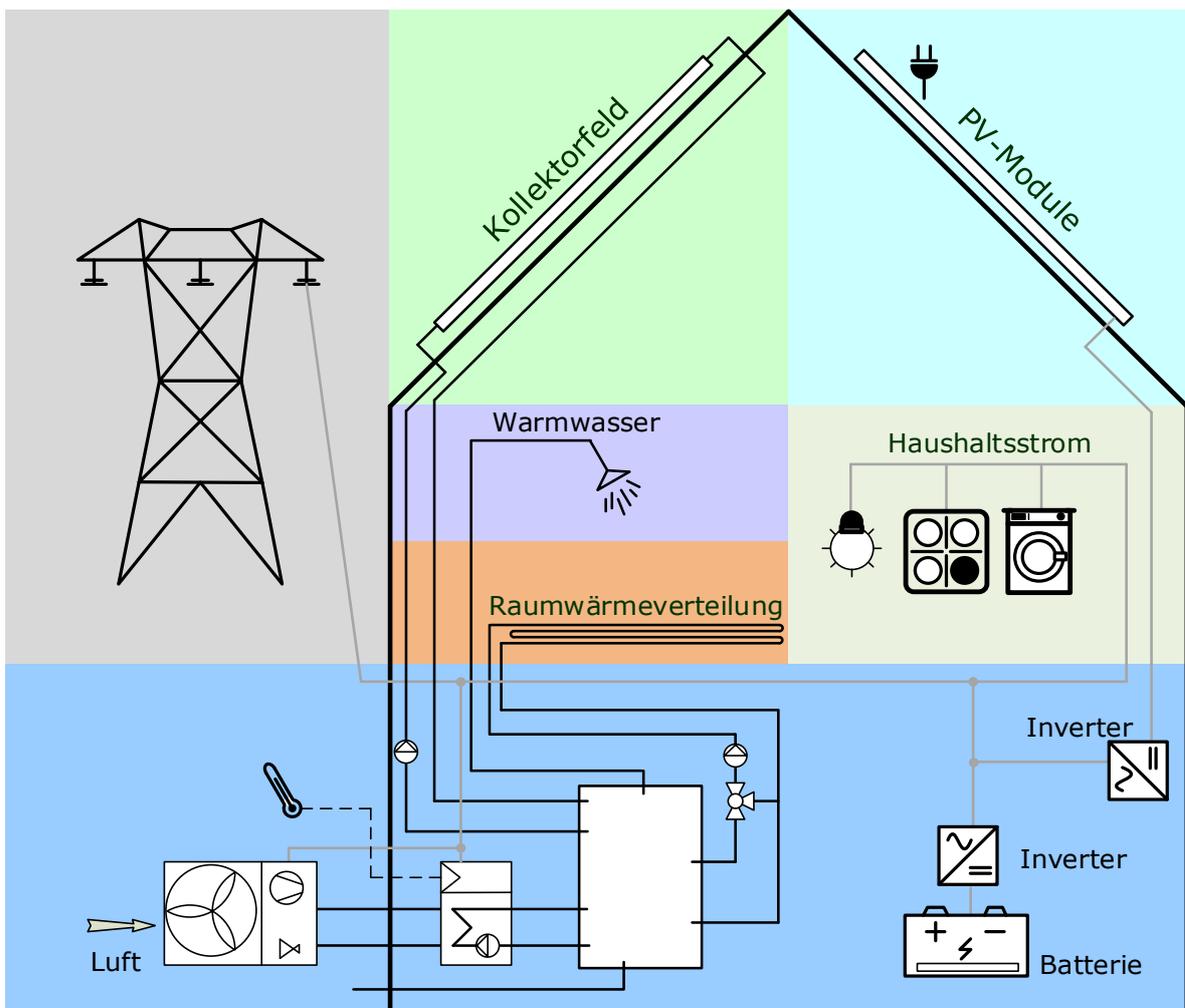




Schlussbericht 23. August 2018

# SolProof - Kompaktheit und Fehlerresistenz von Solaren Heizsystemen auf dem Prüfstand





**Datum:** 31. Mai 2018

**Ort:** Rapperswil

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Solarwärme und Wärmespeicherung  
CH-3003 Bern  
www.bfe.admin.ch

**Auftragnehmer:**

SPF Institut für Solartechnik  
Hochschule für Technik HSR  
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil  
www.spf.ch

**Autoren:**

Robert Haberl, Institut für Solartechnik SPF, [robert.haberl@spf.ch](mailto:robert.haberl@spf.ch)  
Andreas Reber, Institut für Solartechnik SPF, [andreas.reber@spf.ch](mailto:andreas.reber@spf.ch)  
Dani Carbonell, Institut für Solartechnik SPF, [dani.carbonell@spf.ch](mailto:dani.carbonell@spf.ch)  
Michel Y. Haller, Institut für Solartechnik SPF, [michel.haller@spf.ch](mailto:michel.haller@spf.ch)

**BFE-Bereichsleitung:** Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

**BFE-Programmleitung:** Elimar Frank, [elimar.frank@frank-energy.com](mailto:elimar.frank@frank-energy.com)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501234-01

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

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Systeme zur Bereitstellung von Wärme und Strom im Einfamilienhaus können als Gesamtsystem über mehrere Tage mit dem Concise Cycle Testverfahren ausgemessen und geprüft werden. In diesem Projekt wurde das Verfahren erweitert durch das Erfassen der Fehlersicherheit und des Installationsaufwandes, und gleichzeitig wurde die Methode in mehrfacher Hinsicht vereinfacht:

- Der Prüfzyklus wurde von 12 Tagen auf 6 Tage verkürzt.
- Die Testprozedur wurde auf ein „Benchmark-Verfahren“ mit identischen Lasten umgestellt.
- Aus dem Projekt CombiVolt wurde die Erweiterung der Testmethode von Wärme auf Wärme- und Stromversorgung übernommen.

Mit Hilfe der neuen Methode wurden vier verschiedene Komplettsysteme getestet. Die Resultate zeigen die Stärken und Schwächen der verschiedenen Systeme, und geben wertvolle Anhaltspunkte für die Reduktion des Installationsaufwandes und die Erhöhung der Robustheit und Fehlersicherheit der Systeme.

## Résumé

Les systèmes pour la fourniture de chaleur et d'électricité dans les maisons particulières peuvent être mesurés et testés comme un système complet sur plusieurs jours à l'aide du Concise Cycle Test. Dans ce projet, la procédure a été étendue en enregistrant la sécurité aux erreurs et l'effort d'installation, et en même temps simplifiée à plusieurs égards:

- Le cycle d'essai a été raccourci de 12 jours à 6 jours.
- La procédure de test a été convertie en "procédure de référence" avec des charges identiques dans chaque essai.
- L'extension de la méthode d'essai de l'alimentation de chaleur à une alimentation de chaleur et d'électricité a été reprise du projet CombiVolt.

En utilisant la nouvelle méthode, quatre systèmes complets différents ont été testés. Les résultats montrent les points forts et les faiblesses de chaque système et fournissent des indications précieuses pour réduire l'effort d'installation et d'augmenter la solidité et la tolérance aux pannes.

## Abstract

Systems for providing heat and electricity in single-family homes can be measured and tested as a whole over several days using the Concise Cycle Test procedure. In this project, the procedure has been extended by recording the error safety and the installation effort, and at the same time the method has been simplified in several respects:

- The test cycle was shortened from 12 days to 6 days.
- The test procedure was converted to a "benchmark procedure" with identical loads in each test.
- The extension of the test method from heat to heat and power supply was adopted from the project CombiVolt.

With the new method, four different complete systems were tested. The results show the strengths and weaknesses of the different systems, and provide valuable information for reducing the installation effort and increasing the robustness and fault tolerance of the systems.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Extended Abstract</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Hintergrund</b> .....	<b>6</b>
2.1 Situation .....	6
2.2 Masterplan Solarwärme .....	6
2.3 Testmethode zur Prüfung von Komplettsystemen.....	6
<b>3 Ziel der Arbeit</b> .....	<b>8</b>
<b>4 Anpassungen am Concise Cycle Test</b> .....	<b>9</b>
4.1 Erweiterung von Wärme auf Wärme- und Stromversorgung .....	9
4.2 Funktionsweise des Tests.....	9
4.3 6-Tages Profil .....	10
4.4 Kombination aus vordefinierter Gebäudelast und freier Heizungsregelung .....	16
4.5 Vereinfachte Simulation der Erdsonden.....	18
4.6 Emulation der Kollektorkreisleitung.....	23
4.7 Kennzahlen.....	23
<b>5 Kompaktheit und Fehlerresistenz</b> .....	<b>26</b>
5.1 Einführung und Übersicht .....	26
5.2 Kriterien für die Kompaktheit eines Systems.....	26
5.3 Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit.....	27
5.4 Nicht bewertete Kriterien der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit.....	29
<b>6 Bestimmung repräsentativer Wärmeverluste</b> .....	<b>30</b>
<b>7 Testresultate</b> .....	<b>33</b>
7.1 Übersicht .....	33
7.2 System 1 .....	34
7.3 System 2 .....	38
7.4 System 3 .....	42
7.5 System 4 .....	46
7.6 Realistische Wärmeverluste .....	48
<b>8 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>50</b>
8.1 Testmethode.....	50
8.2 Testresultate.....	50
8.3 Ausblick.....	51
<b>9 Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>52</b>
<b>10 Symbolverzeichnis</b> .....	<b>53</b>
10.1 Symbole .....	53
10.2 Indizes .....	53
<b>11 Referenzen</b> .....	<b>55</b>
<b>Anhang A Beschreibung der Testmethode</b> .....	<b>57</b>
<b>Anhang B Bewertung der Kompaktheit</b> .....	<b>87</b>
<b>Anhang C Bewertung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit</b> .....	<b>89</b>
<b>Anhang D Wärmeverluste im Jahresverlauf</b> .....	<b>92</b>
<b>Anhang E Emulation der Kollektorkreisleitung</b> .....	<b>94</b>
<b>Anhang F Resultate der Systemtests</b> .....	<b>96</b>
<b>Anhang G Resultate der Messung der realistischen Wärmeverluste</b> .....	<b>100</b>



## 1 Extended Abstract

Der Concise Cycle Test ist ein Hardware-in-the-Loop Prüfverfahren zum Testen von kompletten Systemen zur Energieversorgung von Wohngebäuden. Im Projekt SolProof wurde diese Methode durch das Erfassen der Fehlersicherheit und des Installationsaufwandes erweitert, und gleichzeitig in mehrfacher Hinsicht vereinfacht:

- Der Prüfzyklus wurde von 12 Tagen auf 6 Tage verkürzt und gleichzeitig umgestellt von Wärme auf Wärme- und Stromversorgung:  
Der Concise Cycle Test fasst die Bedingungen eines typischen Jahres in einen Prüfzyklus zusammen, während dem die Anlage ohne Eingriffe von aussen funktionieren muss um ein Gebäude mit Wärme zu versorgen. Im vorliegenden Projekt wurden diese Bedingungen neu definiert und ergänzt um den elektrischen Energiebedarf für Haushaltsgeräte. Mit dem neuen Prüfzyklus können nun in einem 6-Tages Test jegliche Systeme für die Wärme- und Stromversorgung von Gebäuden getestet werden.
- Die gesamte Methodik wurde auf ein „Benchmark-Verfahren“ umgestellt mit identischen Lasten in jeder Prüfung:  
Durch die Umstellung können bereits die Ergebnisse des 6-Tages Tests von verschiedenen Systemen direkt miteinander verglichen werden. Des Weiteren ist eine Extrapolation dieser Resultate auf Jahreswerte möglich. Vor dieser Änderung musste jeweils ein Abbild des geprüften Systems in der Simulationsumgebung TRNSYS erstellt werden. Das Erstellen dieser Simulationsmodelle war zeitaufwändig und erforderte zudem passende Simulationsmodelle für jede Komponenten des Systems. Diese Voraussetzung war gerade für innovative Systeme mit neuen Komponenten nicht leicht zu erfüllen.
- Die Simulation und Emulation einzelner Komponenten im Test wurde vereinfacht.

Neben den Änderungen am CCT Verfahren selbst wurden zusätzliche Tests entwickelt, welche das Verfahren abrunden:

- Eine Bewertungsmatrix für Kompaktheit, Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit erlaubt neu eine gesamtheitliche Beurteilung von Komplettsystemen.
- Die Messung realistischer Wärmeverluste zeigt die real auftretenden Wärmeverluste von Kombispeichern.

Mit Hilfe der neuen Methode wurden vier verschiedene Komplettsysteme getestet. Die Prüfung im vorliegenden Projekt bestätigten einmal mehr, dass die Einbindung verschiedener Komponenten in ein Gesamtsystem eine schwierige Herausforderung ist, deren Komplexität sich bei der Erweiterung um PV-Anlagen und Batterien noch um eine weitere Komponente erweitert.

Alle geprüften Systeme beinhalten Massnahmen, die den Installationsaufwand der hydraulischen Komponenten verringern. Es zeigte sich jedoch, dass die Installation der elektrischen Komponenten sowie der Regler in allen Fällen aufwändiger und fehleranfälliger war als antizipiert. Dies ist zum Teil auf die Tatsache zurückzuführen, dass es sich um mehr oder weniger seriennahe Prototypensysteme handelte.



## 2 Hintergrund

### 2.1 Situation

Heute konkurriert die Photovoltaik mit der Solarwärme um verfügbare Dachflächen und das Investitionskapital ökologischer Hausbesitzer. Dadurch steht die Solarwärme stark unter Druck, die derzeit relativ hohen Kosten zu senken und die Systeme zu vereinfachen. Vor diesem Hintergrund ist sowohl eine Reduktion der Installationszeit durch eine Vereinfachung der Systeme als auch eine Erhöhung der Resistenz gegen Installations- und Planungsfehler anzustreben.

### 2.2 Masterplan Solarwärme

Im Masterplan Solarwärme Schweiz 2035 (Perch-Nielsen et al., 2013) werden drei Hauptziele genannt, welche auf technischer Ebene erreicht werden müssen, um die drei marktnahen Segmente im Solarwärmebereich (Warmwasser im Einfamilienhaus, Kombisysteme im Einfamilienhaus, Warmwasser im Mehrfamilienhaus) in den Massenmarkt zu überführen:

1. Kosten senken
2. Qualität gewährleisten
3. Produkte und Dienstleistungen verbessern

Insbesondere im Bereich der Kombisysteme, also Systemen die Wärme für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung zur Verfügung stellen, und bei der Kooperation zwischen Herstellern und Forschungsinstitutionen stehen dabei Gesamtsysteme und Systemintegration im Vordergrund. Ziel ist hier, die Qualität und Zuverlässigkeit von Gesamtsystemen zu erhöhen und die Installation der Anlagen zu vereinfachen.

