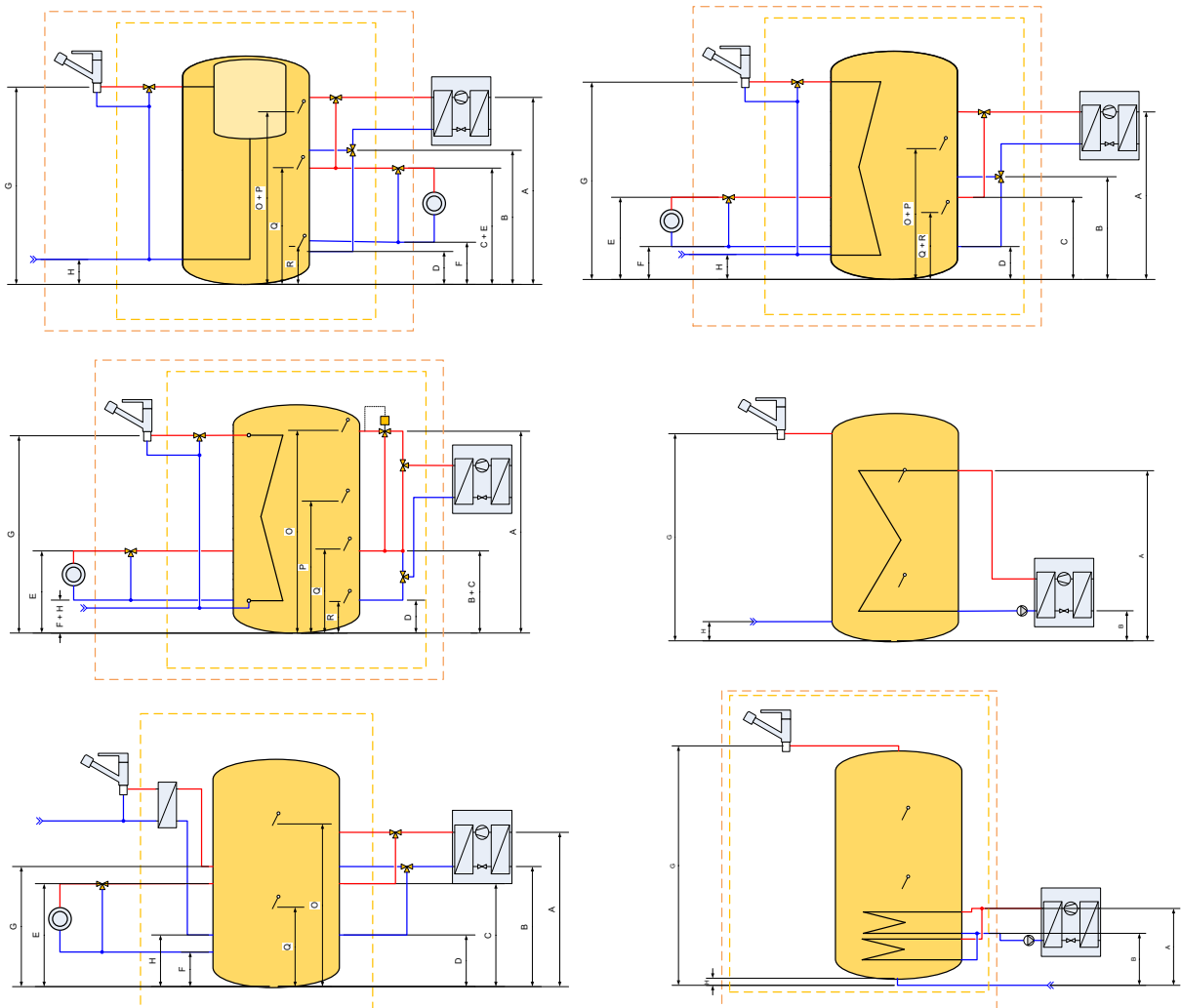




Schlussbericht vom 08. Juli 2024

# RoRoStrat

## Round Robin Speicherschichtung



Quelle: © SPF



**Datum:** 08.07.2024

**Ort:** Rapperswil

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Ko-Finanzierung:**

Solar Certification Fund  
Solar Heat Europe/ESTIF aisbl  
Place du Champ de Mars 2,  
1050 Brussels,  
Belgium

**Subventionsempfänger/innen:**

SPF Institut für Solartechnik  
OST - Ostschweizer Fachhochschule  
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil  
[www.spf.ch](http://www.spf.ch)

**Autor/in:**

Robert Haberl, SPF, [robert.haberl@ost.ch](mailto:robert.haberl@ost.ch)  
Michel Y. Haller, SPF, [michel.haller@ost.ch](mailto:michel.haller@ost.ch)  
Vera Gütle, SPF, [vera.guetle@ost.ch](mailto:vera.guetle@ost.ch)  
Andreas Bohren, SPF, [andreas.bohren@ost.ch](mailto:andreas.bohren@ost.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)  
Stephan A. Mathez, [stephan.a.mathez@solarcampus.ch](mailto:stephan.a.mathez@solarcampus.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502508-01

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



## Zusammenfassung

Die Effizienz der Schichtung in thermischen Speichern spielt eine entscheidende Rolle für die energetische Leistungsfähigkeit von Wärmepumpensystemen. Seit einigen Jahren kann die Schichtungseffizienz mittels einer vom SPF entwickelten Methode gemessen werden. Diese Methode ermittelt die Entropieproduktion des Speichers an einem typischen Testtag (24-h Profil) im Labor durch einen "Concise Cycle Test" (CCT). Die gemessene Entropieproduktion wird dann mit der maximal zu erwartenden Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers oder Speichersystems verglichen.

In diesem Projekt werden die Ergebnisse dieses Ansatzes mit der Ermittlung derselben Kennzahl auf der Grundlage von Component Testing – System Simulation (CTSS) verglichen. Bei diesem zweiten Verfahren werden zunächst Speicher-Simulationsparameter auf der Grundlage der Norm EN 12977 ermittelt. Anschließend wird der "typische Testtag" als 24-h Profil mit dem parametrisierten Speichermodell simuliert und die Entropieproduktion aus den Simulationsergebnissen ermittelt. Die Berechnung der Schichtungseffizienz erfolgt dann wiederum wie beim CCT-Verfahren, indem die Entropieproduktion des - nun simulierten - Speichers mit dem Worst-Case-Szenario eines vollständig durchmischten Speichers verglichen wird.

Beide Methoden wurden bei denselben sechs unterschiedlichen Speichern angewendet. Die Messungen nach der CCT-Methode wurden am SPF durchgeführt, während die Bestimmung der Schichtungseffizienz nach der CTSS-Methode am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart durchgeführt wurde.

Die CCT-Methode zeigt eine Schichtungseffizienz von 69 % bis 84 %. Eine hohe Effizienz korreliert sehr gut mit einer niedrigen Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers. Die nach der CTSS-Methode ermittelten Schichtungseffizienzen lagen im Bereich von 67 – 96 %, wobei die Resultate aus dem CTSS um ca. 5% höher als bei CCT. Der tiefste simulierte Wert ist jedoch 5% tiefer, der höchste 19% höher (96% anstatt 81%). Eine gute Übereinstimmung ist somit nicht gegeben. Kritisch ist dabei, dass das im CTSS-Verfahren benutzte Simulationsmodell TRNSYS Type 340 praktisch nur die Höhe der Anschlusspositionen und die effektive vertikale Leitfähigkeit im Speicher nutzt, um Mischungseffekte abzubilden. Mit diesen Parametern kann jedoch das Verhalten des Speichers und dessen Mischungseffekte vor allem bei impulsreicher Einströmung und bei mitreissender Strömung nicht adäquat abgebildet werden.

Darüber hinaus wurde eine alternative Modellierung der Speichertemperaturprofile mit expliziten mathematischen Funktionen untersucht, welche die Temperatur des Speichers als stetige und integrierbare Funktion in Abhängigkeit der Speicherhöhe beschreiben. Der Tangens hyperbolicus und Exponentialfunktionen eignen sich prinzipiell zur Abbildung von Speichern mit einer Thermokline, bei mehreren Thermoklinen können diese Funktionen superponiert (addiert) werden. Die Parameter zur Beschreibung des Temperaturprofils in einem Speicher mit einer Thermokline als mathematische Funktion sind Schärfe und Position (Wendestelle) der Thermokline, sowie die untere und obere Temperaturgrenze der Funktion. Die durch diese Funktionen bestimmten Speichertemperaturprofile stimmten sehr gut mit den tatsächlich gemessenen Temperaturprofilen zu verschiedenen Zeitpunkten der Be- und Entladung sowie des Standby überein.



## Résumé

L'efficacité de stratification dans les réservoirs du stockage thermique a un grand effet sur le rendement énergétique des systèmes thermopompes. Le SPF ait développé, depuis plusieurs années, une méthodologie pouvant mesurer l'efficacité de la stratification des réservoirs du stockage thermique. Selon cette méthode, l'évolution d'entropie du médium stockage thermique dont contient le réservoir est mesuré au cours de 24 h en lui imposant les conditions représentatives d'une journée de base. Ceci est mené au laboratoire utilisant un « Concise Cycle Test » (CCT). L'évolution d'entropie qui y est mesurée est à la suite comparée au maximum possible, représentant alors un réservoir équivalent dont le médium y est mélangé afin d'avoir une température parfaitement uniforme.

Dans le cadre du projet actuel, l'efficacité de stratification obtenu selon la méthodologie laboratoire du SPF était comparés contre celui obtenu d'une seconde méthode, « Component Testing – System Simulation » (CTSS). Au CTSS, les paramètres nécessaires pour simuler le rendement d'un réservoir de stockage thermique sont préalablement déterminés selon la norme EN 12977. Les conditions représentants la journée de base du test SPF sont ensuite imposées au modèle numérique du réservoir stockage thermique afin d'y calculer l'évolution d'entropie. L'efficacité de stratification qu'il y en résulte est ensuite calculée de façon égale à celle de l'évaluation laboratoire CCT.

Les deux méthodes (CCT, CTSS) étaient chacune effectuées pour l'évaluation de six réservoirs différents. Toutes évaluations CCT étaient effectué au site du SPF, tandis que les évaluations CTSS étaient tous effectué à l'Institut de l'Énergétique du Bâtiment, Génie Thermique et du Stockage d'Énergie (IGTE) situé à l'Université de Stuttgart.

La méthode CCT ait eu comme résultat des efficacités de stratification de 69 % à 84%, dont les résultats les plus élevés conformaient bien aux températures obtenues de la source d'énergie subit à un faible débit. Celles déterminées selon la méthode CTSS étaient de 67 % - 96 %, desquelles la plupart étaient plus élevées de celles du CCT par à peu près 5 %. La plus basse était inférieure au résultat CCT par 5 % et que la plus élevée était excédante de 19 % de plus que celle du CCT. Il n'y avait alors aucun accord entre les résultats des deux méthodes. Le point saillant est que le modèle numérique TRNSYS Type 340, dont se fit la méthode CTSS, est insuffisante pour représenter les phénomènes de stratification et de mélange, surtout sous l'effet des débit impulsifs ainsi que l'entraînement de fluide. Le paramétrage du Type 340 est plutôt simple, utilisant que l'élévation de chacune des connections pour le débit ainsi la conductivité verticale représentative.

Une méthode numérique alternative pour la modélisation du réservoir stockage thermique était aussi évaluée en comparaison de la méthode CCT. Celui-ci préposait une représentation mathématique ayant des fonctions explicites de températures continues et intégrables selon la verticale. En principe, les fonctions tangentes hyperboliques ainsi que les fonctions exponentielles peuvent représenter les réservoirs ayant une seule thermocline, les superposant pour représenter des thermoclines additionnelles. Il faut préciser uniquement la pente et la position (point d'inflexion) d'où se situe chaque thermocline ainsi que les températures min/max de la fonction. Cette modélisation des thermoclines a réussi de bien représenter les températures mesurées dans les réservoirs évalués par la méthode CCT, prises à plusieurs moments lors du chargement, décharge et repos.



## Summary

The efficiency of stratification in thermal stores plays a decisive role in the energy performance of heat pump systems. For some years now, it has been possible to measure stratification efficiency using a method developed by SPF. This method determines the entropy production of the storage tank on a typical test day (24-h profile) in the laboratory using a "Concise Cycle Test" (CCT). The measured entropy production is then compared with the maximum expected entropy production of a fully mixed storage tank or storage system.

In this project, the results of this approach are compared with the determination of the same key figure based on Component Testing - System Simulation (CTSS). In this second method, simulation parameters of the storage tank are first determined based on the EN 12977 standard. The "typical test day" is then simulated as a 24-h profile with the parameterized storage model and the entropy production is determined from the simulation results. The stratification efficiency is then calculated in the same way as for the CCT method, by comparing the entropy production of the - now simulated - storage tank with the worst-case scenario of a fully mixed storage tank.

Both methods were applied to the same six different storage tanks. The measurements using the CCT method were carried out at the SPF, while the determination of the stratification efficiency using the CTSS method was carried out at the Institute for Building Energy, Thermal Engineering and Energy Storage (IGTE) at the University of Stuttgart.

The CCT method shows a stratification efficiency of 69 % to 84 %. A high efficiency correlates very well with a low flow temperature of the heat generator. The stratification efficiencies determined using the CTSS method were in the range of 67 - 96 %, whereby the results from the CTSS were approx. 5 % higher than with CCT. However, the lowest simulated value is 5% lower, the highest 19% higher (96% instead of 81%). There is therefore no good agreement. The critical point here is that the TRNSYS Type 340 simulation model used in the CTSS method practically only uses the height of the connection positions and the effective vertical conductivity in the storage tank to map mixing effects. With these parameters, however, the behavior of the storage tank and its mixing effects cannot be adequately mapped, especially in the case of impulsive inflow and entrained flow.

In addition, an alternative modelling of the storage tank temperature profiles with explicit mathematical functions was investigated, which describe the temperature of the storage tank as a continuous and integrable function depending on the storage tank height. In principle, the hyperbolic tangent and exponential functions are suitable for modelling storage tanks with one thermocline; these functions can be superposed (added together) for several thermoclines. The parameters for describing the temperature profile in a storage tank with a thermocline as a mathematical function are the sharpness and position (inflection point) of the thermocline, as well as the lower and upper temperature limits of the function. The storage tank temperature profiles determined by these functions corresponded very well with the temperature profiles actually measured at various times during charging and discharging as well as standby.



## Take-home messages

- Die Schichtungseffizienz von thermischen Speichern korreliert mit der mittleren Temperatur des Wärmeerzeugers: Je höher die Schichtungseffizienz des Speichers, desto tiefer die nötige Vorlauftemperatur der Wärmepumpe bei der Beladung.
- Das Component Testing – System Simulation Verfahren, mit einem 1D-Simulationsmodell mit ortsfesten Volumen uniformer Temperaturen, kann die Variabilität der Resultate aus den dynamischen Messungen nicht reproduzieren.
- Die Abbildung der Speichertemperaturen als mathematische Funktion ist mit einer Tangens hyperbolicus oder mit einer inversen exponentiellen Funktion möglich.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>10</b>
1.1	Ausgangslage und Hintergrund .....	10
1.1.1	Speicherschichtung und deren Messung.....	10
1.1.2	Speicherschichtung und deren Simulation.....	10
1.2	Motivation des Projektes .....	10
1.3	Projektziele .....	11
<b>2</b>	<b>Vorgehen und Methode .....</b>	<b>12</b>
2.1	Ringversuch .....	12
2.1.1	Messung der Schichtungseffizienz mit dem Concise Cycle Test Verfahren.....	12
2.1.2	Messung der Schichtungseffizienz mit dem Component Test System Simulation Verfahren ..	13
2.2	Simulationsmodell .....	13
<b>3</b>	<b>Ringversuch .....</b>	<b>15</b>
3.1	Getestete Speichersysteme .....	15
3.2	Messung der Schichtungseffizienz mittels CCT .....	16
3.2.1	Hydraulische Einbindung .....	16
3.2.2	Installation am Prüfstand.....	17
3.2.3	Randbedingungen der Schichtungstests .....	17
3.2.4	Resultate der Schichtungstests.....	18
3.3	Schichtungseffizienz nach dem CTSS-Verfahren .....	20
3.4	Vergleich der Testresultate und Diskussion zu den Testmethoden .....	21
3.5	Zusammenfassung .....	23
<b>4</b>	<b>Neues Simulationsmodell für Speicherschichtung .....</b>	<b>25</b>
4.1	Speicher und Messdaten .....	25
4.2	Mathematische Funktionen .....	27
4.3	Kurvenfitting und Ermittlung der Thermokline .....	30
4.4	Verlauf der Funktionsparameter .....	39
4.5	Funktionsparameter im Standby .....	41
4.6	Zusammenfassung neues Simulationsmodell.....	49
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>52</b>
	<b>Annex A Getestete Speicher .....</b>	<b>53</b>
	<b>Annex B Resultate des Schichtungstests .....</b>	<b>60</b>



<b>Annex C Grafiken: Kurvenfitting.....</b>	<b>90</b>
<b>Annex D Speicherzeichnungen.....</b>	<b>95</b>

## **Abkürzungsverzeichnis**

DHW	Domestic Hot Water / Warmwasser
EN	Europäische Norm
FWM	Frischwassermodul
IHX	Immersed Heat Exchanger
KW	Kaltwasser
MAD	Mittlere absolute Abweichung
RL	Rücklauf
SCF	Solar Certification Fund
SE	Schichtungseffizienz
TiT	Tank-in-Tank
VL	Vorlauf
WE	Wärmeerzeuger
WP	Wärmepumpe
WÜ	Wärmeübertrager
WPSM	Wärmepumpen-Systemmodul
WW	Warmwasser





## Formelzeichen

$T$	[°C]	Temperatur
$\Delta T$	[K]	Temperaturdifferenz
$a$		Schärfe der Thermokline
$b$		Position der Thermokline
$c_p$	[kJ]/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität
$h$		relative Speicherhöhe
$m$	[°C]	Steigung der Thermokline
$n$		Zeitschritt
$Q$	[kWh]	Wärme
$\%_{\Delta T}$		Prozentuale Temperaturdifferenzänderung pro Zeitschritt
$\Delta t$	[min]	Länge Zeitschritt

## Indizes

Isolierung	Speicherisolierung
SIA	nach SIA Norm (prSIA 385/2:2023)
ambient	Umgebung
exp	Exponentialfunktion
initial	Startwert
max	Maximal
min	Minimal
tanh	Tangens hyperbolicus



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

### 1.1.1 Speicherschichtung und deren Messung

Die Speicherschichtung ist anerkanntermassen ein wichtiger Parameter für die Bewertung eines thermischen Speichers. Der elektrische Energieverbrauch in einem Wärmepumpensystem kann mit einem gut schichtenden Speicher um bis zu 40 % tiefer ausfallen als mit einem schlecht schichtenden Speicher (siehe SPF-Projekte "StorEx"<sup>1</sup> für Wärmespeicher, welche Brauchwarmwasser (WW) und Raumheizungswärme (RH) in einem Gerät speichern (Kombispeicher) und "DHWstrat"<sup>2</sup> für WW-Speicher). Es gibt aber noch kein einheitliches, international anerkanntes Verfahren, um diese Schichtung zu bewerten. Für die Definition und die Bestimmung der Schichtungseffizienz sind zwei unterschiedliche Verfahren in Diskussion: Die "SPF-Methode" und die "IGTE-Methode" der Universität Stuttgart.

Die SPF-Methode nutzt ein 24-h Profil zur dynamischen und vor allem realitätsnahen Be- und Entladung des Speichers. Direkt aus den Messdaten wird die Entropieproduktion verwendet, um eine dimensionslose Grösse, genannt Schichtungseffizienz, zu bestimmen.

In der Schweiz hat sich für Kombi-Wärmespeicher das vom SPF entwickelte Verfahren etabliert [3]. Dieses wird inzwischen auch für reine Warmwasserspeicher angeboten (Projekt DHWstrat, [www.spf.ch/dhwstrat](http://www.spf.ch/dhwstrat)).

### 1.1.2 Speicherschichtung und deren Simulation

Die Veränderung des Temperaturprofils über die Speicherhöhe mit der Zeit, zum Beispiel während der Be- und Entladung, kann über CFD-Simulationen mit grossem Rechenaufwand abgebildet werden. Diese Modelle eignen sich jedoch auf Grund des hohen Aufwandes und der komplexen und meist teuren und aufwändigen Software nicht zur Simulation ganzer Tages- oder sogar Jahresprofile für die Be- und Entladung, wo einfachere «1D-Knotenmodelle» (fixe Volumen oder Plugflow) zum Einsatz kommen (zum Beispiel in TRNSYS, Polysun, Matlab-Simulink, Tachion, etc.). Diese einfacheren 1D-Modelle sind jedoch nicht in der Lage, schichtungsstörende Prozesse wie die impulsreiche Einströmung («inlet jet mixing») oder die mitreisende Auftriebsströmung («plume entrainment») korrekt abzubilden. Dieses Manko wird heute mit einem stark vereinfachten Workaround kompensiert. Dabei werden andere Parameter des Simulationsmodells, wie zum Beispiel der internen Wärmeleitfähigkeit oder anderer Faktoren, welche zur Mischung von Fluid verschiedener Temperaturen im Speicher führen, künstlich verändert.

## 1.2 Motivation des Projektes

Das Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart schlägt ein Verfahren vor, welches auf dem seit längerem praktizierten «Component Testing System Simulation – CTSS» basiert. Dabei wird der Speicher zuerst

---

<sup>1</sup> Forschungsprogramm Solarthermie und Wärmespeicher, Vertrags-Nr.: SI/500935-01 [1].

<sup>2</sup> Forschungsprogramm Solarthermie und Wärmespeicher, Vertrags-Nr.: SI/500315-03 [2].



vermessen und auf Grund der Messungen in einem 1D-Simulationsmodell («Type 340» [4] in TRNSYS) abgebildet. Über eine Simulation desselben 24-h-Testprofils, welches dem SPF-Verfahren zugrunde liegt, wird dann die Entropiebilanz und in der Folge derselbe Kennwert wie im SPF-Verfahren errechnet. Es gibt bisher jedoch noch keine direkten Vergleichsmessungen der beiden Methoden. Im besten Fall sind die beiden Verfahren kompatibel oder können so angepasst werden, dass sie übereinstimmende Ergebnisse liefern. Ansonsten ist es wichtig, die Unterschiede genau zu verstehen, um möglichst bald zu einem breit akzeptierten Verfahren zu kommen. Es bestehen jedoch noch erhebliche Zweifel in Bezug auf die Qualität der Abbildung von Speicherschichtung in den heute verwendeten Speicher-Simulationsmodellen, da diese die bei ungenügender Schichtung auftretenden Phänomene nicht korrekt abbilden. Beim Bestimmen der Simulationsparameter (fitten der Messdaten) wird das einfach durch zusätzliche Parameter kompensiert, wie zum Beispiel der internen Leitfähigkeit des Speichemediums, um damit eine Erhöhung der Schichtungsverluste zu erreichen. Die Einführung zusätzlicher Parameter führt zwar immer zu besseren Fit-Ergebnissen, aber nicht per se zu einer besseren Beschreibung des allgemeinen Verhaltens des Systems. In zwei unabhängigen Projekten die durch den Solar Certification Fund (SCF, Call 10) finanziert wurden, haben SPF und IGTE ihre Methoden so beschrieben und verfasst, dass sie von einem Fachpublikum verstanden und beurteilt werden können. Am 30. Solar-Keymark-Network-Meeting im Herbst 2021 wurden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Um die offenen Fragen zu klären, wurde ein Ringversuch vorgeschlagen. Auch dieser Ringversuch wird vom Solar Certification Fund unterstützt (SCF Call 13) und bildet die Grundlage für das hier beschriebene Projekt.

### 1.3 Projektziele

Das Ziel ist es, Messungen an in insgesamt sechs verschiedenen Speichern jeweils nach den beiden Verfahren durchzuführen, wobei am SPF die hier entwickelte Messung der Schichtungseffizienz und am IGTE die Messung nach EN 12977 [5] eingesetzt werden. Aufgrund dieser Messungen soll im Idealfall verifiziert werden, dass die beiden Methoden vergleichbare Ergebnisse liefern, oder es soll geklärt werden, inwiefern die Ergebnisse divergieren, und ob mit entsprechenden Anpassungen oder Korrekturen eine einheitliche Kennzahl für Speicherschichtung (Schichtungseffizienz von 0-100%) über zwei verschiedene Wege ermittelt werden kann. Dazu werden die Ergebnisse kommuniziert und mit Experten geteilt. Aufbauend auf den Projektergebnissen wäre es dann ein wichtiges nächstes Ziel, die Kennzahl und das Verfahren – oder beide Verfahren - in einer internationalen Norm zu verankern. Damit würde es dann auch möglich, das Schichtungsverhalten als Parameter in Regelwerken wie zum Beispiel im Europäischen Energielabel unterzubringen, und so die Effizienz insbesondere von Wärmepumpen und/oder Solarwärme in Kombination mit Wärmespeichern zu erhöhen.



## 2 Vorgehen und Methode

### 2.1 Ringversuch

Sechs verschiedene Speichersysteme wurden jeweils an beiden beteiligten Instituten mit verschiedenen Testmethoden gemessen.

Die Hersteller der Speicher beteiligten sich auch finanziell an dem Projekt. Die Lieferung durch die beteiligten Hersteller umfasste jeweils, neben dem Speicher selbst, auch alle Komponenten, die zur Einbindung des Speichers nötig sind. Dazu zählen neben allfälligen Umschaltventilen und der nötigen Verrohrung auch externe Wärmeübertrager (WÜ) und Pumpen, sofern diese benötigt werden (z.B. Frischwassermodul).

#### 2.1.1 Messung der Schichtungseffizienz mit dem Concise Cycle Test Verfahren

Am SPF Institut für Solartechnik wurde die Schichtungseffizienz der Kombispeicher nach der SPF internen Prüfvorschrift 86 (PV86, [3]) getestet, Warmwasserspeicher wurden nach der im Projekt DHWStrat definierten Methode zur Messung der Schichtungseffizienz geprüft.

Die Testmethoden für Kombispeicher und WW-Speicher folgen beide demselben Konzept mit dynamischer Emulation von Be- und Endladevorgängen. Für diese Art der Prüfung werden typische Bedingungen in einem Prüfzyklus zusammengefasst, um einen praxisnahen Betrieb zu ermöglichen. Die geprüfte Anlage läuft dabei als Hardware-in-the-Loop ohne Eingriffe von aussen. Die Methode wird sowohl zur Ermittlung der Leistungskennzahlen von Komplettsystemen zur Versorgung von Wohnhäusern mit Wärme und Strom, als auch zur Ermittlung der Schichtungseffizienz von Kombispeichern verwendet, wobei der Prüfzyklus jeweils angepasst wird. Im Fall der Messung der Schichtungseffizienz ist dies ein 24-h Zyklus, der mehrmals wiederholt wird.

Die Bezeichnung der Testmethode lautet CCT - Concise Cycle Test.

Jede Mischung von Fluiden mit verschiedenen Temperaturen hat, genau wie Wärmeausgleichsprozesse jeglicher Art, eine (messbare) Entropieproduktion zur Folge. Diesen Umstand macht sich die hier verwendete Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz zunutze, indem die Entropieproduktion von Speicher-Systemen während dem realitätsnahen Betrieb gemessen wird.

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

$$\zeta_{str} = 1 - \frac{\text{Entropieproduktion gemessen}}{\text{Entropieproduktion völlig durchmischter Speicher}} \quad \text{Formel 1}$$

Die Schichtungseffizienz beschreibt also, wie gut der Speicher seine Aufgabe im Vergleich zu einem vollständig durchmischten Speicher (worst case) «erledigt». Ein perfekt schichtendes



System<sup>3</sup> würde eine Schichtungseffizienz von 100 % erreichen. Ein völlig durchmischter Speicher 0 %.

Ein weiteres Resultat der Messung sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe wird nach Formel 2 bestimmt. Die Bestimmung der Temperaturen für den Wärmebezug erfolgt analog.

$$\overline{T_{WP,VL}} = \frac{\sum (T_{WP,VL,i} \cdot \dot{Q}_{WP,i})}{\sum \dot{Q}_{WP,i}} \quad \text{Formel 2}$$

### 2.1.2 Messung der Schichtungseffizienz mit dem Component Test System Simulation Verfahren

Am IGTE wurde die Schichtungseffizienz nach dem CTSS-Verfahren bestimmt. Die Abkürzung steht für «Component Testing – System Simulation». Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des komponentenorientierten Testverfahrens für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung. Beim CTSS-Verfahren werden die zentralen Komponenten wie Kollektor, Speicher und Regelung separat geprüft. Mit den dabei ermittelten Parametern wird in Verbindung mit entsprechend detaillierten Simulationsmodellen der jährliche Energieertrag für definierte Randbedingungen berechnet.

Dazu wurden die Speicher mittels Testsequenzen aus der EN 12977-3 getestet. Die Messdaten dienen zur Parametrisierung eines Simulationsmodells der Speicher für eine anschließende Jahressimulation. Die Bestimmung von Kennwerten eines Modells (Parameteridentifikation) durch Anpassung der Kennwerte an gemessene Daten ist eine etablierte Methode. Der grundsätzliche Ansatz ist i. a. für alle Modelle der Gleiche. Es wird eine Zielfunktion definiert, mit der die Übereinstimmung der gemessenen Daten mit dem aus dem Modell unter der Verwendung der Modellkennwerte berechneten Ergebnis verglichen wird. Die Zielfunktion wird normalerweise so gewählt, dass kleine Werte der Zielfunktion eine gute Übereinstimmung repräsentieren. Die Kennwerte des Modells werden dann so geändert, dass die Zielfunktion minimiert wird, um den passenden Kennwertsatz zu finden. Der Prozess der Anpassung ist also eine Minimierung der Zielfunktion im mehrdimensionalen Raum.

Als Simulationsmodell wird das 1D-Modell «Type 340» in der Simulationssoftware TRNSYS verwendet. Zusätzlich zur oben genannten Jahressimulation mit dem parametrisierten Modell wurde in diesem Projekt auch eine Simulation desselben 24-h Testprofils durchgeführt, welches dem SPF-Verfahren zugrunde liegt. Aus der Entropiebilanz dieser Simulation wurde dann der Kennwert der «Schichtungseffizienz» bestimmt.

## 2.2 Simulationsmodell

Simulationsmodelle von thermischen Speichern müssen jeweils einen Kompromiss aus Simulationszeit und Genauigkeit der Abbildung der Speichertemperatur eingehen. Modelle, welche ein realitätsnahes Temperaturprofil mit schneller Simulationszeit garantieren sind den Autoren bislang nicht bekannt.

<sup>3</sup> Ein perfekt schichtendes System ist physikalisch nicht möglich, entsprechend muss das Ergebnis der Messung kleiner als 100 % sein.



Erste Vergleiche des SPF anhand bisheriger Messungen zeigen, dass einfache mathematische Funktionen zur Abbildung des Temperaturprofils  $T$  über die Höhe  $h$  des Speichers in der Form

$$T(h) = f(h, t, x_1 \dots x_i)$$

*Formel 3*

die Temperaturverteilung im Speicher gut abbilden können. In dieser Formel steht  $t$  für die Zeit und die Parameter  $x_1$  bis  $x_i$  sind weitere Parameter wie der Volumenstrom und die Temperatur der Beladung, die Eintrittshöhe, sowie die Frage, ob mit internem oder externem WÜ übertragen wird, etc. Die Herausforderung ist es, die zeitliche Veränderung der Funktionsparameter einer solchen Funktion während Beladung, Speicherung und Entladung zu ermitteln. Dabei wird das Be- und Entladekonzept (interne, externe Be- oder Entlade-Wärmetauscher, Magroladung, Qualität der Schichtung etc.) einen Einfluss haben auf die Funktionsparameter, was es wiederum ermöglicht unterschiedliche Konzepte mit «systembezogenen» Parametern abzubilden.

Zur Ermittlung der beschriebenen Parameter und deren Einfluss auf die so berechnete Temperaturverteilung über die Zeit werden die im Ringversuch erlangten Messdaten verwendet.



## 3 Ringversuch

### 3.1 Getestete Speichersysteme

Die getesteten Speicher hatten Nennvolumen von 0.3 m<sup>3</sup> bis 0.9 m<sup>3</sup> und verfolgten verschiedene Konzepte zur Einbindung der Wärmepumpe und zur Warmwasserbereitung.

Vier der geprüften Speicher waren Kombispeicher. Bei drei der Kombispeicher wurde Warmwasser durch das Speichervolumen geführt. In zwei Fällen über innenliegende Spiralrohrwärmeübertrager, bei einem weiteren Speicher durch einen Innentank. Die Beladung durch die Wärmepumpe erfolgte in allen vier Kombispeichern mit einer doppelten Umschaltung (Vor- und Rücklauf). Einer der geprüften Kombispeicher nutzte eine Dreipunkt-Anbindung, wobei der mittlere Anschluss sowohl für den RH-Vorlauf als auch für den WW-Rücklauf verwendet wurde.

Zwei der geprüften Speicher waren WW-Speicher. In beiden Fällen ist das Frischwasser auch das Speichermedium. Die Beladung der WW-Speicher erfolgte jeweils mittels internen Wärmeübertragern.

Alle Speicher wurden ohne Warmwasser-Zirkulation getestet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Speicher inklusive deren Grösse bzw. Nennvolumen. In Annex A sind Details wie z.B. die relativen Höhen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler zu finden.

*Tabelle 1: Übersicht der geprüften Speicher*

		A	B	C	D	E	F
Zweck	WW	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RH	✓	✓	✓		✓	
WW-Bereitung		TiT	IHX	IHX	direkt	FWM	direkt
Nachheizung		direkt	direkt	direkt	IHX	direkt	IHX
Nennvolumen	[l]	896	826	931	300	600	800
WW-Volumen	[l]	220	31	43.5	300	-	650
TiT		Tank-in-Tank					
IHX		Immersed Heat Exchanger					
FWM		Frischwassermodule					



## 3.2 Messung der Schichtungseffizienz mittels CCT

### 3.2.1 Hydraulische Einbindung

Die Messung der Schichtungseffizienz erfolgt immer am gesamten Speichersystem, also inklusive der Hydraulik. Die hydraulische Einbindung der Speicher ist in Abbildung 1 bis Abbildung 6 zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass die gezeigten Höhen die Position am Speicheranschluss zeigen. Im Speicher integrierte Schichteinrichtungen oder Leitungsführungen werden dabei nicht berücksichtigt.

