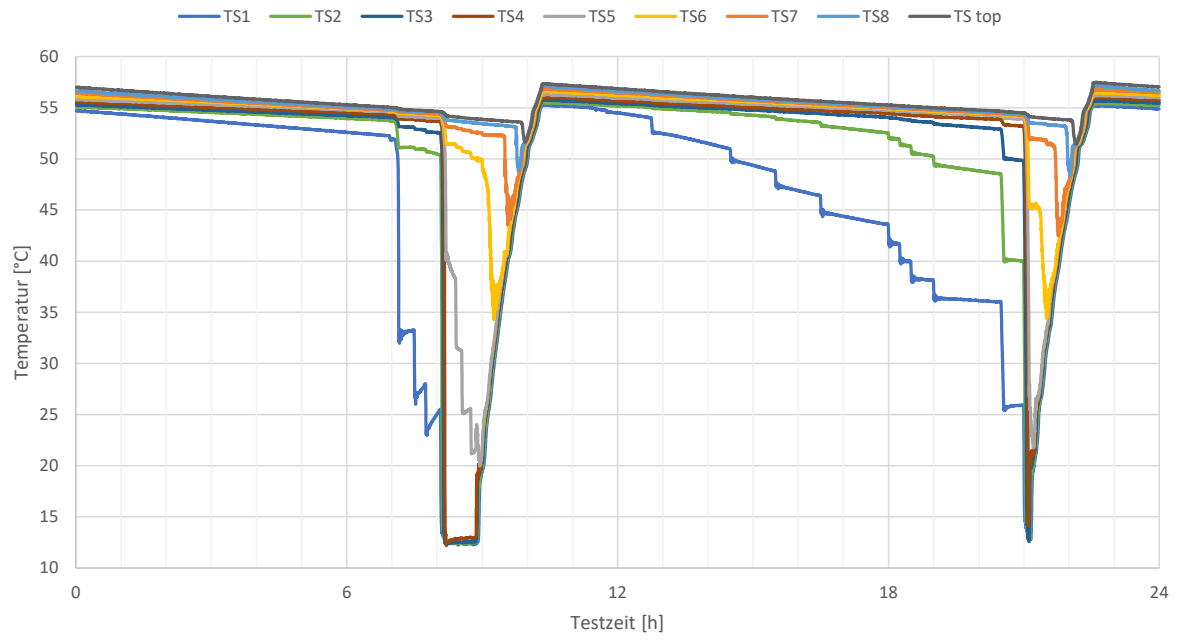


Abbildung 33: Verlauf der Messung von Speicher #4 / Test I.



Annex C: Entropiebilanz des Vergleichssystems

Tabelle 21: Zugeführte und abgeführte Entropie in Abhängigkeit des verwendeten Zapfprofiles.

		L	XL	XXL
ΔS_{ww}	[kJ/K]	141.06	230.71	296.69
$\Delta S_{60^\circ C}$	[kJ/K]	125.94	206.07	265.07
$\Delta S_{irr,mix}$	[kJ/K]	15.12	24.64	31.63