### 2.3 Testmethode zur Prüfung von Komplettsystemen

Um Heizsysteme als Gesamtsystem inklusive aller Komponenten im praxisnahen Betrieb testen zu können wurde am SPF ein spezielles Prüfverfahren, der Concise Cycle Test (CCT) entwickelt, und bereits in den Jahren 2002 – 2004 eingeführt. Dabei wurden die Bedingungen eines typischen Jahres in einen 12-tägigen Prüfzyklus zusammengefasst, während dem die Anlage ohne Eingriffe von aussen funktionieren muss. Die Methode bestand aus einem messtechnischen und einem simulationsbasierten Teil, da die Messdaten nicht direkt zu Jahreswerten extrapoliert werden konnten. Die Messdaten wurden dazu verwendet, ein Simulationsmodell der gesamten Anlage zu erstellen, mit dessen Hilfe jahresbasierte Kennwerte errechnet wurden (Haller and Vogelsanger, 2005a, 2005b; Konersmann et al., 2007). Ausgangslage für die Entwicklung der CCT-Methode war unter anderem die von Bales vorgestellte „Combitest“ Methode (Bales, 2004). Die Entwicklung des CCT erfolgte im Rahmen des IEA SHC Task 26 (Vogelsanger, 2002). Ähnliche Ansätze zur Charakterisierung von Wärmeversorgungssystemen wurden, ausgehend vom IEA SHC Task 26, parallel an anderen Instituten entwickelt (Haller et al., 2013).

Im Rahmen des Projektes SOL-HEAP<sup>1</sup> wurden unter Verwendung der CCT Methode Systemtests an 11 verschiedenen Heizsystemen durchgeführt, die Solarthermie und Wärmepumpen verbinden. Eine der Erkenntnisse dieses Projektes war, dass zum einen die Komponenten zur

---

<sup>1</sup> Durch das Bundesamt für Energie BFE gefördertes Projekt. Vertragsnummer: SE/500494-01.



Raumwärmeverteilung<sup>2</sup> ein wichtiger Bestandteil der getesteten Anlagen sind, und zum anderen die freie Regelung der Raumheizung während dem Test zu unterschiedlichen Lasten im Test führt (Haberl et al., 2014). Bedingt durch die unterschiedliche Raumheizungslast, respektive unterschiedliche Wärmeenergiemengen die in die Raumheizverteilung abgegeben werden, war ein Vergleich der getesteten Systeme erst möglich, wenn ein mit Messdaten validiertes Simulationsmodell der Anlage erstellt und Systeme mit identischer Last simuliert wurden. Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde das Ziel formuliert, die Prüfmethode so umzugestalten, dass sie einem Benchmark Test entspricht, der einen direkten Vergleich der Messergebnisse aus dem Labortest erlaubt. Dadurch kann auf die Erstellung und Validierung eines Simulationsmodells verzichtet werden, was den Aufwand und die Kosten eines Systemtests um ca. 50% reduziert. Eine weitere Reduktion von Aufwand und Kosten kann erreicht werden durch eine Verkürzung des Testverfahrens von zwölf auf sechs Tage.

Im Fokus standen deshalb im Projektteil „Weiterentwicklung Prüfmethode“ die folgenden Entwicklungsschritte:

- Verkürzung des Testverfahrens auf sechs repräsentative Tage deren Messergebnisse ohne Simulationsmodell extrapoliert werden können auf Jahreswerte.
- Kombiniertes Ansatz zwischen vordefinierter Gebäudelast und freier Regelung der Raumwärmeverteilkomponenten wie Mischarmaturen und Pumpen.

Erste Vorarbeiten zur Verkürzung des Testverfahrens und zur Extrapolierbarkeit konnten bereits im EU Projekt MacSheep realisiert werden. So hat der Projektpartner SERC<sup>3</sup> ein Testverfahren von sechs Tagen entwickelt, welches für Kombinationen von Solarwärme und Wärmepumpe (Luft- oder Sole-WP) eine Extrapolation der Testergebnisse auf ein ganzes Jahr erlaubt. Diese Extrapolation erfolgte durch einfache Multiplikation der Ergebnisse mit dem Faktor 6/365 (Chèze et al., 2014; Haberl et al., 2015). Dieses Testverfahren wurde mit Meteonorm-Wetterdaten entwickelt, welche eine zeitliche Auflösung von einer Stunde besitzen (Haberl et al., 2015). Es konnte im Rahmen des MacSheep Projektes gezeigt werden, dass für Solarwärmesysteme eine höhere Auflösung von Wetterdaten, zum Beispiel in 10-Minuten Schritten, keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat (Granzotto et al., 2014).

---

<sup>2</sup> Heizkreispumpe, Mischarmaturen inklusive der Stellmotoren, Überströmventile etc.

<sup>3</sup> Solar Energy Research Center der Högskolan Dalarna.



### 3 Ziel der Arbeit

Das Projekt SolProof verfolgte zwei Teil-Ziele:

- a. Entwickeln von kompakteren Kombisystemen mit reduziertem Installationsaufwand und Resistenz gegen Installationsfehler. Hierzu wurden geeignete Kriterien erarbeitet, welche im Teststand erhoben werden können.
- b. Reduktion des Aufwands bei gleichzeitiger Erhöhung der Aussagekraft im CCT-Verfahren: Aufbauend auf Erkenntnissen aus den Projekten Sol-Heap (BFE) (Haller et al., 2014) und MacSheep (EU FP7) (Haller, 2015) soll das CCT-Verfahren verkürzt werden auf sechs Tage. Gleichzeitig soll sichergestellt werden, dass die Testresultate repräsentativ für die Jahresperformance des Systems sind. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion des Testaufwands, und gleichzeitig dazu, dass auch ohne Simulationsabbild ein Benchmarking der getesteten Systeme möglich sein wird. Das Verfahren soll prinzipiell offen sein gegenüber jeglichen Systemen für die effiziente Bereitstellung von Wärme – und möglicherweise auch elektrischer Energie - im Wohnbereich.

Angestrebte Resultate sind:

- Kriterien, sowie ein Testverfahren, für die Beurteilung der Kompaktheit und Resistenz gegen Installationsfehler, respektive für die "Einfachheit" der Installation.
- Eine Vereinfachung der Systeme der beteiligten Hersteller, bei gleichzeitiger Erhöhung der Kompaktheit und Resistenz gegen Installationsfehler durch hohen Vorfertigungsgrad ab Werk. Dies soll ausgelöst werden durch das Bestreben der Hersteller, im Prüfstand jeweils das beste Ergebnis zu erzielen.
- Ein vereinfachter Performance Benchmark Test, basierend auf realistischem, dynamischem hardware-in-the-loop Test von kombinierten Heizsystemen (vereinfachtes und weiter entwickeltes CCT-Verfahren).



## 4 Anpassungen am Concise Cycle Test

### 4.1 Erweiterung von Wärme auf Wärme- und Stromversorgung

Auf Grund der rasanten Kostensenkung der Photovoltaik besteht inzwischen ein stetig wachsender Markt für Systeme in welchen solare Wärme über eine Kombination von Photovoltaik und Wärmepumpe zur Verfügung gestellt wird. Diese Systeme decken in der Regel nicht nur einen Teil des Wärmebedarfs mit Solarenergie, sondern auch einen Teil des Strombedarfs. Parallel zum Projekt SolProof wurde deshalb im Projekt CombiVolt (BFE Projekt SI/501336-01) das Concise Cycle Testverfahren auch auf Systeme erweitert welche als Energiequelle Photovoltaik nutzen und optional mit Batteriespeicher sowie Eigenverbrauchsoptimierter Regelung ausgestattet sind.

In der Folge wurde angestrebt, sowohl für solarthermische als auch für photovoltaische Systeme, inklusive Systeme mit PVT-Kollektoren, ein- und dasselbe Testprofil verwenden zu können. Deshalb wurde die anfänglich aus MacSheep übernommene Entwicklung eines 6-Tages-Verfahrens mit Wetterdaten in Stundenwerten, welche in SolProof bereits weiter entwickelt wurde, im Laufe des Projektes ersetzt durch das 6-Tage Profil von CombiVolt, welches über eine höhere Auflösung der Wetterdaten verfügt.

### 4.2 Funktionsweise des Tests

Auf dem Prüfstand wird der realitätsnahe Betrieb eines kompletten Systems zur Bereitstellung von Wärme (und möglicherweise von Strom) für ein Einfamilienhaus im hard-ware-in-the-loop Verfahren ausgemessen. Dazu simuliert und emuliert der Prüfstand während dem Prüfzyklus ein komplettes Gebäude, dessen Bedarf an Wärme – und gegebenenfalls auch an Strom – gedeckt werden muss. Das Verfahren zur Simulation und Emulation kann wie folgt beschrieben werden:

- Durch die Prüfstandssoftware werden am Ende jeden Zeitschrittes<sup>4</sup> aktuelle Messwerte an die Simulationssoftware übergeben.
- In der Simulation wird entsprechend der eingestellten Parameter sowie der übergebenen Werte das Verhalten der jeweiligen Komponente berechnet und an die Prüfstandssoftware übermittelt.
- Während jedem Zeitschritt steuert die Prüfstandssoftware die Emulation, während die Simulationssoftware pausiert. Erst am Ende des Zeitschrittes werden neue Messdaten an die Simulationssoftware übergeben, und die Zielgrößen für die Regelung während dem nächsten Zeitschritt durch die Simulationssoftware ermittelt.

Besondere Bedeutung kommt in diesem Verfahren der Wahl der Rahmenbedingungen für Wetter und Lasten im Test zu. Mit dem Ziel eines möglichst realitätsnahen Betriebs des Systems ist klar, dass typische Bedingungen aus dem Verlauf eines Jahres enthalten sein müssen. Das Ziel der Prüfung ist ein Ergebnis, das repräsentativ für den Betrieb eines Heizsystems in einem Jahr ist.

In den folgenden Kapiteln werden lediglich die wichtigsten Änderungen an der ursprünglichen Methode beschrieben. Eine vollständige Beschreibung der Methode ist Anhang A: Beschreibung der Testmethode zu finden.

---

<sup>4</sup> Die Zeitschritte sind die Länge des Zeitintervalls einer dynamischen bzw. transienten Simulation. Bei einer solchen Simulation wird der zeitliche Fortschritt in einzelne Abschnitte aufgeteilt (diskretisiert) und die Lösung schrittweise für aufeinanderfolgende Zeitschritte berechnet. Je nach Anwendungsfall können die Zeitschritte unterschiedlich gewählt werden.



### 4.3 6-Tages Profil

Im Rahmen des Projektes MacSheep wurde ein Testverfahren von sechs Tagen entwickelt (Haberl et al., 2015). Basis dieses Profils sind Meteonorm-Wetterdaten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Im Hinblick auf eine universelle Anwendung der Methode auf alle möglichen Gebäudeenergiesysteme, insbesondere auch auf photovoltaische Systeme mit viel geringerer Trägheit als thermische Systeme, sollten jedoch zeitlich höher aufgelöste Wetterdaten verwendet werden. Im Projekt SolProof wurden deshalb die sechs Meteonorm-Tage aus dem MacSheep Projekt ersetzt durch Tagesprofile, welche mit einer Zeitauflösung von 10 min. von Meteo-Schweiz gemessen wurden. Hauptbedingung für die Auswahl der neuen Tage war die Strahlungssumme und deren Verlauf sowie die Aussentemperatur. In Abbildung 1 sind die beiden Testsequenzen dargestellt.

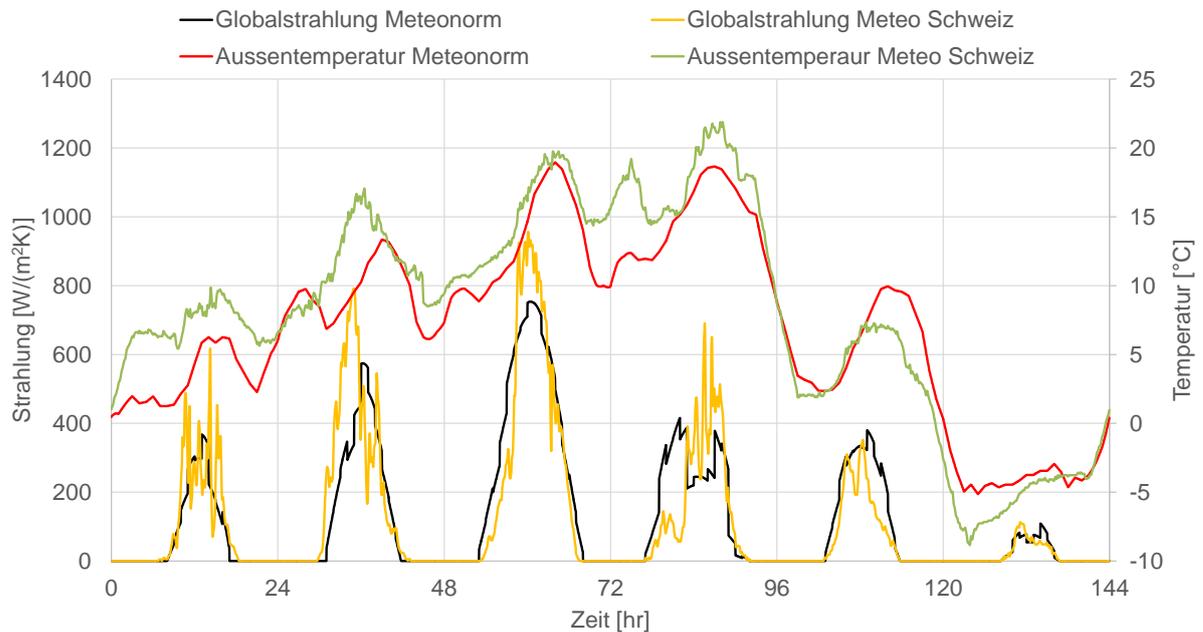


Abbildung 1: 6-Tages Wetterdatensatz für Systemtests aus dem Projekt MacSheep (Meteonorm Daten) und neue Tage mit zeitlich höher aufgelösten Daten (MeteoSchweiz).

Die Solarstrahlung wird durch thermische Kollektoren in Wärme umgewandelt und in den Speicher eingebracht. Im Testzyklus verschwinden die Abstände zwischen den einzelnen Tagen welche die typischen Betriebszustände von Jahreszeiten repräsentieren. Dadurch kann im Speicher die Wärme eines Sommertages bis zu einem Tag der die Übergangszeit repräsentiert gespeichert und für die Raumheizung nutzbar gemacht werden. Zwar kann diesem Effekt über ein Warmwasserzappprofil mit höherem Bedarf zum richtigen Zeitpunkt entgegengewirkt werden. Dies beeinflusst jedoch das Ergebnis ebenfalls, und eine längere Speicherwirkung bleibt dennoch erhalten. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Testtage so zu wählen, dass die auf Jahresdaten mit dem Faktor 365/6 extrapolierte Strahlungssumme des Testzyklus kleiner ist als die Strahlungssumme der Jahreswetterdaten. Durch eine Photovoltaikanlage (PV-Anlage) wird die Strahlung in elektrische Energie umgewandelt. Diese Energie kann sowohl für die Haushaltsgeräte in einem Gebäude als auch für ein Heizsystem verwendet werden. Um in einem 6-Tage Zyklus sowohl einen Energiebedarf (für sowohl das Heizsystem als auch den elektrischen Energiebedarf inklusive der Haushaltsgeräte) als auch einen Nutzungsgrad zu erhalten, die auf ein ganzes Jahr extrapoliert werden können, muss die Strahlungssumme in der Testsequenz bereits extrapolierbar sein. Deshalb ist der oben gezeigte Testzyklus, welcher für rein thermische Systeme entwickelt wurde, nicht universell anwendbar.