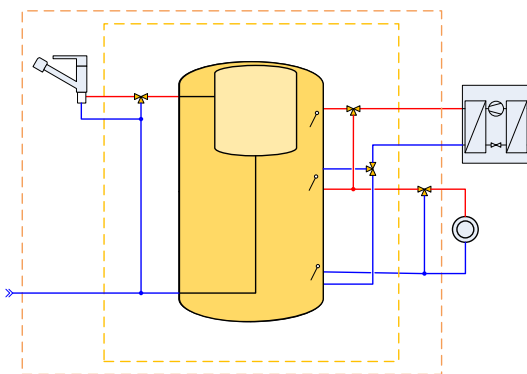


Abbildung 1: Einbindung von Speicher A

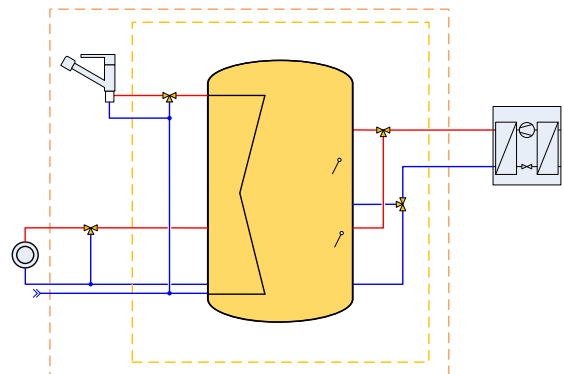


Abbildung 2: Einbindung von Speicher B

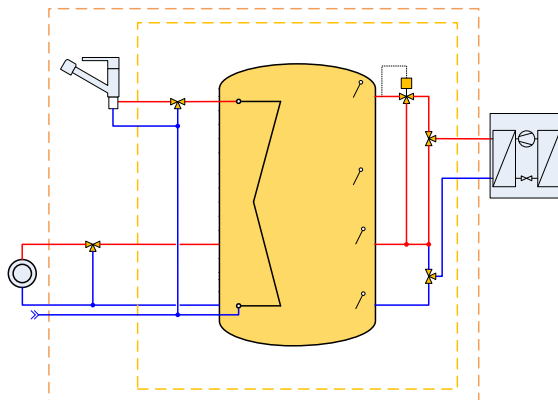


Abbildung 3: Einbindung von Speicher C

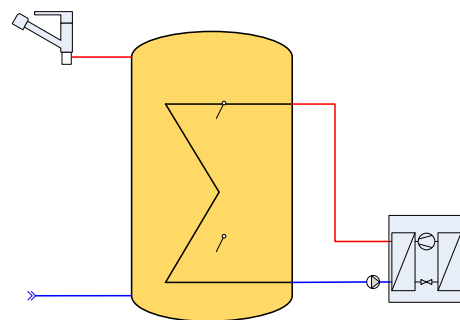


Abbildung 4: Einbindung von Speicher D

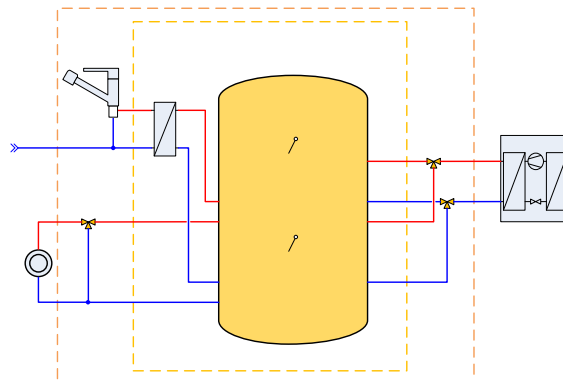


Abbildung 5: Einbindung von Speicher E

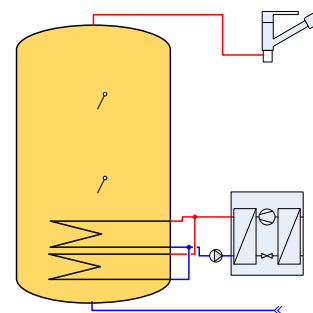


Abbildung 6: Einbindung von Speicher D





### 3.2.2 Installation am Prüfstand

Mit der beschriebenen bzw. der referenzierten Testmethode wurde die Schichtungseffizienz der in Kapitel 2.1 genannten Speicher bestimmt. Die Installation auf dem Prüfstand erfolgte entweder durch eine vom Hersteller bestimmte Person, oder nach Anleitung durch den Hersteller durch Personal des SPF. Die Messtechnik wurde durch Mitarbeiter des SPF installiert und die Isolation sämtlicher hydraulischer Anschlüsse vorgenommen (vgl. Abbildung 7).



*Abbildung 7: Speicher auf dem Prüfstand des SPF. Alle Anschlüsse sind siphoniert und isoliert. Die Temperaturmessung erfolgt so nahe am Speicher-System wie möglich*

### 3.2.3 Randbedingungen der Schichtungstests

Die Speicher wurden unter den durch den jeweiligen Hersteller gewählten Randbedingungen getestet. Dazu zählen neben der Vorgabe der hydraulischen Einbindung auch Parameter zur Regelung der Nachheizung (Sensorposition, Solltemperaturen und Hysterese), die Leistung der Wärmepumpe sowie, bei Warmwasserspeichern, die Wahl des hinterlegten WW-Zapfprofils. Eine Besonderheit bestand im Speicher C: Im üblichen Schema des Herstellers ist im Vorlauf der WP zur Beladung des Speichers ein thermisches Mischventil enthalten, um die Eintrittstemperatur in den Speicher von Beginn der WW-Ladung an auf einen Sollwert anzuheben. In Test 1 war dieses Mischventil noch inaktiv, in Test 2 wurde es aktiviert.

Eine Übersicht der Parameter ist in Tabelle 2 zu sehen.



Tabelle 2: Randbedingungen der Laborversuche

Speicher	A	B	C		D			E	F	
Test-Nr.	1	1	1	2	1	2	3	1	1	2
Nennleistung der Wärmepumpe [kW]	15	15	15	15	8	8	8	14	20	15
Massenstrom der Wärmepumpe (am Kondensator) [m³/h]	2.6	2.6	2.6	2.6	1.6	1.6	1.6	2.4	3.4	2.6
Max. VL-Temperatur der WP <sup>(1)</sup> [°C]	55	55	55	55	60	60	60	55	60	65 <sup>(1)</sup>
Zeitfenster für die WW-Bereitung	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Zapfprofil	L	L	L	L	XL	XL	XL	L	XXL	XXL
Solltemperaturen (zur Regelung der Nachheizung)										
WW ein [°C]	47	45	50	48	40	45	40	40	47	50
WW aus [°C]	52	52	50	49	50	50	50	51	52	55
RH ein [°C]	25	25	25	25	-	-	-	27	-	-
RH aus [°C]	28	33	30	30	-	-	-	30	-	-
Thermomischer			Nein	Ja						

<sup>(1)</sup> Die Temperaturbegrenzung der emulierten WP ist in der Prüfvorschrift für Kombispeicher mit 55°C definiert, für WW-Speicher mit 60°C.

<sup>(2)</sup> Die Temperaturbegrenzung der emulierten WP wurde für diesen Test auf 65°C erhöht.

### 3.2.4 Resultate der Schichtungstests

Die mit der CCT-Methode gemessene Schichtungseffizienz der Speicher, teilweise unter verschiedenen Randbedingungen, ist in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3: Mit der CCT-Methode gemessene Schichtungseffizienz (SE) mit der Bilanzgrenze «Speicher» und «System»

Speicher:	A	B	C		D			E	F	
Test:	1	1	1	2	1	2	3	1	1	2
SE Speicher [%]	84.0	83.0	78.8	74.7	71.2	69.7	70.6	81.5	69.6	71.7
SE System [%]	80.0	76.7	74.6	71.8	71.2	69.7	70.6	79.8	69.6	71.7



Wie in Formel 1 (Kapitel 2.1.1 Messung der Schichtungseffizienz mit dem Concise Cycle Test Verfahren) beschrieben, errechnet sich die Schichtungseffizienz der Speicher mit Hilfe der gemessenen Entropiebilanz während eines 24-h Testzyklus. Dabei wird unterschieden zwischen der im Speicher inklusive der Be- und Entladeeinrichtungen (interne wie externe Wärmetauscher) generierten Entropie und der in der Hydraulik generierten Entropie. In Abbildung 8 ist die Schichtungseffizienz auf Systemebene für Kombispeicher (orange) sowie für Warmwasserspeicher (blau) dargestellt. Die Entropieproduktion in der Hydraulik wird als «Mischung Hydraulik» dargestellt. Entsprechend ist die Schichtungseffizienz auf Speicherebene abzulesen als Summe der orangen/blauen Balken und der grau dargestellten «Mischung Hydraulik».

Kombispeicher werden seitens SPF in Effizienzklassen eingeteilt. Ausschlaggebend dafür ist die Schichtungseffizienz auf Systemebene. Zum Erreichen der höchsten Effizienzkategorie A ist eine Schichtungseffizienz von mindestens 80 % nötig, die Einteilung als B erfolgt ab 75%. Dies ist auch die Mindestanforderung zur Zulassung für das Wärmepumpen-Systemmodul.<sup>4</sup>

Kombispeicher C erreicht diese Mindestanforderung in beiden Fällen – mit und ohne Thermomischer im VL der WP – nicht. Der Tank-in-Tank Kombispeicher (Speicher A) erreicht in Kombination mit einer 15 kW WP mit exakt 80.0% die Effizienzkategorie A. Speicher E mit FWM und 14 kW Beladeleistung verfehlte die Einteilung in die Effizienzkategorie A nur knapp.

Die in Abbildung 8 rot hinterlegten Messungen erfüllen aus verschiedenen Gründen die Anforderungen der Testmethode nicht: Bei Speicher D sinkt die WW-Austrittstemperatur unter 50 °C, wenn zeitgleich zum Bezug eine Beladung über den integrierten Wärmeübertrager stattfindet. Aufgrund der geringen Speicherkapazität des 300 l Speichers in Kombination mit dem XL-Zapfprofil ist das Zusammentreffen von Be- und Entladung allerdings unvermeidlich. Die in der Testmethode definierten Komfortbedingungen können deshalb nicht erfüllt werden. Für die Messung 2 bei Speicher F wurde die maximale Vorlauftemperatur der WP nicht limitiert, um die nötige Austrittstemperatur für die Beladung bei 50 °C / 55 °C zu ermitteln.

Neben der Schichtungseffizienz ist auch die, nach Leistung gewichtete, mittlere Vorlauftemperatur der Be- und Entladung jeweils als Datenpunkt dargestellt. Es zeigt sich, dass Kombispeicher mit hoher Schichtungseffizienz mit einer tieferen mittleren Vorlauftemperatur der WP beladen werden. Im Vergleich zwischen den Speichern A und E wird eine höhere WW-Austrittstemperatur des Tank-in-Tank Speichers deutlich.

---

<sup>4</sup> <https://www.wp-systemmodul.ch/de/>

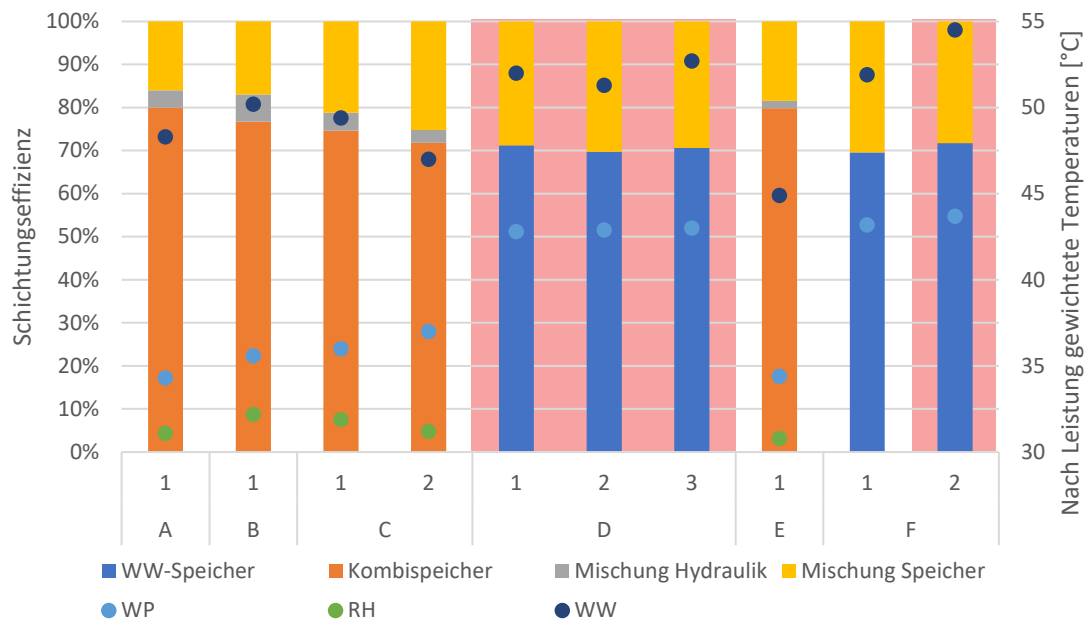


Abbildung 8: Schichtungseffizienz und Schichtungsverluste der gemessenen Speicher (linke Ordinatenachse) sowie die, nach Leistung gewichteten, Mitteltemperaturen der Be- und Entladung (rechte Ordinatenachse). Die rot hinterlegten Resultate erfüllten unter den getesteten Bedingungen nicht die Komfortbedingungen (Speicher D) oder wurden unter von der PV abweichenden Bedingungen getestet (Speicher F-2)

Detailliertere Resultate der einzelnen Messungen mit weiteren Daten, wie zum Beispiel den Temperaturverläufen im Speicher und Energie-Temperatur-Diagrammen, sind in Annex B zu finden.

### 3.3 Schichtungseffizienz nach dem CTSS-Verfahren

Die durch das IGTE ermittelten Kennwerte für das Simulationsmodell der Speicher sind in Tabelle 4 dargestellt. Die ermittelte Schichtungskennzahl ist für alle Kombispeicher des Ringversuches identisch. Unterschiede bestehen in der effektiven vertikalen Wärmeleitfähigkeit. Diese ist für Speicher mit internen Wärmeübertragern zur Warmwasserbereitung jeweils in derselben Grössenordnung. Dabei scheint es keine Rolle zu spielen, ob ein Innentank oder ein Spiralrohr als Wärmeübertrager eingesetzt wird. Für den Speicher zur Kombination mit einem Frischwassermodule ist die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit erwartungsgemäss niedriger.



*Tabelle 4: Physikalische Kennwerte und Simulationsparameter, ermittelt nach der EN12977-3 sowie die simulierte Schichtungseffizienz auf Speicherebene*

Speicher		A	B	C	D	E	F
Thermische Kapazität	[kJ/K]	3720.7	3407.0	3637.0	1240.2	2597.0	3428.0
Wärmeverlustrate (Stillstand)	[W/K]	3.6	3.5	3.6	3.0	3.1	3.3
max. Bereitschafts- verlust	[W]	177.7	171.8	176.3	159.6	156.7	172.7
effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit	[W/(K*m)]	1.8	1.7	1.7	1.5	0.8	0.9
Schichtungskennzahl	[-]	190.0	190.0	190.0	144.0	190.0	172.0

Die Resultate der so parametrisierten Simulationen unter den Randbedingungen aus Tabelle 2 (Kapitel 3.2.3) sind in Tabelle 5 zu sehen. Es gilt zu beachten, dass die ausgewiesene Schichtungseffizienz die Schichtungseffizienz des Speichers ist. Die Schichtungseffizienz auf Systemebene wurde nicht ermittelt.

*Tabelle 5: Mit der CTSS-Methode ermittelte Schichtungseffizienz (SE) mit der Bilanzgrenze «Speicher»*

Speicher:	A	B	C	D			E	F	
Simulation:	1	1	1	1	2	3	1	1	2
SE Speicher [%]	89	87	87	76	67	76	96	75	76

Die, durch Simulation der Beladung und Entladung über einen Tag ermittelte Schichtungseffizienz der Speicher A, B und C unter Verwendung fast identischer vertikaler Wärmeleitfähigkeit und Schichtungskennzahl, ist nach der CTSS Methode fast identisch. Der Speicher mit der niedrigsten vertikalen Wärmeleitfähigkeit wird mit einer Schichtungseffizienz von 96% bewertet. Eine Schichtungseffizienz von 100 % entspricht dem idealen reversiblen - und entsprechend isentropen - Prozess. Die Schichtungseffizienz des Speicher E kommt also bereits sehr nahe an den idealen Speicher, welcher rein physikalisch nicht möglich ist.

### 3.4 Vergleich der Testresultate und Diskussion zu den Testmethoden

Die Resultate der beiden Methoden sind in Abbildung 9 gegenübergestellt. In der Tendenz stimmen die Resultate überein, d.h. es gibt eine Korrelation. Das Gütemass der linearen Regression ( $R^2$ ) ist mit 81 % jedoch tief.

Speicher mit niedriger Schichtungseffizienz aus dem Concise Cycle Test haben tendenziell auch eine niedrigere Effizienz nach dem CTSS Verfahren.



Die nach dem CTSS-Verfahren ermittelte Schichtungseffizienz ist jedoch mit einer Ausnahme deutlich höher als die Schichtungseffizienz nach der CCT-Methode. Die Differenz der Ergebnisse ist zumeist grösser als 5 %.

Die generell tiefere Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern mit internem Wärmeübertrager zur Beladung wird in beiden Methoden abgebildet.

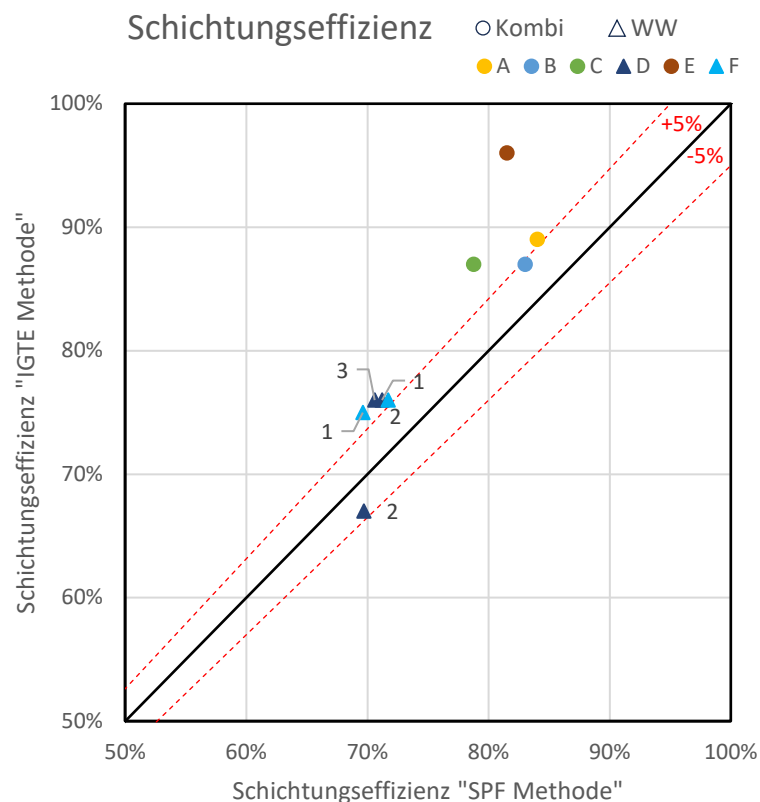


Abbildung 9: Vergleich der Schichtungseffizienz auf Speicherebene nach der SPF Methode (Messung der Schichtungseffizienz) und der IGTE Methode (CTSS)

Die grösste Abweichung zwischen den Resultaten liegt im Speicher E vor mit 15 Prozentpunkten (96% auf Grund CTSS, 81.5 % im CCT). Dieser verwendet einen externen Wärmeübertrager zur Warmwasserbereitung (FWM). Im Simulationsmodell muss dazu das Frischwassermodul inklusive dem Wärmetauscher, der primärseitigen Pumpe sowie deren Regelung berücksichtigt werden. Eine weitere Besonderheit im Speicher E ist die Verwendung eines Sprührohres zur Beladung der WW-Zone. Die Messdaten mittels Sensoren an der Speicherwand zeigen, dass die Temperatur der, durch ein Lochblech vom unteren Speichervolumen separierten, Zone bei der Beladung homogenisiert wird. Eine optimale Stufenladung der Zone würde sich in einem Energie-Temperatur-Diagramm auch als stufenförmige Linie zeigen. Abbildung 10 zeigt, dass dies beim vorliegenden Speicher bei den Warmwasserladungen (blaue Kurve im Temperaturbereich oberhalb von 40 °C) nicht der Fall ist.

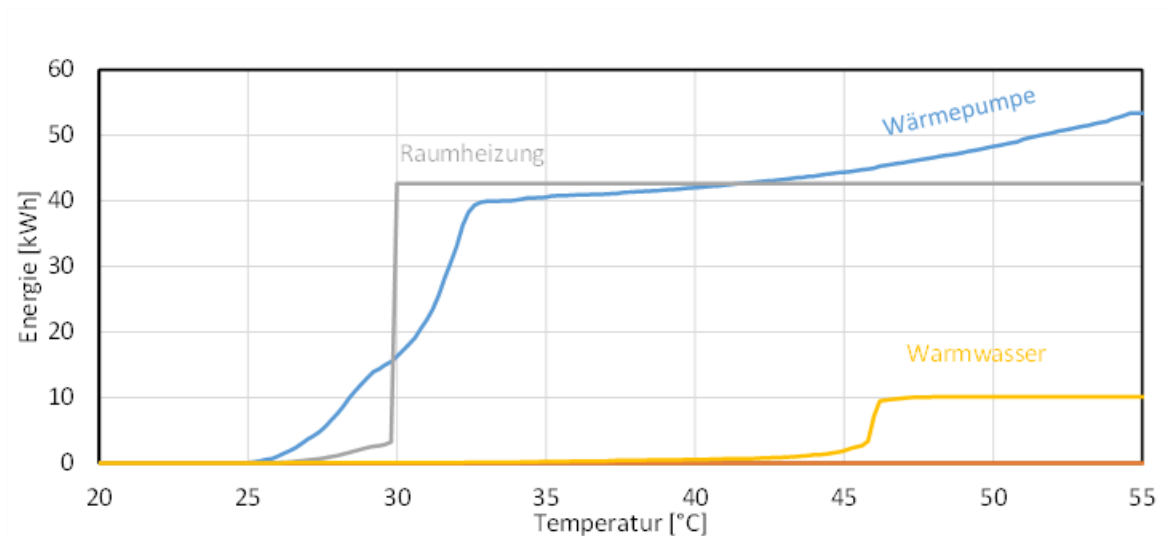


Abbildung 10: Energie-Temperatur Diagramm der Messung an Speicher E

Die geringste Abweichung zwischen den Resultaten der Kombispeicher ist in den Speichern A und B zu beobachten. Speicher A ist das Modell, welches als einziges die Einstufung in die Effizienzklasse A erhalten hat. Entsprechend wenige Mischungsvorgänge traten bei diesem Modell auf.

Speicher B zeigt auf Speicherebene ebenfalls in beiden Methoden eine hohe Schichtungseffizienz (83% mittels CCT-Methode, 87% nach der CTSS Methode). Aus dem Concise Cycle Test kann die Schichtungseffizienz auf zwei Arten berechnet werden: Auf Grund der Entropieproduktion im Speicher und auf Grund der Entropieproduktion „System“. Vergleicht man die beiden Ergebnisse, so stellt man teilweise grosse Unterschiede fest. Die im Speicher und den Be- und Entladeeinrichtungen (Wärmetauscher) generierte Entropie kann durchaus deutlich geringer ausfallen als die insgesamt im Speicher-System generierte Entropie. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn ein Speicher mit Temperaturen von 50 °C Vorlauf sehr gut schichtend beladen wird, dann aber die Entnahme für RH aus einem Bereich mit zu hoher Temperatur (ebenfalls schichtend) erfolgt. Die Entropieproduktion findet in diesem Falle nicht im Speicher selber statt, sondern im Heizkreis-Mischventil, wo heisses Wasser aus dem Speicher mit dem Heizkreis-Rücklauf gemischt wird. Dieser Effekt der zu hohen Austrittstemperatur für die Raumwärmeversorgung ist bei Speicher B zu beobachten, der auf Speicherebene eine Schichtungseffizienz von 83.0 % aufweist, auf Systemebene jedoch nur noch eine Schichtungseffizienz von 76.7 %.

### 3.5 Zusammenfassung

Die Resultate aus der Bestimmung der Schichtungseffizienz von Speichern nach der direkten Messung der Schichtungseffizienz gegenüber dem Component Testing – System Simulation Ansatz weichen stark voneinander ab.

Aus den Messungen nach der Norm EN 12977-3 wurden Parameter für den sogenannten Type 340 bestimmt. Für die resultierende Schichtungseffizienz aus der Simulation scheinen die



Parameter «Schichtungskennzahl» und die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit relevant zu sein.

Resultate, die in den dynamischen Messungen durch Strömungsvorgänge im Speichervolumen beeinflusst werden, können nach Ansicht der Autoren mit den genannten Parametern des Simulaitonsmodells nicht in ausreichender Qualität abgebildet werden.





## 4 Neues Simulationsmodell für Speicherschichtung

### 4.1 Speicher und Messdaten

Für die Entwicklung eines Simulationsmodells, welches an Stelle der Simulation mehrerer ortsfester oder mobiler Volumen uniformer Temperatur die Speichertemperatur als kontinuierliche und ableitbare Funktion der Speicherhöhe abbildet, wurden die Messdaten von drei Warmwasserspeicher verwendet. Zum einen Speicher F aus Tabelle 1, sowie zwei weitere, welche nachfolgend als G und H bezeichnet werden. Angaben zu Wärmeübertragung, Volumen, sowie die Positionen von Vor- und Rücklauf sind in Tabelle 6 aufgeführt. Untersucht wurden zwei Speicher mit interner Wärmeübertragung für die Beladung (F, G) mit je 800 l Volumen und ein 200 l Speicher (H) mit externer Wärmeübertragung für die Beladung.

Tabelle 6 Technische Daten der untersuchten WW-Speicher

	F	G	H
Wärmeübertragung	intern	intern	extern
Nennvolumen [l]	800	800	200
Speicherhöhe [m]	1.7	1.74	1.25
Position rel. zur Speicherhöhe			
Beladung Vorlauf [-]	0.34	0.81	0.456
Beladung Rücklauf [-]	0.17	0.04	0.12
Einbauten	- Flachregister-WÜ - 2 Glattrohr-WÜ - Prallplatte VL - Prallplatte KW Beladung - KW gegen Tankboden		

Die Speichertemperaturen über einen Zeitraum von 24 Stunden für die Speicher F, G und H sind in Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt. Die Temperaturen wurden mit 8 Sensoren (TS1 unten, TS8 oben im Speicher) gemessen. Die Zeitpunkte, in denen eine Entladung stattfindet, sind mit blauem Hintergrund markiert und die Beladung mit rotem Hintergrund. Speicher F und G besitzen ein identisches Zapfprofil (EU tapping cycle XXL) und jeweils einen Beladevorgang am Nachmittag, wobei der Beladevorgang von Speicher G länger dauert als von Speicher F. Für Speicher H wurde ein kleineres Zapfprofil gewählt (EU tapping cycle L). Es findet je ein Beladevorgang am Morgen und am Abend statt. Aufgrund des späteren Beladevorgangs von Speicher H im Vergleich zu den anderen beiden Speichern, befindet sich Speicher H über einen längeren Zeitraum in durchgeladenem Zustand im Standby.

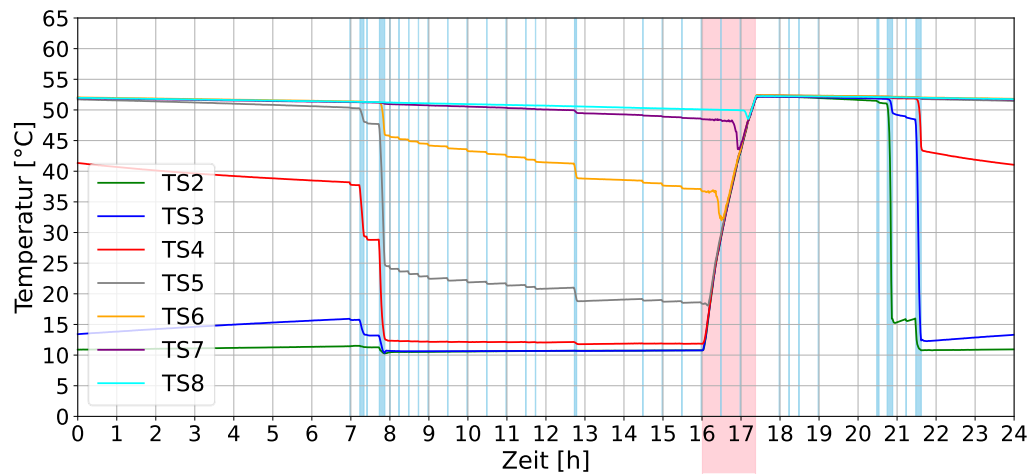


Abbildung 11 Speicher F, Speichertemperaturen TS aus Messdaten über die Zeit, blauer Hintergrund markiert eine Entladung und roter Hintergrund markiert eine Beladung

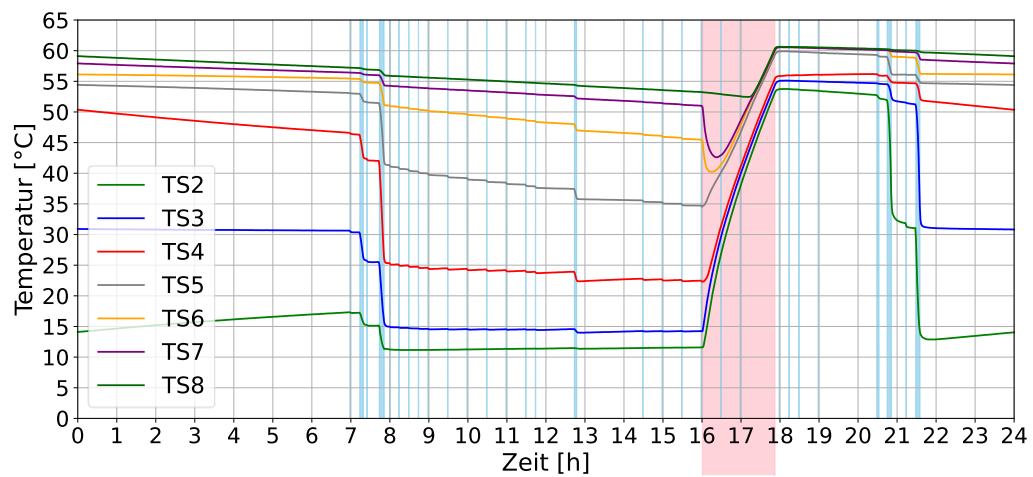


Abbildung 12 Speicher G, Speichertemperaturen TS aus Messdaten über die Zeit, blauer Hintergrund markiert eine Entladung und roter Hintergrund markiert eine Beladung

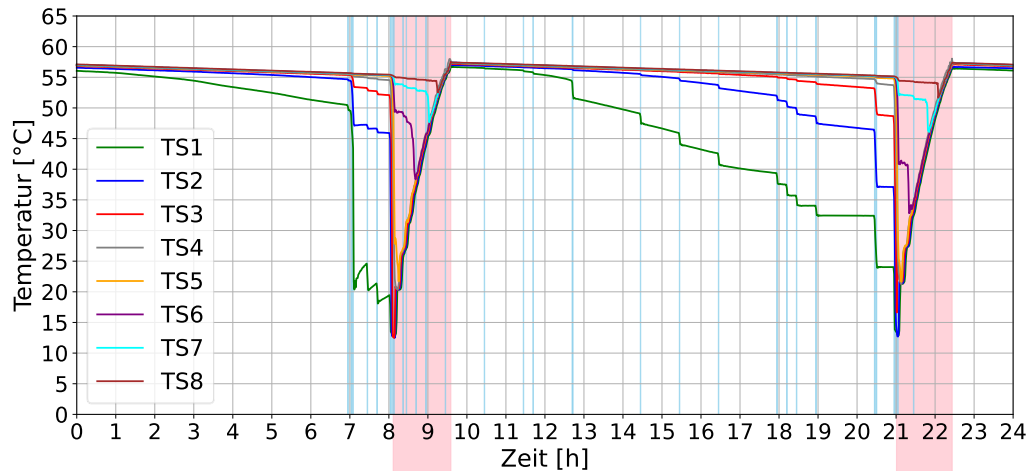


Abbildung 13 Speicher H, Speichertemperaturen TS aus Messdaten über die Zeit, blauer Hintergrund markiert eine Entladung und roter Hintergrund markiert eine Beladung

Anhand der Messdaten werden für einen Speicher drei Zustände definiert:

- Standby: kein Massenstrom von WP oder DHW
- Entladung: Massenstrom bei DHW
- Beladung: Massenstrom bei WP

Wobei Überlagerungen der Zustände Entladung und Beladung möglich sind.

## 4.2 Mathematische Funktionen

Zur Abbildung des Temperaturprofils im WW-Speicher werden im Folgenden eine Tangens hyperbolicus Funktion (Formel 4) und eine Exponentialfunktion (Formel 5) in Abhängigkeit der relativen Speicherhöhe  $h$  betrachtet.

$$T_{\tanh}(h) = T_{\min} + [0.5 + 0.5 \tanh(a(h - b))] * (T_{\max} - T_{\min}) \quad \text{Formel 4}$$

$$T_{\exp}(h) = (T_{\max} - T_{\min}) / [1 + e^{-a(h-b)}] + T_{\min} \quad \text{Formel 5}$$

Beide Funktionen eignen sich zum Abbilden von Temperaturprofilen, welche eine Thermokline besitzen. Die Parameter  $a$  und  $b$  bestimmen die Schärfe respektive die Position (Wendestelle) der Thermokline. Über  $T_{\min}$  bzw.  $T_{\max}$  werden Temperaturminimum und -maximum und damit die Temperaturen unterhalb und oberhalb der Thermokline definiert.

Zur Berechnung der Energie im Speicher und zur einfachen Überprüfung der Energieerhaltung (erster Hauptsatz der Thermodynamik) müssen die Funktionen integrierbar sein. Die Berechnung des Integrals der tanh-Fkt. aus Formel 4 ergibt:



$$\int T_{\tanh}(h)dh = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min})h + \frac{1}{2a}(T_{\max} - T_{\min}) \ln(\cosh(a(b-h))) + C \quad \text{Formel 6}$$

Des Weiteren lässt sich aus der exp-Fkt. aus Formel 5 das Integral wie folgt bilden:

$$\int T_{\exp}(h)dh = T_{\max}h + \left[ \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{a} \ln(e^{a(b-h)} + 1) \right] + C \quad \text{Formel 7}$$

Für beide Integrale ist im Allgemeinen die Definitionsmenge  $D = \{h \in \mathbb{R}\}$  mit  $(a, b, T_{\min}, T_{\max}) \in \mathbb{R}$ . Es ist gezeigt, dass beide Funktionen integrierbar sind und die Einhaltung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik damit sichergestellt werden kann, wenn vereinfachend angenommen wird, dass die spezifische Wärmekapazität des Mediums  $c_p$  (hier von Wasser) konstant, d.h. unabhängig von der Temperatur, ist.

Bei Annahme einer konstanten spezifischen Wärmekapazität kann zur Berechnung der Wärmeenergie im Speicher die mittlere Speichertemperatur  $\bar{T}$  ermittelt werden. Durch Integration der Temperaturfunktion über den Bereich innerhalb der Grenzen von minimaler Speicherhöhe  $h_{\min}$  und maximaler Speicherhöhe  $h_{\max}$  berechnet sich  $\bar{T}$  nach Formel 8.

$$\bar{T} = \frac{1}{h_{\max} - h_{\min}} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} T(h)dh \quad \text{Formel 8}$$

Für die betrachteten tanh-Fkt. und exp-Fkt. ergibt sich das bestimmte Integral in den Grenzen der relativen Höhe  $h_{\min} = 0$  unten im Speicher und  $h_{\max} = 1$  oben im Speicher wie folgt:

$$\overline{T_{\tanh}} = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) + \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2a} \ln \left[ \frac{\cosh(a(1-b))}{\cosh(-ab)} \right] \quad \text{Formel 9}$$

$$\overline{T_{\exp}} = T_{\max} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{a} \ln \left[ \frac{e^{ab-a} + 1}{e^{ab} + 1} \right] \quad \text{Formel 10}$$

Es wird untersucht, welche Funktion zur Abbildung des Temperaturprofils besser geeignet ist. Hierzu wird zunächst betrachtet, ob die Funktionen ineinander überführbar sind. Der Tangens hyperbolicus ist wie folgt definiert:

$$\tanh(x) = \frac{\sinh x}{\cosh x} = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad \text{Formel 11}$$

In Formel 4 wird  $\tanh(x)$  mit  $(e^{2x} - 1)/(e^{2x} + 1)$  und  $x = h$  ersetzt, durch umstellen folgt:

$$T_{\tanh}(h) = \frac{T_{\max}e^{2ah} + T_{\min}e^{2ab}}{e^{2ah} + e^{2ab}} \quad \text{Formel 12}$$

Aus Umstellen von Formel 5 ergibt sich:



$$T_{exp}(h) = \frac{T_{max}e^{ah} + T_{min}e^{ab}}{e^{ah} + e^{ab}}$$

Formel 13

Es ist gezeigt, dass beide Funktionen ineinander überführbar sind. Zum Abbilden der gleichen Thermokline ist der Schärfeparameter  $a$  beim Tangens hyperbolicus doppelt so gross wie bei der Exponentialfunktion.