Als Ziel für die verbesserte Testmethode wurde die Offenheit gegenüber jeglichen Systemen für die Bereitstellung von Wärme im Wohnbereich formuliert. Dies beinhaltet auch die Bereitstellung von Wärme aus photovoltaisch erzeugtem Strom über eine Wärmepumpe. Aus diesem Grund muss auch der Bedarf an elektrischer Energie im Haushalt berücksichtigt werden und damit der Eigenverbrauch von PV-Strom, der Autarkiegrad und der nötige Aufwand an Strom ab Netz zur Deckung des gesamten Energiebedarfes in einem Haushalt (thermisch und elektrisch). Dies gilt sowohl unter Berücksichtigung thermischer als auch elektrischer Speicher. Deshalb wurde, ausgehend von den oben gezeigten Wetterdaten, der Testzyklus entsprechend weiter entwickelt.

Für diese Profilsuche wurde ein Simulationsmodell eines Heizsystems in TRNSYS (Klein, S.A. et al, 2010, p. 17) erstellt. Das Gebäude wurde simuliert mit einem TRNSYS Type der das Gleichungssystem des Gebäudesimulationsmodells nach ISO 13790 (“Energieeffizienz von Gebäuden — Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008),” 2008) implementiert, jedoch aus Stabilitätsgründen um eine thermische Masse der Lufttemperatur ergänzt wurde (Battaglia et al., 2016). Die Heizlast des Gebäudes basiert auf den Definitionen des SFH45 aus dem Task 44 des Solar Heating and Cooling Program der IEA (Haller et al., 2013). Mit Standort in Zürich beträgt der Wärmebedarf für die Raumheizung (RH) 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) bei einer Energiebezugsfläche (EBF) von 150 m<sup>2</sup>. Als Bindeglied zwischen dem Gebäude und dem Heizsystem dient ein Radiatormodell, das entsprechend einer Fussbodenheizung parametrisiert wurde. Die wesentlichen Komponenten des Heizsystems selbst sind:

- Ein Kombispeicher, modelliert mit dem non-standard Type 340 (Drück and Pauschinger, 2006).
- Eine Wärmepumpe, modelliert mit dem non-standard Type 877 (Heinz and Haller, 2013), parametrisiert mit Daten aus dem „Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44“ (Haller et al., 2013).
- Erdsonden, modelliert mit dem non-standard Type 451 (Wetter and Huber, 1997).
- Solarthermische Kollektoren, modelliert mit dem non-standard Type 832 (Haller, 2012).
- PV-Module und ein Wechselrichter, modelliert mit dem Type 194 aus der TRNSYS Standardbibliothek.
- Eine Batterie, modelliert mit einer Kombination aus Equations und dem Type 93 (value recall) aus der TRNSYS Standardbibliothek.

Für die Basisversion des Heizsystems wurde eine Luft/Wasser Wärmepumpe verwendet, da diese die grösste Abhängigkeit von den Wetterdaten zeigt. Diese Wärmepumpe ist mit einer doppelten Umschaltung (Vor- und Rücklauf) an den Speicher angebunden. Das Heizsystem wurde jeweils in einer 6-Tages Simulation mit entsprechenden 6-Tages Profilen und einer Jahressimulation mit Jahresprofilen simuliert. Dabei besteht ein „Profil“ aus mehreren Einzelprofilen, die aufeinander abgestimmt sein müssen: Wetterdaten, ein Warmwasser-Zapfprofil, die Heizleistung für das Gebäude und der Bedarf an Haushaltsstrom. Die Resultate der beiden Simulationen wurden dann miteinander verglichen. Mit dem Ziel einer möglichst geringen Differenz zwischen der Jahressimulation und den extrapolierten Werten der simulierten Sequenz von 6-Tagen wurden die Einzelprofile der 6-Tages Simulation immer wieder angepasst, bis



eine zufriedenstellende Korrelation erreicht wurde. Diese Anpassungen wurden mit Hilfe des Programms GenOpt<sup>5</sup> (Wetter, 2011) durchgeführt.

Die Extrapolierbarkeit der Resultate darf dabei nicht vom getesteten System abhängen, sondern muss für verschiedene Systeme gegeben sein. Deshalb wurde zur Kontrolle des gefundenen Profils eine breite Palette an Systemvarianten jeweils in 6-Tages Simulationen und Jahressimulationen gegenübergestellt. Variiert wurden dazu:

- Parameter der Wärmepumpe
  - Quelle (Luft/Wasser und Sole/Wasser)
  - Hydraulische Anbindung (verschiedene Konzepte)
- Regelstrategie der Wärmepumpe
  - Rein wärmegeführter Betrieb
  - Verschiedene Strategien zur Optimierung des Eigenstromverbrauches von PV-Strom
- Parameter des thermischen Speichers
  - Volumen (0.7 – 1.5 m<sup>3</sup>)
  - Isolation
  - Positionen von Ein- und Auslässen
- Parameter der solarthermischen Anlage
  - Verschiedene Kennlinien
  - Kollektorfeldgrösse (7 – 14 m<sup>2</sup>)
  - Durchsatz (high-flow mit 40 l/(m<sup>2</sup>h)) und low-flow mit 20 l/(m<sup>2</sup>h))
- Feldgrösse der PV-Anlage (3.4 – 7.2 kWp)
- Parameter des elektrischen Speichers
  - Nutzbare Kapazität (3.4 – 13.0 kWh)
  - Maximale Beladeleistung (1.7 – 7.2 kW)
  - Maximale Entladeleistung (1.1 – 7.2 kW)

In Abbildung 2 bis Abbildung 4 sind die resultierenden Profile dargestellt, die zusammen die neue 6-Tages Testsequenz des CCT ergeben. Aus den Wetterdaten und dem beschriebenen Gebäude ergibt sich ein Profil für die Raumheizungslast, welches in Kapitel 4.4 vorgestellt wird.

---

<sup>5</sup> GenOpt ist ein Optimierungsprogramm zur Minimierung einer Kostenfunktion, welche aus den Resultaten eines anderen Simulationsprogrammes (hier TRNSYS) ausgelesen wird.

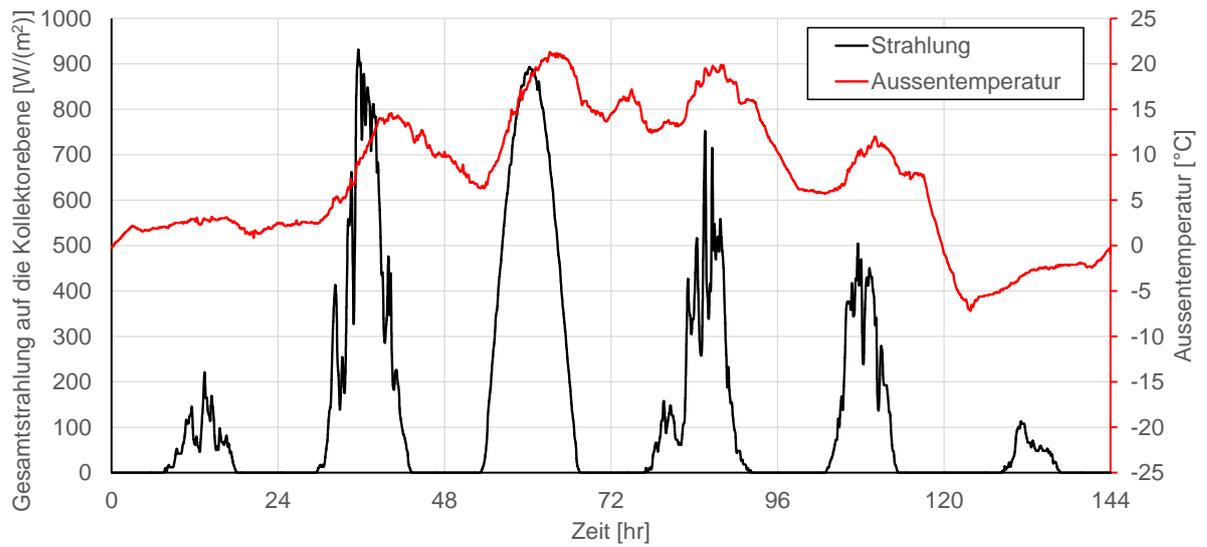


Abbildung 2: Wetterdaten der resultierenden Testsequenz.

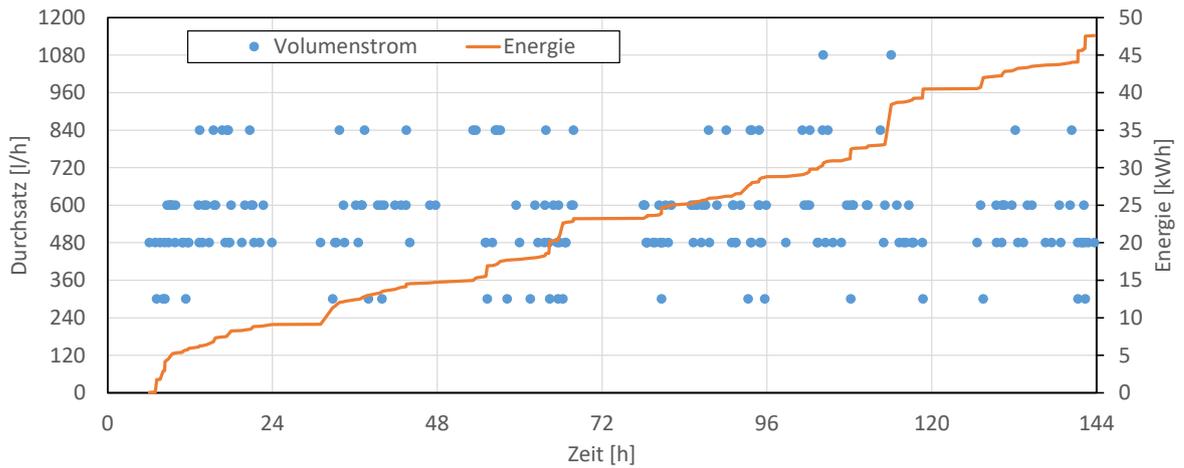


Abbildung 3: Warmwasserzapfprofil der resultierenden Testsequenz.

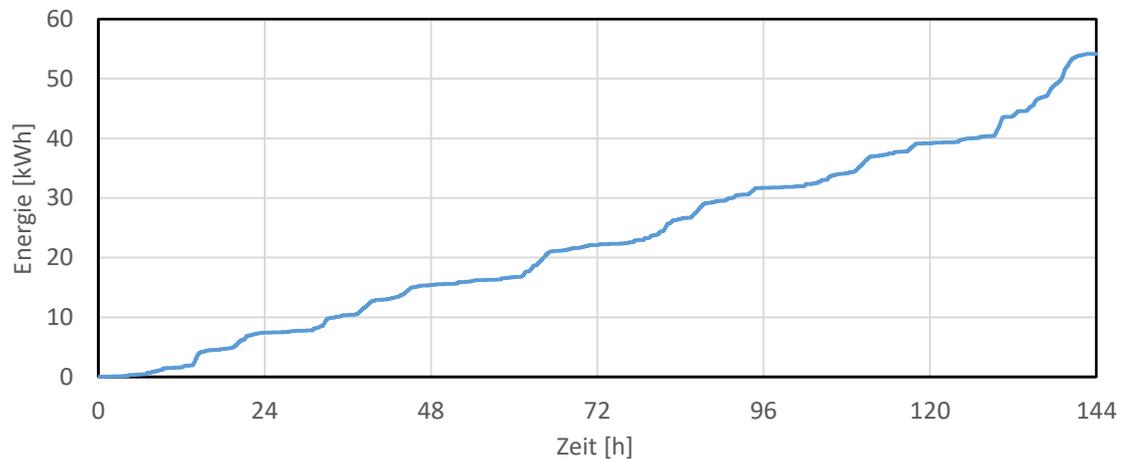


Abbildung 4: Haushaltsstromprofil der resultierenden Testsequenz.



Die Strahlungssumme der gezeigten Testsequenz entspricht der Strahlungssumme im gesamten Jahr:

$$\frac{Q_{Rad,6d}}{6} \cdot 365 = Q_{Rad,annual}$$

Formel 1

Es wurde bereits beschrieben, dass eine längere Speicherwirkung im kurzen Prüfzyklus zu einer besseren Nutzbarkeit der Solarwärme auch für die Raumheizung führt. Ein zweiter Effekt des Prüfzyklus ist die Temperatur des Speichers zu Beginn des Sommertages: Diese ist nicht, wie in längeren Schönwetterperioden im Realfall, schon zu Beginn des Tages hoch. Dadurch wird auch an einem Sommertag ein höherer Solarertrag erzielt. In Simulationen von Systemen mit thermischen Solaranlagen über 6 Tage im Vergleich zu Jahressimulationen werden diese Effekte der thermischen Solarenergie deutlich. In Abbildung 5 ist der extrapolierte Solarertrag von Systemen mit solarthermischen Anlagen dem Solarertrag von Jahressimulationen gegenübergestellt. Der Solarertrag in den 6-Tages Simulationen ist um ca. 21 % höher als in den Jahressimulationen (vgl. Abbildung 5).