Während einer Jahressimulation werden Speichertemperaturen und gespeicherte Energie für jeden Simulationsschritt gerechnet. Daher hat die von der Software – im vorliegenden Fall ein Python-Script - benötigte Zeit zur Berechnung der Temperaturen mit Hilfe der gewählten Funktion und die Berechnung der Wärmeenergie über das Integral der Funktion einen Einfluss auf die Gesamtsimulationszeit. In Tabelle 7 sind von Python benötigte Rechenzeiten, um ein Temperaturprofil im Speicher mit 11 Stützstellen über die Höhe und die Wärmemenge zu berechnen, aufgeführt. Da die Rechenzeit aufgrund von Hintergrundprozessen des Rechners stark variiert, wurde mit Python `timeit.repeat()` die mittlere Rechenzeit aus 10 000 Berechnungen ermittelt. Um die Schwankungen des Mittelwertes abzubilden wurde dies insgesamt 1 000 mal wiederholt und als minimale bzw. maximale Rechenzeit aufgeführt. Python benötigt zur Berechnung der exp-Fkt. weniger Zeit. Jedoch befindet sich der zeitliche Unterschied in der gleichen Grössenordnung wie die durch Hintergrundprozesse auftretenden Schwankungen.

Tabelle 7 Ermittelte minimale und maximale Rechenzeit zur Berechnung der Funktionen mit Python

	Minimale mittlere Rechenzeit	Maximale mittlere Rechenzeit
tanh-Fkt.	$2.766 \cdot 10^{-8}$ s	$9.911 \cdot 10^{-8}$ s
exp-Fkt.	$2.725 \cdot 10^{-8}$ s	$5.152 \cdot 10^{-8}$ s

Es ist gezeigt, dass beide Funktionen integrierbar und ineinander überführbar sind. Aufgrund der Überführbarkeit sind keine Unterschiede in der Abbildung des Temperaturprofils im Speicher zu erwarten. Zudem treten keine nennenswerte Unterschiede in der benötigten Rechenzeit auf. Somit eignen sich beide Funktionen gleichermassen zum Fitten des Temperaturprofils im Speicher. Nachfolgend wird nur noch die Tangens hyperbolicus Funktion aus Formel 4 betrachtet.

Der Einfluss der verschiedenen Funktionsparameter auf die Tangens hyperbolicus Funktion ist in Abbildung 14 dargestellt.  $T_{min}$  und  $T_{max}$  entsprechen der minimalen bzw. maximalen Temperatur im Speicher. Der Definitionsbereich entspricht entsprechend den zu erwartenden Speichertemperaturen. Die Position, respektive die Wendestelle, der Thermokline kann direkt aus Parameter  $b$  abgelesen werden (Abbildung 14, links). Für den betrachteten Fall eines Temperaturprofils im Speicher ist die Position der Thermokline relativ zur Speicherhöhe gegeben. Hierdurch ergibt sich als Definitionsbereich für  $b$ :  $0 \leq b \leq 1$ . Parameter  $a$  beeinflusst die Schärfe der Thermokline (Abbildung 14, Mitte) und hat für die gegebene Anwendung einen Definitionsbereich von  $0 \leq a < \infty$ . Für negative  $a$  würde sich das Temperaturprofil im Speicher umdrehen. Je grösser  $a$  desto schärfer ist die Thermokline. Jedoch hat auch die Temperaturdifferenz im Speicher einen Einfluss auf die Schärfe der Thermokline, wenn diese



als Ableitung der Temperatur über die Speicherhöhe definiert wird. In Abbildung 14, rechts sind Temperaturverläufe mit verschieden grosser Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$  dargestellt. Parameter  $a$  und  $b$  sind für alle Kurven gleich. Die Thermoklinen erscheinen unterschiedlich scharf, da die Steigung zwischen den verschiedenen Thermoklinen variiert.

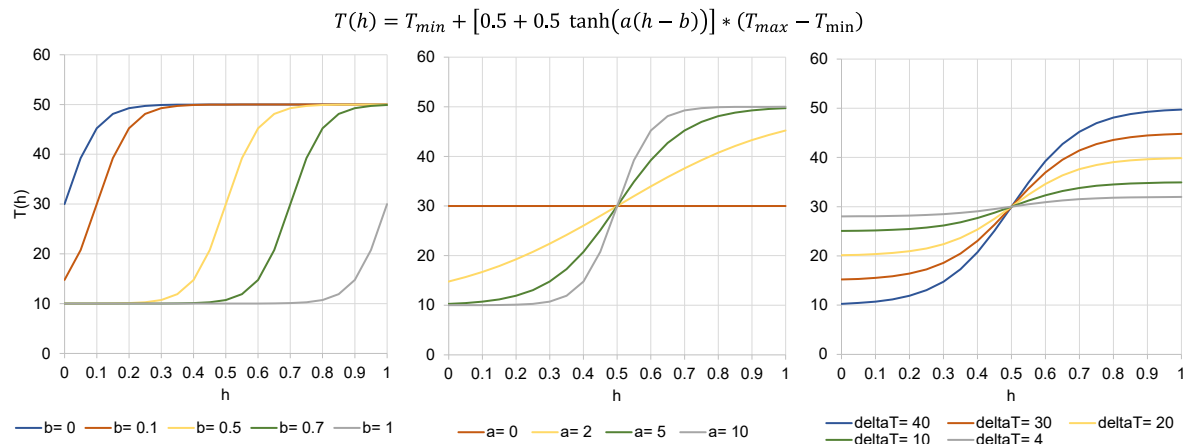


Abbildung 14 Einfluss der Parameter auf die Tangens hyperbolicus Funktion; links: Variation Parameter  $b$ ; Mitte: Variation Parameter  $a$ ; rechts: Variation  $\Delta T$

Die Steigung der Thermokline ergibt sich aus dem Differenzial der tanh-Fkt

$$T'(h) = -\frac{0.5a(T_{min} - T_{max})}{\cosh^2(a(h - b))}. \quad \text{Formel 14}$$

Die Steigung der Thermokline entspricht dem Temperaturgradienten an der Stelle  $h$ . Unter der Annahme eines konstanten Temperaturanstieges über  $h$ , entspräche die Steigung der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen minimaler und maximaler Temperatur im Speicher.

An der Wendestelle  $b$  hat die Funktion  $T'(h)$  ein Maximum, was der grössten Steigung der tanh-Fkt entspricht. Aus Formel 14 berechnet sich die Steigung an der Wendestelle  $m_b$  wie folgt:

$$m_b = T'(h = b) = -0.5a(T_{min} - T_{max}). \quad \text{Formel 15}$$

Der maximale Temperaturgradient  $m_b$  lässt sich damit aus der Schärfe  $a$ , sowie  $T_{min}$  und  $T_{max}$  ableiten.

### 4.3 Kurvenfitting und Ermittlung der Thermokline

Nachfolgend wird gezeigt, ob die Temperaturkurve als Funktion der relativen Höhe  $h$  zu verschiedenen Zeitpunkten während Standby, Ladung und Entladung des Speichers mit der Tangens hyperbolicus (tanh) Funktion aus Formel 4 abgebildet werden kann. Hierfür werden als erstes aus den für die in Tabelle 6 aufgeführten WW-Speicher zu jedem Zeitpunkt  $T_{min}$  und



$T_{max}$  aus den Messdaten bestimmt. Anschliessend werden die Messdaten mithilfe des Python Pakets `scipy` an die tanh-Fkt. gefittet und somit die Funktionsparameter  $a$  und  $b$  für jeweils einen spezifischen Zeitpunkt im Leben des Speichers ermittelt.

Für das Kurvenfitting musste bei Speicher F und G auf den Einbezug des Temperatursensors TS1 aus folgendem Grund verzichtet werden: Unterhalb des Wärmetauschers dieser Speicher entsteht ein Kaltwasservolumen, welches durch Beladung des Speichers nicht auf höhere Temperatur gebracht werden kann. Hierdurch bildet sich im Temperaturprofil eine zweite Thermokline, welche mit nur einer tanh-Funktion nicht abgebildet werden kann. Hierfür wäre die Superposition von zwei tanh-Funktionen notwendig, was jedoch eine Weiterentwicklung des Modells bedingt die den Rahmen dieser Initial-Untersuchungen der Machbarkeit sprengen würde.

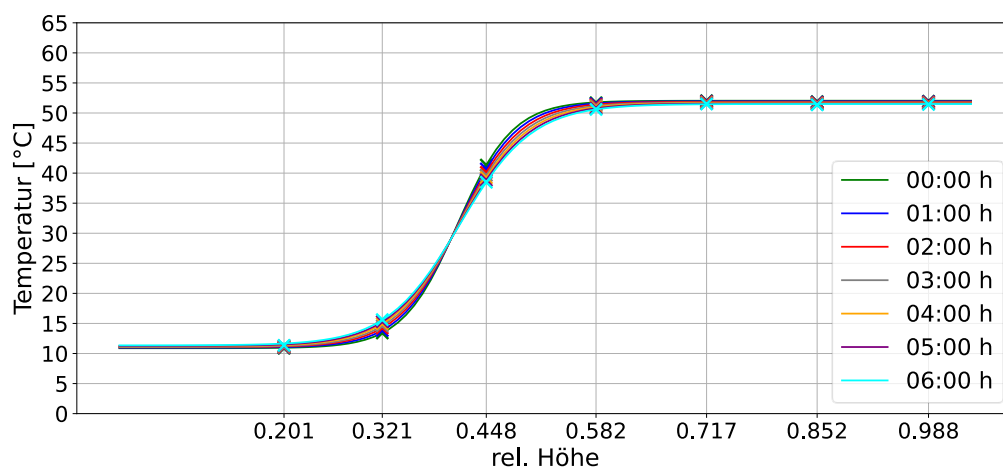


Abbildung 15 Standby Speicher F, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die dimensionslose Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

In Abbildung 15 ist das Temperaturprofil von Speicher F über die relative Speicherhöhe zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Der Speicher befindet sich im Standby. Es ist eine scharfe Thermokline erkennbar, die über Nacht (von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr) unschärfer wird. Dieser Effekt spiegelt sich auch in den Messdaten (x) wieder.

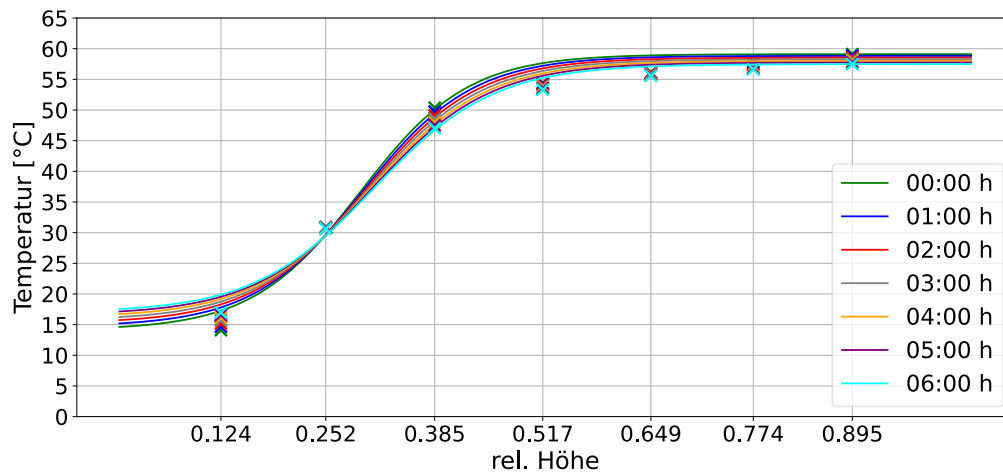


Abbildung 16 Standby Speicher G, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

Weiter ist der Standby für Speicher G in Abbildung 16 dargestellt. Es fällt auf, dass die Thermokline in Speicher G bereits zu Beginn des Standbys unschärfer ist als bei Speicher F und die Unschärfe mit zeitlichem Verlauf zunimmt. Zudem lassen sich die Speichertemperaturen mit der gefitteten Funktion schlechter abbilden als bei Speicher F und Speicher H (Abbildung 17). Diese Abweichung zwischen Modell und Messung ist ein Resultat der Festlegung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  auf Grund der minimalen und maximalen Temperaturen, die im Speicher zum entsprechenden Zeitpunkt gemessen wurden. Weil jedoch die Thermokline schon relativ nahe am unteren Ende des Speichers ist, wird auf der Höhe  $h = 0.124$  kein Wert gemessen, der das Minimum eines guten Fits der Kurve nicht repräsentiert. Wie später in Abbildung 30 gezeigt wird, kann hier ein sehr guter Fit erzielt werden, indem  $T_{min}$  nicht aus den Messdaten definiert wird.

Speicher H, wie in Abbildung 17 gezeigt, weist am Anfang des Standbys ein kleineres  $\Delta T$  als die anderen beiden Speicher auf, da nach der Beladung am Abend keine Entladung mehr stattfindet. Die Temperaturen im Speicher fallen mit der Zeit stärker ab. Vor allem der unterste Temperatursensor ( $h = 0.158$ ) sinkt deutlich. Der Temperaturunterschied wird grösser, wodurch die Thermokline schärfer wird.



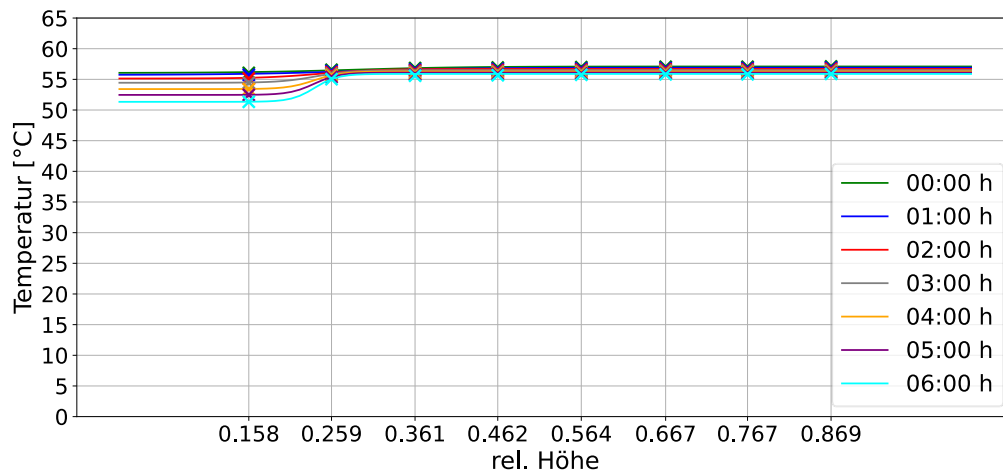


Abbildung 17 Standby Speicher H, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

Der Beladevorgang von Speicher F ist in Abbildung 18 und von Speicher G in Abbildung 19 dargestellt. Für beide Speicher wird ersichtlich, dass der Temperaturunterschied zwischen  $T_{min}$  und  $T_{max}$  aufgrund der Beladung kleiner wird (grüne Linie: Beginn der Beladung, türkise Linie: Ende der Beladung). Für Speicher F lässt sich die tanh-Funktion auch während der Beladung gut an die Messstellen fitten.

Hingegen treten bei Speicher G deutlichere Abweichungen zwischen gemessener Temperatur im Speicher und dem gefitteten Temperaturverlauf auf. Es fällt auf, dass die Thermoklinen im Speicher G unschärfer sind als bei F. Der Speicher G besitzt zwei in Reihe geschaltete Glattrohrwärmetauscher, die sich über die gesamte Speicherhöhe erstrecken. Der Rücklauf des oberen Wärmetauschers befindet sich oberhalb der Messstelle  $h = 0.385$  und der Vorlauf des unteren Wärmetauschers befindet sich oberhalb  $h = 0.252$ . Dadurch bildet sich in diesem Bereich ein Plateau aus. Dies ist beispielsweise zum Zeitpunkt 17:15 Uhr (violette Kreuze) gut erkennbar. Bei  $h = 0.252$  liegt der gefittete Wert unterhalb des Messpunktes, bei  $h = 0.385$  oberhalb. Dies führt zur Bildung einer zweiten Thermokline während der Beladung, was mit nur einer einzigen tanh-Fkt. nicht abbildbar ist. Auch hier könnte eine Weiterentwicklung des Modells zur Abbildung zweier Thermoklinen durch Superposition zweier tanh-Funktionen zielführend sein.

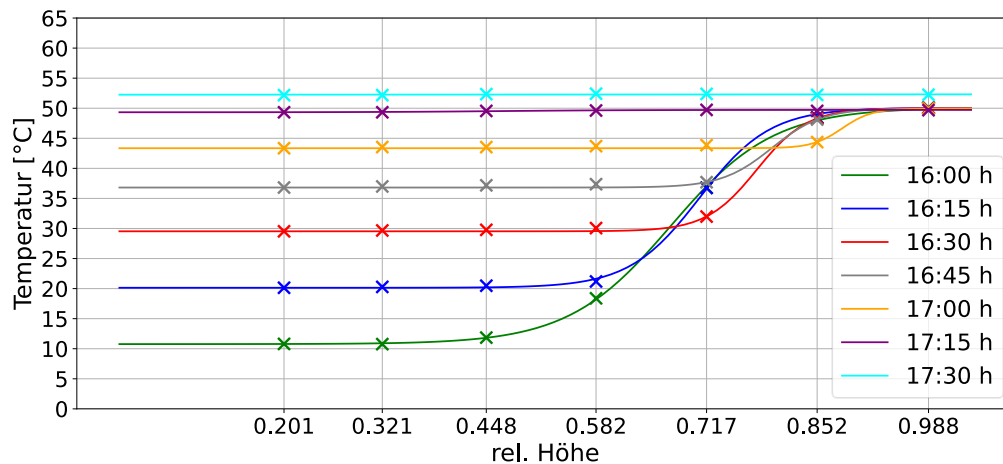


Abbildung 18 Beladung Speicher F, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

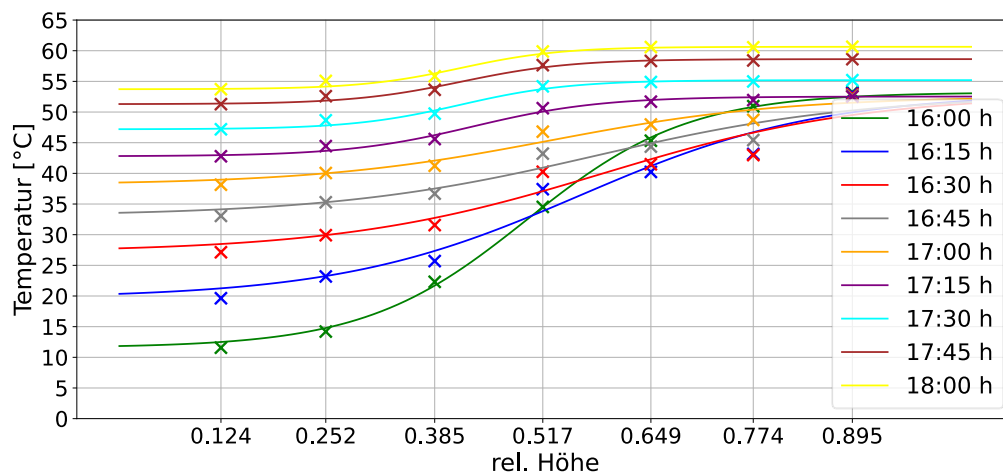


Abbildung 19 Beladung Speicher G, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

Speicher H wird über einen externen Wärmeübertrager beladen und strömt über eine Prallplatte in den Speicher. In Abbildung 20 sind die Thermoklinen während der Beladung des Speichers am Abend dargestellt. Für diesen Speicher startet um 20:45 Uhr eine Entladung, wodurch eine Beladung kurz nach 21:00 Uhr ausgelöst wird. Es kommt zu einer Überlappung von Be- und Entladung. Durch die Entladung verschiebt sich die Thermokline nach oben (im Zeitraum von 21:00 bis 21:20 Uhr), während durch den Beladevorgang die Temperaturen unterhalb der Thermokline stiegen. Gegen Ende der Beladung (ab 22:00 Uhr) wird die Thermokline weitgehend aufgelöst. Zudem zeigt die gemessene Temperatur an Position  $h = 0.462$  während der Beladung eine höhere Temperatur als die Fühlerpositionen darunter und darüber. Dies kann durch den Umstand erklärt werden, dass der Fühler an der Stelle  $h = 0.462$  nahe am Eintritt des WP-Vorlaufs liegt, was den Messwert beeinflussen kann.

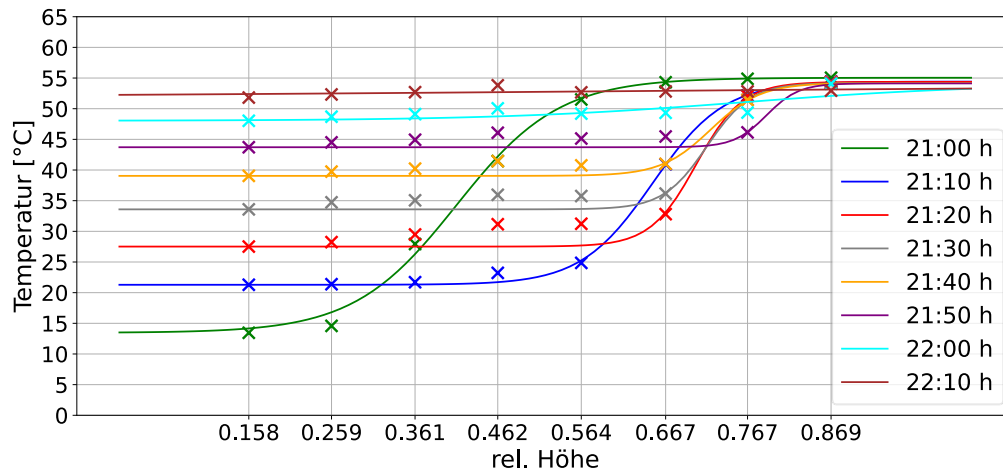


Abbildung 20 Beladung Speicher H, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

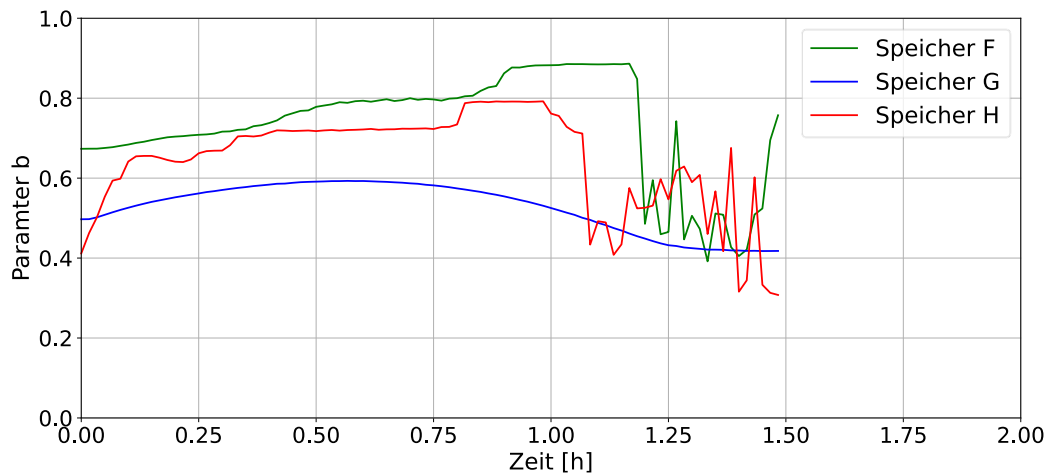


Abbildung 21 Zeitlicher Verlauf der Position der Thermokline (Parameter  $b$ ) während der Beladung für Speicher F, G, H

In Abbildung 21 ist der zeitliche Verlauf von Parameter  $b$  während der Beladung für die verschiedenen Speicher dargestellt. Hierbei befindet sich die Wendestelle der Thermokline bei  $b = 0$  ganz unten im Speicher und bei  $b = 1$  ganz Oben. Auffällig ist, dass sich für alle drei Speicher die Thermoklinen während der Beladung zunächst nach oben bewegen und sich im Verlauf wieder nach unten verschieben, wobei die Fluktuation der gefitteten Werte bei Speicher F und H gegen Ende der Beladung darauf hinweist, dass sich die Thermokline aufgelöst hat und deshalb keine exakte Position mehr bestimmbar ist.

Wärmeres Wasser steigt aufgrund seiner geringeren Dichte im Speicher nach oben. Nähern sich die Temperaturen in den aufsteigenden Wasserschichten den Temperaturen der darüberliegenden Schicht an, so kommt es lokal zu einer Durchmischung der Schichten und



zu einem Temperaturabfall in der oberen Schicht. Die Temperaturen im Speicher werden nicht kontinuierlich über die gesamte Speicherhöhe gemessen, sondern an diskreten Stellen. Die lokale Durchmischung wird daher an den Sensoren sichtbar, sobald die Temperatur an einem Sensor kurzzeitig während der Beladung abfällt. Gleichzeitig führt es zu einer sprunghaften Verschiebung der Thermokline nach oben. Zum Beispiel wird für Speicher F in Abbildung 18 im Zeitraum von 16:20 Uhr (rot) zu 16:30 Uhr (grau) ersichtlich, dass die Thermokline räumlich nach oben verschoben wird und gleichzeitig die Temperatur an der Stelle  $h = 0.717$  sinkt. Dies ist auch im Temperatur-Zeit Verlauf der einzelnen Sensoren in Abbildung 11 sichtbar. Für Speicher F und H tritt dieser Effekt über den gesamten Beladevorgang auf, für Speicher G wird die Temperatur an den einzelnen Sensoren oberhalb der Thermokline nur in der ersten Hälfte der Beladung heruntergerissen, was den unterschiedlichen Verlauf der Position der Thermoklinen erklärt.

In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind Entladevorgänge für Speicher F und G aufgeführt, wobei beide Speicher identische Zapfprofile aufweisen. Es findet um ca. 20:30 und 21:15 Uhr je ein kleinerer Warmwasserverbrauch statt, sowie zwei grössere Entnahmen beginnend um ca. 20:45 Uhr und 21:30 Uhr. Bei der Entladung, ausgehend von einem gut beladenen Speicher wird zuerst der unterste Speicherbereich bis  $h \approx 0.15 - 0.30$  abgekühlt, bevor die dadurch entstandene Thermokline nach oben zu wandern beginnt. Für Speicher F wird die Entladung durch die gefittete Funktion sehr gut abgebildet, hingegen kommt es bei Speicher G zu grösseren Abweichungen, da die Temperaturprofile nicht symmetrisch sind bezüglich des Mittelpunktes der Thermokline (Punktsymmetrisch zu  $P(b, T_{min} + (T_{max} - T_{min})/2)$ ). Dies könnte auf eine Störung der Thermokline durch nicht optimale Einschichtung hinweisen. Auch die deutliche Reduktion von Temperaturen oberhalb der Thermokline deutet auf solche Prozesse hin. Zudem scheinen die Thermoklinen in Speicher G, wie schon beim Standby, so weit unten im Speicher zu sein, dass die Festlegung von  $T_{min}$  auf Grund des Messwertes bei 0.124 keinen guten Fit der tanh-Funktion zulässt.

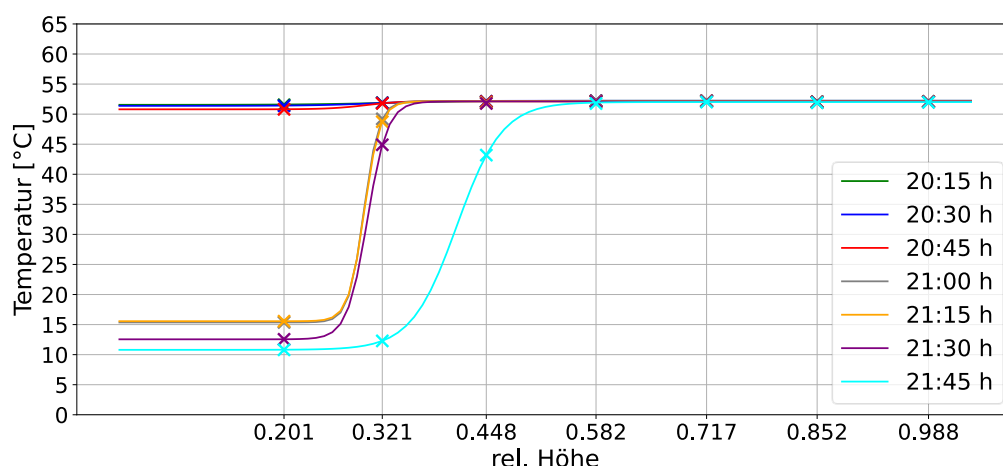


Abbildung 22 Entladung Speicher F, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

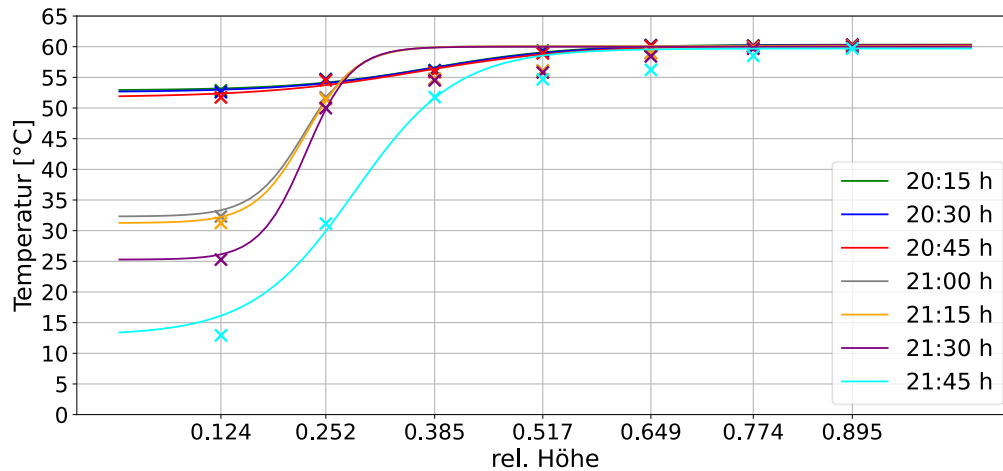


Abbildung 23 Entladung Speicher G, Messpunkte (x) und gefittete Funktion (Linie) über die Speicherhöhe für verschiedene Zeiten

Für Speicher H ist der Tagesverlauf (10:00 Uhr bis 20:00 Uhr) mit mehreren kleinen Warmwasserbezügen in Abbildung 24 dargestellt. Auch hier sinken zuerst vor allem die Temperaturen im Speicherbereich bis  $h \approx 0.2$ . Die gefitteten Kurven zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Die Abweichung nimmt jedoch gegen Abend zu. Bei Betrachtung der Messpunkte fällt auf, dass auch hier das Profil gegen Abend zunehmend unsymmetrisch wird. Dies kann, wie bei Speicher G (Abbildung 23), von der tanh-Fkt. nicht gut abgebildet werden. Zudem fällt die Temperatur im oberen Teil des Speichers im Tagesverlauf ab, was auf Wärmeverluste zurückzuführen ist, und passt zusammen mit der Tatsache, dass die Speichertemperaturen in längerem Standby (Abbildung 17) ebenfalls abfallen.

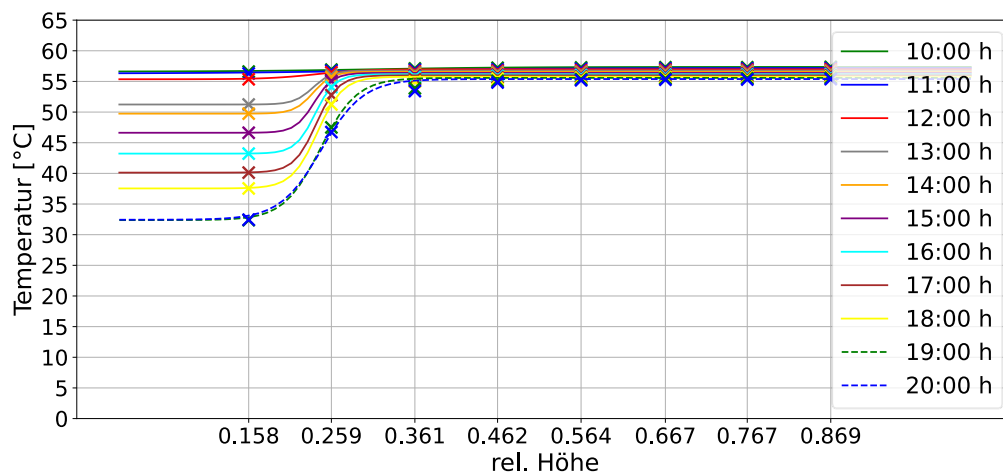


Abbildung 24 Tagesverlauf Speicher H, Standby- und Entladephasen im Wechsel

Alle Grafiken mit Temperaturprofilen zu verschiedenen Zeitpunkten in Annex C aufgeführt.



Die mittlere absolute Abweichung (MAD) zwischen gefittetem Wert und Messwert sind für alle drei Speicher in Abbildung 25 über den ganzen Tagesverlauf von 24 Stunden dargestellt. Für Speicher F lässt sich das Temperaturprofil gut mit dem Tangens hyperbolicus abbilden. Über den gesamten Zeitraum ist die Fehlerabweichung klein und hat ein Maximum von rund 0.3 K während der Beladung am Nachmittag (ca. 16:00 Uhr). Für die anderen beiden Speicher ist die Fehlerabweichung grösser und auch hier treten Maxima während der Beladung (Speicher G: 16:00 Uhr, Speicher H: 8:00 und 21:00 Uhr) auf. Bei Speicher G tritt ein weiteres Maximum während dem Entladevorgang am Abend auf. Zudem geht aus der Grafik für Speicher G hervor, dass die Abweichung zwischen Fit und Messwert während Standby und Entladung höher sind als bei den anderen beiden Speichern. Hingegen hat Speicher H mit einer maximalen Abweichung von 3 K sehr grosse Abweichungen während der Beladung, jedoch nur geringe Abweichungen vor und nach den Beladungsvorgängen.

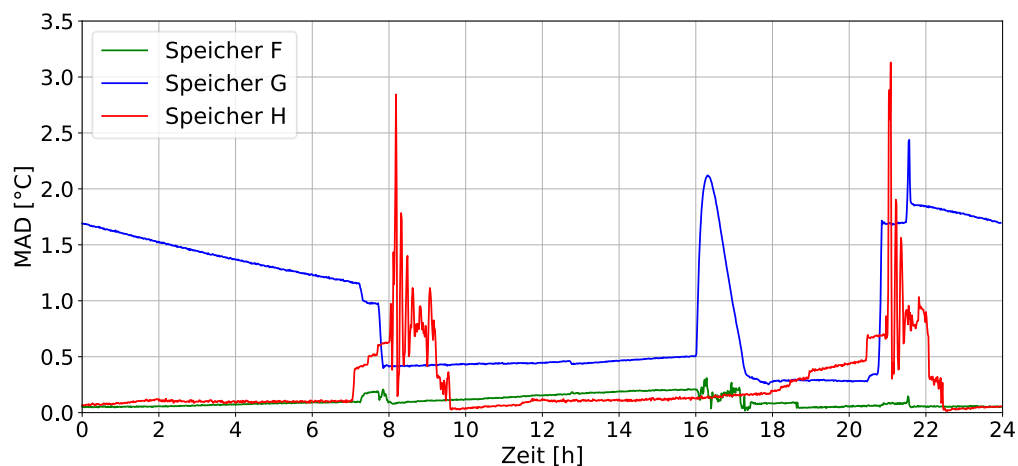


Abbildung 25 Mittlere absolute Fehlerabweichung (MAD) der drei Speicher F, G und H

Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturprofile der WW-Speicher zu verschiedenen Zeitpunkten von Standby, Be- und Entladung relativ gut mit einer tanh-Funktion abgebildet werden können. Voraussetzung ist, dass der Temperaturverlauf im Speicher nur eine Thermokline besitzt. Die Thermokline muss zudem symmetrisch sein. Auch die Verläufe während der Be- und Entladung lassen sich einigermaßen gut abbilden. Speicher F und G haben das gleiche Volumen und auf dem Prüfstand wurde das identische Zapfprofil verwendet. Die Wärmeübertragung zur Beladung erfolgt intern über einen Wärmetauscher, hierbei kommen jedoch verschiedene Wärmetauscher zur Anwendung. Beim Vergleich der beiden Speicher fällt auf, dass sich das gemessene Temperaturprofil von Speicher F mit der tanh-Fkt. besser abbilden lässt als von Speicher G. Die Thermokline in Speicher G ist deutlich unschärfer und nicht symmetrisch. Vor allem bei der Asymmetrie kommt die tanh-Funktion an ihre Grenzen. Auch Warmwasser-Speicher mit externer Wärmeübertragung zur Beladung lassen sich abbilden, wie mit Speicher H gezeigt. Hier treten jedoch grössere Abweichungen zwischen gefittetem Temperaturwert und Messwert während der Beladung auf.

Die oben dargestellten Kurvenfits könnten voraussichtlich durch folgende Massnahmen verbessert werden:



- $T_{min}$  und/oder  $T_{max}$  nicht über Temperaturmesswerte des untersten bzw. obersten Speicherfühlers festlegen, wenn ersichtlich ist, dass die Thermokline zu nahe am unteren, respektive oberen Rand des Speichers ist.
- Superposition von zwei tanh-Funktionen zur Abbildung mehrere Thermoklinen im Speicher

#### 4.4 Verlauf der Funktionsparameter

Für die Entwicklung des Simulationsmodells ist der zeitliche Verlauf der Parameter  $a$  und  $b$ , sowie  $T_{min}$  und  $T_{max}$  entscheidend. Dabei ist die Schärfe der Thermokline von der Zeit sowie der Durchmischung des Speichers abhängig. Folglich wird die Thermokline für einen Speicher, welcher sich über längere Zeit im Standby befindet oder bei schlechter Schichtung, unschärfer. Eine Veränderung der Ladung des Speichers, durch einen schichtenden Belade- oder Entladevorgang, verschiebt die Position (Parameter  $b$ ) der Thermokline in Abhängigkeit der Zeit sowie der Belade- bzw. Entladeleistung. Beispielsweise wird bei schichtender Entladung die Thermokline nach oben verschoben, da das Kaltwasservolumen im unteren Teil des Speichers grösser wird. Die Resultate aus dem Kurvenfitting zeigen, dass die Speicher zunächst im unteren Bereich bis zu einer Höhe von  $h \approx 0.2 - 0.3$  auskühlen, bevor die Thermokline nach oben verschoben wird. Während sich im Standby die Thermokline durch Wärmeleitung und Diffusion aufgrund der Zeit ändert, ist bei Be- und Entladung die Änderung der Energie entscheidend. Dabei beeinflussen eine turbulente Einstromung oder eine mitreisende Strömung die Thermokline.

Der zeitliche Verlauf der Funktionsparameter  $a$  (Steilheit der Thermokline),  $b$  (rel. Höhe der Thermokline im Speicher), sowie  $T_{min}$  und  $T_{max}$  und die aus dem Integral und Differenzial der tanh-Fkt. berechnete mittlere Speichertemperatur ( $T_{mittel}$ , blau) respektive Steigung der Thermokline als Ableitung über die Höhe ( $m_b$ , rot) von Speicher F ist in Abbildung 26 dargestellt.

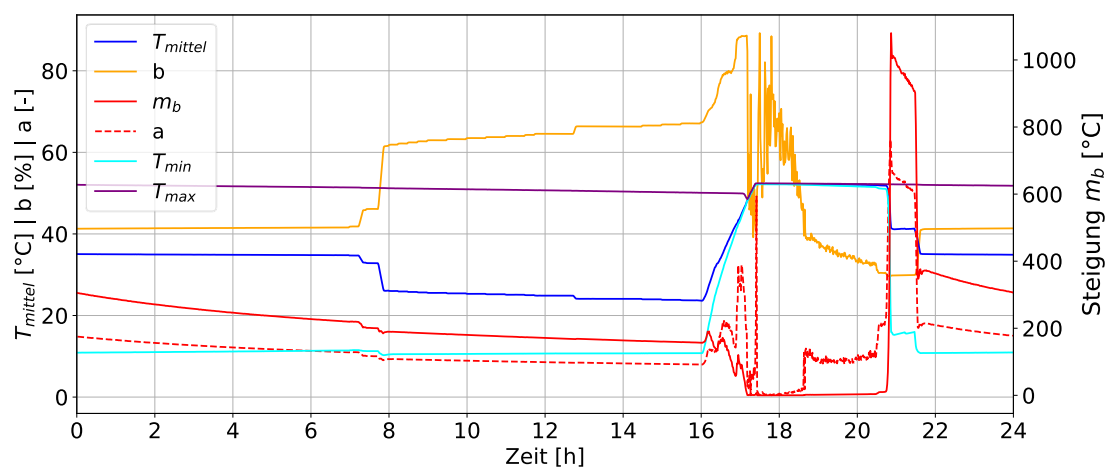


Abbildung 26 Speicher F: Funktionsparameter, gefittete, mittlere Temperatur und Steigung der Thermokline über die Zeit



Aus der Grafik geht hervor, dass während Standby und Entladung (0:00 Uhr bis 16:00 Uhr)  $a$  abnimmt und  $b$  steigt. Die Thermokline wird somit weniger scharf ( $a$  nimmt ab) und verschiebt sich im Speicher nach oben ( $b$  steigt). Interessant ist der Verlauf der Parameter während der Beladung (ab 16:00 Uhr) und im vollständig beladenen Zustand nach der Beladung. Die Thermokline verschiebt sich zunächst nach oben ( $b$  steigt). Sobald das  $\Delta T$  im Speicher klein wird, schwankt der Fitwert der Position der Thermokline stark. Die Schwankungen von Parameter  $b$  sind ein Effekt des Kurvenfittings, da der Speicher bei kleinem  $\Delta T$  eine annähernd homogene Temperatur über die gesamte Speicherhöhe hat, kann keine ausgeprägte Thermokline mehr erkannt werden. Dies wird auch ersichtlich beim Verlauf der Steigung  $m_b$ , welche während der Beladung sinkt und für den vollbeladenen Speicher gegen null geht. Erst mit der ersten Entladung (ca. 20:30 Uhr), nachdem der Speicher beladen wurde, bildet sich wieder eine neue Thermokline an anderer Position aus. Parameter  $a$  bzw.  $m_b$  steigen sprunghaft an und  $b$  bleibt bei ungefähr 1/3 der Speicherhöhe bis zur nächsten Entladung konstant.

Sowohl Parameter  $a$  als auch die Steigung  $m_b$  geben Rückschluss auf die Schärfe der Thermokline. Während  $a$  ein Funktionsparameter darstellt, lässt sich  $m_b$  aus der Ableitung der tanh-Fkt. nach Formel 14 berechnen und hat als Einheit die Bedeutung Temperaturanstieg pro relative Speicherhöhe. In Abbildung 27 ist jeweils für alle drei Speicher die mittlere Temperatur, die Steigung  $m_b$ , Parameter  $a$  und  $b$  über 24 Stunden dargestellt. Anhand der, aus dem Integral der tanh-Fkt. berechneten, mittleren Temperatur ist der Speicherzustand erkennbar (z.B. steigt  $T_{mittel}$  wenn der Speicher beladen wird.)

Auffällig ist, dass Parameter  $a$  von Speicher H im Standby (0:00 Uhr bis 6:00 Uhr) deutlich grösser ist als bei den anderen beiden Speichern. Ein voreiliger Rückschluss hieraus wäre, dass die Thermokline in H schärfer ist als bei den anderen beiden Speichern. Bei Betrachtung der Steigungen  $m_b$  im gleichen Zeitraum ist jedoch festzustellen, dass dieser Wert bei H geringer ist als bei den anderen beiden Speicher. Grund hierfür ist das geringere  $\Delta T$  zwischen minimaler und maximaler Temperatur im Speicher H. Zur Beurteilung der Schärfe einer Thermokline eignet sich daher die Steigung an der Wendestelle  $m_b$  besser, da sie besser interpretierbar ist und Thermoklinen mit verschiedenen grossen  $\Delta T$  vergleichbar macht. Ein weiterer Vorteil ist, dass wenn die Steigung gegen null geht, keine Thermokline im Speicher vorhanden ist bzw. geht auch  $\Delta T$  gegen null. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei Zuständen in denen  $\Delta T = T_{max} - T_{min} \approx 0$  ist, welche gegen Ende einer Beladung auftreten, Parameter  $a = 0$  und Parameter  $b = const$  angenommen werden können. Der Wert von  $b$  müsste so gewählt werden, dass dieser einen guten Startwert bildet, sobald sich, zum Beispiel durch Entladung, wieder eine Thermokline ausbildet.



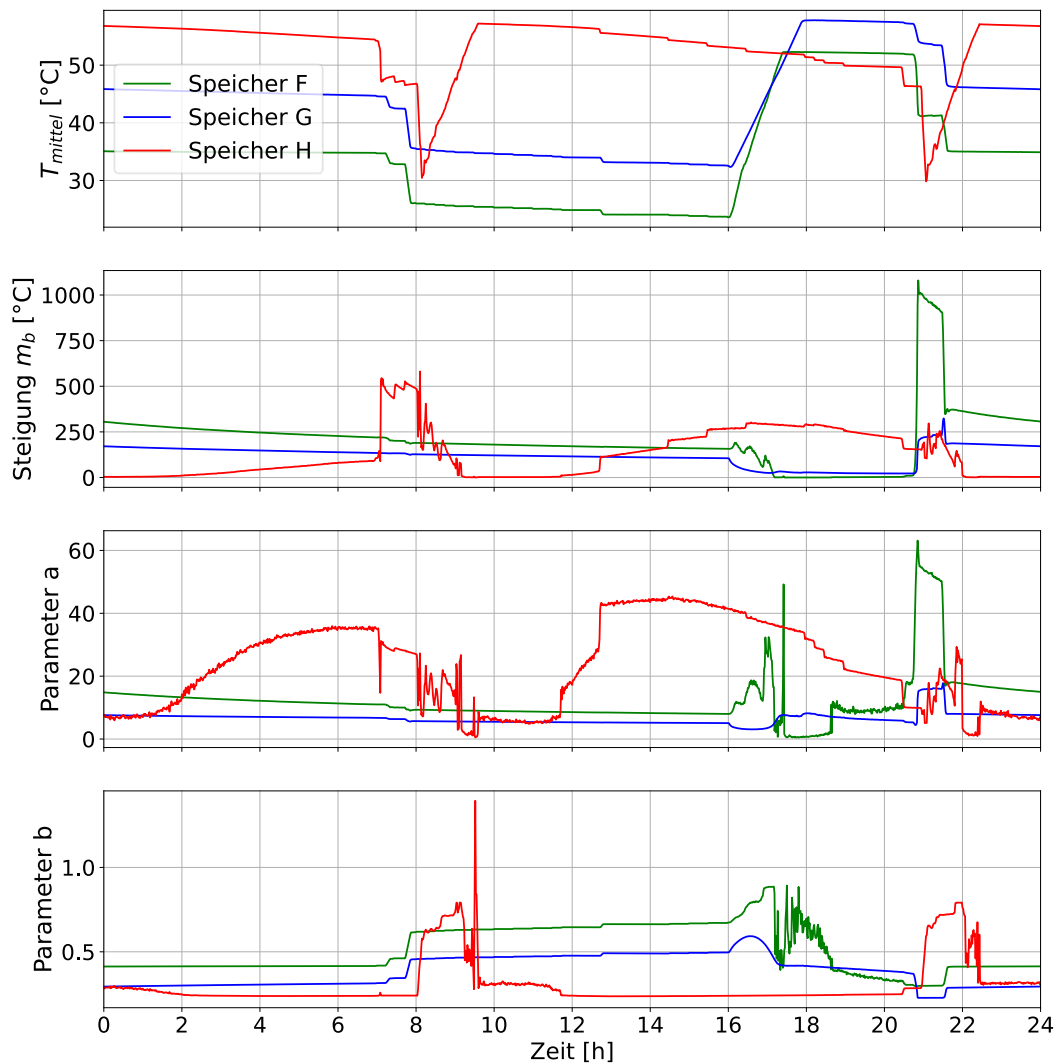


Abbildung 27 Mittlere Temperatur aus dem Integral der tanh.-Fkt., Steigung der Wendestelle und Parameter a für Speicher F (grün), Speicher G (blau) und Speicher H (rot).

## 4.5 Funktionsparameter im Standby

Das Kurvenfitting hat gezeigt, dass sich das Temperaturprofil eines WW-Speichers gut mit der tanh-Funktion abbilden lässt. Bisher wurden die Funktionsparameter  $T_{min}$  und  $T_{max}$  aus Messdaten abgelesen und  $a$  bzw.  $b$  mittels Kurvenfitting durch Python ermittelt. Nachfolgend wird der zeitliche Verlauf von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  während des Standbys aufgrund Wärmeverluste berechnet und als Parameter für die tanh-Fkt. verwendet.



Die zeitliche Änderung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  im Standby wird massgeblich von Wärmeverlusten bestimmt. Die Wärmeverluste eines Speichers sind abhängig vom Wärmeverlustkoeffizient  $k$ , der Speicheroberfläche  $A$ , und dem Temperaturunterschied  $\Delta T$  zwischen der Temperatur im Speicher  $T_{Speicher}$  und der Umgebungstemperatur  $T_{ambient}$ .

$$\Delta T = T_{Speicher} - T_{ambient}$$

Formel 16

Im zeitlichen Verlauf wird  $\Delta T$  kleiner, da sich  $T_{Speicher}$  der Umgebungstemperatur annähert.  $\Delta T$  ändert sich über einen Zeitschritt  $n$ , um einen konstanten Prozentsatz  $\%_{\Delta T}$ . Unter der Annahme, dass die Wärmeverluste im Speicher gleichmässig verteilt sind, berechnet sich die Temperaturdifferenz  $\Delta T_{max,n+1}$  zwischen  $T_{max}$  und  $T_{ambient}$  zum nächsten Zeitschritt  $n + 1$  wie folgt:

$$\Delta T_{max,n+1} = \Delta T_{max,n} - \Delta T_{max,n} * \%_{\Delta T}$$

Formel 17

Bei  $T_{ambient} = const$  ändert sich zum nächsten Zeitschritt  $T_{max,n+1}$  wie folgt:

$$T_{max,n+1} = T_{max,n} - \Delta T_{max,n} * \%_{\Delta T}$$

Formel 18

Dabei wird als Startwert,  $n = 0$ , ein initiales Temperaturmaximum  $T_{max,n=0} = T_{max,initial}$  angenommen. Analog erfolgt die Berechnung des zeitlichen Verlaufs von  $T_{min}$ .

$$\Delta T_{min,n+1} = \Delta T_{min,n} - \Delta T_{min,n} * \%_{\Delta T}$$

Formel 19

$$T_{min,n+1} = T_{min,n} - \Delta T_{min,n} * \%_{\Delta T}$$

Formel 20

Wiederum mit einem initialen Temperaturminimum  $T_{min,n=0} = T_{min,initial}$ .

Für die zeitliche Entwicklung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  ist die Abschätzung der prozentualen Änderung pro Zeitschritt  $\%_{\Delta T}$  wichtig. Eine Möglichkeit ist die Berechnung des Wärmeverlustkoeffizienten in Abhängigkeit von Isolierung und Wärmebrücken. Hieraus ergibt sich

$$\%_{\Delta T, Isolierung} = 1 - e^{-\frac{kA}{m \cdot c_p} \cdot \Delta t}$$

Formel 21

Wobei  $k$  der Wärmeverlustkoeffizient,  $A$  die Speicheroberfläche,  $m$  die gespeicherte Masse und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität des Speichermediums (Wasser) ist.  $\Delta t$  entspricht der Dauer des Zeitschritts.

Eine weitere Möglichkeit besteht über die Berechnung der Wärmeverluste nach prSIA 385/2:2023. Die Verluste eines Speichers während 24 h berechnen sich in Abhängigkeit des Speichervolumen  $V$  und der Anzahl der Speicheranschlüsse in der warmen Zone  $x$  wie folgt:



$$Q_{\text{Verlust}} = 0.11\sqrt{V} + 0.1(x - 2)$$

Formel 22

Unter der Annahme, dass die Wärmeverluste proportional über den Tag verteilt sind, können die entstehenden Wärmeverluste pro Zeitschritt  $Q_{\text{Verlust},\Delta t}$  ermittelt werden und  $\%_{\Delta T, \text{SIA}}$  ergibt sich aus dem Verhältnis  $Q_{\text{Verlust},\Delta t}$  und der thermischen Masse des Speichers  $Q_{\text{Speicher}}$ .

$$\%_{\Delta T, \text{SIA}} = \frac{Q_{\text{Verlust},\Delta t}}{Q_{\text{Speicher}}}$$

Formel 23

Zur Berechnung der zeitlichen Entwicklung von  $T_{\text{max}}$  und  $T_{\text{min}}$  im Standby nach Formel 18 beziehungsweise Formel 20 müssen die Speicher spezifische prozentuale Temperaturdifferenzänderung pro Zeit  $\%_{\Delta T}$ , sowie eine initiale  $T_{\text{max},\text{initial}}$  und  $T_{\text{min},\text{initial}}$  zu Beginn des Standbys bekannt sein.

In Tabelle 8 sind  $\%_{\Delta T}$  für die drei Speicher aufgeführt. Die Dauer eines Zeitschritts beträgt  $\Delta t = 1 \text{ min}$ . Es zeigt sich, dass die Änderungsrate nach der Berechnung über die Wärmeverluste aus der SIA höher ausfallen als über die Isolierung. Ebenfalls aufgeführt sind die initiale minimale, respektive maximale Speichertemperatur,  $T_{\text{min},\text{initial}}$  und  $T_{\text{max},\text{initial}}$ . Für Speicher F und H sind diese aus den Messdaten entnommen. Für Speicher G wurde lediglich  $T_{\text{max},\text{initial}}$  aus den Messdaten entnommen. Für  $T_{\text{min}}$  wurde der initiale Startwert manuell festgelegt und liegt mit  $T_{\text{min},\text{initial}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  unterhalb der gemessenen Speichertemperatur. Bei diesem Speicher befindet sich die Thermokline weit unten im Speicher, respektive nicht mehr vollständig im Speicher.  $T_{\text{min}}$  liegt daher ausserhalb des Speichers, respektive deutlich unterhalb des untersten Messpunktes, und kann deshalb einen kleineren Wert als die gemessenen Temperaturen im Speicher annehmen.

Tabelle 8 Prozentuale Änderung von  $\Delta T$  und initiale  $T_{\text{min}}$  bzw.  $T_{\text{max}}$  der drei Speicher F, G und H

		F	G	H
$\%_{\Delta T, \text{Isolierung}}$	[-]	$2.67 * 10^{-5}$	$3.26 * 10^{-5}$	$5.56 * 10^{-5}$
$\%_{\Delta T, \text{SIA}}$	[-]	$5.52 * 10^{-5}$	$5.04 * 10^{-5}$	$1.10 * 10^{-4}$
$T_{\text{min},\text{initial}}$	[°C]	10.9	5	56.1
$T_{\text{max},\text{initial}}$	[°C]	52	59.1	57.1

In Abbildung 28 ist für Speicher F die zeitliche Entwicklung von  $T_{\text{max}}$  (links) und  $T_{\text{min}}$  (rechts) im Standby dargestellt. Verglichen werden die Messdaten (blau) mit den berechneten Werten nach der Verlustrechnung aus der Speicherisolierung (orange) und nach der SIA (gelb). Im Vergleich zu den Messdaten wird die berechnete Temperaturänderung über die Zeit unterschätzt. Die auftretenden Wärmeverluste sind oben und unten im Speicher aufgrund der grösseren Oberfläche höher als in der Speichermitte. Zur Vereinfachung wurde in der Berechnung die Wärmeverluste jedoch gleichmässig über dem Speicher angenommen, was Grund für die Unterschätzung der Temperaturänderung sein kann.

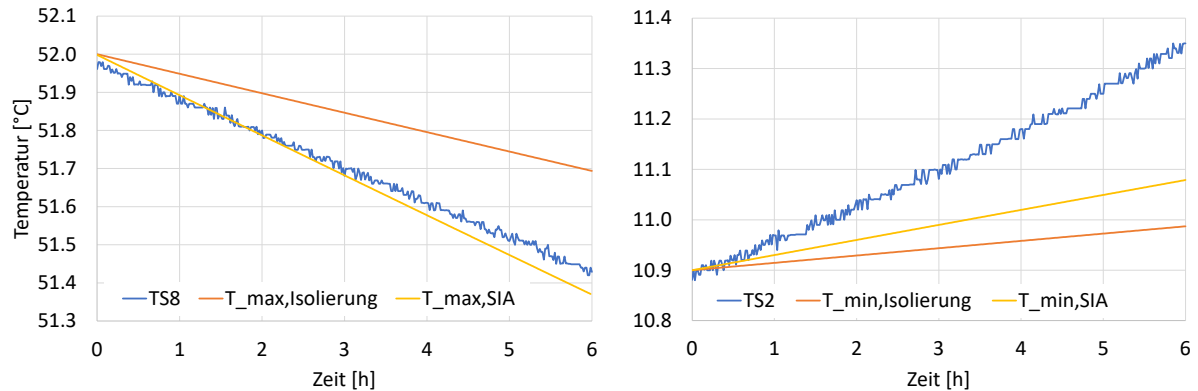


Abbildung 28 Gemessene und berechnete maximale Speichertemperatur (links) und minimale Speichertemperatur (rechts) im Standby für Speicher F.

Anschliessend wurde das Temperaturprofil im Standby mit der tanh-Fkt. (Formel 4) gefittet. Dabei wurde  $T_{min}$  und  $T_{max}$  nach der oben beschriebenen Vorgehensweise mit den Daten aus Tabelle 8 berechnet. Für die prozentuale Änderungsrate wurde  $\%_{\Delta T, SIA}$  verwendet. Die Parameter  $a$  und  $b$  sind wie zuvor (Kapitel 4.3) gefittet. In Abbildung 29 sind die gefitteten Temperaturprofile von Speicher F und in Abbildung 30 von Speicher G abgebildet. Für beide Speicher zeigen die gefitteten Temperaturprofile eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten (x). Vor allem für Speicher G konnte eine Verbesserung des Fits im Vergleich zur Ermittlung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  aus Messdaten erzielt werden.

In Abbildung 31 sind die Temperaturprofile im Standby für Speicher H dargestellt. Hier zeigen sich deutlichere Abweichungen zwischen Messdaten und gefitteter Kurve im unteren Teil des Speichers. Die Temperatur unten im Speicher sinkt über die Zeit deutlich schneller ab als die berechnete  $T_{min}$ . Hier können Wärmebrücken im unteren Speicherbereich mögliche Ursachen sein, wobei die Differenzen zwischen Messwerten und Fits nur wenige Kelvin betragen.

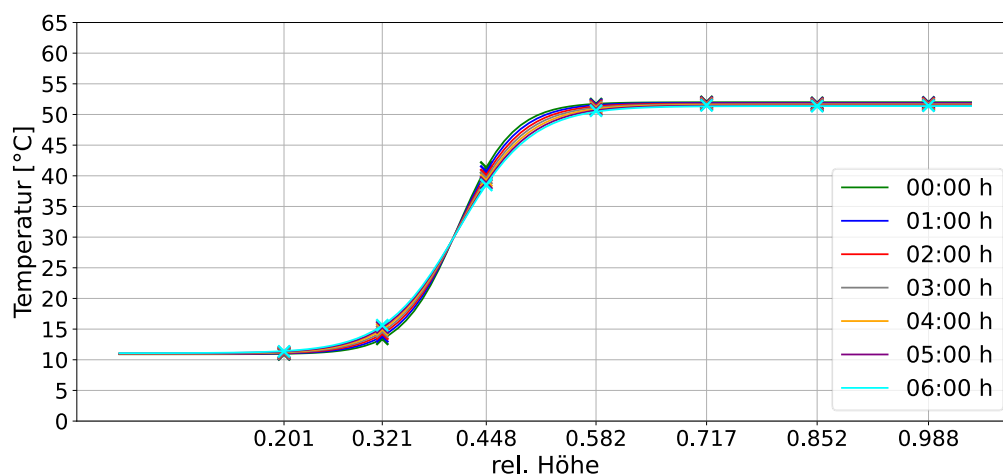


Abbildung 29 Temperatur im Standby von Speicher F, Parameter  $a$  und  $b$  gefittet,  $T_{min}$  und  $T_{max}$  über Wärmeverluste berechnet

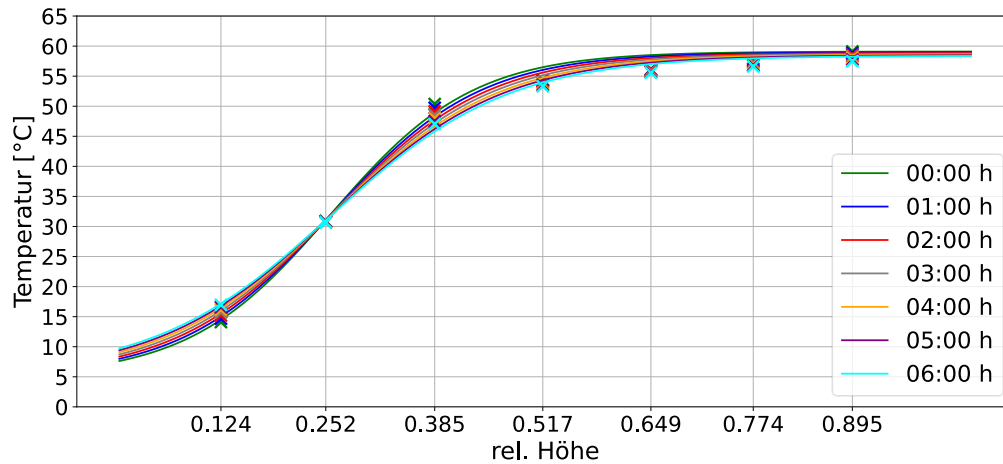


Abbildung 30 Temperatur im Standby von Speicher G, Parameter  $a$  und  $b$  gefittet,  $T_{min}$  und  $T_{max}$  über Wärmeverluste berechnet

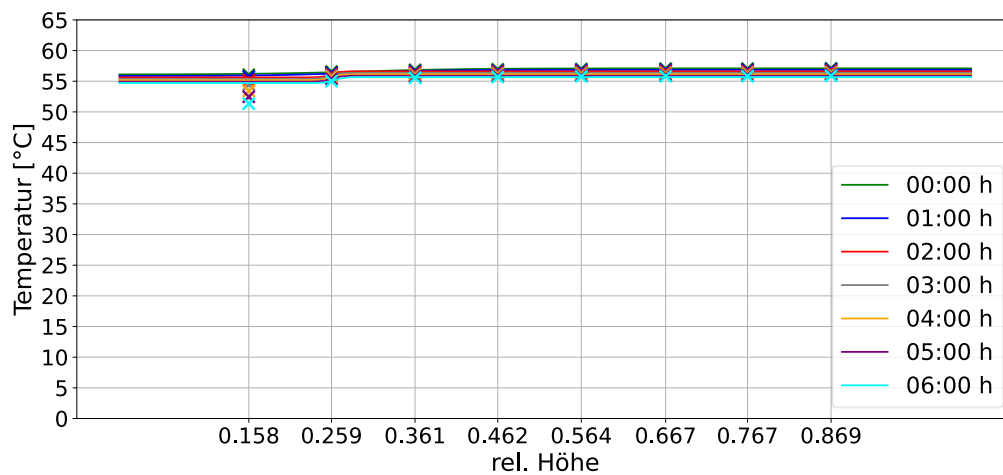


Abbildung 31 Temperatur im Standby von Speicher H, Parameter  $a$  und  $b$  gefittet,  $T_{min}$  und  $T_{max}$  über Wärmeverluste berechnet

Ein Vergleich des zeitlichen Verlaufs von gemessenem und berechnetem  $T_{min}$  für Speicher H ist in Abbildung 32 dargestellt. Zu Beginn des Standbys zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe. Im zeitlichen Verlauf klaffen diese jedoch stark auseinander. Auffällig ist, dass die gemessene Temperatur (blau) mit der Zeit schneller sinkt. Ursache hierfür könnte eine Wärmebrücke sein, welche sich etwas unterhalb der Messstelle befindet, so dass deren Einfluss erst nach einer gewissen Zeit am Messpunkt spürbar wird.

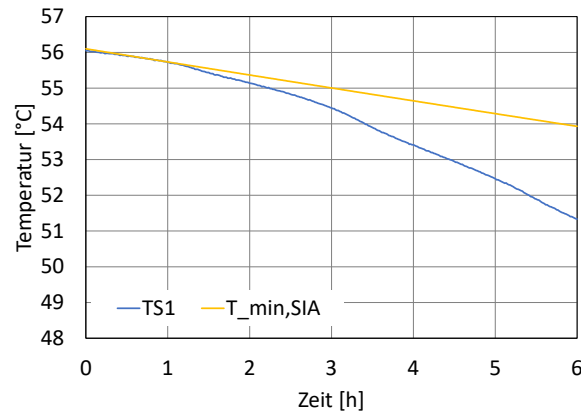


Abbildung 32 Gemessene und berechnete minimale Speichertemperatur im Standby für Speicher H.

Für das Temperaturprofil im Speicher während des Standbys wurden hier zwei Verfahren zur Ermittlung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  aufgezeigt:

- v01:  $T_{min}$  und  $T_{max}$  wurde aus den Messwerten direkt bestimmt (Kapitel 4.3)
- v02:  $T_{min}$  und  $T_{max}$  wurde aus den Wärmeverlusten berechnet

Für den Vergleich der beiden Varianten ist in Abbildung 33, für die jeweilige Variante die mittlere absolute Abweichung von gefitteten zu gemessenen Werten für alle drei Speicher dargestellt. Für Speicher F (links) zeigt sich für beide Vorgehensweisen ein ähnlich guter Fit der Temperaturprofile. Für Speicher G (Mitte) konnte das Temperaturprofil in v02 durch die Berechnung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  deutlich verbessert werden. Grund hierfür ist, dass sich die Thermokline nicht vollständig im Speicher befindet und  $T_{min}$  daher tiefer als die gemessene Speichertemperatur, ist. Eine deutliche Verschlechterung des Temperaturprofils durch die berechneten Temperaturen zeigt sich bei Speicher H (rechts), da der Temperaturverlauf durch eine Herleitung der Wärmeverluste aus der Physik unten im Speicher nicht gut abgebildet werden kann.

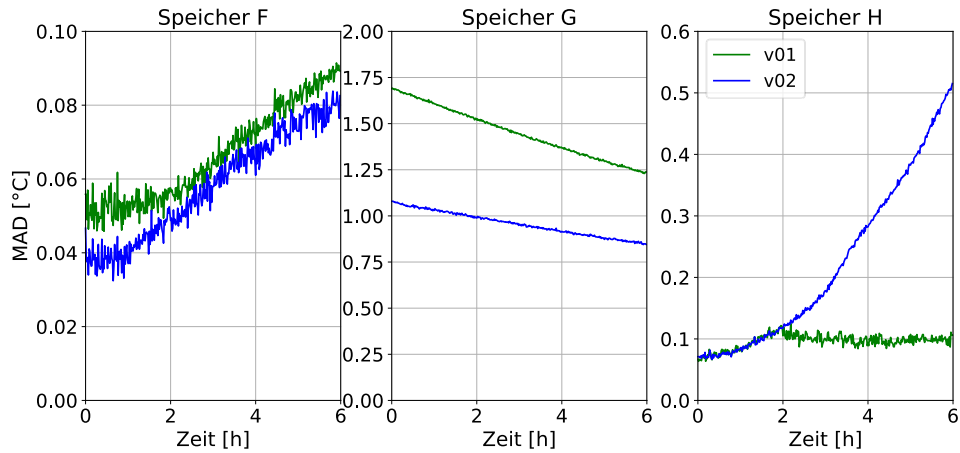


Abbildung 33 Vergleich der mittleren absoluten Abweichung aus den gefitteten Kurven mit  $T_{min}$  und  $T_{max}$  bestimmt aus Messwerten (v01) und berechnet über Wärmeverluste (v02); links: Speicher F, Mitte: Speicher G, rechts: Speicher H.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich bei der mittleren Speichertemperatur, welche aus dem Integral der tanh-Funktion (Formel 9) berechnet wird. In Abbildung 34 sind die mittleren Speichertemperaturen im Standby für alle drei Speicher (F,G,H) und für beide Varianten (v01, v02) dargestellt.

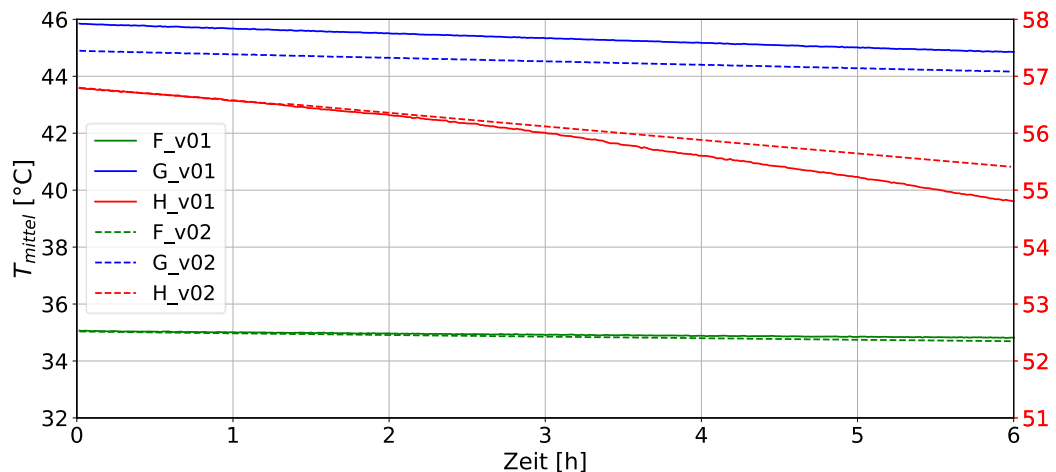


Abbildung 34 Mittlere Speichertemperatur über der Zeit im Standby für alle drei Speicher (grün:F, blau:G, rot:H) und beide Varianten (v01: durchgezogene Linie, v02: gestrichelte Linie)

Die mittlere Temperatur von Speicher F liegt für beide Varianten nahe zusammen und sinkt über den abgebildeten Zeitraum von 6 Stunden (00:00Uhr bis 6:00Uhr) leicht. Für Speicher G (blaue Linien) fällt die mittlere Speichertemperatur in beiden Varianten, es zeigt sich jedoch, dass bei v02 die mittlere Speichertemperatur circa 1 K tiefer ist als bei v01. Es wurde erkannt, dass  $T_{min}$  im Fall von Speicher G tiefer ist, als die gemessene Temperatur unten im Speicher.