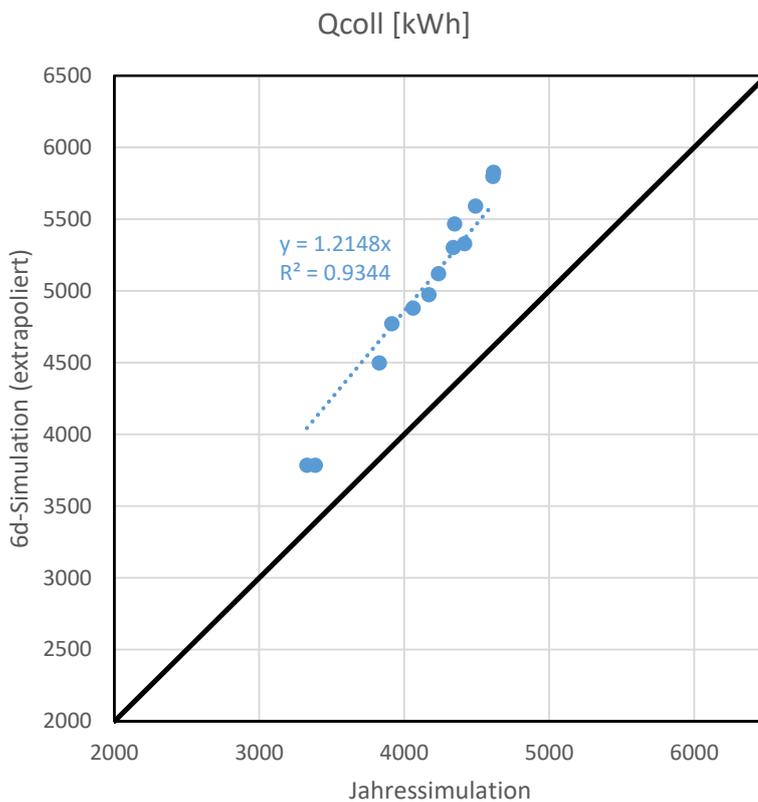


Abbildung 5: Solarertrag der verschiedenen simulierten Systeme in Jahressimulationen und als extrapoliertes Wert aus den 6-Tages Simulationen mit den Wetterdaten der Testsequenz.

Der höhere Solarertrag in der Testsequenz führt zu einem niedrigeren Energiebedarf der Nachheizung im System. Dieser Effekt muss für die direkte Extrapolierbarkeit der Resultate zu Jahresergebnissen ausgeglichen werden. Dazu wurde eine Korrektur des elektrischen Energiebedarfs der Nachheizung in Abhängigkeit des Kollektorfeldes eingeführt. Ausschlaggebend für die Korrektur ist die Wärmeleistung des Kollektorfeldes bei einer Einstrahlung von  $700 \text{ W/m}^2$  und einer Temperaturdifferenz von  $30 \text{ K}$  ( $P_{CC}$ ). Diese Wärmeleistung wird in einem quadratischen Term für die Korrektur des Energiebedarfs nach Formel 2 verwendet:



$$W_{el,HSys} = \frac{W_{el,HSysCCT} \cdot F_C \cdot 365}{6} \quad \text{Formel 2}$$

$$F_C = 1 - (A \cdot P_{CC}^2 + B \cdot P_{CC}) \quad \text{Formel 3}$$

$$A = -0.002$$

$$B = 0.035$$

Die Resultate der Simulationen der, nach der Leistung des Kollektorfeldes korrigierten, Systeme mit thermischen Solaranlagen sind zusammen mit den Systemen mit PV-Anlagen in Abbildung 6 dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse aus den 6-Tages Simulationen mit der neuen Testsequenz gegenüber Jahressimulationen dargestellt. Jeder der Datenpunkte repräsentiert ein individuelles Heizsystem. Gezeigt werden verschiedene Bilanzierungszeiten für die ab Netz bezogene elektrische Energie: Auf Minutenbasis (= Simulationszeitschritt), in 15-Minuten Schritten (Abrechnungszeitraum für den Netzbezug in realen Systemen mit saldierendem Zähler), der Tagesbedarf sowie der Jahresbezug. Für Systeme mit solarthermischen Kollektoren aber ohne PV-Module ist das Ergebnis für jeden Bilanzierungszeitraum identisch, da es nur Bezug ab Netz, aber keine Einspeisung gibt. Für Systeme mit PV-Modulen ist die Wahl des Bilanzierungszeitraumes hingegen sehr wichtig. Ein System, das über ein Jahr mehr el. Energie an das Netz liefert (einspeist) als es bezieht, wird bei Betrachtung kürzerer Zeiträume sehr wohl einen Bezug ab Netz aufweisen.

Die Resultate zeigen insgesamt eine sehr gute Extrapolierbarkeit der Resultate, und bestätigen damit die Eignung der gefunden Kombination aus Einzelprofilen für die Prüfung von PV-WP-Systemen mit Eigenverbrauchsoptimierung. Die Resultate mit solarthermischen Kollektoren wurden nach der oben gezeigten Formel korrigiert. Mit dieser Korrektur erreichen auch die Systeme mit solarthermischen Kollektoren eine sehr gute Extrapolierbarkeit der Resultate.

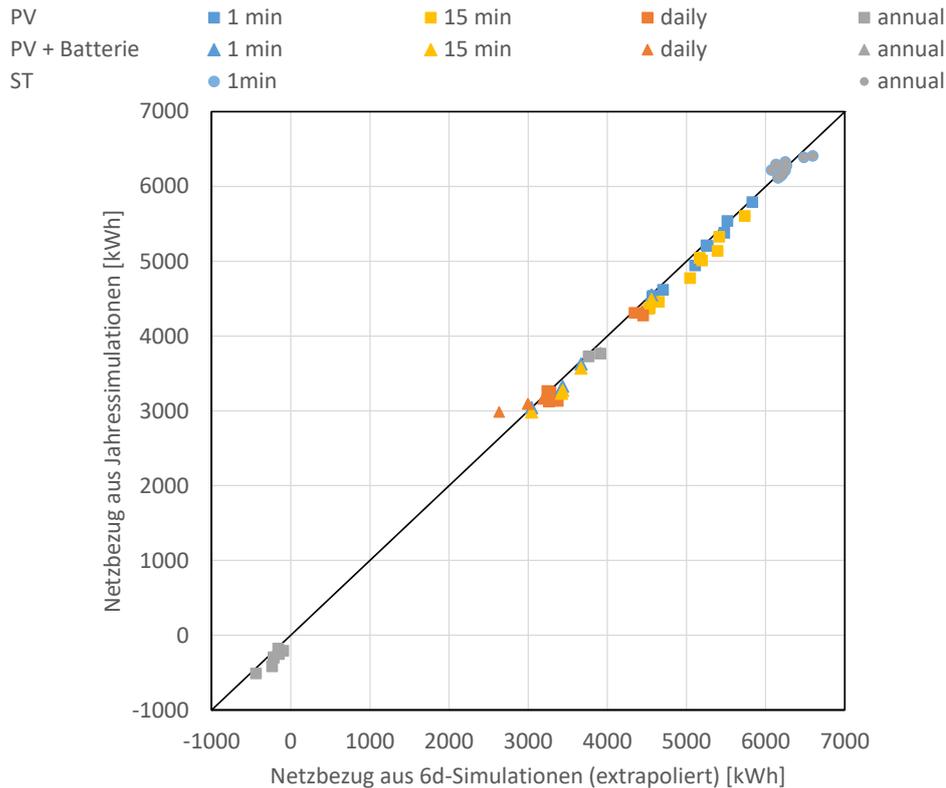


Abbildung 6: Netzbezug der verschiedenen simulierten Systeme in Jahressimulationen und als extrapoliertes Wert aus den 6-Tages Simulationen mit den verschiedenen Profilen der Testsequenz. Dargestellt werden Werte mit den Bilanzierungszeiträumen 1 min, 15 min, 1 Tag und 1 Jahr. PV = Photovoltaik und Wärmepumpe; ST = Solarthermie und Wärmepumpe.

#### 4.4 Kombination aus vordefinierter Gebäudelast und freier Heizungsregelung

Die Kombination einer vordefinierten Gebäudelast mit einer Simulation der Wärmeabgabe und des Gebäudes wurde im EU Projekt MacSheep entwickelt und in SolProof auf den oben beschriebenen sechs Tage Testzyklus übertragen. Dieser Ansatz sieht vor, dass die getestete Anlage mit der eigenen Hardware (Heizkreispumpe, Mischgruppe etc.) und mit der eigenen Regelung Wärme an das virtuelle Gebäude liefern kann. Während dem Test werden dann die Reaktion des Gebäudes und die Wärmeabgabe an den Raum errechnet. Die gelieferte Leistung wird mit einem vordefinierten Lastprofil verglichen. Sobald die vordefinierte Last überschritten ist, wird durch entsprechende Massnahmen am Prüfstand die Wärmelieferung an das Gebäude gedrosselt. Um diese essentielle Funktion der erweiterten Prüfmethode anwenden zu können wurde, basierend auf den neuen Wetterdaten, ein Lastprofil für die Heizlast des Gebäudes erstellt. Dieses Profil enthält für jeden Testtag die kumulierte Heizleistung welche benötigt wird um das Gebäude auf eine Raumtemperatur von exakt 20 °C zu heizen. Abbildung 7 zeigt die vordefinierte Last im Prüfzyklus.

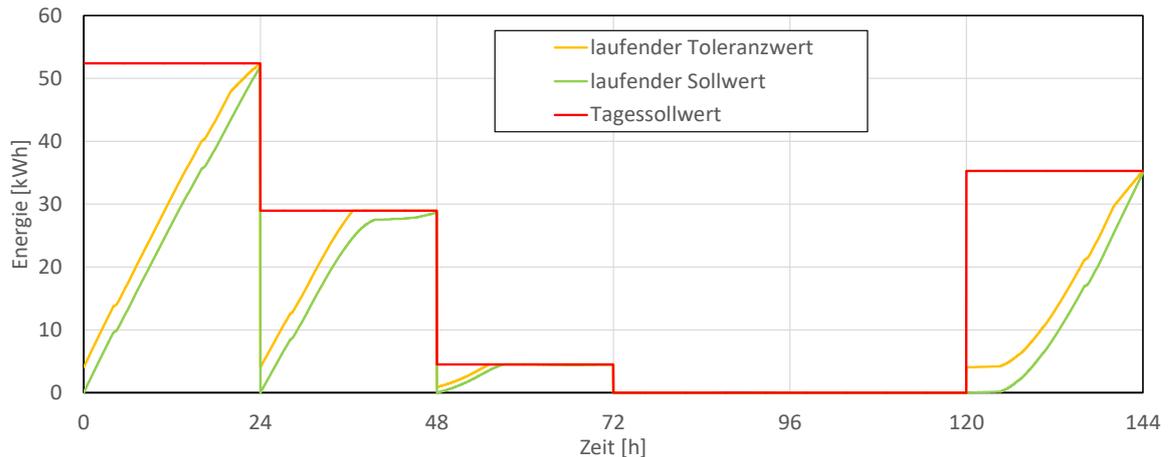


Abbildung 7: Vordefinierte Raumheizungslast als Tagessollwert. Die gelbe Linie zeigt die zulässige Obergrenze der kumulierten Energie (Toleranzwert) im Verlauf der Testtage. Bei Überschreiten dieser Linie wird die Energielieferung an das Gebäude durch den Prüfstand gedrosselt.

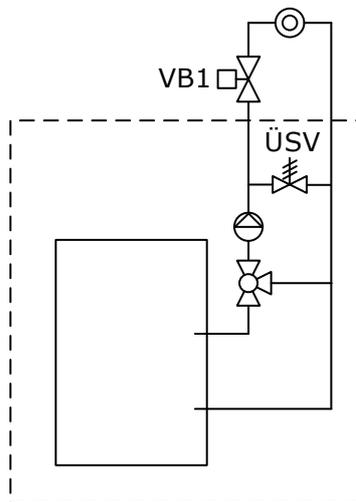


Abbildung 8: Begrenzung der Raumwärmelieferung durch den Prüfstand.

Um die Lieferung an Raumwärme zu begrenzen wird der Massenstrom im Heizkreis durch den Prüfstand begrenzt. Hierzu wird das in Abbildung 8 gezeigte Ventil „VB1“ verwendet.

Dieses Ventil wird nach 2 Kriterien angesteuert: Bei Überschreiten der Raum-Solltemperatur mit 50 %/K (Emulation eines Thermostatventils) und bei Überschreiten des laufenden Toleranzwertes mit 25 %/kWh. Entsprechend wird das Ventil sowohl komplett geschlossen wenn die Raumtemperatur 22 °C erreicht, als auch wenn der laufende Toleranzwert um 4 kWh überschritten ist. Spätestens bei Erreichen des Tages-Sollwertes für die Energielieferung wird das Ventil komplett geschlossen.

In Abbildung 9 wird die Umsetzung der Methode anhand eines Beispiels gezeigt: Die Ventilposition wird zu Beginn des Tages durch die Raumtemperatur im virtuellen Gebäude definiert (Phase „A“). Im gezeigten Beispiel überschreitet die tatsächliche Wärmelieferung an das Gebäude bereits nach circa einer Stunde den laufenden Sollwert mit Obergrenze (laufender Toleranzwert). Entsprechend wird in Phase „B“ die Ventilposition sowohl durch die Raumtemperatur als auch durch den Energiesollwert bestimmt. Die Wärme kann infolgedessen nur mit stark gedrosseltem Volumenstrom an das Gebäude geliefert werden. Nach ca. 23 Stunden ist das Tagessoll erreicht und das Ventil VB1 schliesst komplett. In Phase „C“ ist die Wärmelieferung an das Gebäude durch den Teststand unterbunden. Ohne die Begrenzung der Wärmelieferung wäre der Energieeintrag in das Gebäude an diesem Tag zu hoch gewesen und damit wäre ein direkter Vergleich der Resultate mit den Resultaten anderer geprüfter Heizsysteme nicht mehr möglich.

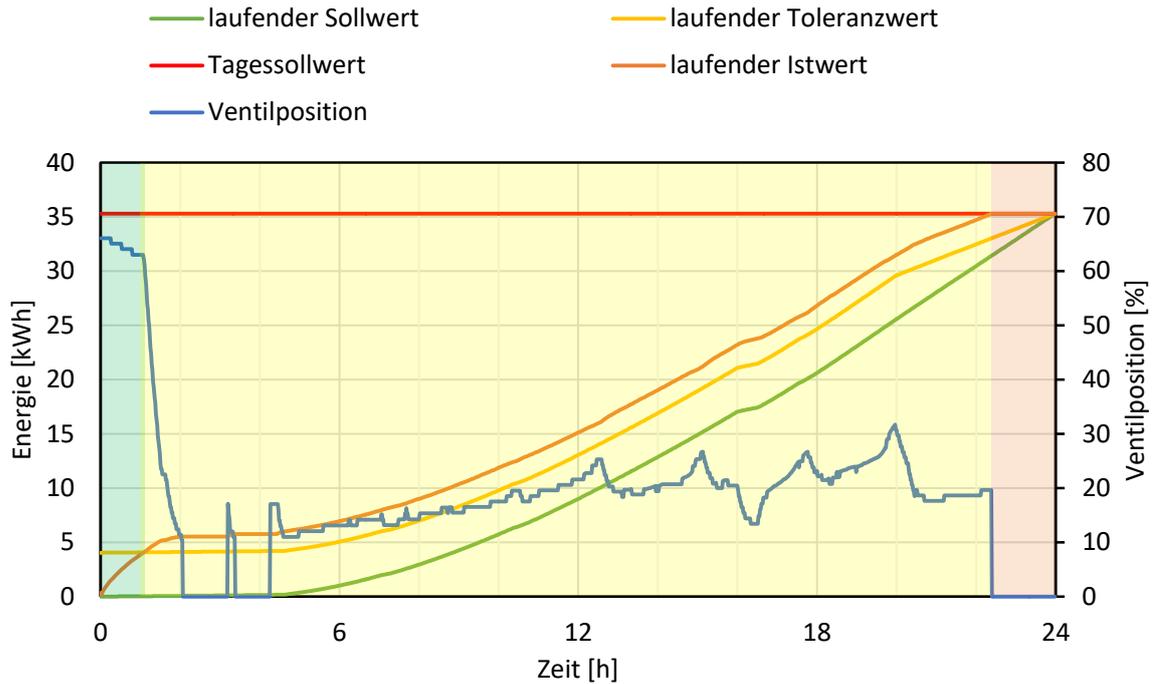


Abbildung 9: Umsetzung der Kombination einer vordefinierten Gebäudelast mit einer Simulation der Wärmeabgabe.