Durch das Anpassen von  $T_{min}$  von v02 verschiebt sich die Thermokline zu tieferen Temperaturen im unteren Bereich des Speichers, was das die tiefere Mitteltemperatur erklärt.

Bei Speicher H sinkt die mittlere Temperatur für beide Varianten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass sich das Temperaturprofil über die Berechnung der Wärmeverluste (v02) nicht so gut abbilden lässt, wie bei der ersten Variante (v01). Vor allem im zeitlichen Verlauf wird der Unterschied der beiden Fitting-Verfahren grösser, dies zeigt sich auch beim zeitlichen Verlauf der mittleren Speichertemperaturen. Während zu Beginn des Standbys die mittlere Speichertemperatur für beide Varianten (rote Linien) gut übereinstimmt, zeigt sich gegen Ende des Standbys ein Unterschied in der mittleren Speichertemperatur von fast 2 K.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit beiden Verfahren das Temperaturprofil im Standby abbilden lässt. Das Abfallen der mittleren Speichertemperatur im Standby zeigt zudem eine gute Übereinstimmung mit der Physik, da der Speicher Wärme an die kältere Umgebung verliert. Vor allem, wenn sich die Thermokline nicht vollständig im Speicher befindet, kann über die Berechnung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  aus den Wärmeverlusten und entsprechender initialer Temperatur eine Verbesserung des Kurvenfits im Vergleich zur Verwendung von Messdaten erzielt werden. Folgende Punkte beziehungsweise Kenntnisse über den Speicher sind dabei wichtig:

- Berechnung der prozentualen Temperaturdifferenzänderung  $\%_{\Delta t}$ , welche abhängig von Wärmeverlusten und damit spezifisch für den jeweiligen Speicher ist.
- Abschätzung der initialen Temperaturen  $T_{min,initial}$  und  $T_{max,initial}$ . Diese sind abhängig vom Speicherzustand zu Beginn des Standbys und der Position der Thermokline im Speicher.

Bisher wurde durch die Annahme von gleichmässig verteilten Wärmeverlusten die Berechnung von  $\%_{\Delta t}$  vereinfacht. Da die Speicherverluste oben und unten im Speicher in der Regel grösser ausfallen, kann durch eine spezifische Betrachtung der Verluste an der jeweiligen Speicherhöhe die zeitliche Entwicklung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  verbessert werden.

Zur vollständigen zeitlichen Abbildung des Temperaturprofils im Standby mit der tanh-Funktion, fehlt die zeitliche Entwicklung der Funktionsparameter  $a$  und  $b$ . Diese wurden bisher mittels Kurvenfitting ermittelt. Für einen Speicher im Standby ändert sich die Thermokline aufgrund von Wärmeleitung und Diffusion. Wie aus den bisherigen gefitten Kurven erkennbar ist, wird die Thermokline mit der Zeit unschärfer. Dies hat zur Folge, dass Parameter  $a$  bzw. die Steigung an der Wendestelle  $m_b$  kleiner wird. Die Position der Thermokline verändert sich dabei kaum. Für eine erste Betrachtung sind in Abbildung 35 beispielhaft die Temperaturprofile von Speicher F mit der Annahme  $b = const$  abgebildet. Der Parameter  $b = 0.43$  entspricht dem Mittelwert der im Standby gefitteten Werte für  $b$ . Die Abbildung zeigt, dass das berechnete Temperaturprofil mit konstanter Thermoklinenposition immer noch eine gute Übereinstimmung mit Messdaten (x) aufweist. Dies lässt in einem ersten Schritt die Annahme  $b = const$  im Standby zu. Wichtig hierfür sind Kenntnisse über die Position der Thermokline im Speicher. Diese ist vor allem vom Speicherzustand zu Beginn des Standbys abhängig.



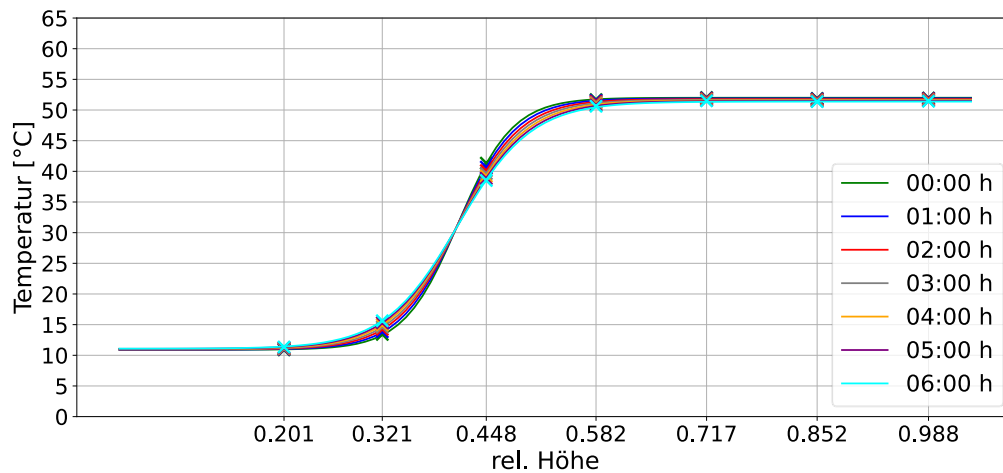


Abbildung 35 Standby Speicher F mit  $\%_{\Delta T, SIA} = 5.52 \cdot 10^{-5}$ ,  $T_{min, initial} = 10.9^\circ\text{C}$ ,  $T_{max, initial} = 52^\circ\text{C}$ ,  $b = 0.43$

Abschliessend bleibt festzustellen, dass sich die zeitliche Entwicklung  $T_{min}$  und  $T_{max}$  über die Wärmeverluste des Speichers berechnen lässt und die Position, Parameter  $b$ , der Thermokline im Standby als konstant angenommen werden kann. Im weiteren Vorgehen kann durch eine verbesserte Wärmeverlustrechnung die Berechnung von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  verbessert werden. Die Annahme einer unveränderlichen Position der Thermokline sollte noch weitergehend untersucht werden. Letztlich bleibt die Abhängigkeit der Schärfe, Parameter  $a$  bzw. Steigung  $m_b$ , von der Zeit noch offen.

#### 4.6 Zusammenfassung neues Simulationsmodell

Das Simulationsmodell hat gezeigt, dass sich mit der gewählten Tangens hyperbolicus Funktion das Temperaturprofil im Speicher abbilden lässt. Da es sich dabei um eine stetige, integrierbare Funktion handelt, kann die Energieerhaltung sichergestellt werden.

Die Funktionsparameter  $T_{min}$  und  $T_{max}$  müssen nicht den Speichertemperaturen unten und oben im Speicher entsprechen. Befindet sich die Thermokline weit unten oder oben im Speicher, kann  $T_{min}$  respektive  $T_{max}$  unter- bzw. oberhalb der im Speicher gemessenen Temperaturen liegen. Die Stetigkeit der Funktion ist dennoch gegeben. Die minimale und die maximale Speichertemperatur ist der Funktionswert an der Position 0 und 1. Für eine bessere Verständlichkeit in einer allfälligen späteren Verwendung der Funktionen sollte die Bezeichnung der Funktionsparameter überarbeitet werden.

Weiter hat sich gezeigt, dass die Steigung der Thermokline an der Wendestelle  $m_b$  eine bessere Aussage über die Schärfe der Thermokline gibt, da sie Speicherzustände mit verschiedenen  $\Delta T$  vergleichbar macht. Zudem lässt sich an  $m_b$  erkennen, ob sich die Thermokline aufgelöst hat. Dieses Erkenntnis ist speziell dann wichtig, wenn Funktionen mit mehreren Thermoklinen verwendet werden, die sich bei Be- oder Entladevorgängen neu ausbilden. Dies könnte z.B. bei einer Stufenladung eines Speichers nötig werden. Die Anzahl der Thermokline muss während einer Simulation auch wieder reduziert werden können.



Zum Schluss konnte gezeigt werden, dass sich über Wärmeverluste im Standby den Verlauf von  $T_{min}$  und  $T_{max}$  berechnen lässt.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Die Speicherschichtung ist ein wichtiger Parameter für die Bewertung von thermischen Speichern. Das am SPF entwickelte Verfahren zur Messung der Schichtungseffizienz durch den Concise Cycle Test (CCT) hat sich in der Schweiz etabliert. Eine Alternative dazu ist der Ansatz des Component Testing – System Simulation (CTSS). Mit Hilfe von Messdaten, welche durch Testzyklen gemäss der Norm EN 12977-3 gewonnen werden, kann ein Simulationsmodell des Speichers parametrisiert werden. Im nächsten Schritt wird dieses Modell zur Simulation von Be- und Entladevorgängen genutzt, um daraus die Schichtungseffizienz zu bestimmen.

Im vorliegenden Projekt wurde die Schichtungseffizienz von 6 verschiedenen Speichern sowohl nach der CCT-Methode als auch nach der CTSS-Methode bestimmt.

Die Resultate nach der CCT-Methode zeigen eine grosse Bandbreite der Schichtungseffizienz bei den geprüften Speichern. Dabei korreliert eine hohe Schichtungseffizienz mit einer tiefen mittleren Vorlauftemperatur des Wärmereizgebers und somit auch mit der Effizienz des Gesamtsystems. Negative Effekte, welche die Temperaturschichtung im Speicher beeinflussen, können aufgrund der Messdaten benannt werden und so zu einer Verbesserung der Produkte auf dem Markt beitragen.

Die Bestimmung der Schichtungseffizienz nach dem CTSS-Verfahren unter Verwendung des Type 340 Simulationsmodells kann diese Variabilität der Resultate nicht bestätigen. Die Temperaturverteilung im Speicher wird vorwiegend über die effektive vertikale Leitfähigkeit im Speicher bestimmt. Dadurch können Effekte am Speichereintritt, welche eine Durchmischung von Temperaturschichten verursachen, nicht abgebildet werden.

Das in der CTSS-Methode verwendete Simulationsmodell basiert auf der Aufteilung des Speichervolumens auf eine bestimmte Anzahl ortsfester Volumen uniformer Temperatur. Als alternativer Ansatz wurde im Projekt RoRoStrat die Modellierung der Speichertemperatur durch eine stetige, integrierbare Funktion untersucht. Sowohl eine Tangens hyperbolicus Funktion als auch eine Exponentialfunktion haben sich als geeignete Funktionen zur Abbildung eines Thermoklines im Speicher herausgestellt.

Die variablen Parameter zur Beschreibung der Temperatur mit maximal einem Thermoklin im Speicher sind die Schärfe (Parameter  $a$ ) und die Position (Wendestelle; Parameter  $b$ ) der Thermokline. Über  $T_{min}$  bzw.  $T_{max}$  werden Temperaturminimum und -maximum und damit die Temperaturen unterhalb und oberhalb der Thermokline definiert.

Anhand der Messdaten von drei verschiedenen Speichern wurde gezeigt, dass die Parameter der Funktion so gefittet werden können, dass eine sehr gute Übereinstimmung von simulierten gemessenen Temperaturen während der Prozesse Be- und Entladung sowie im StandBy resultiert.



Es zeigte sich, dass die Funktionsparameter  $T_{min}$  und  $T_{max}$  nicht zwingend den Speichertemperaturen unten und oben im Speicher entsprechen müssen. Wenn sich die Thermokline weit unten oder oben im Speicher befindet, können diese unter- bzw. oberhalb der gemessenen Temperaturen liegen. Die Stetigkeit der Funktion bleibt dennoch gewährleistet. Die minimale und maximale Speichertemperatur entsprechen den Funktionswerten an den Positionen 0 (Speicher unten) und 1 (Speicher oben).

Weiterhin zeigt sich, dass die Steigung der Thermokline an der Wendestelle  $m_b$  eine bessere Aussage über die Schärfe der Thermokline ermöglicht. Sie macht Speicherzustände mit verschiedenen  $\Delta T$  vergleichbar und zeigt, ob sich die Thermokline aufgelöst hat. Dieses Erkenntnis ist besonders relevant, wenn Funktionen mit mehreren Thermoklinen verwendet werden, die sich während Be- oder Entladevorgängen neu ausbilden. In Simulationen sollte die Anzahl der Thermoklinen ebenfalls reduziert werden können.

## 6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Der Ansatz der Abbildung der Speichertemperatur als mathematische Funktion über die Höhe des Speichers ist dazu geeignet, auch dynamische Prozesse im Speichervolumen aufgrund einer impulsreichen Strömung oder aufgrund von mitreissender Strömung abzubilden.

Für die Anwendung im Simulationsmodell muss noch eine Möglichkeit zur Superposition ausgearbeitet werden, um mehrere Thermokline in einem Speicher abbilden zu können. Zudem muss aus Daten wie der Temperatur und dem Massenstrom am Speichereintritt der zeitliche Verlauf der Funktionsparameter abgeleitet werden.

Diese Arbeiten sind im Projekt EffPlusWW (SI/502673-01 und SI/502677-01) geplant.

## 7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde zusammen mit dem IGTE der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Präsentation der Resultate ist zum Zeitpunkt der Berichtslegung auch im Rahmen des Solar Keymark Network geplant.

Die geprüften Speicher wurden von fünf verschiedenen Herstellern zur Verfügung gestellt. Diese haben sich neben einem finanziellen Beitrag auch in diversen Besprechungen aktiv in das Projekt eingebracht.

Die Ergebnisse werden in den Solar-Keymark-Network-Meetings 2024 auf europäischer Ebene präsentiert.



## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Haller MY, Haberl R, Persdorf P, Reber A. StorEx - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern. Bundesamt für Energie BFE; 2015.
- [2] Haberl R, Türk O, Bohren A, Haller MY. DHWStrat - Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern. Bundesamt für Energie BFE; 2021.
- [3] 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](https://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/spf/Testing/Speicherschichtung/SPF-PV86-SE-Ver2.2.pdf) (accessed November 15, 2019).
- [4] Drück H. TRNSYS - Type 340 – MULTIPOINT Store - Model - Version 1.99. Internes Dokument 2006.
- [5] CEN/TC 312. EN 12977: Thermal solar systems and components — Custom built systems — Parts 1 – 5 2018.



## **Annex AGetestete Speicher**



## Speicher A

Zur Messung der Schichtungseffizienz des Tank-in-Tank Kombispeichers wurde dieser gemässe dem vereinfachten Schema in Abbildung 36 auf dem Prüfstand installiert.

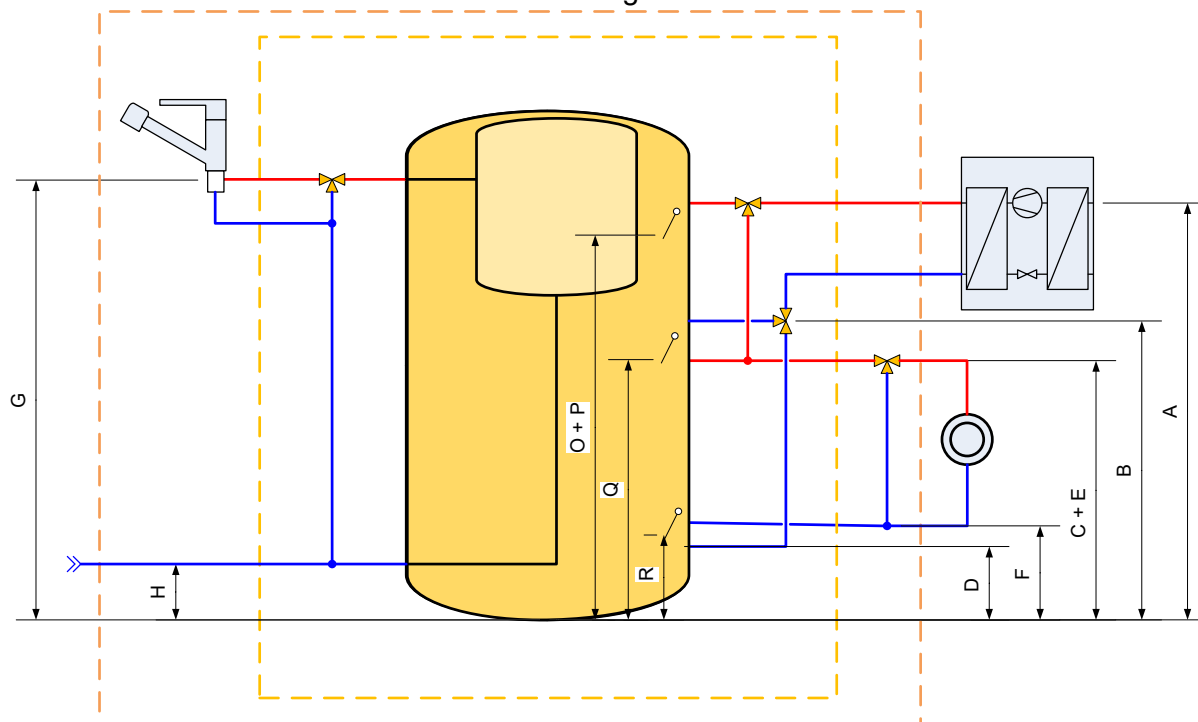


Abbildung 36: Hydraulikschema des Kombispeichers

Tabelle 9: Anschlusspositionen und Temperatursensoren des geprüften Speichers

Im Test verwendete Speicheranschlüsse		Höhe ab Boden [cm]
A	Wärmepumpe Vorlauf Warmwasser	101
B	Wärmepumpe Rücklauf Warmwasser	82
C	Wärmepumpe Vorlauf Raumheizung	70
D	Wärmepumpe Rücklauf Raumheizung	46
E	Raumheizung Vorlauf	71
F	Raumheizung Rücklauf	17
G	Warmwasser Austritt	79
H	Warmwasser Eintritt	50

Im Test verwendet Temperaturfühler		
O	Warmwasser Ein	102
P	Warmwasser Aus	102
Q	Raumheizung Ein	54
R	Raumheizung Aus	54



## Speicher B

Zur Messung der Schichtungseffizienz des Kombispeichers wurde dieser gemässe dem vereinfachten Schema in Abbildung 1 auf dem Prüfstand installiert.

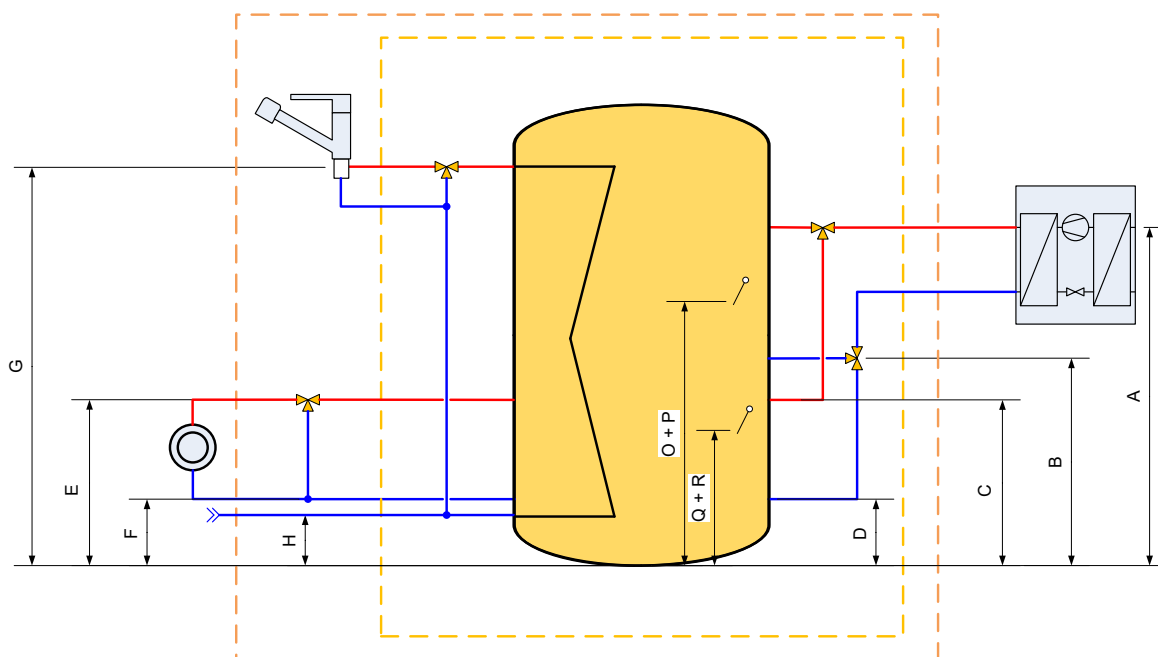


Abbildung 37: Hydraulikschema des Kombispeichers

Im Test verwendete Speicheranschlüsse		Höhe ab Boden [cm]
A	Wärmepumpe Vorlauf Warmwasser	126
B	Wärmepumpe Rücklauf Warmwasser	94
C	Wärmepumpe Vorlauf Raumheizung	57
D	Wärmepumpe Rücklauf Raumheizung	24
E	Raumheizung Vorlauf	57
F	Raumheizung Rücklauf	24
G	Warmwasser Austritt	174
H	Warmwasser Eintritt	14

Im Test verwendet Temperaturfühler		
O	Warmwasser Ein	131
P	Warmwasser Aus	131
Q	Raumheizung Ein	46
R	Raumheizung Aus	46



## Speicher C

Zur Messung der Schichtungseffizienz des Kombispeichers wurde dieser nach dem vereinfachten Schema in Abbildung 38 auf dem Prüfstand installiert.

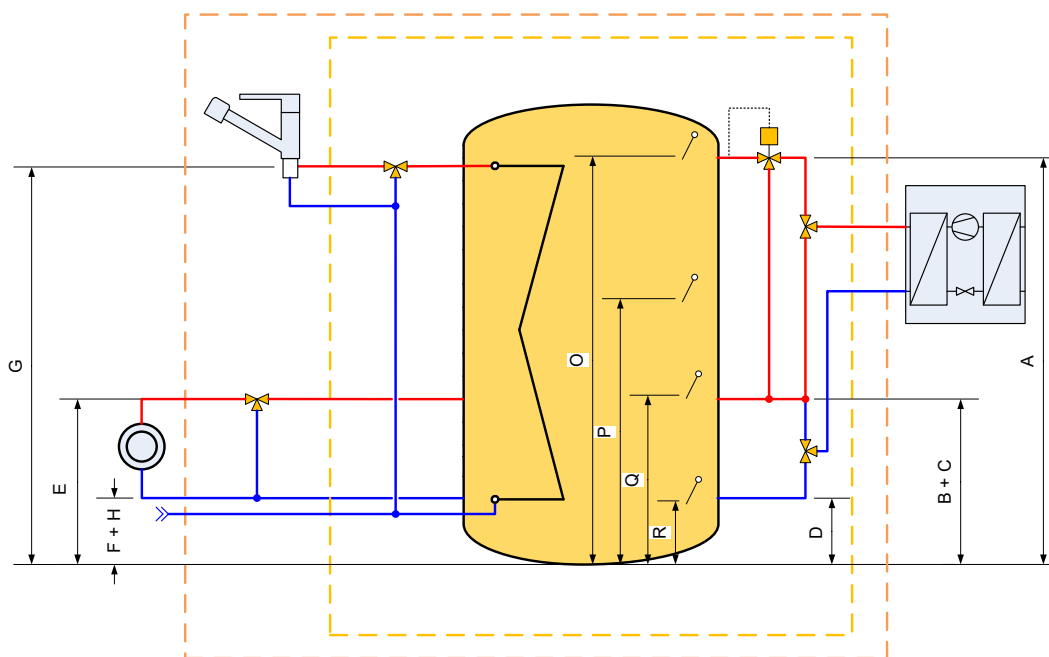


Abbildung 38: Hydraulikschema des Kombispeichers

Tabelle 10: Positionen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler am Speicher

Speicheranschlüsse	Höhe ab Boden [cm]
Wärmepumpe Vorlauf Warmwasser	176
Wärmepumpe Rücklauf Warmwasser	81
Wärmepumpe Vorlauf Raumheizung	81
Wärmepumpe Rücklauf Raumheizung	28
Raumheizung Vorlauf	81
Raumheizung Rücklauf	28
Warmwasser Austritt	176
Kaltwasser Eintritt	28
Temperaturfühler	
Warmwasser Ein	176
Warmwasser Aus	136
Raumheizung Ein	81
Raumheizung Aus	28





## Speicher D

Zur Messung der Schichtungseffizienz des Warmwasserspeichers wurde dieser gemäss dem vereinfachten Schema in Abbildung 39 auf dem Prüfstand installiert.

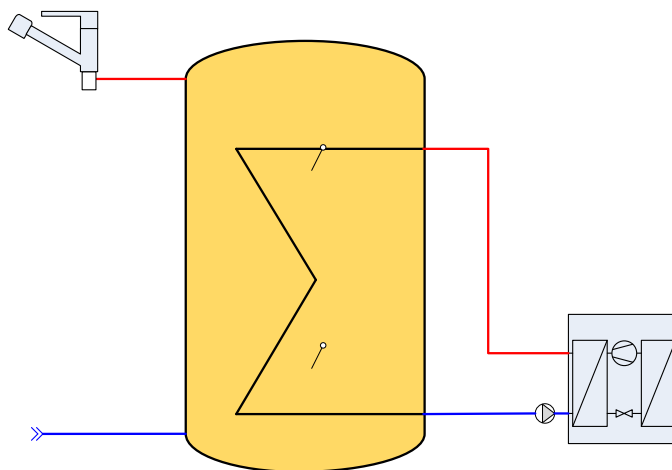


Abbildung 39: Hydraulikschema des Warmwasserspeichers

Tabelle 11: Positionen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler am Speicher

Speicheranschlüsse		Höhe ab Boden [cm]
A	Wärmepumpe Vorlauf Warmwasser	113
B	Wärmepumpe Rücklauf Warmwasser	22
C	Wärmepumpe Vorlauf Raumheizung	--
D	Wärmepumpe Rücklauf Raumheizung	--
E	Raumheizung Vorlauf	--
F	Raumheizung Rücklauf	--
G	Warmwasser Austritt	131
H	Kaltwasser Eintritt	12

Temperaturfühler		Höhe ab Boden [cm]
O	Warmwasser Ein	105
P	Warmwasser Aus	40
Q	Raumheizung Ein	--
R	Raumheizung Aus	--



## Speicher E

Zur Messung der Schichtungseffizienz des Kombispeichers in Kombination mit einem Frischwassermodul wurde dieser nach dem vereinfachten Schema in Abbildung 40 auf dem Prüfstand installiert.

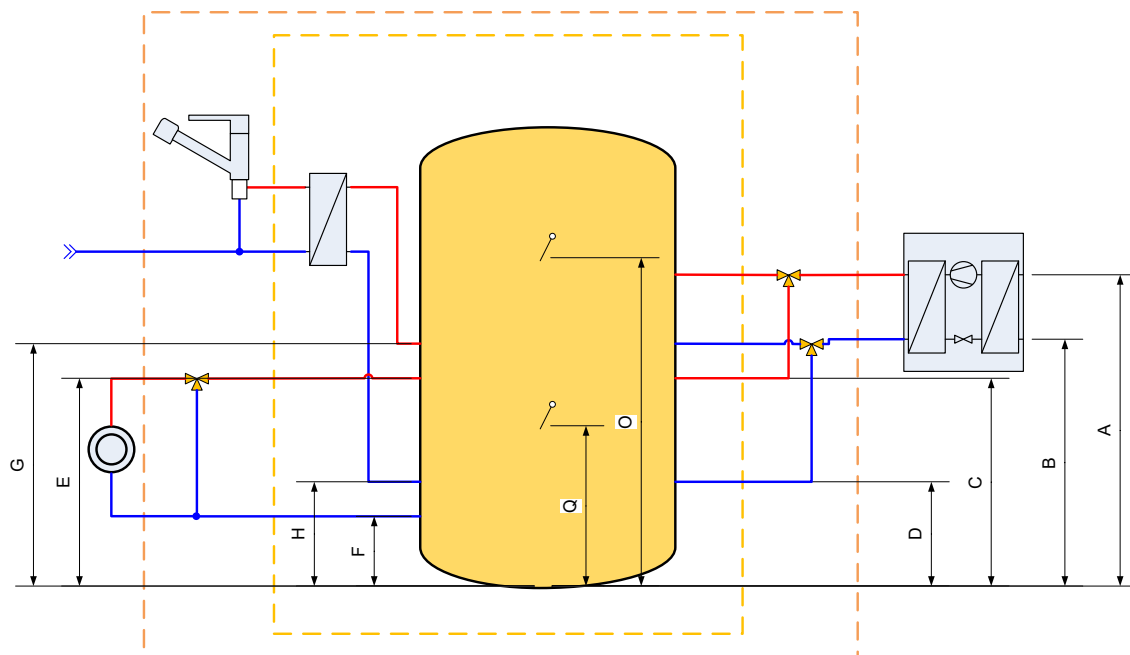


Abbildung 40: Hydraulikschema des Kombispeichers

Tabelle 12: Positionen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler am Speicher

Speicheranschlüsse	Höhe ab Boden [cm]
Wärmepumpe Vorlauf Warmwasser	101
Wärmepumpe Rücklauf Warmwasser	82
Wärmepumpe Vorlauf Raumheizung	70
Wärmepumpe Rücklauf Raumheizung	46
Raumheizung Vorlauf	71
Raumheizung Rücklauf	17
Warmwasser Austritt	79
Kaltwasser Eintritt	50
<b>Temperaturfühler</b>	
Warmwasser Ein / Aus	102
Raumheizung Ein / Aus	54



## Speicher F

Zur Messung der Schichtungseffizienz des Warmwasserspeichers wurde dieser gemäss dem vereinfachten Schema in Abbildung 41 auf dem Prüfstand installiert.

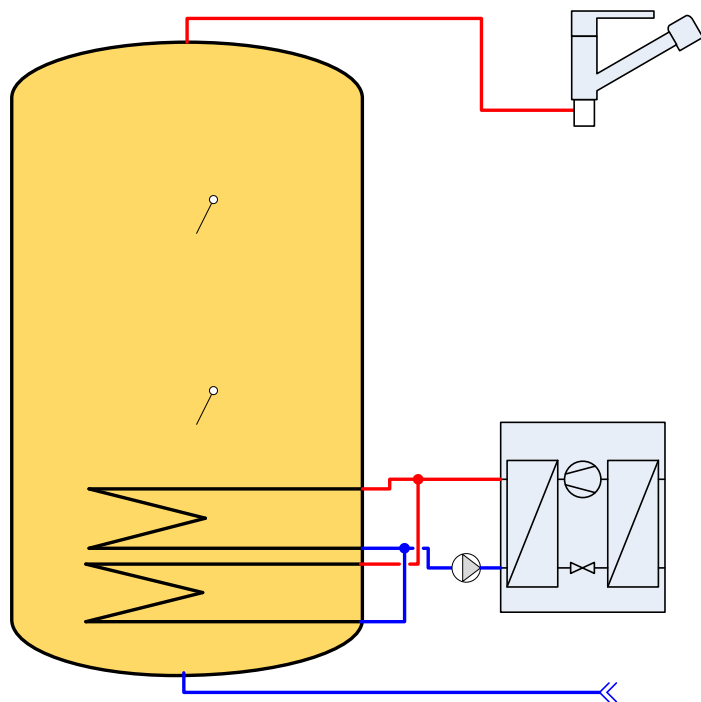


Abbildung 41: Hydraulikschema des Warmwasserspeichers

Tabelle 13: Positionen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler am Speicher

Speicheranschlüsse		Höhe ab Boden [cm]
A	Wärmepumpe Vorlauf Warmwasser	68
B	Wärmepumpe Rücklauf Warmwasser	38
C	Wärmepumpe Vorlauf Raumheizung	--
D	Wärmepumpe Rücklauf Raumheizung	--
E	Raumheizung Vorlauf	--
F	Raumheizung Rücklauf	--
G	Warmwasser Austritt	188
H	Kaltwasser Eintritt	8
Temperaturfühler		
O	Warmwasser Ein	140
P	Warmwasser Aus	82



## Annex B Resultate des Schichtungstests

### Resultate Speicher A

Die Energiebilanzen und die im Speichersystem produzierte Entropie als Mass für die auftretenden Mischungsprozesse sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt. Die unterschiedliche Schichtungseffizienz zeigt sich in der gemessenen Entropieproduktion im System. Diese sollte für eine gute Schichtungseffizienz möglichst gering ausfallen.

*Tabelle 14: Ergebnisse der Schichtungstests – Energiebilanz in kWh*

	Test 1
Wärmepumpe (Wärme)	53.2
Wärmepumpe (Wärme, WW-Modus)	9.9
Raumheizung	42.3
Warmwasser (über 40 °C)	9.5
Warmwasser (unter 40 °C) <sup>(a)</sup>	0.1
Speicheränderung	0.1
Verluste	1.4

<sup>(a)</sup> Bei einer WW-Zapfung wird die Wärme erst dann als Nutzwärme definiert, wenn 40 °C erreicht sind.

*Tabelle 15: Ergebnisse der Schichtungstests – Entropieproduktion im Speicher-System in kJ/K. Tiefe Werte bedeuten gute Schichtung und Exergieerhaltung*

	Test 1
Im Speicher	8.66
In der Hydraulik	2.12
<b>Gesamt</b>	<b>10.78</b>

Die Schichtungseffizienz wurde berechnet, indem die gemessene Entropieproduktion verglichen wurde mit der Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Wärmepumpe immer mit Vorlauftemperaturen von 55 °C betrieben werden muss (worst case).

*Tabelle 16: Schichtungseffizienz und Warmwasser-Verhältnis*

Test	Test 1
<b>Schichtungseffizienz Speicher (%)</b>	<b>84.0</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.28
<b>Schichtungseffizienz System<sup>(1)</sup> (%)</b>	<b>80.0</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.35
<b>Warmwasser-Verhältnis (-)</b>	<b>1.0</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.18

<sup>(1)</sup> Die Schichtungseffizienz auf Systemebene ist massgebend für die Zulassung eines Kombispeichers zum Wärmepumpen-Systemmodul

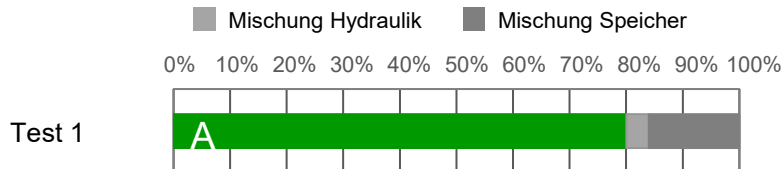


In Tabelle 17 sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges dargestellt.

*Tabelle 17: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen*

Test	Test 1
<b>Wärmelieferung</b>	
Wärmepumpe [°C]	34.3
<b>Wärmebezug</b>	
Raumheizung [°C]	31.1
Warmwasser [°C]	48.3

Abbildung 42 zeigt die Schichtungseffizienz (grün) des Systems. Dargestellt ist auch der Verlust an Schichtungseffizienz, welcher auf die Mischung im Speicher (helles grau) bzw. in der Hydraulik (dunkelgrau) zurückzuführen ist.



*Abbildung 42: Schichtungseffizienz und Schichtungsverluste des Systems.*

In den folgenden Abbildungen sind Energie-Temperatur Diagramme der Tests gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus der Wärmepumpe und evtl. den Kollektoren sowie die vom System gelieferte Energie für Raumheizung und Warmwasser jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

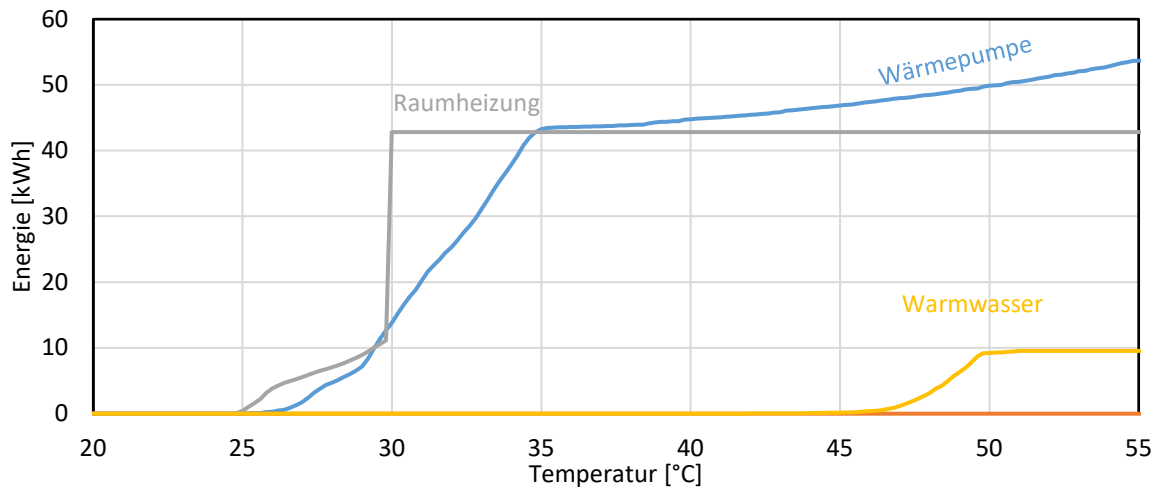


Abbildung 43: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 1.

Während dem Test wurden Anlegefühler an der Speicherwand angebracht. Die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 44 zu sehen.

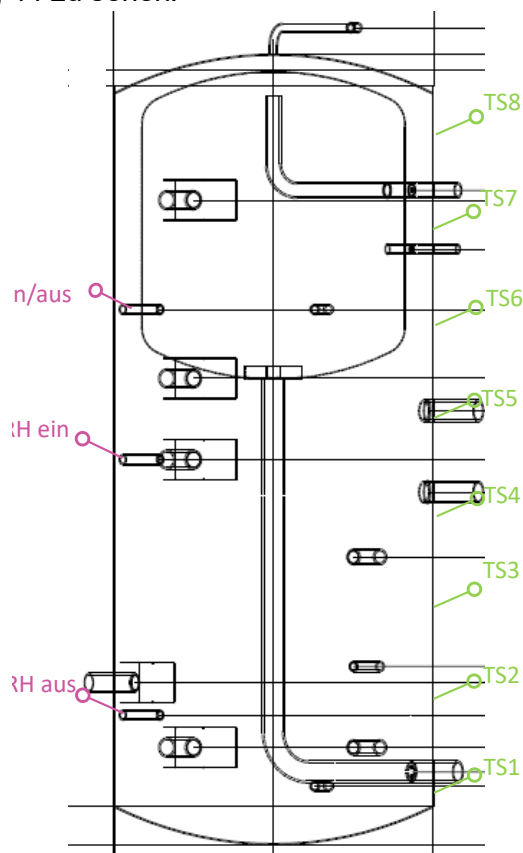


Abbildung 44: Position der Anlegefühler und der Sensoren zur Regelung.

In der folgenden Grafik ist der Verlauf der Speichertemperaturen im Test am letzten Testtag dargestellt. Zusätzlich sind die Temperaturfühler zur Regelung des Speichersystems eingezeichnet.

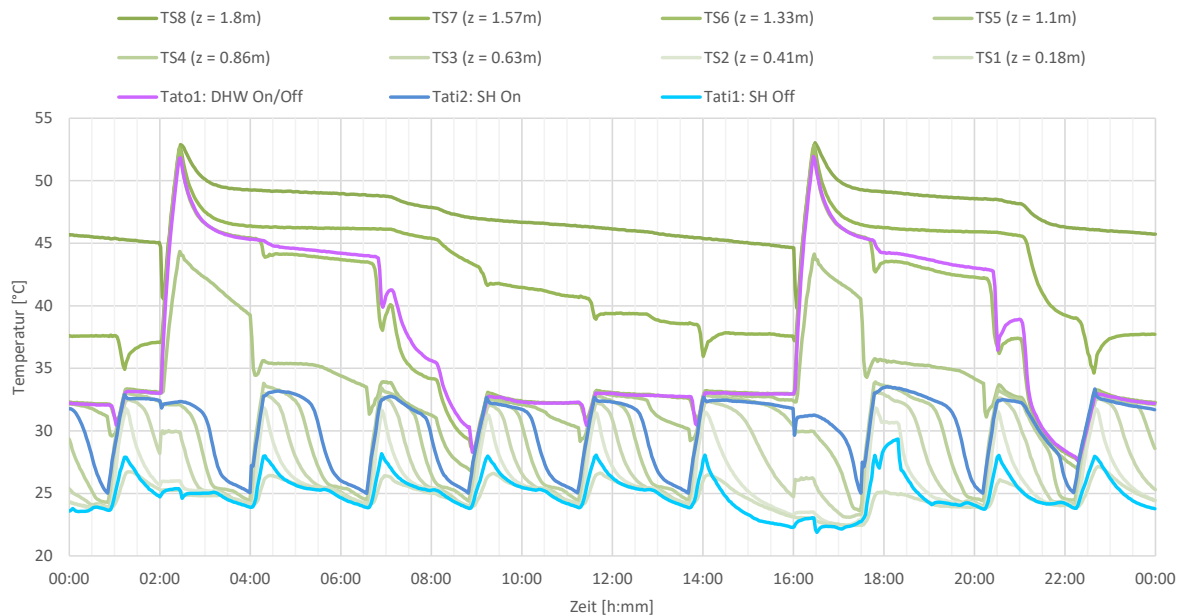


Abbildung 45: Temperaturverlauf während dem Test.

Der Speicher erreicht mit 80% Schichtungseffizienz auf Systemebene ein sehr gutes Resultat. Das Volumen des innenliegenden Speichers ist genügend gross dimensioniert um den, dem Test zugrunde liegenden, Tagesbedarf sicher mit ausreichend hoher Temperatur zu decken.

Voraussetzung dafür ist jedoch die Vorgabe von WW-Zeitfenstern. An der Sensorposition für die Regelung der WW-Nachladung sinkt die Temperatur deutlich früher, als ein tatsächlicher Bedarf zur Nachladung der WW-Zone besteht. Entsprechen würde ohne die Vorgabe von WW-Zeitfenstern die Nachladung jeweils verfrüht erfolgen, mit negativen Auswirkungen auf die gesamte Systemeffizienz.



## Resultate Speicher B

Die Energiebilanzen und die im Speichersystem produzierte Entropie als Mass für die auftretenden Mischungsprozesse sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 dargestellt. Die unterschiedliche Schichtungseffizienz zeigt sich in der gemessenen Entropieproduktion im System. Diese sollte für eine gute Schichtungseffizienz möglichst gering ausfallen.

Tabelle 18: Ergebnisse der Schichtungstests – Energiebilanz in **kWh**

	Test 1
Wärmepumpe (Wärme)	53.9
Wärmepumpe (Wärme, WW-Modus)	8.8
Raumheizung	42.5
Warmwasser (über 40 °C)	9.5
Warmwasser (unter 40 °C) <sup>(a)</sup>	0.0
Speicheränderung	0.1
Verluste	2.0

<sup>(a)</sup> Bei einer WW-Zapfung wird die Wärme erst dann als Nutzwärme definiert, wenn 40 °C erreicht sind.

Tabelle 19: Ergebnisse der Schichtungstests – Entropieproduktion im Speicher-System in **kJ/K**. Tiefe Werte bedeuten gute Schichtung und Exergieerhaltung

	Test 1
Im Speicher	9.2
In der Hydraulik	3.4
<b>Gesamt</b>	<b>12.6</b>

Die Schichtungseffizienz wurde berechnet, indem die gemessene Entropieproduktion verglichen wurde mit der Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Wärmepumpe immer mit Vorlauftemperaturen von 55 °C betrieben werden muss (worst case).

Tabelle 20: Schichtungseffizienz und Warmwasser-Verhältnis

Test	Test 1
<b>Schichtungseffizienz Speicher (%)</b>	<b>83.0</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.46
<b>Schichtungseffizienz System<sup>(1)</sup> (%)</b>	<b>76.7</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.45
<b>Warmwasser-Verhältnis (-)</b>	<b>0.9</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.77

<sup>(1)</sup> Die Schichtungseffizienz auf Systemebene ist massgebend für die Zulassung eines Kombispeichers zum Wärmepumpen-Systemmodul



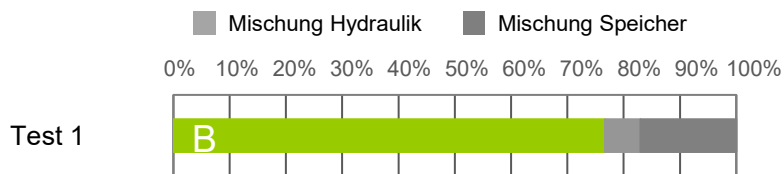


In Tabelle 21 sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges dargestellt.

*Tabelle 21: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen*

Test	Test 1
<b>Wärmelieferung</b>	
Wärmepumpe [°C]	35.6
<b>Wärmebezug</b>	
Raumheizung [°C]	32.2
Warmwasser [°C]	50.2

Abbildung 46 zeigt die Schichtungseffizienz (grün) des Systems. Dargestellt ist auch der Verlust an Schichtungseffizienz, welcher auf die Mischung im Speicher (helles grau) bzw. in der Hydraulik (dunkelgrau) zurückzuführen ist.



*Abbildung 46: Schichtungseffizienz und Schichtungsverluste des Systems*

In den folgenden Abbildungen sind Energie-Temperatur Diagramme der Tests gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus der Wärmepumpe und evtl. den Kollektoren sowie die vom System gelieferte Energie für Raumheizung und Warmwasser jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

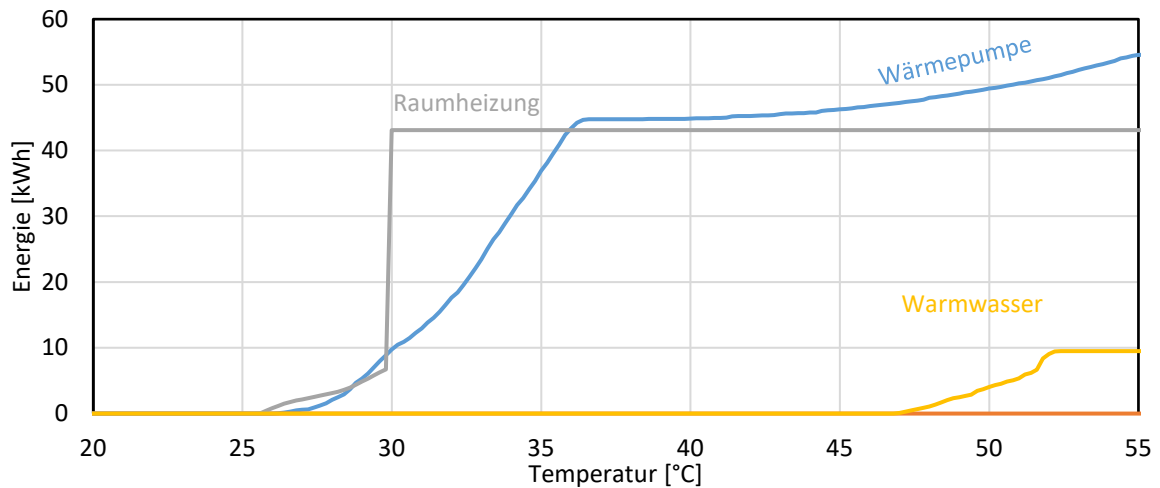


Abbildung 47: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 1.

Während dem Test wurden Anlegefühler an der Speicherwand angebracht. Die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 48 zu sehen.

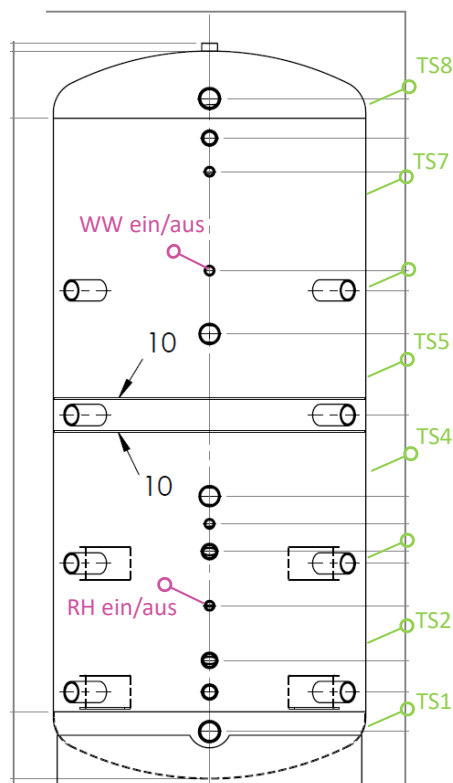


Abbildung 48: Position der Anlegefühler und der Sensoren zur Regelung.

In der folgenden Grafik ist der Verlauf der Speichertemperaturen im Test am letzten Testtag dargestellt. Zusätzlich sind die Temperaturfühler zur Regelung des Speichersystems eingezeichnet.

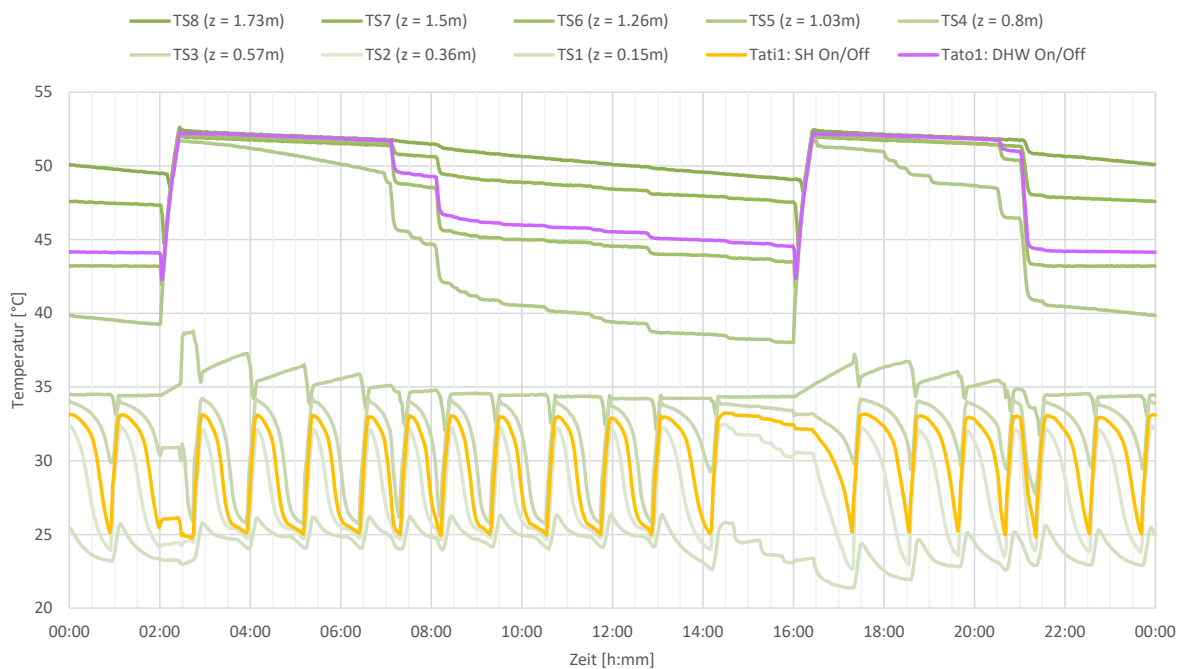


Abbildung 49: Temperaturverlauf während dem Test.

Der Speicher erreicht mit fast 77 % Schichtungseffizienz auf Systemebene ein gutes Resultat. Die Schichtungseffizienz auf Speicherebene betrug 83 %. Der grosse Unterschied erklärt sich über Mischungsprozesse in der Hydraulik.

Mit dem Konzept der Warmwassererwärmung mittels eines innenliegenden Wärmeübertragers wird zu Beginn eines Zapfvorgangs das Wasser ausgestossen, welches sich im Wärmeübertrager befindet. Im vorliegenden Fall sind dies 31 Liter. Allerdings ist nur der Teil des Wasser auf ausreichend hoher Temperatur, welcher sich im oberen, heissen Teil des Speichers befindet. Während des Zapfvorgangs nimmt dann das nachströmende Kaltwasser die Temperatur des umgebenden Wassers im Speicher auf. Mit den Randbedingungen aus dem Schichtungstest ist das Wasser im unteren Teil des Speichers für die Raumwärmeversorgung erwärmt. Wäre dies nicht der Fall, so würde die Übertragungsleistung des Wärmeübertragers nur im oberen Teil des Speichers vermutlich nicht ausreichen, um eine genügend hohe Schüttleistung zu gewährleisten. Entsprechend ist dieses Konzept idealerweise mit einer solarthermischen Anlage zu kombinieren um auch im Sommer (ohne Wärmebedarf für die Raumheizung) den unteren Bereich des Speichers warm zu halten.



## Resultate Speicher C

Die Energiebilanzen und die im Speichersystem produzierte Entropie als Mass für die auftretenden Mischungsprozesse sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 22: Ergebnisse der Schichtungstests – Energiebilanz in **kWh**

	Test 1	Test 2
Wärmepumpe (Wärme)	52.36	51.54
Wärmepumpe (Wärme, WW-Modus)	16.95	15.58
Raumheizung	42.37	41.36
Warmwasser (über 40 °C)	9.52	9.54
Warmwasser (unter 40 °C) <sup>(a)</sup>	0.07	0.09
Speicheränderung	0.48	0.93
Verluste	0.13	0.69

<sup>(a)</sup> Bei einer WW-Zapfung wird die Wärme erst dann als Nutzwärme definiert, wenn 40 °C erreicht sind.

Tabelle 23: Ergebnisse der Schichtungstests – Entropieproduktion im Speicher-System in **kJ/K**. Tiefe Werte bedeuten gute Schichtung und Exergieerhaltung

	Test 1	Test 2
Im Speicher	11.47	13.64
In der Hydraulik	2.23	1.58
<b>Gesamt</b>	<b>13.70</b>	<b>15.22</b>

Die Schichtungseffizienz wurde berechnet, indem die gemessene Entropieproduktion verglichen wurde mit der Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Wärmepumpe immer mit Vorlauftemperaturen von 55 °C betrieben werden muss (worst case).

Tabelle 24: Schichtungseffizienz und Warmwasser-Verhältnis

Test	Test 1	Test 2
<b>Schichtungseffizienz Speicher (%)</b>	<b>78.76</b>	<b>74.74</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.44	0.49
<b>Schichtungseffizienz System <sup>(1)</sup> (%)</b>	<b>74.64</b>	<b>71.81</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.30	0.44
<b>Warmwasser-Verhältnis (-)</b>	<b>1.78</b>	<b>1.63</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	2.72	0.80

<sup>(1)</sup> Die Schichtungseffizienz auf Systemebene ist massgebend für die Zulassung eines Kombispeichers zum Wärmepumpen-Systemmodul

In Tabelle 25 sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges dargestellt.



*Tabelle 25: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen*

Test	Test 1	Test 2
<b>Wärmelieferung</b>		
Wärmepumpe [°C]	36.0	37.0
<b>Wärmebezug</b>		
Raumheizung [°C]	31.9	31.2
Warmwasser [°C]	49.4	47.0

In den folgenden Abbildungen sind Energie-Temperatur Diagramme der Tests gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus der Wärmepumpe und evtl. den Kollektoren sowie die vom System gelieferte Energie für Raumheizung und Warmwasser jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

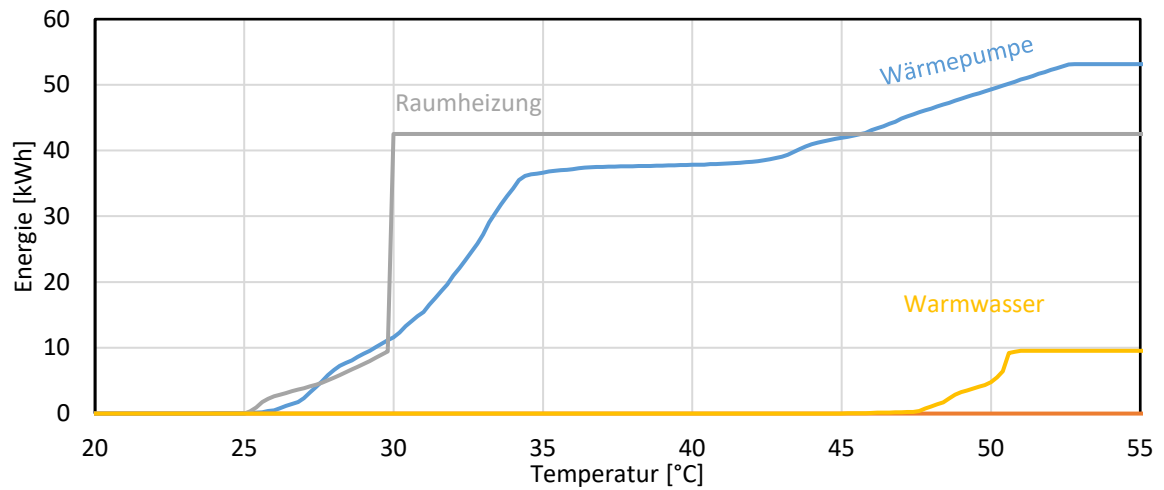


Abbildung 50: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 1 ohne Mischventil im WW-Ladekreis.

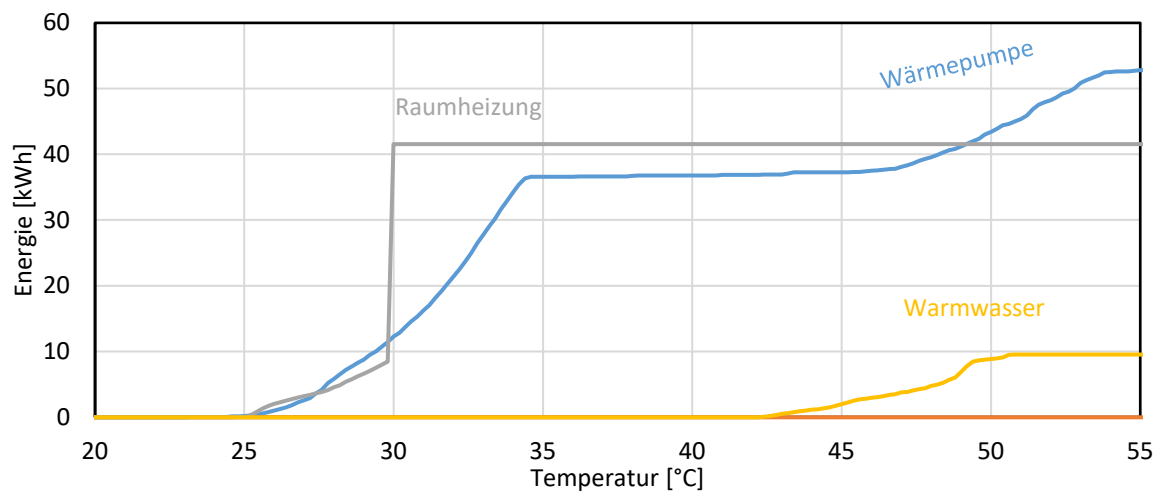


Abbildung 51: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 2 (mit Mischventil zur Temperaturhochhaltung im WW-Ladekreis).

Während des Tests wurden Anlegefühler an der Speicherwand angebracht. Die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 52 dargestellt.

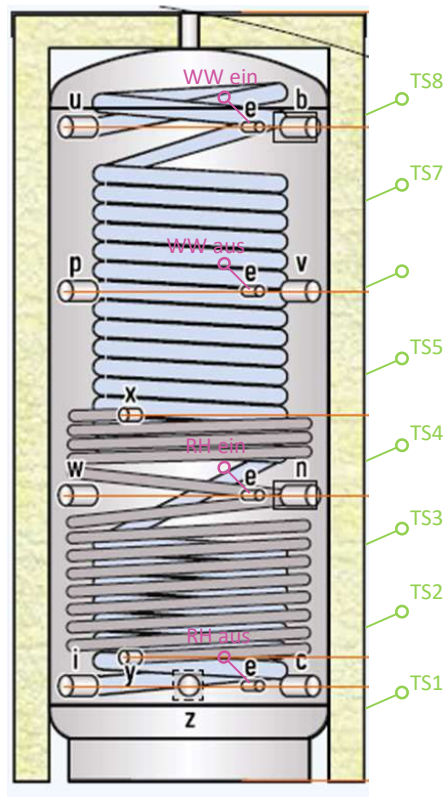


Abbildung 52: Speicher mit den Positionen der Sensoren zur Regelung und den Anlegefühlern an der Speicherwand (TS1 bis TS8).

In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf der Speichertemperaturen am letzten Testtag dargestellt.

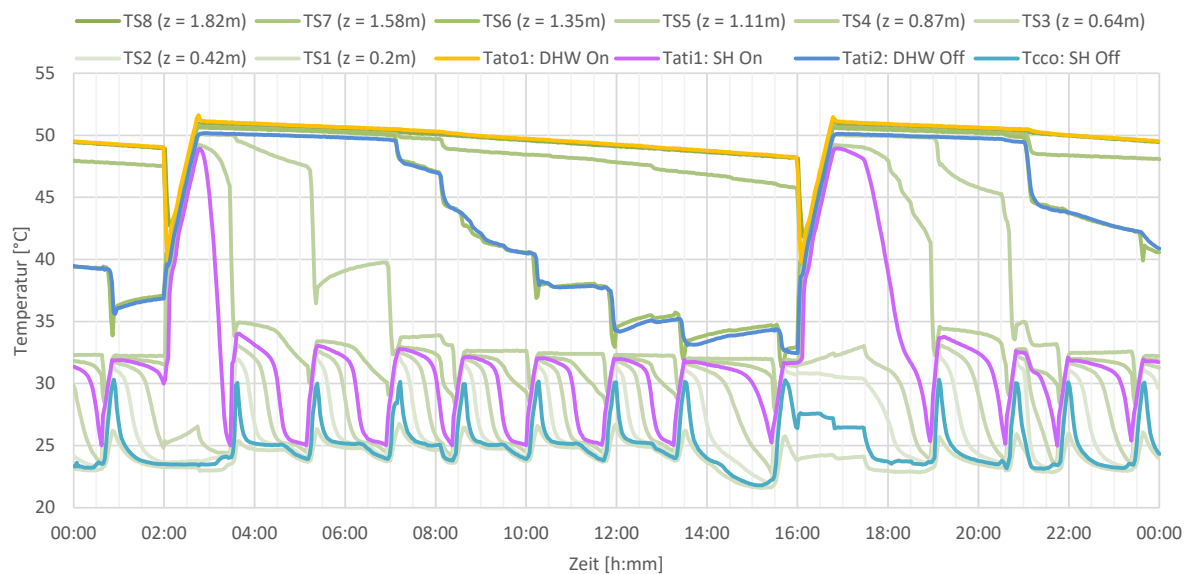




Abbildung 53: Temperaturverlauf während der Messung 1 (15 kW Wärmepumpe, mit Zeitfenster, ohne Mischung im Vorlauf der Wärmepumpe). Gezeigt werden neben den Anlegefühlern TS1 bis TS8 auch die Temperaturen zur Regelung der Wärmepumpe für Warmwasser (WW) und Raumheizung (SH).

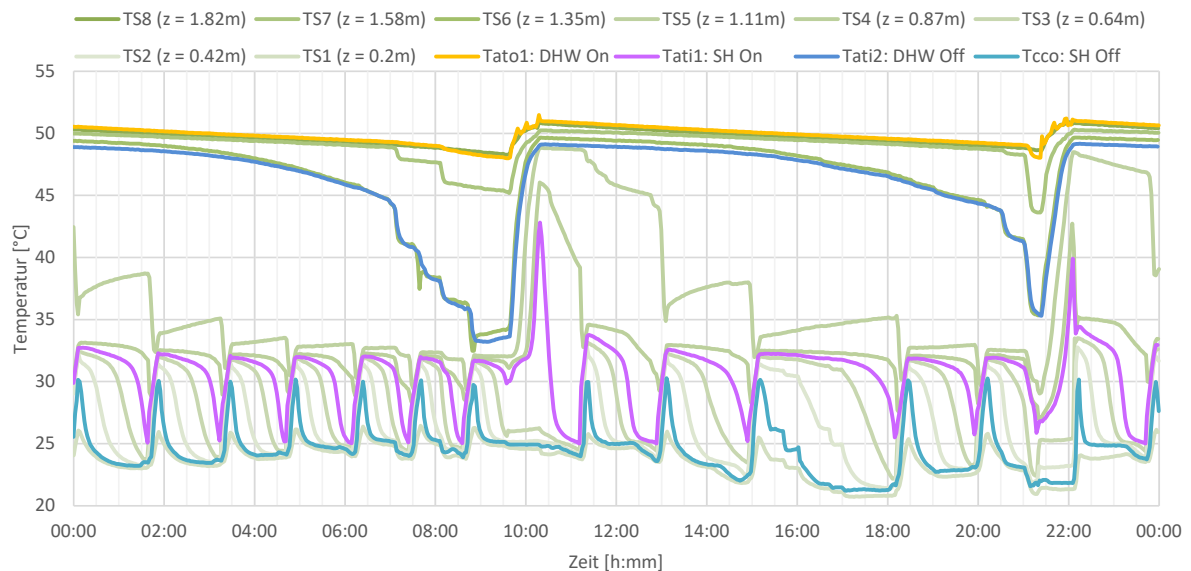


Abbildung 54: Temperaturverlauf während der Messung 2 (15 kW Wärmepumpe, ohne Zeitfenster, mit Mischung im Vorlauf der Wärmepumpe). Gezeigt werden neben den Anlegefühlern TS1 bis TS8 auch die Temperaturen zur Regelung der Wärmepumpe für Warmwasser (WW) und Raumheizung (SH).

Das thermostatische Mischventil im Vorlauf der Wärmepumpe war auf eine Austrittstemperatur von 50 °C in den Speicher gestellt. Die Einstellung des Mischventils konnte im Labor aufgrund der verschiedenen Messstellen im Test durchgeführt werden. Im Feld gestaltet sich die Einstellung wahrscheinlich als schwierig.

Im Betrieb zeigt sich, dass sich ein oszillierendes Verhalten ergibt. Die Rücklauftemperatur zur Wärmepumpe schwankt für ca. 30 min um ca. 45 °C, was zu einer Vorlauftemperatur von 50 °C führt, allerdings mit Ausschlägen von  $\pm 2$  K.



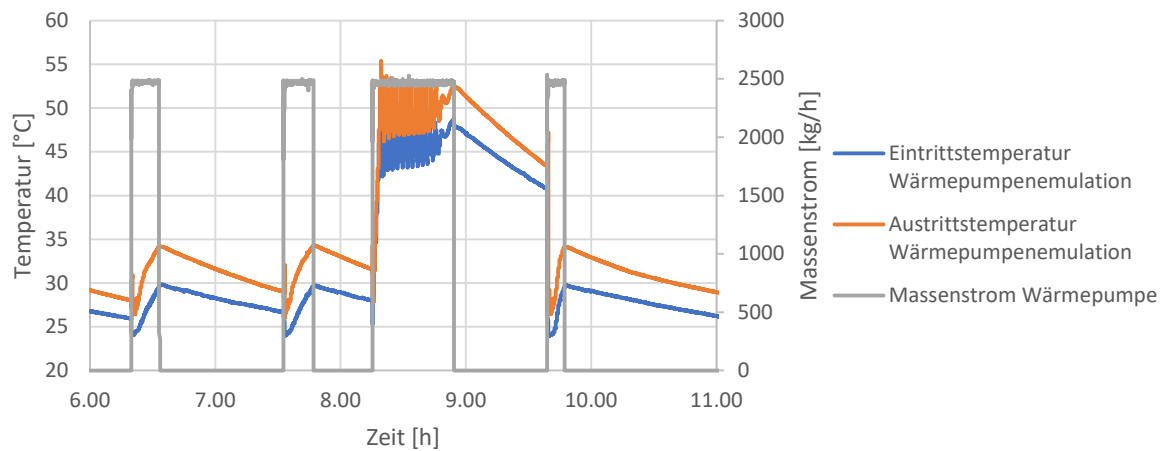


Abbildung 55: Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmepumpenemulation während einer WW-Beladung.

Das Mischventil gewährleistet eine hohe Temperatur im oberen Teil des Speichers, ohne Temperatureinbruch während der Beladung. Allerdings führt die zusätzliche Mischung erwartungsgemäss auch zu einer Reduktion der Schichtungseffizienz. Diese betrug in Test 1 auf Systemebene knapp 75 %. Mit Mischventil im WW-Ladekreis betrug die Schichtungseffizienz noch 72 %.



## Resultate Speicher D

Die Energiebilanzen und die im Speichersystem produzierte Entropie als Mass für die auftretenden Mischungsprozesse sind in **Error! Reference source not found.** und Tabelle 26 dargestellt. Die Schichtungseffizienz zeigt sich in der gemessenen Entropieproduktion im System. Diese sollte für eine gute Schichtungseffizienz möglichst gering ausfallen.

Tabelle 26: Ergebnisse der Schichtungstests – Energiebilanz in **kWh**

	Test 1	Test 2	Test 3
Wärmepumpe (Wärme)	20.32	20.46	20.00
Wärmepumpe (Wärme, WW-Modus)	20.32	20.46	20.00
Raumheizung	--	--	--
Warmwasser (über 40 °C)	19.07	19.07	19.07
Warmwasser (unter 40 °C) <sup>(a)</sup>	0.00	0.00	0.00
Speicheränderung	0.00	0.03	0.01
Verluste	1.25	1.38	0.93

<sup>(a)</sup> Bei einer WW-Zapfung wird die Wärme erst dann als Nutzwärme definiert, wenn 40 °C erreicht sind.

Tabelle 27: Ergebnisse der Schichtungstests – Entropieproduktion im Speicher-System in **kJ/K**. Tiefe Werte bedeuten gute Schichtung und Exergieerhaltung

	Test 1	Test 2	Test 3
Im Speicher	7.18	7.46	7.25
In der Hydraulik	0.00	0.00	0.00
<b>Gesamt</b>	<b>7.18</b>	<b>7.46</b>	<b>7.25</b>

Die Schichtungseffizienz wurde berechnet, indem die gemessene Entropieproduktion verglichen wurde mit der Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Wärmepumpe immer mit der maximalen Vorlauftemperatur betrieben werden muss (worst case). Ein gültiges Ergebnis liegt nur dann vor, wenn die Komfortbedingungen des Tests erfüllt wurden.

Tabelle 28: Schichtungseffizienz und Warmwasser-Verhältnis

Test	Test 1	Test 2 <sup>(2)</sup>	
<b>Komfortbedingungen erfüllt</b>	<b>Nein</b>	<b>Nein</b>	<b>Nein</b>
<b>Schichtungseffizienz Speicher (%)</b>	<b>71.19</b>	<b>69.74</b>	<b>70.56</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.32	0.40	0.11
<b>Schichtungseffizienz System<sup>(1)</sup> (%)</b>	<b>71.19</b>	<b>69.74</b>	<b>70.56</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.32	0.40	0.11
<b>Warmwasser-Verhältnis (-)</b>	<b>1.06</b>	<b>1.07</b>	<b>1.05</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.08	0.15	0.05

<sup>(1)</sup> Die Schichtungseffizienz auf Systemebene ist massgebend für die Zulassung eines Kombispeichers zum Wärmepumpen-Systemmodul

<sup>(2)</sup> Die Resultate aus Test 2 sind keine gültigen Resultate, da die in der Prüfvorschrift vorgesehene Begrenzung der maximalen Beladetemperatur auf 60 °C nicht aktiv war.