## 4.5 Vereinfachte Simulation der Erdsonden

### 4.5.1 Problemstellung

Bei der Verwendung von Wärmepumpen wird im CCT die Umweltwärme entsprechend der Wetterdaten des Tests zur Verfügung gestellt. Im Fall von Sole/Wasser Wärmepumpen mit Erdsonden als Quelle ist die Umweltwärme allerdings nicht nur von den aktuellen Temperaturen und Umwelteinflüssen abhängig, sondern auch von saisonalen Effekten, bzw. der Entzugsleistung aus dem Erdreich über die Wochen und Monate vor dem aktuellen Zeitpunkt.

Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, und trotzdem realistische Quelltemperaturen während dem Test zu gewährleisten, wurde bis anhin ein spezieller Ansatz in der Simulation und Emulation des Erdreiches verwendet:

- Die Simulation der Erdsonde erfolgt mit dem EWS Modell von Wetter & Huber (Wetter and Huber, 1997).
- Die 6 Test Tage des Prüfzyklus entsprechen einem konkreten Tag im Jahresdatensatz. Z.B. entspricht der Testtag 1 dem 1. März (Tag 60) aus dem Jahresdatensatz. Die Reihenfolge der Tage im Testprofil richtet sich nach der Reihenfolge der Tage im Jahreszyklus.
- Zur Konditionierung des Erdreiches wird am Prüfstand eine Simulation gestartet. Diese Simulation wird anfangs noch nicht auf Echtzeit gebremst. In der Simulation wird eine vordefinierte Entzugsleistung aus dem Erdreich entnommen.
- Zum Start des ersten Testtages, mit unserem Test-Profil also nach (365 + 60) Tagen, wird die Simulation zum einen auf Echtzeit gebremst und zum anderen mit tatsächlichen Messdaten aus dem Test (Eintrittstemperatur und Massenstrom) weitergeführt.
- Die Simulation läuft dann über 24 h in Echtzeit.



- Nach dem Ende des ersten Testtages wird die Simulation wieder mit den Jahreswetterdaten und der vordefinierten Last ungebremst fortgeführt um das Erdreich für den nächsten Testtag zu konditionieren. Bei Erreichen des nächsten Testtages wird die Simulation wieder auf Echtzeit und reale Messdaten umgestellt. Dieser Wechsel wird bis zum Ende des Tests in einem Rhythmus von 24 Stunden weitergeführt.

Durch diesen Ansatz wird sichergestellt, dass die Austrittstemperatur der Erdsonden zum einen von der aktuellen Entzugsleistung und dem tatsächlichen Volumenstrom abhängt, und zum anderen auch der jahreszeitliche Verlauf der Erdreichtemperaturen abgebildet wird. Diese Vorteile werden allerdings nur durch eine sehr aufwändige Umsetzung in der Kopplung der Prüfstands- und der Simulationssoftware erreicht, welche die Verfügbarkeit eines komplexen Erdsondenmodells voraussetzt. Im Projekt SolProof wurde daher eine einfachere und fehlerresistentere Alternative zu diesem Ansatz ausgearbeitet, die nicht mehr abhängig ist von einem proprietären Erdsonden-Modell.

Dieser neue Ansatz basiert wie zuvor auf einer Simulation des Erdreichs. Für die Simulation wurde allerdings das EWS Modell zum einen vereinfacht und zum anderen mit der Möglichkeit versehen, fixe Temperaturen im Erdreich zu ausgewählten Zeitpunkten vorzugeben.

#### **4.5.2 Vorgabe von fixen Temperaturen**

Das EWS Modell wurde so verändert, dass zu ausgewählten Zeitpunkten die Temperaturen an bestimmten Punkten im Erdreich eingelesen werden können. Auf diese Weise entfällt im Test der Wechsel zwischen der Simulation mit vordefinierter Last und Simulation in Echtzeit mit Daten aus dem Test. Dadurch kann das Testverfahren deutlich vereinfacht werden. Es muss keine vordefinierte Last zwischen den Tagen definiert und eingebunden werden in die Prüfprozedur, und es werden dennoch identische Rahmenbedingungen für alle geprüften Systeme garantiert.

#### **4.5.3 Vereinfachung des EWS Modells**

Im EWS-Modell wurden inklusive Temperatur des Erdsondenrohres 7 radiale und 5 axiale Temperaturknoten simuliert. Der äusserste Temperaturknoten in radialer Richtung wird üblicherweise einmal pro Woche neu berechnet mit Hilfe einer g-Funktion oder einem anderen Verfahren zur Bestimmung der Langzeit-Veränderungen der Temperaturen im Fernbereich der Erdsonde. Im neu vereinfachten Ansatz werden die Temperaturen aller radialen und axialen Knoten zu Beginn jeden Tages neu initialisiert (= auf einen vorgegebenen Wert gesetzt, der für alle Prüfungen gleich ist), so dass auf die Berechnung der Langzeit-Veränderung des Fernbereiches komplett verzichtet werden kann. Von der Möglichkeit, für verschiedene axiale Schichten unterschiedlichen Eigenschaften (Kapazität, Wärmedurchgang etc.) vorzugeben wurde nicht Gebrauch gemacht.

Es wurden zwei weitere Vereinfachungen des Modells hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Austrittstemperatur der Erdsonden und die Entzugsleistung aus dem Erdreich untersucht:



$$CCT - T_{boco}^{radial}$$

Für diese Version werden zu Beginn jedes Testtages unterschiedliche Temperaturen in radialer Richtung vorgegeben, jedoch nicht in axialer Richtung. D.h. die 5 Knoten welche an axial unterschiedlichen, jedoch radial identischen Positionen sind, weisen zu Beginn jeden Testtages dieselbe Temperatur auf.

$$CCT - T_{boco}^{axial}$$

Für diese Version werden zu Beginn jedes Testtages unterschiedliche Temperaturen in axialer Richtung vorgegeben, jedoch nicht in radialer Richtung. D.h. die 7 Knoten welche an radial unterschiedlichen, jedoch axial identischen Positionen sind, weisen zu Beginn jeden Testtages dieselbe Temperatur auf.

Für beide Varianten wurden Simulationen durchgeführt und mit der bisher verwendeten detaillierten Abbildung des Erdreiches verglichen. Resultate aus dem Vergleich einer Simulation mit nur radial abhängiger Temperatur-Initialisierung ( $CCT - T_{boco}^{radial}$ ) sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Diese Variante zeigt leichte Abweichungen der Entzugsleistung und der Temperaturen des Sonden-Vorlaufs, so dass am Ende der Testsequenz ein signifikanter Unterschied in der bezogenen Energiemenge zu erkennen ist. In Abbildung 12 und Abbildung 13 sind die Resultate mit nur axial abhängiger Temperatur-Initialisierung dargestellt ( $CCT - T_{boco}^{axial}$ ). Die Resultate aus dieser Simulation zeigen weniger Unterschiede zur Referenz-Simulation. Aus diesem Grunde wurde zur Umsetzung am Prüfstand das Modell  $CCT - T_{boco}^{axial}$  mit nur axial abhängiger Temperatur-Initialisierung ausgewählt und implementiert.

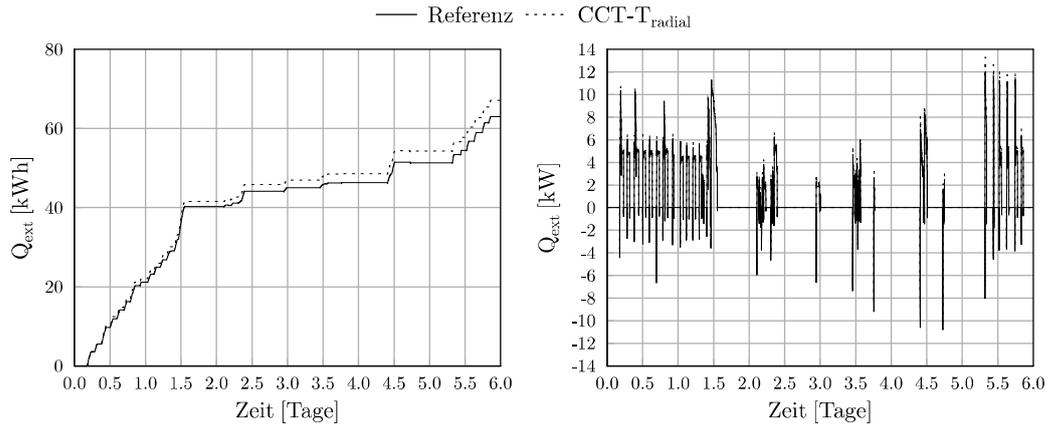


Abbildung 10: Kumulierte Energie (links) und Entzugsleistung (rechts) aus einem durchgeführten Test mit detaillierter Simulation inklusive Zwischentage und einer Simulation mit axial konstanter Temperaturinitialisierung ( $CCT - T_{boco}^{radial}$ ).

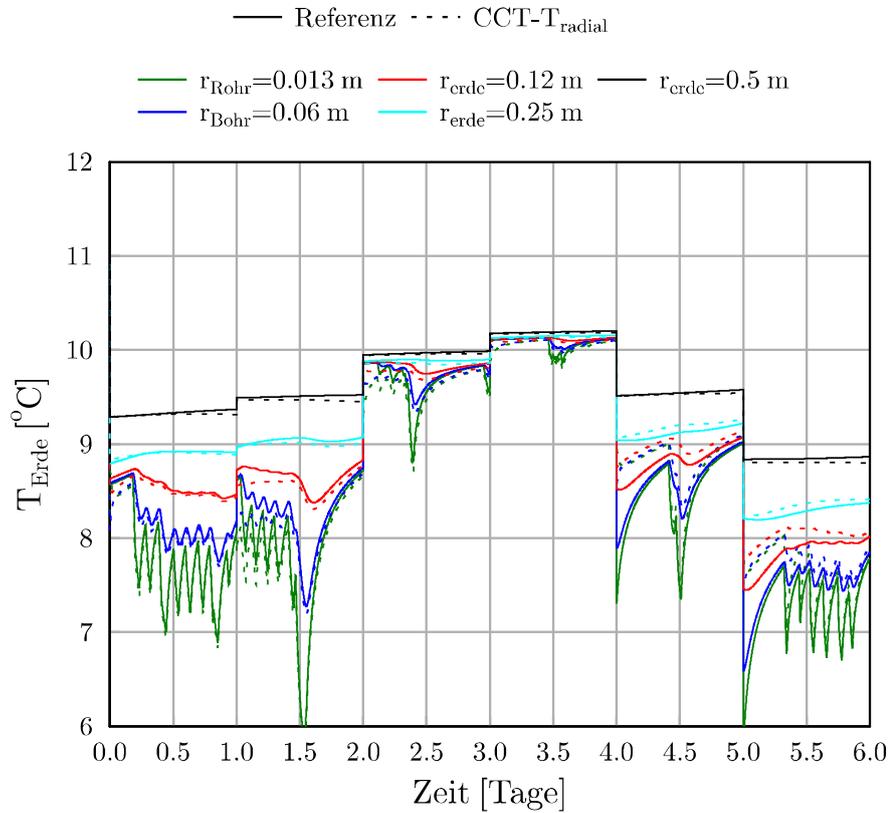


Abbildung 11: Radiale Temperaturverteilung aus einer Referenzmessung mit detaillierter Simulation und einer Simulation mit axial konstanter Temperatur-Initialisierung ( $CCT - T_{boco}^{radial}$ ).

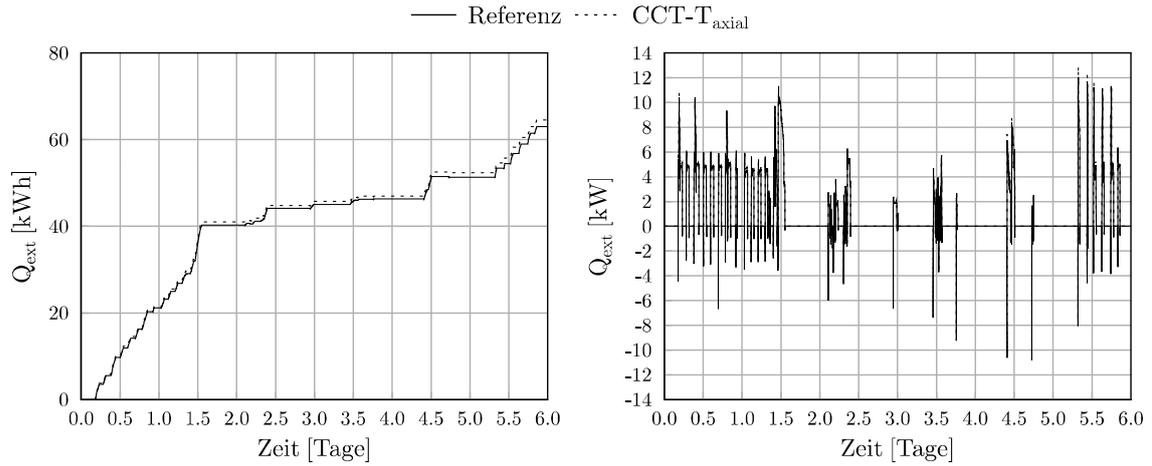


Abbildung 12 Kumulierte Energie (links) und Entzugsleistung (rechts) aus einem durchgeführten Test mit detaillierter Simulation inklusive Zwischentage und einer Simulation mit radial konstanter Temperaturinitialisierung (CCT –  $T_{boco}^{axial}$ ).