In Tabelle 29 sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges dargestellt.

*Tabelle 29: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen*

	Test 1	Test 2	Test 3
<b>Wärmelieferung</b>			
Wärmepumpe [°C]	42.8	42.9	43.0
<b>Wärmebezug</b>			
Raumheizung [°C]	--	--	--
Warmwasser [°C]	52.0	51.3	52.7

In den folgenden Abbildungen sind Energie-Temperatur Diagramme der Tests gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus der Wärmepumpe und evtl. den Kollektoren sowie die vom System gelieferte Energie für Raumheizung und Warmwasser jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

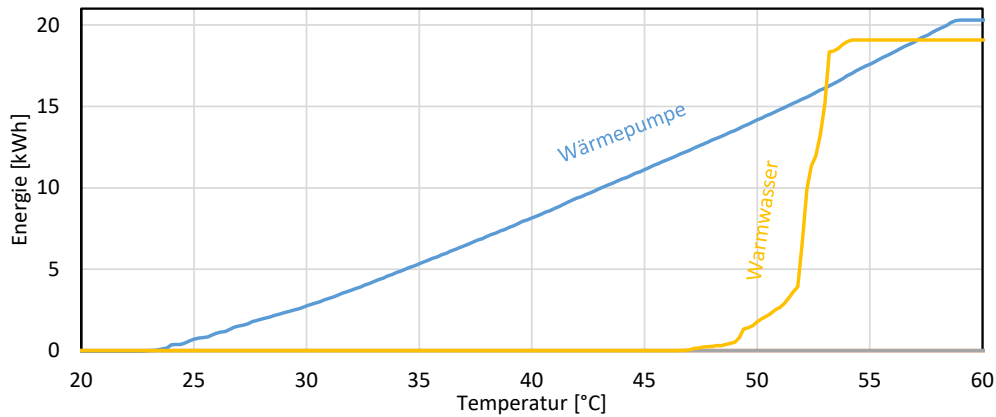


Abbildung 56: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 1. An der Wärmelieferung für WW ist zu sehen, dass etwa 2 kWh unterhalb von 50 °C geliefert wurden

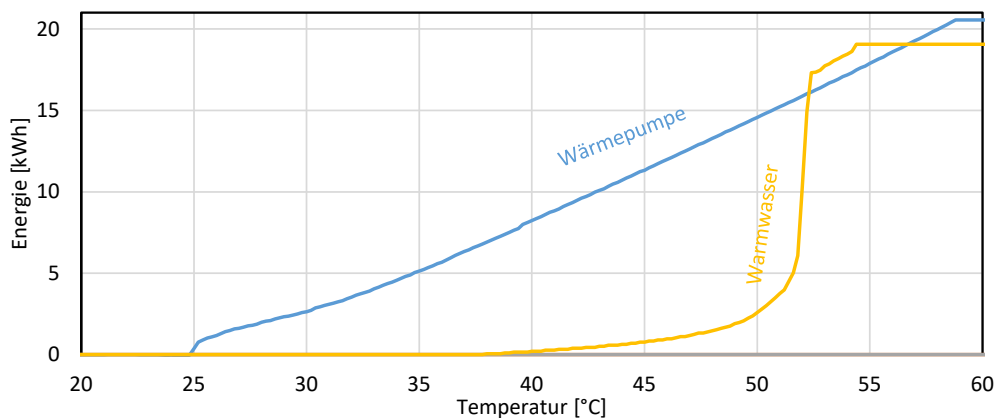


Abbildung 57: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 2. An der Wärmelieferung für WW ist zu sehen, dass etwa 3 kWh unterhalb von 50 °C geliefert wurden, wobei die tiefste Temperatur am Austritt aus dem Speicher weniger als 40 °C betrug

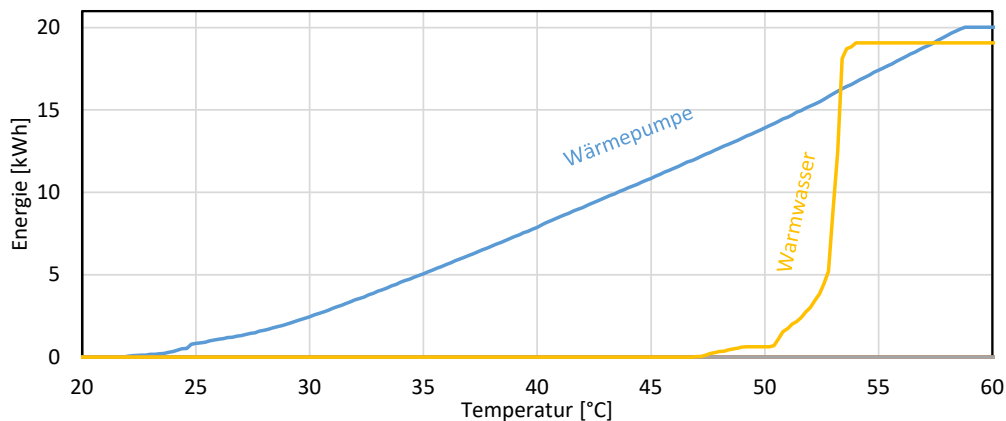


Abbildung 58: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 3. An der Wärmelieferung für WW ist zu sehen, dass etwa 0.5 kWh unterhalb von 50 °C geliefert wurden, wobei die tiefste Temperatur am Austritt aus dem Speicher ca. 48 °C betrug



Während des Tests wurden Anlegefühler an der Speicherwand angebracht. Die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 59 dargestellt.

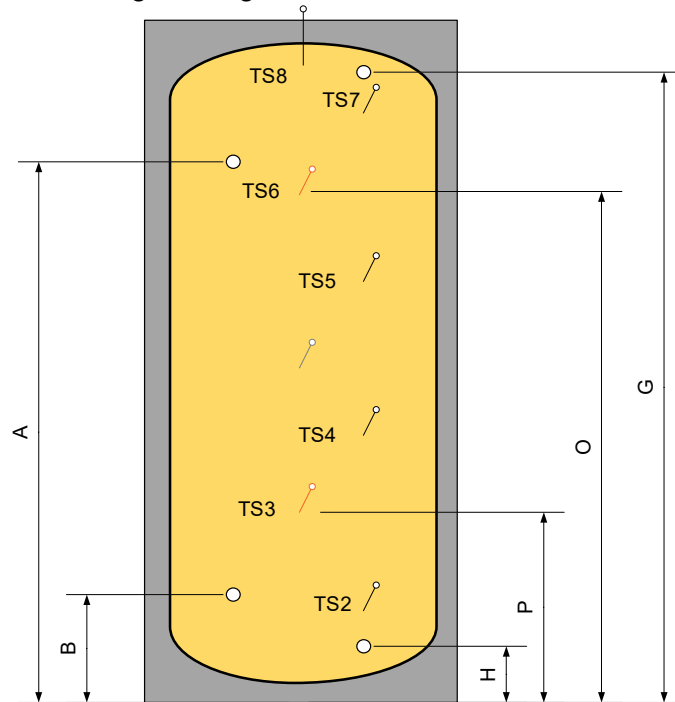


Abbildung 59: Grafische Darstellung der Positionen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler

In der folgenden Grafik ist der Verlauf der Speichertemperaturen im Test am letzten Testtag dargestellt. Die Temperaturen an den Sensoren zur Regelung der Nachheizung sind in blau (= WW ein) und rot (= WW aus) eingezeichnet.

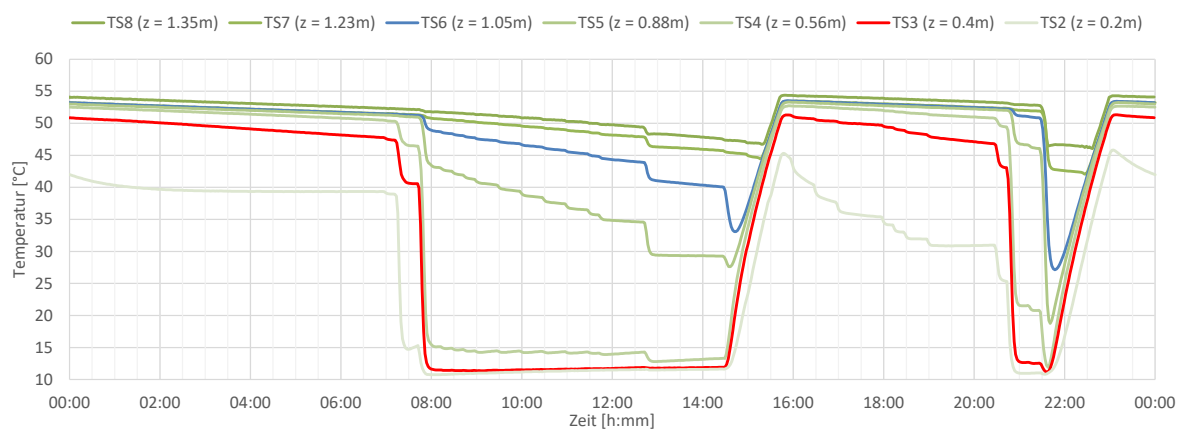


Abbildung 60: Temperaturverlauf während der Messung 1 (8 kW Wärmepumpe, ohne Zeitfenster). TS6 = Einschaltbedingung WW-Ladung; TS3 = Ausschaltbedingung WW-Ladung

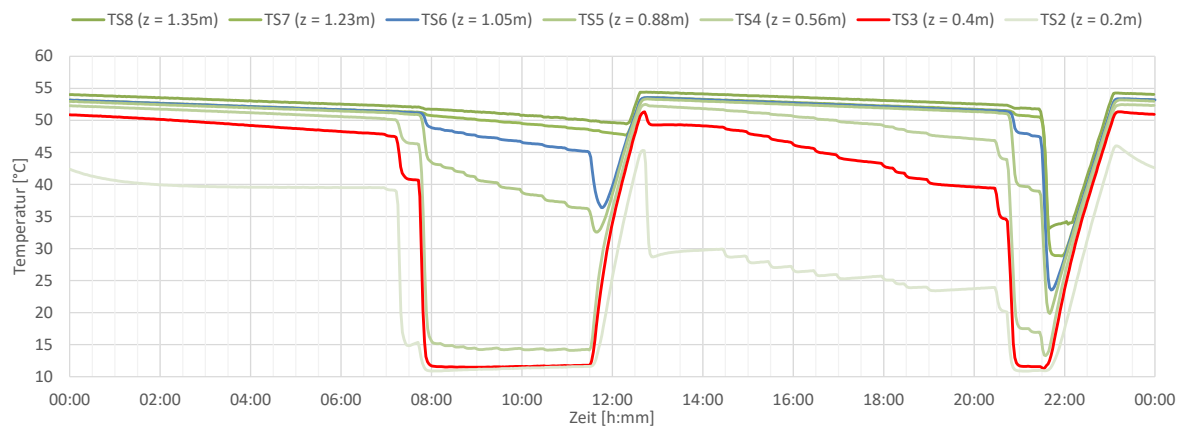


Abbildung 61: Temperaturverlauf während der Messung 2 (8 kW Wärmepumpe, ohne Zeitfenster). TS6 = Einschaltbedingung WW-Ladung; TS3 = Ausschaltbedingung WW-Ladung

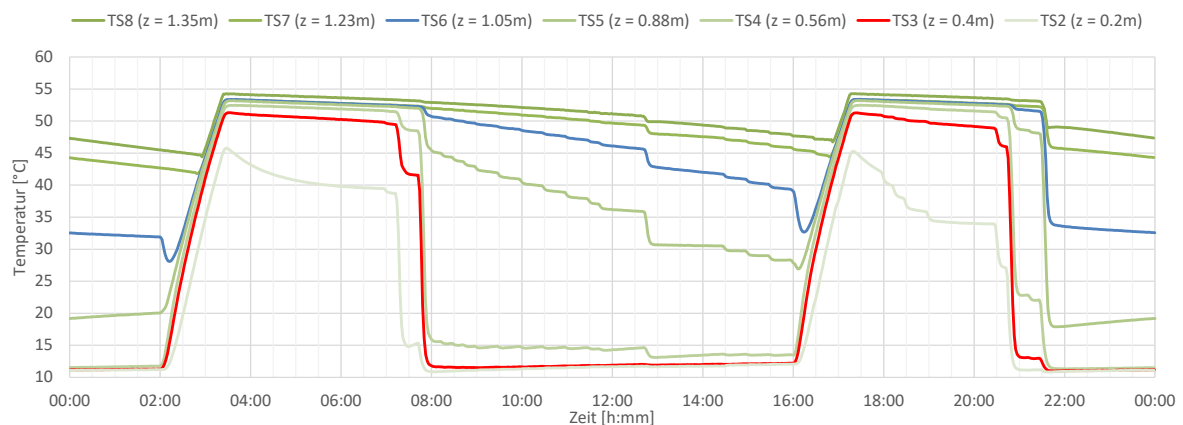


Abbildung 62: Temperaturverlauf während der Messung 3 (8 kW Wärmepumpe, mit Zeitfenster). TS6 = Einschaltbedingung WW-Ladung; TS3 = Ausschaltbedingung WW-Ladung

Die Temperatur im Speicher oben fällt unter 50 °C zu einem Zeitpunkt, an dem der Sensor zur Regelung der Nachladung (Einschaltbedingung) noch deutlich über 45 °C anzeigt. Deshalb wurde in Test 1 die geforderte Austrittstemperatur aus dem Speicher von 50°C nicht erreicht.

Aus den Messdaten aus Test 1 wurde deshalb die Temperatur bestimmt, welche noch eine Austrittstemperatur von 50 °C gewährleistet. Die neue Einschalttemperatur von 45 °C wurde im Test 2 vorgegeben. Damit ergibt sich allerdings die Situation, dass am Abend eine Nachladung des Speichers durch eine grössere Zapfung ausgelöst wird und dann die Be- und Entladung gleichzeitig stattfindet. In diesem Zustand fällt die Speichertemperatur im Speicher oben auf unter 35 °C ab.

In Test 3 wurden deshalb Zeitfenster vorgegeben, während denen die WW-Bereitung möglich ist. Mit dem gewählten Profil XL ist in diesem Fall die entnommene Wärmemenge zu gross, um bis zum zweiten Zeitfenster des Tages (ab 16:00 Uhr) genügend hohe Temperaturen zu gewährleisten. Um dennoch genügend WW zur Verfügung zu stellen könnte die Beladetemperatur erhöht werden. Dies ist aber mit gängigen Wärmepumpen, welche am Austritt auf 60 °C limitiert sind, nicht möglich.



Der Kaltwassereintritt in den Speicher unten erfolgt über eine Schichtleitkrempe. Die Messungen zeigen, dass auf diese Weise ein deutlich ausgeprägter Thermoklin durch das eintretende Kaltwasser ausgebildet wird. Das heisst, es entsteht eine Zone im Speicher unten mit sehr kalten Temperaturen und eine scharfe Trennung zu den oberen, wärmeren Schichten im Speicher. Diese Trennung ist als sehr positiv zu werten.



## Resultate Speicher E

Die Energiebilanzen und die im Speichersystem produzierte Entropie als Mass für die auftretenden Mischungsprozesse sind in Tabelle 30 und Tabelle 31 dargestellt.

*Tabelle 30: Ergebnisse der Schichtungstests – Energiebilanz in kWh*

	Test 1
Wärmepumpe (Wärme)	53.21
Wärmepumpe (Wärme, WW-Modus)	11.85
Raumheizung	42.54
Warmwasser (über 40 °C)	10.12
Warmwasser (unter 40 °C) <sup>(a)</sup>	0.66
Speicheränderung	0.04
Verluste	0.52

<sup>(a)</sup> Bei einer WW-Zapfung wird die Wärme erst dann als Nutzwärme definiert, wenn 40 °C erreicht sind.

*Tabelle 31: Ergebnisse der Schichtungstests – Entropieproduktion im Speicher-System in kJ/K. Tiefe Werte bedeuten gute Schichtung und Exergieerhaltung*

	Test 1
Im Speicher	10.02
In der Hydraulik	0.88
<b>Gesamt</b>	<b>10.89</b>

Die Schichtungseffizienz wurde berechnet, indem die gemessene Entropieproduktion verglichen wurde mit der Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Wärmepumpe immer mit Vorlauftemperaturen von 55 °C betrieben werden muss (worst case).

*Tabelle 32: Schichtungseffizienz und Warmwasser-Verhältnis*

Test	Test 1
<b>Komfortbedingungen erfüllt</b>	<b>Ja</b>
<b>Schichtungseffizienz Speicher (%)</b>	<b>81.45</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.17
<b>Schichtungseffizienz System<sup>(1)</sup> (%)</b>	<b>79.83</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.17
<b>Warmwasser-Verhältnis (-)</b>	<b>1.17</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.51

<sup>(1)</sup> Die Schichtungseffizienz auf Systemebene ist massgebend für die Zulassung eines Kombispeichers zum Wärmepumpen-Systemmodul

In Tabelle 33 sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges dargestellt.





Tabelle 33: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen

Test	Test 1
<b>Wärmelieferung</b>	
Wärmepumpe [°C]	34.4
<b>Wärmebezug</b>	
Raumheizung [°C]	30.8
Warmwasser [°C]	44.9

In den folgenden Abbildungen sind Energie-Temperatur Diagramme der Tests gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus der Wärmepumpe und evtl. den Kollektoren sowie die vom System gelieferte Energie für Raumheizung und Warmwasser jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

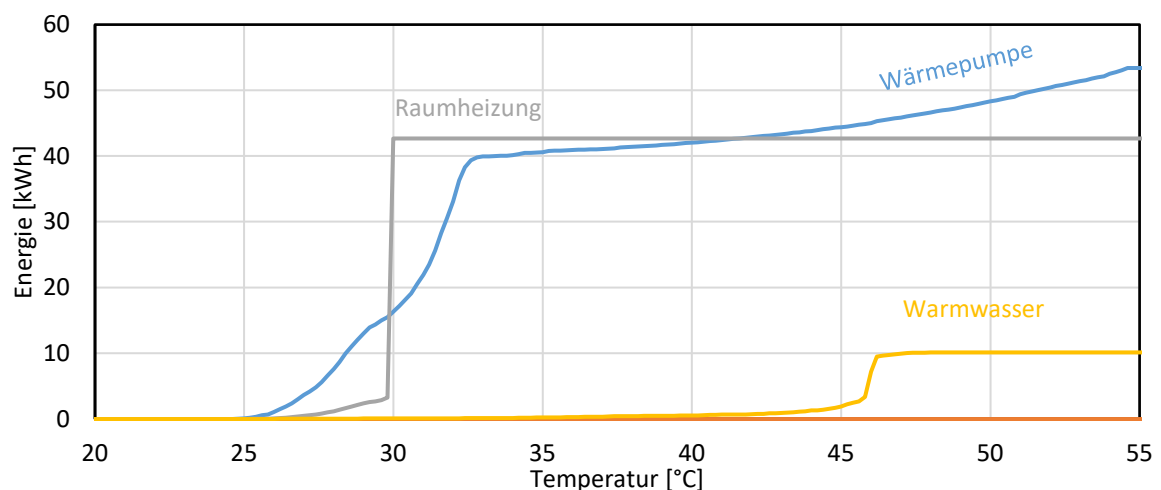


Abbildung 63: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 1

Während des Tests wurden Anlegefühler an der Speicherwand angebracht. Die Positionen der Sensoren sind in Abbildung 64 dargestellt.

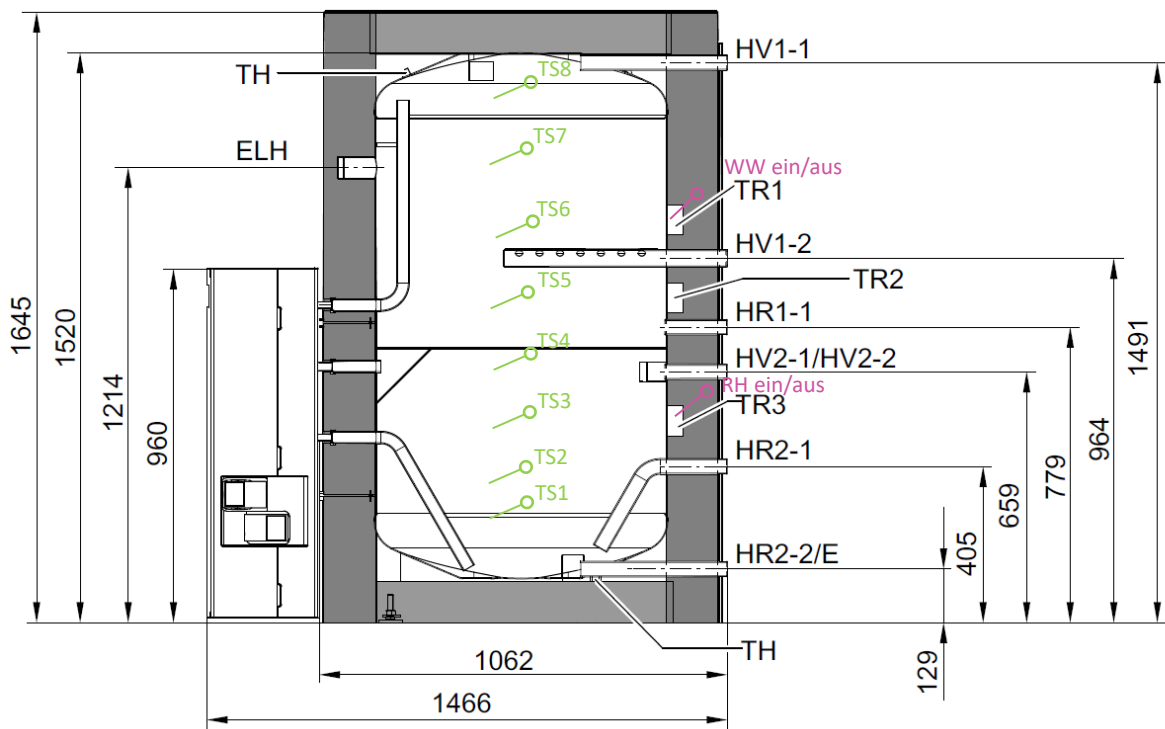


Abbildung 64: Speicher mit den Positionen der Sensoren zur Regelung und den Anlegefühlern an der Speicherwand (TS1 bis TS8)

In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf der Speichertemperaturen am letzten Testtag dargestellt.

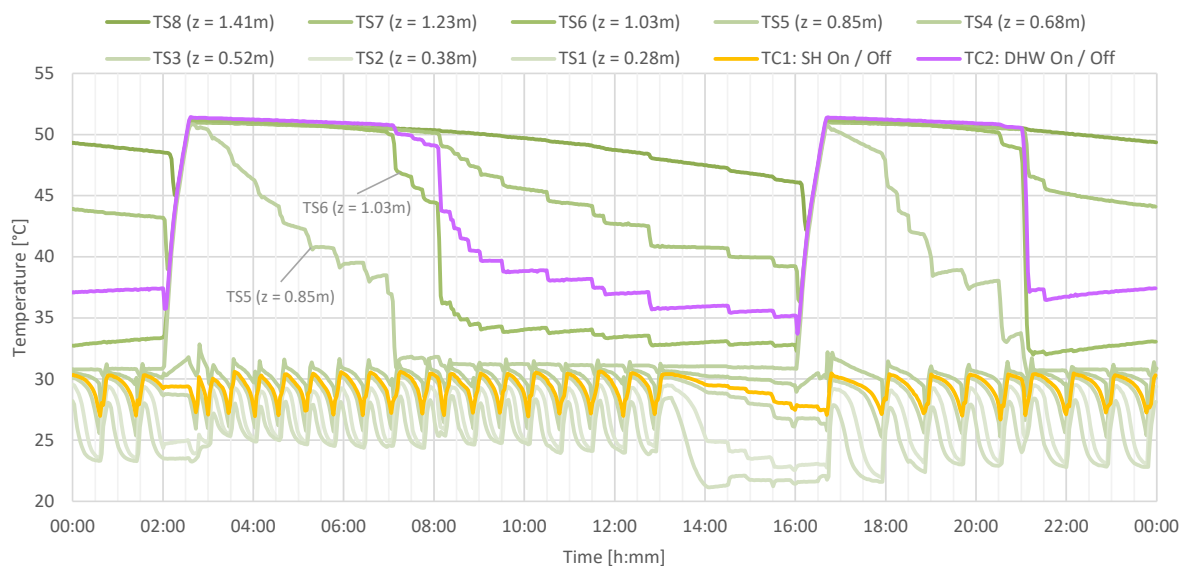


Abbildung 65: Temperaturverlauf während der Messung. Gezeigt werden neben den Anlegefühlern TS1 bis TS8 auch die Temperaturen zur Regelung der Wärmepumpe für Warmwasser (DHW On/Off) und Raumheizung (SH On/Off)

Die Warmwasserzone ist durch eine Trennplatte von der unteren Raumheizungszone getrennt. Der Sensor TS5 befindet sich oberhalb der Platte. Das Diagramm mit der Temperaturkurve zeigt, dass während der Warmwasserladung die Temperaturen oberhalb der



Trennplatte ansteigen, während in der SH-Zone kein Einfluss durch die Warmwasserladung zu beobachten ist. Nach der Ladung sinkt jedoch die Temperatur an der Position TS5 ohne Warmwasserverbrauch (zu beobachten zwischen 3:00 und 7:00 Uhr). Es ist also eine leichte - aber nicht störende - Durchmischung im Bereich des Lochblechs zu beobachten.

Bei der Warmwasserentnahme speist das Frischwassermodule kaltes Wasser in den unteren Teil des Speichers ein und entnimmt gleichzeitig warmes Wasser von oben. Dadurch entsteht eine Kolbenströmung durch den gesamten Speicher, die nicht zuletzt durch das Lochblech ermöglicht wird.

Während des Ladevorgangs der Brauchwasserzone sinkt die Temperatur im oberen Teil des Speichers aufgrund der Vermischung mit dem eintretenden Wasserstrom im Speicher. Zu Beginn des Ladevorgangs ist die Temperatur des eintretenden Wassers etwa gleich hoch wie bei Position TS6, die Vermischung ist bis TS7 bemerkbar.

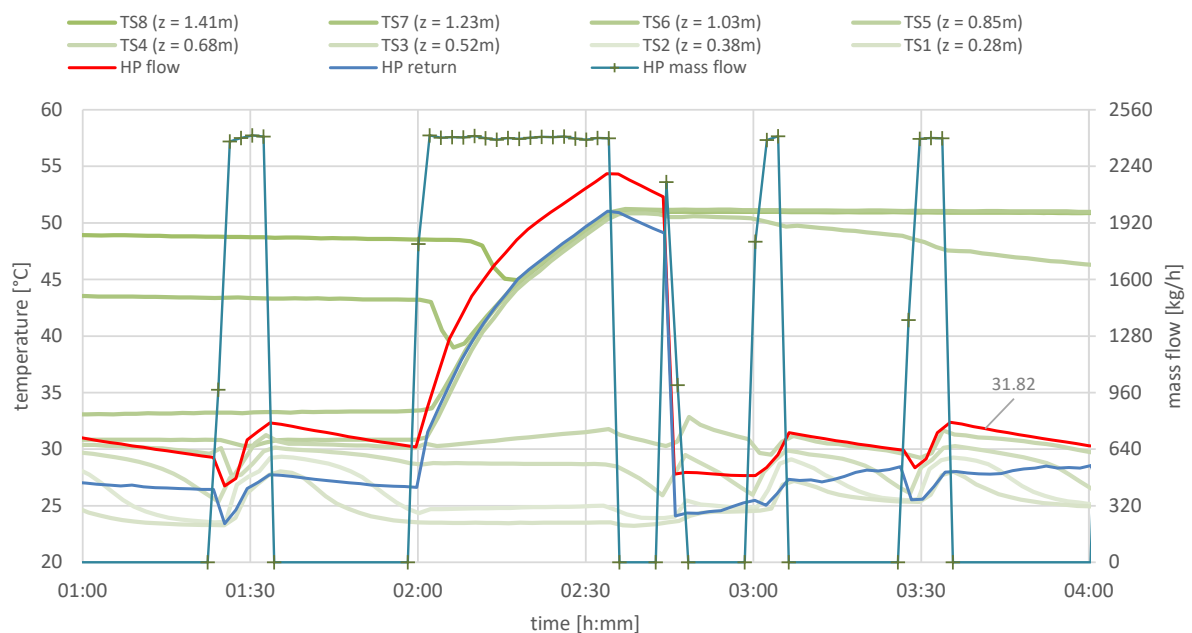


Abbildung 66: Ausschnitt der Messung: Warmwasser-Ladevorgang mit Start um 02:00 Uhr

Insgesamt wird mit 79.8 % auf Systemebene ein gutes Testresultat (B) erreicht. Die Einstufung in die Effizienzklasse A erfolgt ab 80.0 %.



## Resultate Speicher F

Die Energiebilanzen und die im Speichersystem produzierte Entropie als Mass für die auftretenden Mischungsprozesse sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellt. Die Schichtungseffizienz zeigt sich in der gemessenen Entropieproduktion im System. Diese sollte für eine gute Schichtungseffizienz möglichst gering ausfallen.

Tabelle 34: Ergebnisse der Schichtungstests – Energiebilanz in kWh

	Test 1	Test 2	Test 3
Wärmepumpe (Wärme)	25.4	25.5	
Wärmepumpe (Wärme, WW-Modus)	25.4	25.5	
Raumheizung	-	-	
Warmwasser (über 40 °C)	24.5	24.5	
Warmwasser (unter 40 °C) <sup>(a)</sup>	0.0	0.0	
Speicheränderung	0.3	0.4	
Verluste	0.9	1.1	

<sup>(a)</sup> Bei einer WW-Zapfung wird die Wärme erst dann als Nutzwärme definiert, wenn 40 °C erreicht sind.

Tabelle 35: Ergebnisse der Schichtungstests – Entropieproduktion im Speicher-System in kJ/K. Tiefe Werte bedeuten gute Schichtung und Exergieerhaltung

	Test 1	Test 2	Test 3
Im Speicher	9.6	8.9	
In der Hydraulik	0.0	0.0	
<b>Gesamt</b>	<b>9.6</b>	<b>8.9</b>	

Die Schichtungseffizienz wurde berechnet, indem die gemessene Entropieproduktion verglichen wurde mit der Entropieproduktion eines vollständig durchmischten Speichers, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Wärmepumpe immer mit der maximalen Vorlauftemperatur betrieben werden muss (worst case). Ein gültiges Ergebnis liegt nur dann vor, wenn die Komfortbedingungen des Tests erfüllt wurden.

Tabelle 36: Schichtungseffizienz und Warmwasser-Verhältnis

Test	Test 1	Test 2 <sup>(2)</sup>
<b>Komfortbedingungen erfüllt</b>	<b>Ja</b>	<b>Ja</b>
<b>Schichtungseffizienz Speicher (%)</b>	<b>69.6</b>	<b>[71.7] <sup>(2)</sup></b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.9	1.1
<b>Schichtungseffizienz System <sup>(1)</sup> (%)</b>	<b>69.6</b>	<b>[71.7] <sup>(2)</sup></b>
Zweifache Standardabweichung (%)	0.9	1.1
<b>Warmwasser-Verhältnis (-)</b>	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>
Zweifache Standardabweichung (%)	1.1	2.1

<sup>(1)</sup> Die Schichtungseffizienz auf Systemebene ist massgebend für die Zulassung eines Kombispeichers zum Wärmepumpen-Systemmodul

<sup>(2)</sup> Die Resultate aus Test 2 sind keine gültigen Resultate, da die in der Prüfvorschrift vorgesehene Begrenzung der maximalen Beladetemperatur auf 60 °C nicht aktiv war.



In Tabelle 37 sind die nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Wärmelieferung und des Wärmebezuges dargestellt.

Tabelle 37: Nach Leistung gewichtete Vorlauftemperaturen

	Test 1	Test 2	Test 3
<b>Wärmelieferung</b>			
Wärmepumpe [°C]	43.2	43.7	
<b>Wärmebezug</b>			
Raumheizung [°C]	-	-	
Warmwasser [°C]	51.9	54.5	

Tabelle 38 zeigt die maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe. Die Emulation der Wärmepumpe ist auf 60 °C begrenzt. Für den Test 2 wurde diese Begrenzung aufgehoben, um die maximale Vorlauftemperatur bei 55 °C am WW-Sensor zu ermitteln.

Tabelle 38: Maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe

	Test 1	Test 2	Test 3
Max. VL-Temp. der WP [°C]	60.0	61.8	

In den folgenden Abbildungen sind Energie-Temperatur Diagramme der Tests gezeigt. Dazu wurde die an das System gelieferte Energie aus der Wärmepumpe und evtl. den Kollektoren sowie die vom System gelieferte Energie für Raumheizung und Warmwasser jeweils nach der Vorlauftemperatur geordnet.

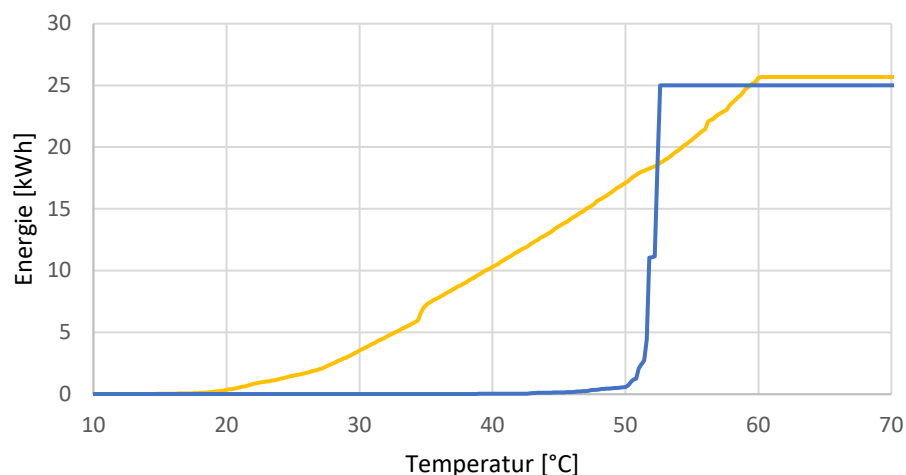


Abbildung 67: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 1. An der Wärmelieferung für WW ist zu sehen, dass nahezu die gesamte Energie bei etwa 52 °C geliefert wurde

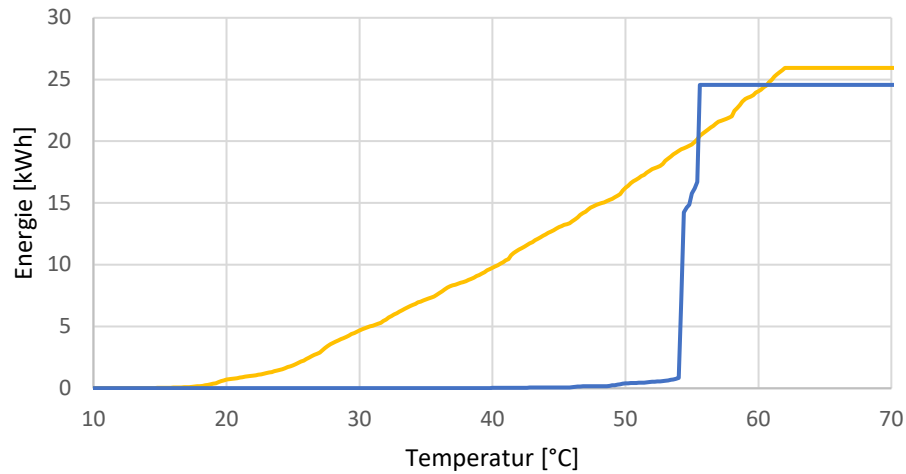


Abbildung 68: Energie-Temperatur Diagramm aus Test 2. Die Wärmelieferung erfolgte zum Teil bei über 60 °C. Die gelieferte Wärme (Warmwasser) wurde auf höherem Temperatur-Niveau als in Test 1 geliefert

In der folgenden Grafik ist der Verlauf der Speichertemperaturen im Test am letzten Testtag dargestellt. Es handelt sich bei den Messungen um Pt100 Temperaturfühler, die in Fühlerhülsen im Speicher platziert waren. Die Positionen der Temperaturfühler sind in Abbildung 69 dargestellt.

Die Temperaturen an den Sensoren zur Regelung der Nachheizung sind in violett (= DHW On) und gelb (= DHW Off) eingezeichnet.

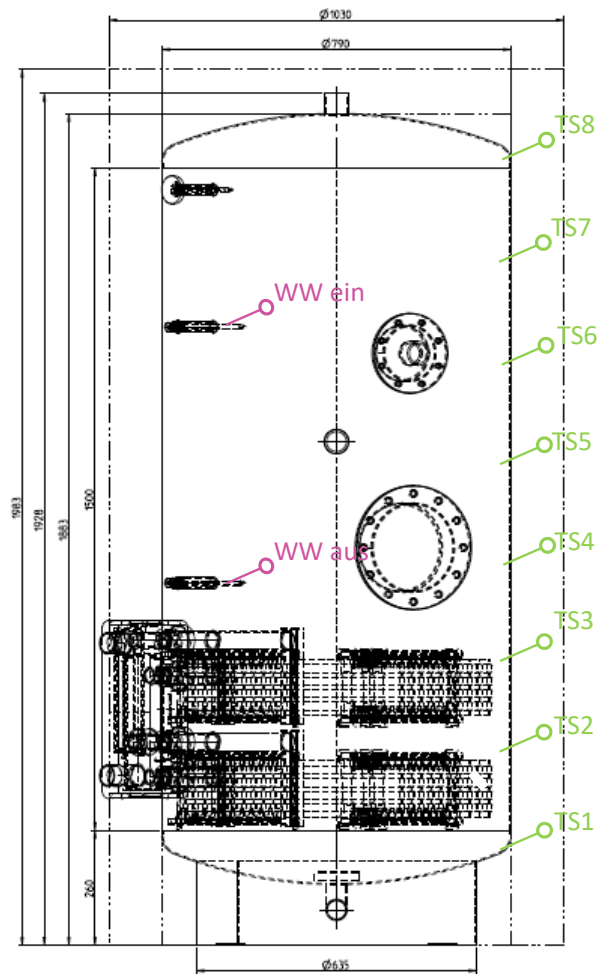


Abbildung 69: Grafische Darstellung der Positionen der Speicheranschlüsse und Temperaturfühler

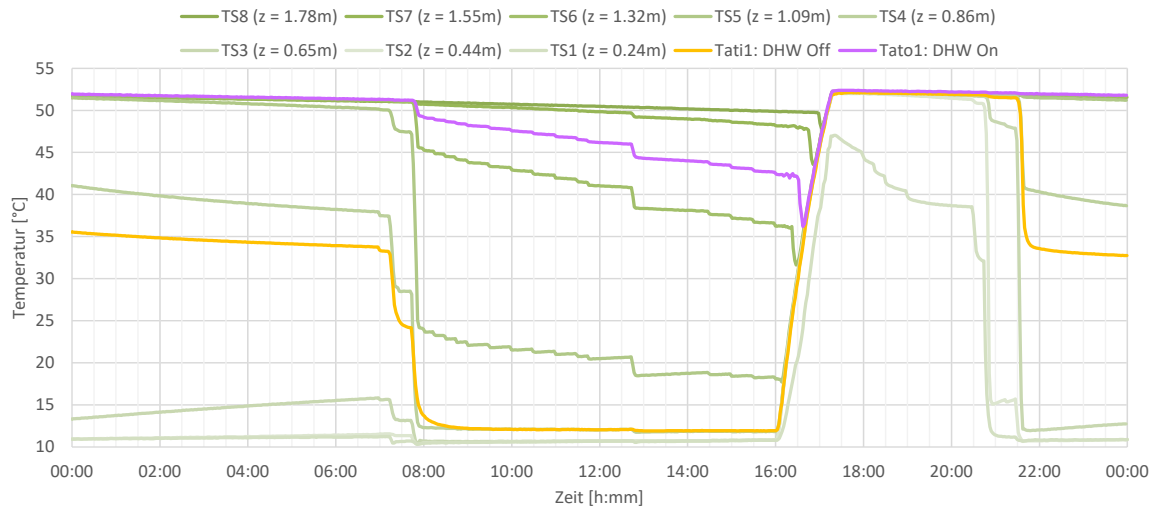


Abbildung 70: Temperaturverlauf während der Messung 1 (20 kW Wärmepumpe, mit Zeitfenster). TS6 = Einschaltbedingung WW-Ladung; TS3 = Ausschaltbedingung WW-Ladung

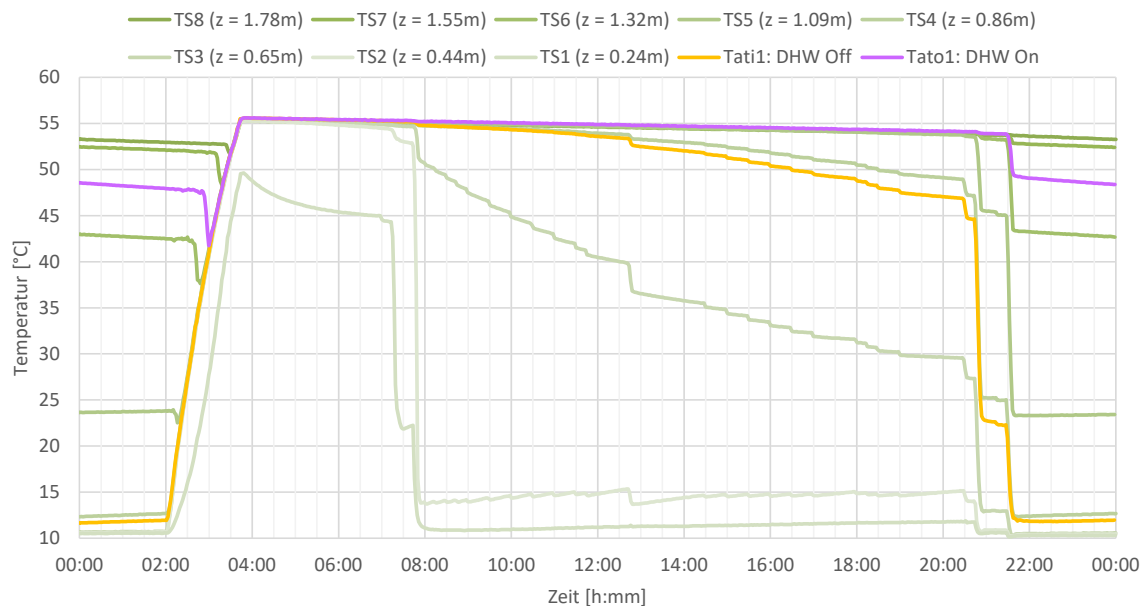


Abbildung 71: Temperaturverlauf während der Messung 2 (15 kW Wärmepumpe, mit Zeitfenster). TS6 = Einschaltbedingung WW-Ladung; TS3 = Ausschaltbedingung WW-Ladung

Aus den Messungen fällt positiv auf, dass sich beim Warmwasserbezug um 07:00 Uhr sofort eine sehr scharf abgegrenzte Kaltwasserzone im unteren Teil des Speichers ausbildet. Nach dem Ende der Zapfung beträgt die Temperturdifferenz zw. den Sensoren TS2 und TS3 mehr als 35 K.

Die Speicherladung erfolgte in beiden Messungen jeweils nur ein Mal pro 24 h, entweder zum Zeitfenster mit Start um 02:00 Uhr oder um 16:00 Uhr. In welchem der Zeitfenster die Beladung





stattfindet, ist dabei Zufall und hängt nur von der Konditionierung des Systems ab. Nach Start der Messung gibt es keine Verschiebung mehr, die 24 h Zyklen sind jeweils an aufeinanderfolgenden Tagen identisch.

Während der Beladung fällt auf, dass der untere Bereich zuerst aufgewärmt wird, ohne eine Beeinflussung der oberen Zonen. Das erwärmte Volumen vergrößert sich nach und nach, wobei ein Einfluss auf die darüberliegenden Bereiche erst dann zu beobachten ist, wenn der Thermoklin diese praktisch erreicht hat.



## Annex C Grafiken: Kurvenfitting

Speicher F

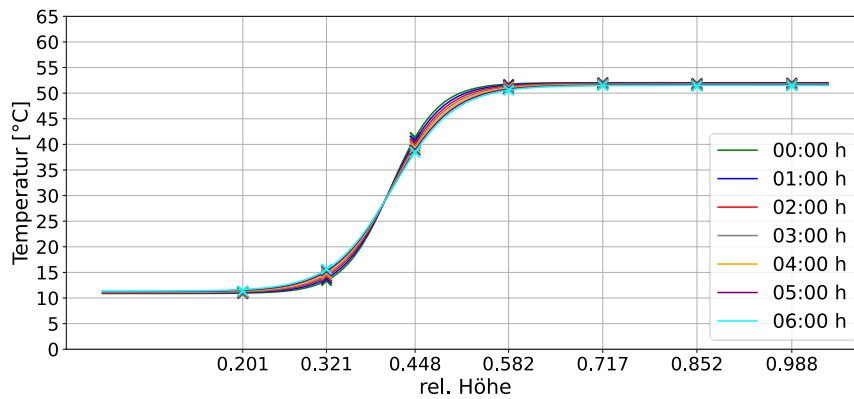


Abbildung 72 Standby über Nacht, Speicher F

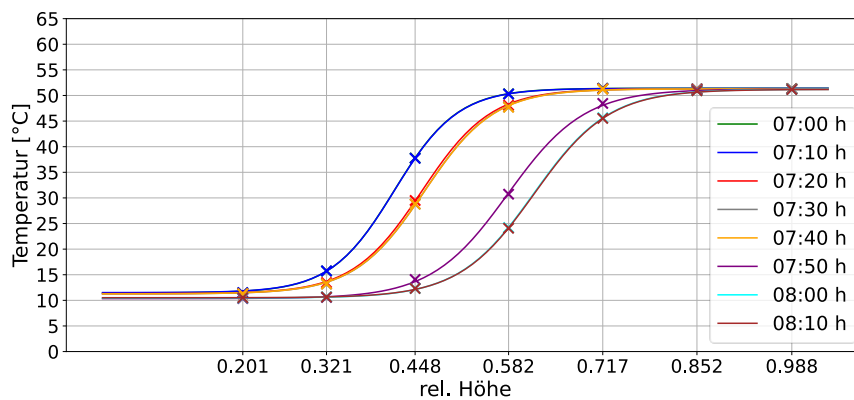


Abbildung 73 Entladung am Morgen, Speicher F

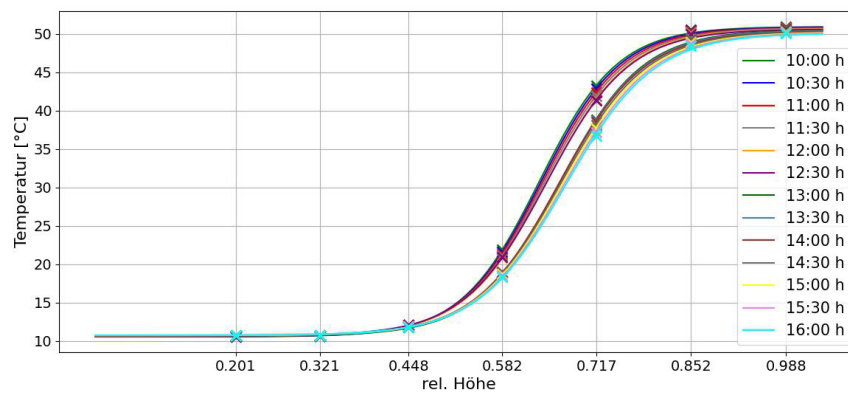


Abbildung 74 Standby und kleinere WW-Bezüge am Tag, Speicher F

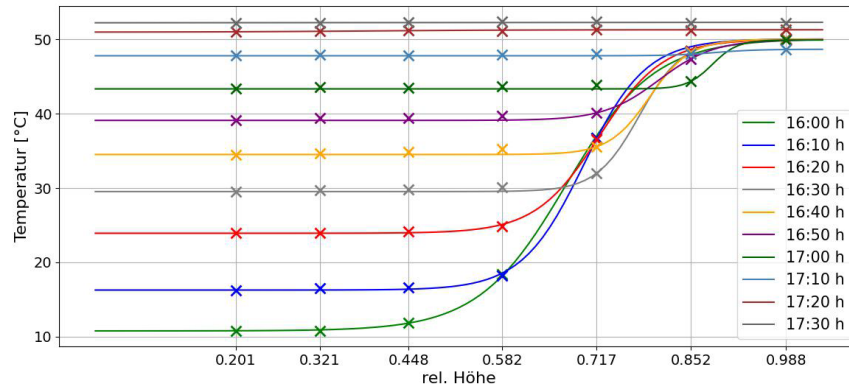


Abbildung 75 Beladung, Speicher F

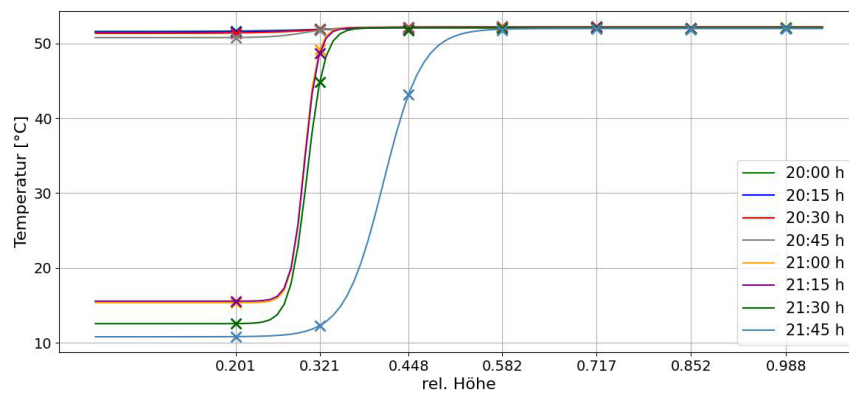


Abbildung 76 Entladung am Abend, Speicher F



## Speicher G

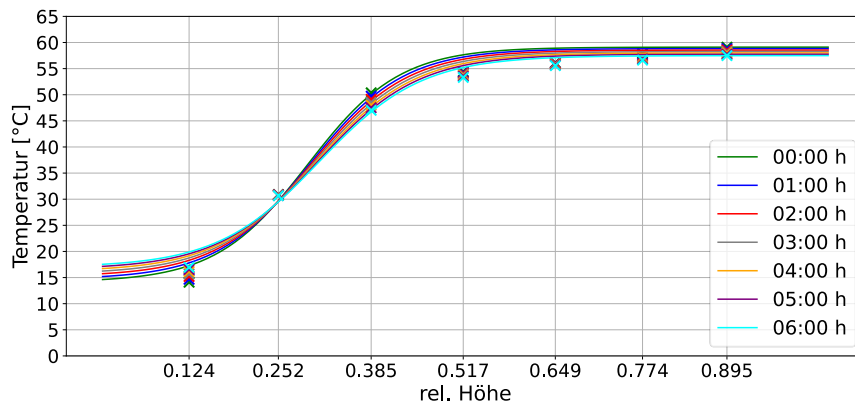


Abbildung 77 Standby über Nacht, Speicher G

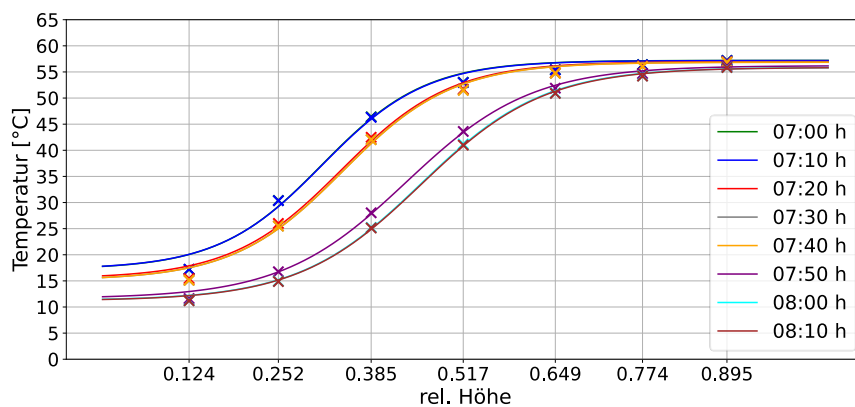


Abbildung 78 Entladung am Morgen, Speicher G

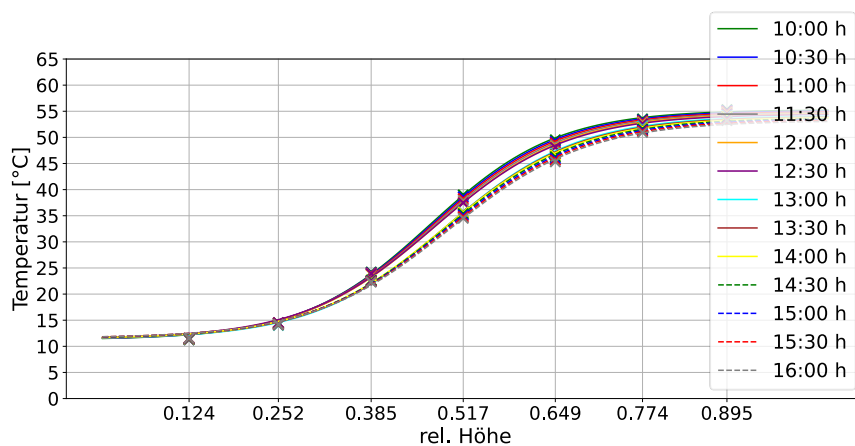


Abbildung 79 Standby und kleinere WW-Bezüge am Tag, Speicher G

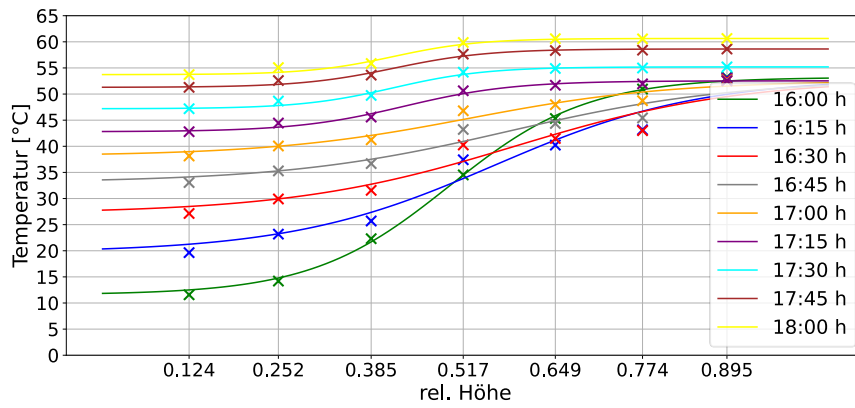


Abbildung 80 Beladung, Speicher G

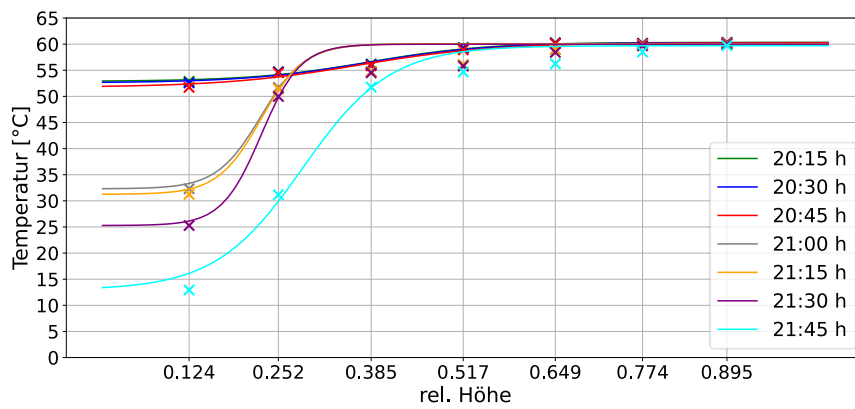


Abbildung 81 Entladung am Abend, Speicher G



## Speicher H

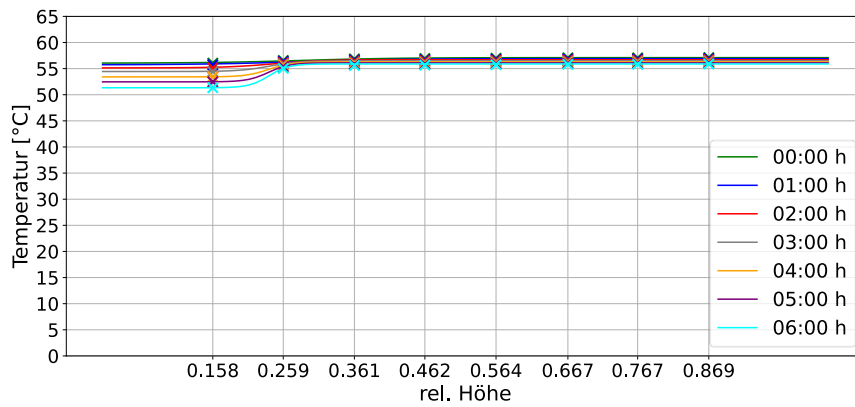


Abbildung 82 Standby über Nacht Speicher H

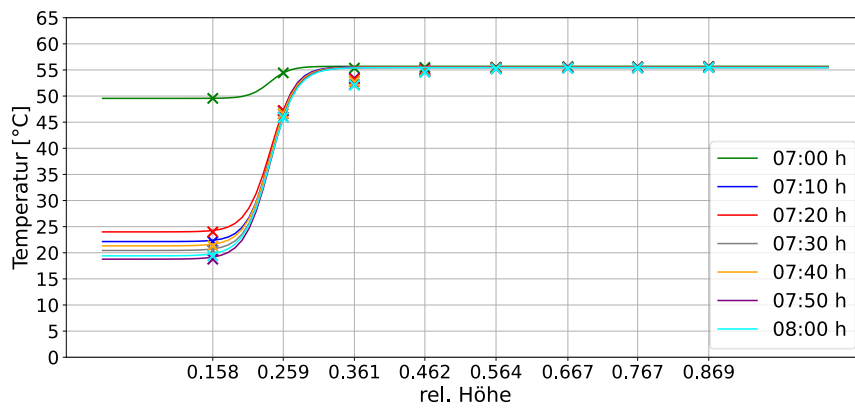


Abbildung 83 Entladung am Morgen, Speicher H

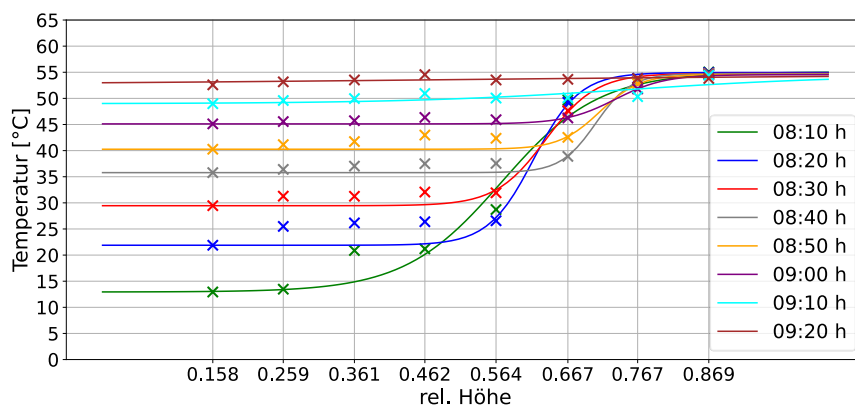


Abbildung 84 Beladung am Morgen, Speicher H

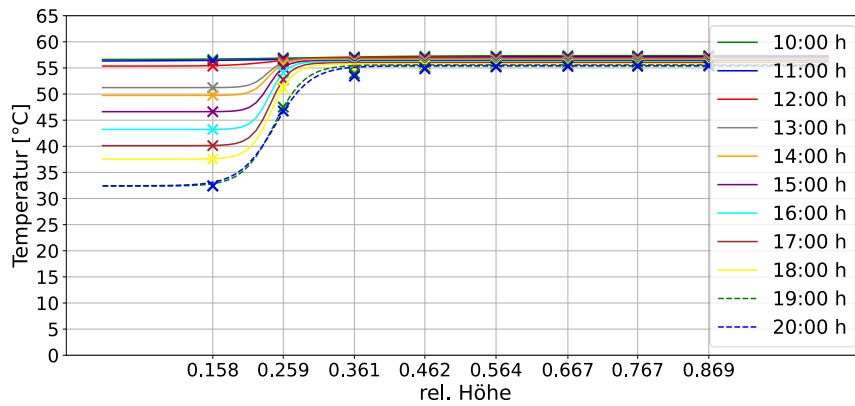


Abbildung 85 Standby und kleinere WW-Bezüge am Tag, Speicher H

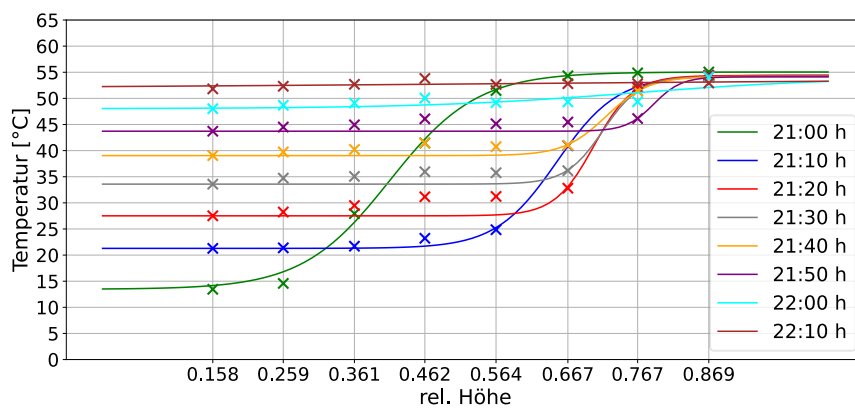
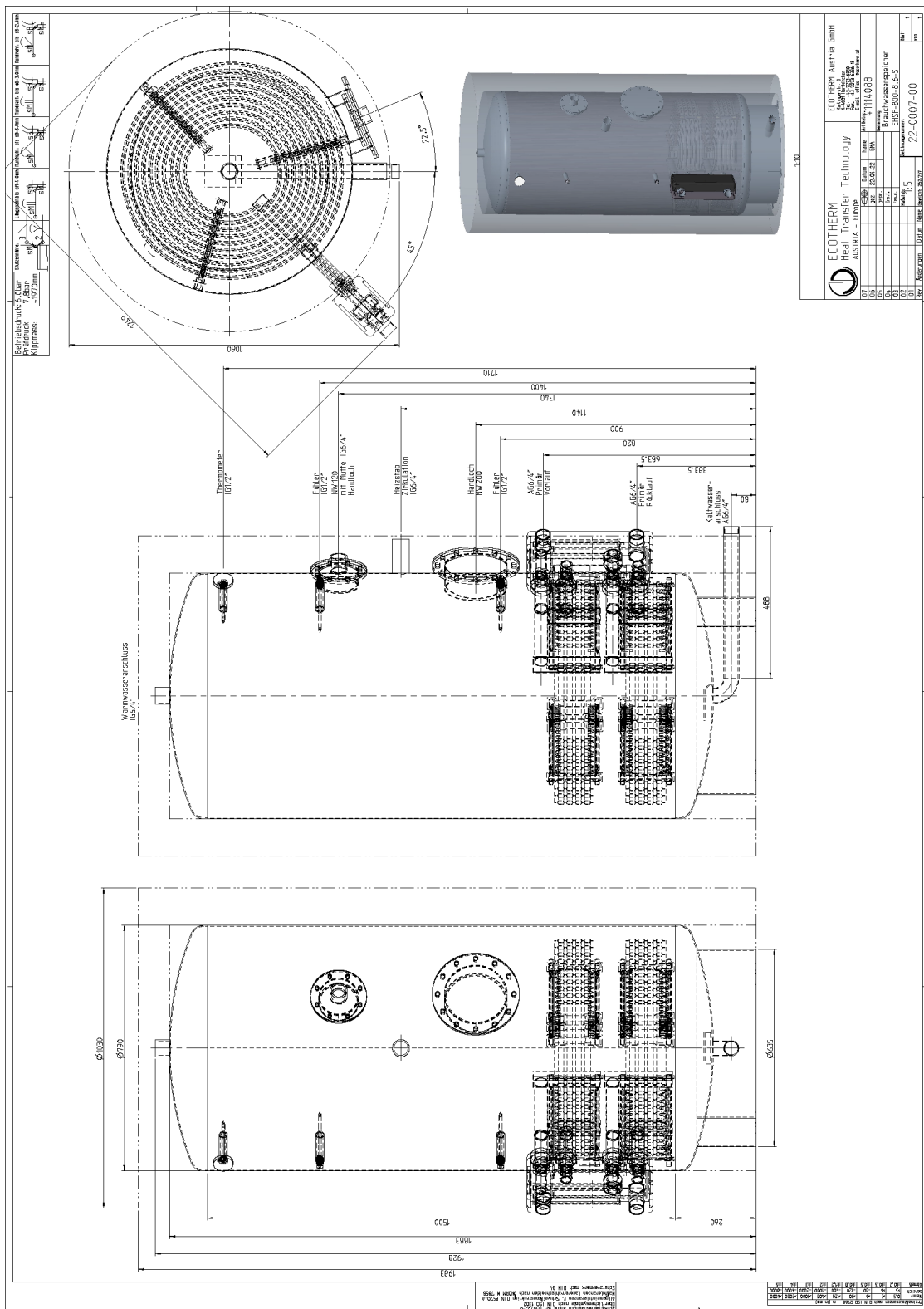


Abbildung 86 Beladung am Abend, Speicher H

## Annex D Speicherzeichnungen

Im Folgenden werden Zeichnungen derjenigen Speicher gezeigt, die für die Modellierung der Speichertemperaturen mittels einer tanh-Funktion verwendet wurden.



96/98





Verwendung Usage Utilisation Use	Dimension Dimension Dimension Dimensione	800	1000	1250	1500	1750	2000
A Höhe Height   Hauteur   Altezza	Ø - mm	1990	2190	2240	2120	2150	2350
B	Ø - mm	1940	2140	2190	2070	2100	2300
C Ø	Ø - mm	990	990	1100	1200	1300	1300
D	Ø - mm	790	790	900	1000	1100	1100
E Kaltwasser Cold water   Eau froide   Acqua fredda	I - mm	175	175	200	220	235	235
	G* - mm	2*	2*	2*	2*	2*	2*
F Warmwasser Hot water   Eau chaude   Acqua calda	I - mm	1765	1965	1990	1750	1730	1930
	G* - mm	2*	2*	2*	2*	2*	2*
G Zirkulation Circulation   Circolazione	I - mm	1400	1600	1600	1450	1400	1650
	G* - mm	1*	1*	1*	1*	1*	1*
H Flansch unten Flange below   Bide du bas	I - mm	350	350	400	470	480	480
	Ø - mm	290/220	290/220	290/220	290/220	290/220	290/220
I Flansch oben Flange above   Bide du haut	I - mm	800	930	900	850	870	1000
	Ø - mm	180/120	180/120	180/120	180/120	180/120	180/120
J VL Glattrohrwärmtauscher unten Bottom heating coil   Echangeurs de chaleur bas   Serpentino inferiore	I - mm	675	855	790	780	780	900
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"
K RL Glattrohrwärmtauscher unten Bottom heating coil   Echangeurs de chaleur bas   Serpentino inferiore	I - mm	275	275	320	360	360	360
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"
L VL VL Glattrohrwärmtauscher oben Top heating coil   Echangeurs de chaleur haut Serpentino superiore	I - mm	1620	1855	1870	1600	1590	1790
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"
M RL VL Glattrohrwärmtauscher oben Top heating coil   Echangeurs de chaleur haut Serpentino superiore	I - mm	900	1000	1020	910	940	1090
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"
N Thermometer Thermometer   Termometro	I - mm	1650	1850	1900	1750	1750	1950
	G* - mm	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
O Füllnülse Sensor sleeve   Manchon de sonde	I - mm	1940	2140	2190	2070	2100	2300
	G* - mm	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
P Füller Sensor   Sonde   Sensor	I - mm	540	580	660	590	600	600
	G* - mm	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
Q Magnesiumanode Magnesium anode   Anode de magnésium	I - mm	1940	2140	2190	2070	2100	2300
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"
R Magnesiumanode Magnesium anode   Anode de magnésium	I - mm	570	610	670	1080	1110	730
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"
S Anschluss oben Connection top   Lien ci-dessus	I - mm	1940	2140	2190	2070	2100	2300
	G* - mm	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"	1 1/4"

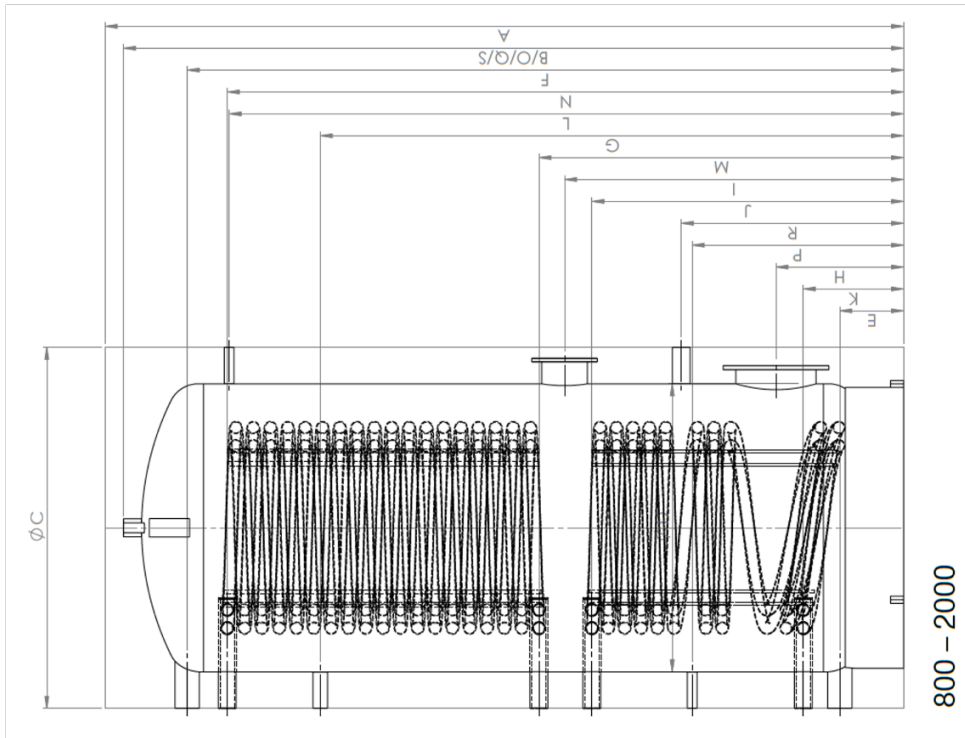


Abbildung 88 Zeichnung Speicher G