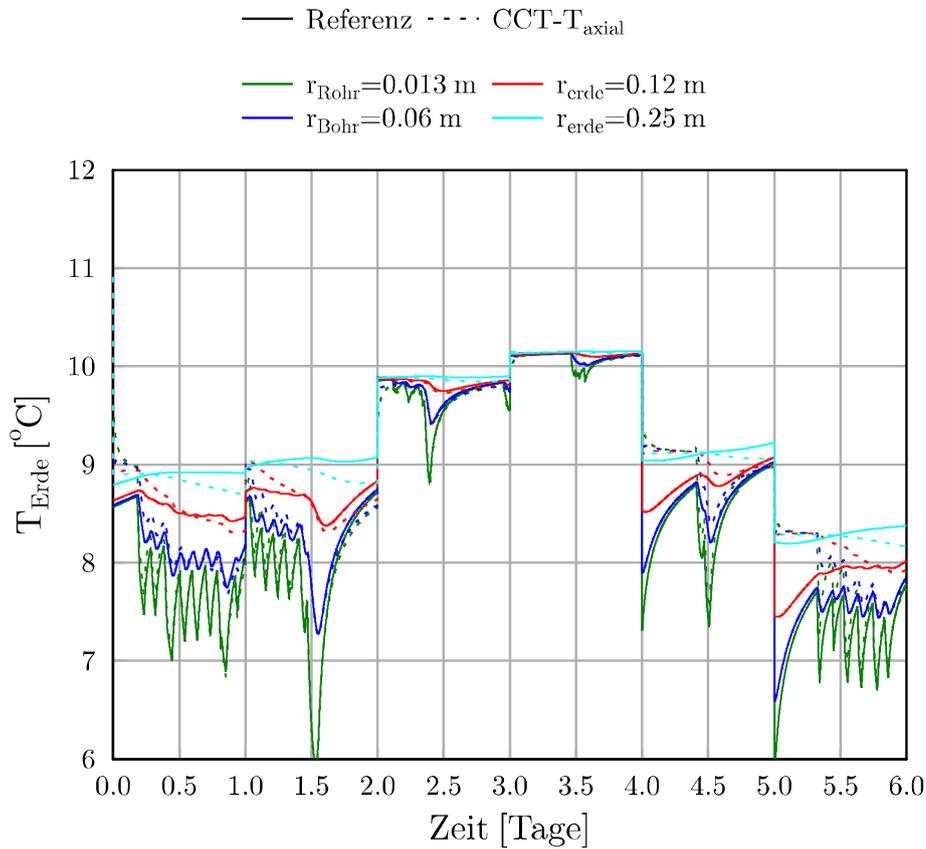


Abbildung 13: Radiale Temperaturverteilung aus einer Referenzmessung mit detaillierter Simulation und einer Simulation mit radial konstanter Temperatur-Initialisierung (CCT –  $T_{boco}^{axial}$ ).



## 4.6 Emulation der Kollektorkreisleitung

### 4.6.1 Problemstellung

Bisher wurde die Kollektorkreisleitung als Teil des zu prüfenden Systems angesehen und musste daher real installiert werden. Die Installation einer 15 m Leitung (im Vor- und Rücklauf) gestaltete sich jeweils als aufwändig. Eine besondere Schwierigkeit bestand darin, die Leitung ohne Knickstellen (mit entsprechendem Druckverlust) und mit genügend grossem Abstand der Leitungsstücke auf kleinem Raum umzusetzen.

Aus der Harmonisierung der verschiedenen Prüfmethode im Projekt MacSheep resultierte eine Verkürzung der Leitungslänge auf 10 m. Zusätzlich wurde die Kollektorkreisleitung als optionale Komponente eingestuft, die sowohl installiert als auch simuliert und emuliert werden kann. Allerdings wurde kein Vorgehen zur Simulation und Emulation definiert.

Ein Grund für fehlende Vorgaben in diesem Bereich sind Schwierigkeiten, die Leitung zu simulieren und in der Folge auch zu emulieren unter Berücksichtigung der Trägheit des Systems. Die Zeit zum Durchströmen der kompletten Leitung beträgt bei einer Kollektorfläche von 10 m<sup>2</sup> und einer DN16 Leitung zwischen 35 s und 92 s<sup>6</sup>. Die Austrittstemperatur aus der Kollektorkreisleitung ändert sich in der Realität erst, nachdem der Inhalt der Leitung ausgestossen wurde.

Die Zeitschritte der Simulation für die Berechnung des Kollektorfeldes betragen im CCT 60 s. Ein neuer Wert wird immer zu Beginn des Zeitschrittes vorgegeben. Durch den Prüfstand muss die Austrittstemperatur der Kollektorkreisleitung jedoch jederzeit realistisch auf Grund der Simulationsergebnisse emuliert werden, unabhängig davon wann die Kollektorkreispumpe startet oder stoppt. Daneben ist die Temperatur am Kollektorfühler im Kollektorfeld ein entscheidender Punkt. Diese Temperatur muss für das geprüfte System als Entscheidungsgrundlage für den Betrieb des Kollektorkreises bekannt sein.

### 4.6.2 Umsetzung am Prüfstand

Die Simulation des Kollektorfeldes ist mit dem Prüfstand verknüpft. Die Messdaten für Durchsatz und Eintrittstemperatur werden durch den Prüfstand aufgenommen und an das Simulationsmodell kommuniziert. Dieses Modell errechnet damit die Austrittstemperatur und übergibt diese an den Prüfstand zur Emulation. Durch die Integration der Kollektorkreisleitung in die Simulation musste die Kommunikation zwischen Prüfstand und Simulation erweitert werden. Neu wird die Austrittstemperatur aus der Kollektorkreisleitung an den Prüfstand übergeben. Im Anhang F wird gezeigt, wie die Berechnung der Temperatur in Fällen mit und ohne Durchsatz im Kollektor berechnet wird. Als Entscheidungsgrundlage für das geprüfte System ist die Temperatur im Kollektor (beziehungsweise am Kollektorfühler) nötig. Diese Temperatur wird nun zusätzlich übergeben und in einer Emulationsbox nachgestellt. In dieser Emulationsbox ist der Kollektorfühler platziert.

## 4.7 Kennzahlen

Der Testzyklus des CCT ist für ein sehr breites Spektrum an unterschiedlichen Systemen gleichermaßen geeignet. Es können Systeme mit PV-Modulen oder solarthermischen Kollektoren, mit Verbrennungskesseln (mit verschiedenen Brennstoffen) oder Wärmepumpen (mit verschiedenen Wärmequellen) getestet werden. Je nach System sind dabei verschiedene Kennzahlen von Interesse.

---

<sup>6</sup> mit einem spezifischen Durchsatz von 15 - 40 kg/(m<sup>2</sup>h). Bei 15 m<sup>2</sup> Kollektorfläche resultieren 23 s bis 61 s.



Im Fall von Systemen, die Heizkessel für die Nachheizung verwenden in Kombination mit oder ohne Solarwärme, werden aus der Nutzwärme und dem Brennstoffbedarf verschiedene Nutzungsgrade berechnet. Der einfachste System-Nutzungsgrad berücksichtigt nur den Energieeintrag durch den Brennstoff in Form des oberen Heizwertes (Formel 4). Bezüglich der Ausnutzung des gesamten thermischen Energieeintrags ist auch der System-Nutzungsgrad unter Berücksichtigung des solaren Energieeintrages relevant (Formel 5). Der System-Nutzungsgrad (Formel 6) berücksichtigt die Energie-Einträge durch den Brennstoff und mit Faktor 3 gewichtete elektrische Hilfsenergie, und gibt damit Auskunft über die Menge nicht-solarer Energie welche im Verhältnis zur Nutzenergie aufgewendet werden muss. Die Ausnutzung des gesamten Energieeintrags (Brennstoff + Solar + Elektrisch) wird mit (Formel 7) berechnet.

$$\zeta_{S,B} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B} \quad \text{Formel 4}$$

$$\zeta_{S,B+Sol} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B + Q_{Sol}} \quad \text{Formel 5}$$

$$\zeta_{S,B+el} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B + F_{el} \cdot W_{NB}} \quad \text{Formel 6}$$

$$\zeta_{S,B+Sol+el} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B + Q_{Sol} + F_{el} \cdot W_{NB}} \quad \text{Formel 7}$$

Im Falle von Systemen mit Wärmepumpen als Nachheizung wird die **Arbeitszahl** des Heizsystems bestimmt. Diese zeigt die Effizienz der gesamten Anlage und beinhaltet entsprechend auch die Verluste des Speichers / der Speicher und der Hydraulik (Formel 8). Mit dieser Definition unterscheidet sich die Arbeitszahl deutlich von der Definition, die z.B. von Miara (Miara et al., 2011) angewendet wird. In (Haller et al., 2014) wird gezeigt, dass die Jahresarbeitszahl (JAZ) durch die Berücksichtigung der Nutzwärme anstelle der Wärme, die an den Speicher geliefert wird, um 0.2 – 0.5 Punkte tiefer ausfällt. Die im Test ermittelten Arbeitszahlen (AZ) entsprechen gleichzeitig der Jahresarbeitszahl (JAZ), mit Ausnahme von Systemen mit solarthermischen Kollektoren, bei denen ein Korrekturfaktor für die Extrapolation nötig ist (vgl. Kapitel 4.3 6-Tages Profil).

$$AZ_{System} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{W_{el,HSys}} \quad \text{Formel 8}$$

Für Systeme, die PV-Anlagen enthalten, werden weitere Kennzahlen bestimmt.

Der **Gesamt-Nutzenergiebedarf** ergibt sich aus der Summe des Haushaltsstrombedarfs sowie den thermischen Energielieferungen für Raumheizung und Warmwasser:

$$E_{use} = Q_{RH} + Q_{WW} + W_{HH} \quad \text{Formel 9}$$

Das **Eigenverbrauchsverhältnis** gibt an, welcher Anteil des lokal produzierten PV-Stroms selbst verbraucht wird:



$$R_{\text{eig}} = \frac{W_{\text{ges}} - W_{\text{NB}}}{W_{\text{PV}}}$$

Formel 10

Die Unabhängigkeit vom externen Stromnetz wird durch den **Autarkiegrad** beschreiben:

$$R_{\text{aut}} = \frac{W_{\text{ges}} - W_{\text{NB}}}{W_{\text{ges}}}$$

Formel 11

Das Eigenverbrauchsverhältnis und der Autarkiegrad sind unter Umständen irreführende Kenngrößen. Durch den Einsatz einer Batterie oder eines thermischen Speichers wird zwangsläufig der elektrische Gesamtverbrauch erhöht<sup>7</sup>. Durch den grösseren Gesamtverbrauch, der jeweils im Zähler der Formeln zu finden ist, erhöht sich sowohl das Eigenverbrauchsverhältnis als auch der Autarkiegrad. Beide Werte nehmen zu je höher die Verluste durch die Speicherbewirtschaftung (sowohl Batterie als auch thermischer Speicher) sind.

Deshalb wird als weitere Kennzahl die **Netzaufwandszahl** bestimmt. Sie beschreibt das Verhältnis der ab Netz bezogenen Energie zum Gesamt-Nutzenergiebedarf:

$$R_{\text{net}} = \frac{W_{\text{NB}}}{E_{\text{use}}}$$

Formel 12

---

<sup>7</sup> Eine Batterie hat immer einen Wirkungsgrad < 1. Durch die Wechselrichter von AC zu DC bei der Beladung und von DC zu AC bei der Entladung sowie durch die Zelle selbst entstehen Verluste, und die Batterie bezieht auch im Standby elektrische Leistung für die Regelung und die Ladungserhaltung. Diese Verluste erhöhen den Gesamtverbrauch eines Systems.



## 5 Kompaktheit und Fehlerresistenz

### 5.1 Einführung und Übersicht

Den Kern der Messung eines Komplettsystems bildet nach wie vor der Concise Cycle Test (CCT). Neu wird diese Messung durch weitere Prüfungen und Massnahmen flankiert: Eine Bewertungsmatrix zur Kompaktheit und Fehlerresistenz wird zur Beurteilung des Systems eingeführt. Die entsprechenden Verfahren zur Bestimmung der Kompaktheit sind unter Abschnitt 5.2, jene zur Bestimmung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit unter 5.3 beschrieben. Bei der Definition der Kriterien für Kompaktheit und Fehlerresistenz wurde das SPF durch eine Begleitgruppe mit Teilnehmern aus folgenden Unternehmen unterstützt (alphabetische Reihenfolge):

- Helvetic Energy GmbH
- Hoval AG
- Marti Energietechnik
- Ratiotherm Heizung + Solartechnik GmbH & Co. KG
- Soltop Schuppisser AG

Das Gesamt-Resultat wird nicht als Zahlenwert, sondern als Symbol (vgl. Abbildung 14) dargestellt. Ein heute übliches Standardsystem welches dem Stand der Technik entspricht wird mit einer neutralen Wertung versehen, Abweichungen im Positiven werden mit einem grün hinterlegten „Plus“ und Abweichungen im Negativen werden mit einem rot hinterlegten „Minus“ versehen.

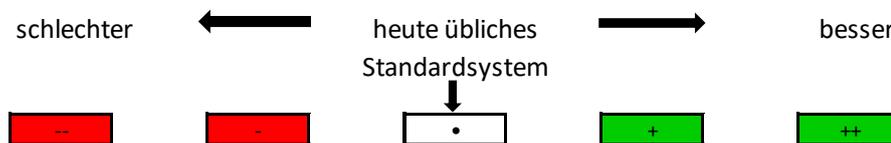


Abbildung 14: Darstellung für die Bewertung von Kompaktheit und Fehlerresistenz.

### 5.2 Kriterien für die Kompaktheit eines Systems

Für die Bewertung der Kompaktheit des Systems wurden gemeinsam mit der Begleitgruppe die folgenden fünf Parameter diskutiert und in der Folge festgelegt:

- K1: Anzahl der gelieferten Einzelkomponenten
- K2: Dimensionen und Gewicht der gelieferten Einzelkomponenten
- K3: Anzahl Regler-Einheiten
- K4: Anzahl Mann-Stunden für die Installation und Inbetriebnahme
- K5: Vollständigkeit, respektive Kompaktheit der gelieferten oder vormontierten Wärmedämmung

Das Verfahren ist in Anhang B inklusive Berechnung einer Kennzahl mit Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Teilaspekte ausführlich beschrieben.



### 5.3 Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit

Wie zur Bewertung der Kompaktheit werden auch zur Bewertung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit mehrere Teilergebnisse aufgenommen. Die effektive Verhinderung von Schwerkraftzirkulation und die Siphonierung der Anschlüsse werden dabei auf Grund von Messungen im Prüfstand bewertet.

#### 5.3.1 Vermeidung von Schwerkraftzirkulation

Unerwünschte Schwerkraftzirkulation über die Vor- und Rücklaufleitung angeschlossener Wärmeerzeuger kann dazu führen, dass die im Wärmespeicher eingelagerte Wärme über Nacht wieder verloren geht. Aus diesem Grund muss Schwerkraftzirkulation mit geeigneten Massnahmen, zum Beispiel mit Rückschlagventilen oder stromlos geschlossenen Ventilen, verhindert werden<sup>8</sup>. Um die Massnahmen zur Verhinderung der Schwerkraftzirkulation zu überprüfen wird im Teststand eine Druckdifferenz auf die entsprechenden Vor- und Rücklaufleitungen des Prüflings appliziert und die Reaktion des Systems darauf gemessen. Um diese Messung in jedem hydraulischen Kreis jeweils in beide Richtungen durchführen zu können, wurde der Prüfstand entsprechend ausgebaut. In Abbildung 15 ist exemplarisch das Hydraulikschema des Emulators der Raumheizlast des Gebäudes dargestellt. Die grün eingezeichneten Komponenten wurden in jedem der einzelnen Kreise ergänzt, um die Applikation einer Druckdifferenz von aussen und den dadurch entstehenden Durchfluss und Temperaturantworten messen zu können.

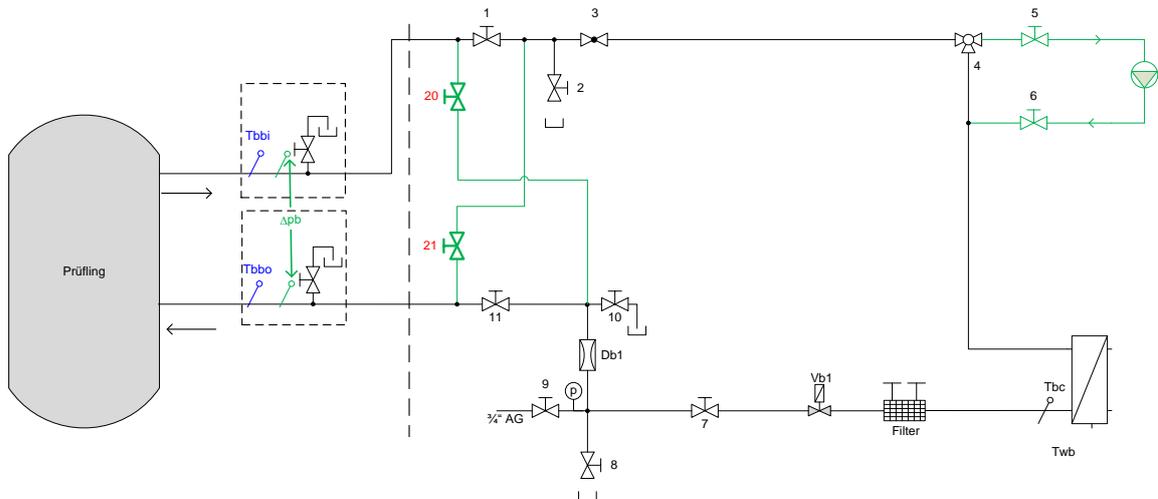


Abbildung 15: Hydraulikschema des Emulators der Raumheizlast des Gebäudes. Die grün eingezeichneten Komponenten wurden zur Messung der Schwerkraftzirkulation eingeführt.

Um dies messtechnisch erfassen zu können, muss der Speicher auf eine homogene Temperatur von mindestens 40 °C konditioniert werden. Seitens des Prüfstandes muss sichergestellt werden, dass die Temperatur in den Rohrleitungen der Raumtemperatur entsprechen. Es darf also über einen längeren Zeitraum kein Durchsatz in der Verbindung zwischen Prüfstand und Prüfling stattfinden. Nach Applizieren der Druckdifferenz werden die Temperaturen des eingetauchten Temperaturfühlers an der Schnittstelle zum Prüfling beobachtet. Steigt die Temperatur an, so kann dies nur durch eine erzwungene Zirkulation ausgelöst sein. Ist jedoch weder

<sup>8</sup> Eine Siphonierung der Anschlüsse verhindert die Schwerkraftzirkulation nicht.



ein Durchfluss<sup>9</sup> noch eine signifikante Temperaturänderung feststellbar, so ist die Zirkulation ausreichend verhindert.

**Schwerkraftzirkulation über die Nachheizung:** Die Messung einer möglichen Schwerkraftzirkulation kann nur an der Schnittstelle zum Prüfstand erfolgen. Zwischen einem Wärmeerzeuger und dem Speicher sind in der Regel keine Messinstrumente installiert, da dies ein Eingriff in das installierte System bedeuten würde und einen Einfluss auf den Druckverlust und die Wärmeverluste hätte. Damit sind Wärmeverluste durch Schwerkraftzirkulation über die Nachheizung inhärent in den Energiebilanzen des Systemtests enthalten. Diese sind jedoch nicht unabhängig von der vom Installateur gewählten Platzierung der Zusatzheizung gegenüber dem Speicher. Um feststellen zu können, ob Schwerkraftzirkulation während dem Test auftritt, werden an den Rohrleitungen Anlegefühler von aussen aufgeklebt. Anhand des Temperaturverlaufs in Stillstandszeiten während des Systemtests kann somit eine qualitative Aussage über die Schwerkraftzirkulation getroffen werden.

### 5.3.2 Siphonierung

Zur Bewertung einer effektiven Siphonierung der Anschlüsse am Speicher zur Verhinderung von Einrohrzirkulation muss von einem aufgewärmten Speicher ausgegangen werden. Gemessen werden die Temperaturen an allen Anschlüssen des Speichers, sofern diese zugänglich sind. Falls die Anschlüsse in einer fest verbauten Hydraulikeinheit nicht zugänglich sind, wird nach dieser Hydraulikeinheit gemessen. Diese Messung kann optisch (mittels einer quantitativen Infrarotmessung) oder durch gut isolierte Pt100 Anlegefühler erfolgen.

Gemessen wird innerhalb eines Abstandes von 50 cm zur Speicherisolation bzw. zur Schnittstelle zwischen Prüfstand und Speicher. Wichtig ist, dass die Messung auf der Speicherseite von allfälligen Siphonierungen oder abwärts führenden Rohren der Prüfstandkomponenten erfolgt. Die Temperaturdifferenz aus der gemessenen Temperatur am Rohr und der Raumtemperatur, geteilt durch die Temperaturdifferenz zwischen dem Speicher und dem Raum, ist ein Indikator für mangelhafte Siphonierung. Entsprechend wird die Effizienz der Siphonierung definiert als:

$$\eta_{Siphon} = 1 - \frac{T_{rohr} - T_{amb}}{T_{Sp} - T_{amb}} \quad \text{Formel 13}$$

Da eine fehlende oder mangelhafte Siphonierung weiter oben an einem Wärmespeicher gravierendere Auswirkungen hat als weiter unten – die Auskühlung wirkt sich jeweils nur auf den Bereich unterhalb des Anschlusses aus – werden die für verschiedene Anschlüsse gemessenen Werte gewichtet mit der Höhe des entsprechenden Anschlusses:

$$\eta_{Siphon,gewichtet} = \frac{\sum \eta_{Siphon,i} \cdot G_i}{\sum G_i} \quad \text{Formel 14}$$

$$G_i = \frac{h_i - h_{Sp,unten}}{h_{Sp,oben} - h_{Sp,unten}} \quad \text{Formel 15}$$

---

<sup>9</sup> Die Durchflussmessgeräte im Prüfstand sind nicht auf kleine Durchsätze ausgelegt. Um sicher einen Durchsatz messen zu können muss dieser oberhalb der Messgenauigkeit des Messgerätes sein.



### 5.3.3 Weitere Kriterien der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit

Zehn weitere Kriterien zur Beurteilung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit wurden im Projekt SolProof mit der Begleitgruppe diskutiert und festgelegt:

- F1: Vollständigkeit der Lieferung
- F2: Vollständigkeit der Dokumentation
- F3: Eindeutigkeit der Anschlüsse (hydraulisch)
- F4: Eindeutigkeit der Sensorplatzierung und –anschlüsse
- F5: Pumpenanschluss
- F6: Füllverhalten
- F7: Frostschutzlieferung
- F8: Bedienung und Fehlererkennung des Reglers
- F9: Monitoring der Wärmemengen
- F10: Stagnationsverhalten.

Diese Kennzahlen sind in Anhang C, inklusive der genauen Verfahren und Formeln zur Berechnung einer gewichteten Kennzahl, dargestellt.

### 5.4 Nicht bewertete Kriterien der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit

Zu beachten ist, dass für die Bewertung von Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit im Labor nur die Komponenten aus dem Technikraum berücksichtigt werden können. Wichtige Kriterien wie z.B. die Platzierung von Kollektortemperaturfühlern, die hydraulische Verschaltung der Kollektoren zu einem Feld sowie die Kollektorkreisleitungen zum Dach können im Labor nicht bewertet werden. Auf Grund der Erfahrungen der Begleitgruppe sind jedoch auch dort häufig Probleme zu finden.

Kontroverse Diskussionen wurden zur Austauschbarkeit von Komponenten geführt. Speziell in der Kritik stehen dabei Pumpen. Modelle mit herstellereinspezifischen Abmessungen oder Anschlüssen sind unter Umständen nach einer gewissen Betriebszeit nicht mehr leicht zu ersetzen. Trotz dieses Risikos werden solche Pumpen als positiv bewertet, da die Vorteile einer vordefinierten Verbindung mit dem Regler (zur Stromversorgung oder für einen drehzahlregelten Betrieb) als wichtiger erachtet wurden als das Risiko eines Ausfalls.

Neben dem Einbau der Pumpen spielt auch deren Förderhöhe eine wichtige Rolle. Speziell für Pumpen im Kollektorkreis sind ausreichende Reserven der Förderhöhe der Pumpen von Bedeutung. Wie bereits beschrieben hängen diese Reserven aber von Parametern ab, die in der Beurteilung nicht berücksichtigt werden können. Der Druckverlust im Kollektorkreis wird im Test entsprechend einer Leitungslänge von 10 m und den Daten des hinterlegten Kollektorfeldes eingestellt. Im Feld variiert die Leitungsläng, zusätzlich kann der Druckverlust durch Knickstellen in den Leitungen, eine fehlerhafte Verbindung der Kollektoren, oder zusätzliche Kollektoren erhöht werden.



## 6 Bestimmung repräsentativer Wärmeverluste

Türk u.a. (Türk et al., 2016) haben drei der Speicher, deren Schichtungseffizienz und Wärmeverluste an einem typischen Betriebstag im Projekt StorEx (Haller et al., 2015) gemessen wurden, mit weiteren Testmethoden für die Bestimmung von thermischen Verlusten geprüft und die Ergebnisse gegenübergestellt (vgl. Abbildung 16). Die Messungen nach verschiedenen Normen liefern unterschiedliche Ergebnisse. Die Verluste welche mit einem realistischen 24-Stunden Testzyklus im Projekt StorEx bestimmt wurden liegen deutlich tiefer als die Stillstandsverluste aus den standardisierten Messverfahren nach Europäischen Prüfnormen. Dies liegt vor allem daran, dass die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Umgebung im realitätsnahen StorEx Test deutlich tiefer ist als die Temperaturdifferenz die bei Standard-Prüfverfahren gefordert wird. Durch eine Skalierung auf eine ähnliche Temperaturdifferenz liegen die StorEx Ergebnisse im selben Bereich und weisen dabei auch dieselbe Rangordnung auf.

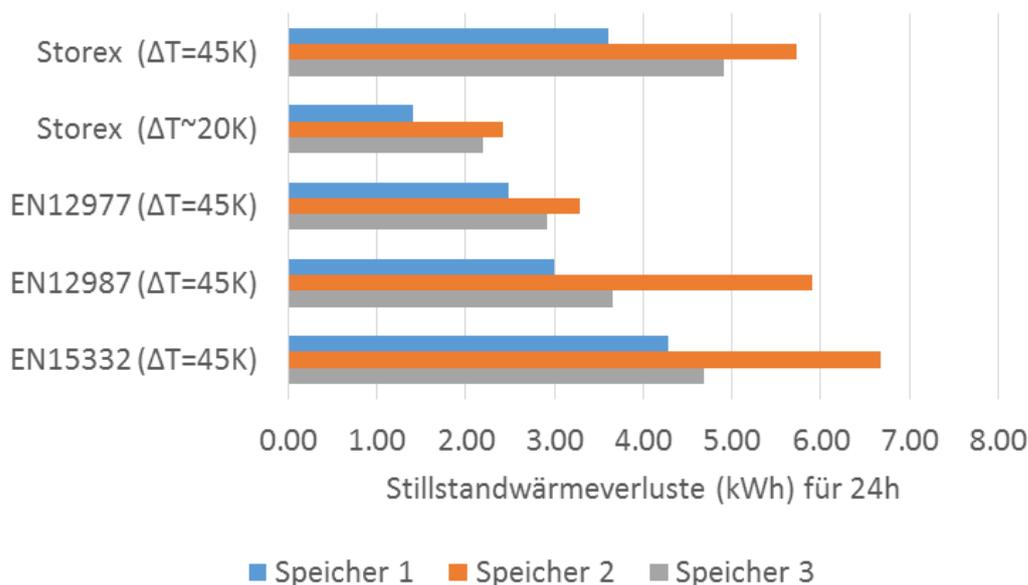


Abbildung 16: Vergleich der Wärmeverluste von drei Speichern, ermittelt mit verschiedenen Testmethoden.  
Quelle: Türk u.a. (2016).

Ein Problem bei der Bestimmung der Verluste nach der Methode im Projekt StorEx ist die Unsicherheit des Ergebnisses. Diese liegt bei bis zu 67 % (1-fache Standardabweichung in % des Messwertes). Diese grosse Unsicherheit ist verursacht durch die Tatsache, dass die Verluste bestimmt werden aus der Input-Output Bilanz des Wärmeumsatzes, d.h. aus der Differenz zweier im Vergleich zu den Verlusten selber sehr grossen Werten.

Für die Bestimmung einer realen Wärmeverlustrate wurde im Projekt SolProof der Zyklus des StorEx-Tests so abgewandelt, dass der Energieumsatz im Verhältnis zu den Verlusten deutlich geringer ist als in StorEx. Wichtig ist dabei, dass die Temperatur im Speicher während des Testzyklus vergleichbar mit der Temperatur eines Speichers in der Heizperiode ist. Höhere Verluste in den Sommermonaten sind kaum relevant, weil sie durch Ertragsüberschüsse solarthermischer Anlagen sozusagen gratis ersetzt werden können. Aus Sicht der Vermeidung von Stagnation im Kollektorfeld sind hohe Verluste im Sommer sogar eher als positiv zu bewerten.

Zur Auswahl eines passenden Tages wurden Jahressimulationen eines mit Messdaten parametrisierten Simulationsmodelles durchgeführt. Das verwendete Modell wurde im Rahmen des



Projektes MacSheep erstellt (Haberl et al., 2015). In einer Simulation wurde ein Kombispeicher durch eine Wärmepumpe und solarthermische Kollektoren beladen. In der zweiten Simulation wurde der Kollektorkreis deaktiviert. In Abbildung 17 sind Tagesresultate aus einer der Simulationen zu sehen. Gezeigt wird der elektrische Energiebedarf der Nachheizung, die Wärmelieferung an das Gebäude sowie die Speicherverluste über der mittleren Speichertemperatur (Werte jeweils über 24 h).

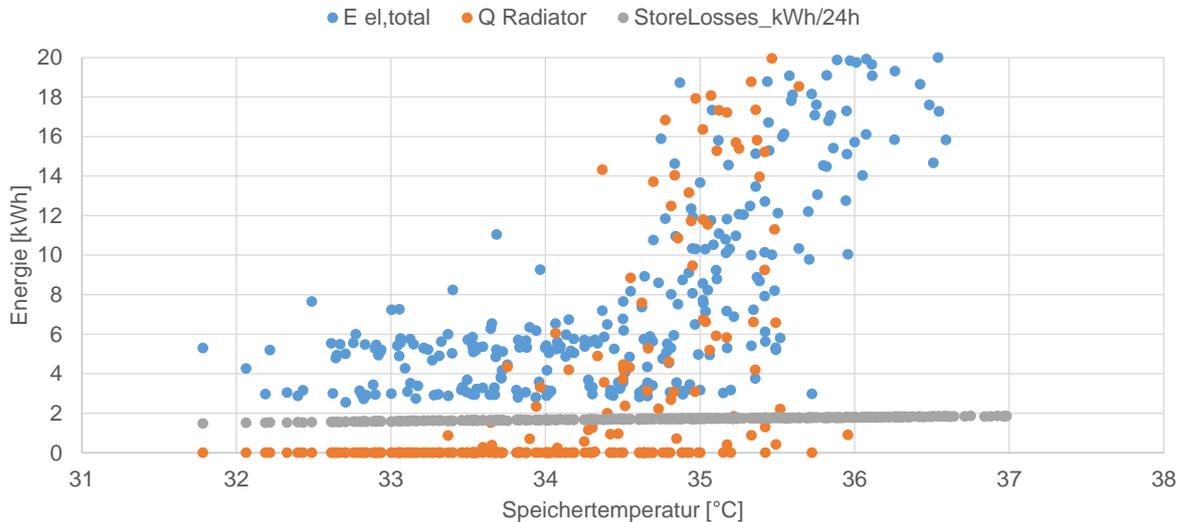


Abbildung 17: Simulation eines Heizsystems ohne solarthermische Kollektoren. Tagesergebnisse sortiert nach der mittleren Speichertemperatur aus einer Jahressimulation.

Die Simulationen zeigen, dass die mittlere Speichertemperatur während der Heizperiode ohne Solarwärme bei ca. 35 °C liegt. Mit höherem Heizwärmebedarf steigt die Temperatur im Speicher nicht signifikant weiter an. Mit dieser Erkenntnis wurde zur Auswahl eines passenden Tages für ein 24-Stunden Testprofil folgende Kriterien definiert:

- Während dem betreffenden Tag soll eine realistisch Warmwasser- und Raumwärmelast gedeckt werden.
- Der Gesamt-Energieumsatz des Tages sollte möglichst klein sein.
- Die mittlere Speichertemperatur sollte zwischen 35 °C und 40 °C betragen.
- Das Concise Cycle Kriterium soll erfüllt sein. D.h., die Speichertemperatur zu Beginn und am Ende des Tages sollte identisch sein, so dass bei nahtloser Wiederholung dieselben Ergebnisse erzielt werden.

Insgesamt gibt es aus der ersten Simulation im Verlauf des Jahres 7 Tage, die den oben genannten Kriterien entsprechen. Aus diesen Tagen wurde der einzige Tag ausgewählt, an dem der Kollektorertrag vernachlässigbar klein ist ( $< 1$  kWh/d). Dieser Tag entspricht auch in der Simulation ohne Solarwärme den genannten Kriterien. Es handelt sich um Tag 63 aus dem Prüfzyklus. In Abbildung 18 sind die Wetterdaten dieses Tages dargestellt. Durch die Korrektur der Aussentemperatur zu Beginn und Ende des Tages wird eine identische Anfangs- und Endtemperatur erreicht (Concise Cycle).

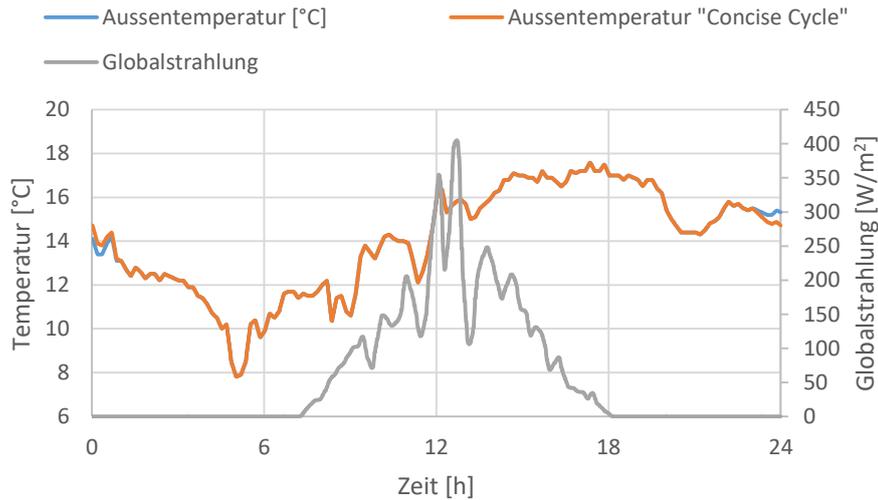


Abbildung 18: Wetterdaten des 24-Stunden Testzyklus zur Bestimmung der realen Verluste eines Kombispeichers.

In Abbildung 19 sind die Profile für die Raumheizung und den WW Bezug zu sehen. Die Heizleistung ist ausreichend, um das hinterlegte Gebäude am Prüftag auf 20 °C zu halten.

Ein Profil aus den „EU tapping cycle“ oder ähnlichem für den Warmwasserbezug wurde nicht verwendet, da der Bezug nur dazu dient eine Beladung des WW-teils im Speicher zu triggern. Mit einem Profil welches die Zapfungen zu stark über den Tag verteilt gibt es keinen klaren Schaltzeitpunkt zum Auslösen der WW-Beladung. Dadurch kann die Beladung täglich zu verschiedenen Zeiten stattfinden, was dem Kriterium des Concise Cycles zuwider läuft. Für die Prüfmethode ist es essentiell, dass die einzelnen Tage immer gleich ablaufen, so dass der Speicherzustand am Anfang und Ende des Testzyklus identisch ist und die Wärmeverluste mehrerer gleicher Tage hintereinander ebenfalls.

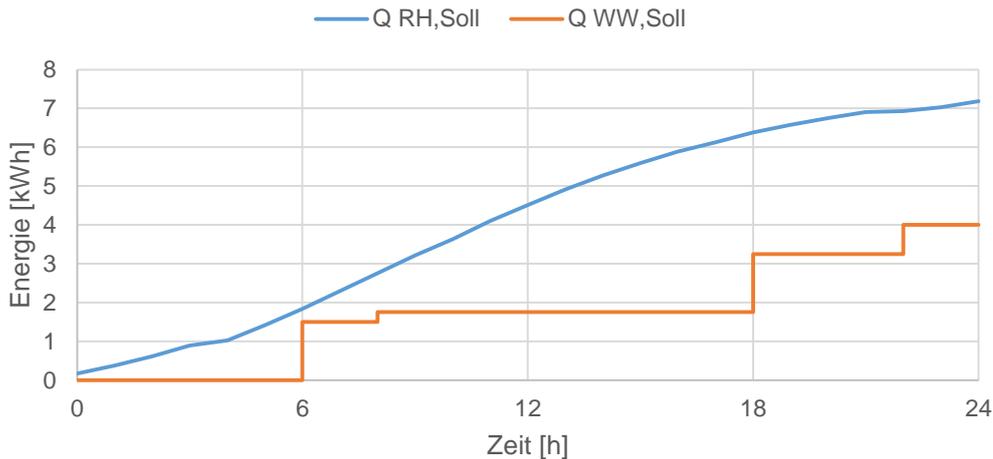


Abbildung 19: Kumulierte Sollwerte für Raumheizung ( $Q_{RH,Soll}$ ) und Warmwasser ( $Q_{WW,Soll}$ ) im 24-Stunden Prüfzyklus zur Ermittlung der Speicherverlust.



## 7 Testresultate

### 7.1 Übersicht

Im Projekt SolProof wurden vier verschiedene Systeme getestet. Tabelle 1 gibt einen Überblick, welche der oben beschriebenen Messungen an welchem der Systeme durchgeführt wurden.

Tabelle 1: Übersicht über die an den vier Systemen durchgeführten Tests.

System	CCT	Kompaktheit und Fehlerresistenz	Reale Wärmeverluste
1	✓	✓	✓
2	✓	-	-
3	✓	✓	-
4	✓	-	-

An jedem der Systeme wurde ein kompletter Systemtest (CCT) durchgeführt.

Als zusätzliche Information für Hersteller wurde die Bestimmung der Kompaktheit und Fehlerresistenz an System 1 und System 3 durchgeführt. System 2 war ein Prototyp mit dem Fokus der Messung auf der Regelung. Die Hydraulik wurde aus Einzelteilen aufgebaut und sollte später als vorgefertigte Einheit geliefert werden. Deshalb wurde in diesem System auf die Bestimmung der Kompaktheit und Fehlerresistenz verzichtet. Auch im Fall des Systems 4 wurde dieser Zusatztest nicht durchgeführt. Es handelte sich ebenfalls um einen Prototypen. In diesem Fall wurde ein bereits komplett installiertes System inklusive aller Komponenten geliefert, welches lediglich an die Prüfstandshydraulik angeschlossen werden musste. Entsprechend konnte die Installation des Systems nicht bewertet werden.

Das Konzept der Messung der realen Wärmeverluste wurde für Kombispeicher entwickelt. In System 2 wurden zwei einzelne Speicher (ein Warmwasserspeicher und ein Pufferspeicher) eingesetzt. Aus diesem Grund konnte die Messung an diesem System nicht durchgeführt werden. Die Verluste des Speichers werden aus der Bilanz der Be- und Entladung bestimmt. Entsprechend ist die Messung der Wärmelieferung eine Voraussetzung für die Bestimmung der Verluste. In den Systemen 3 und 4 war diese Messung nicht möglich da es sich um Systeme mit einem speicherintegrierten Kondensator handelte.



## 7.2 System 1

Das System 1 besteht aus einem bivalenten Kombispeicher, der über PV-T Kollektoren und eine invertergesteuerte Wärmepumpe beladen wird. PV-Überschuss wird durch einen eigenen Regler erkannt und zur Überheizung des thermischen Speicher genutzt um einen möglichst hohen Eigenverbrauch zu erzielen. Zusätzlich zum thermischen Speicher ist auch ein Batteriespeicher im System integriert. Die durch PV-T Kollektoren erzeugte Solarwärme wird zur Regeneration des Erdreiches verwendet. Nur bei ausreichend hohen Temperaturen wird die Wärme direkt in den Speicher eingebracht. In Abbildung 20 ist ein vereinfachtes hydraulisches Schema der Anlage zu sehen. Die rein elektrischen Komponenten sind in diesem Schema nicht eingezeichnet. In Tabelle 2 sind die Spezifikationen des Systems dargestellt.

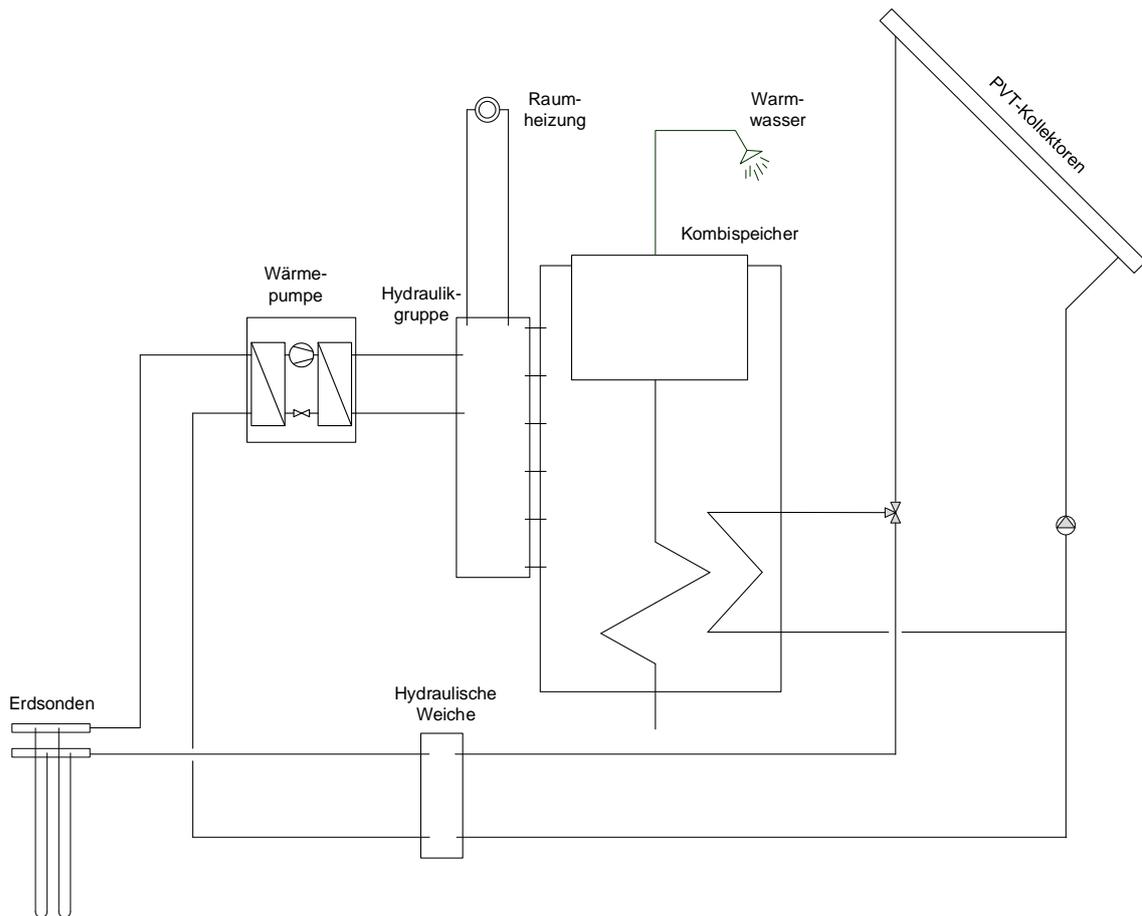


Abbildung 20: Vereinfachtes hydraulisches Schema des ersten getesteten Systems.

Der Ansatz zur Vorfertigung und Fehlervermeidung bei der Installation des Systems wurde in der Hydraulik der Anlage umgesetzt. In einer vorgefertigten Hydraulikgruppe wurden alle nötigen Ventile und Rohrverbindungen vorab installiert. Am Prüfstand mussten dann lediglich die Verbindungen zwischen den Komponenten hergestellt werden. Die Umsetzung der elektrischen Komponenten am Prüfstand war dagegen ungleich aufwändiger. Mehrere Regler, Komponenten die nur durch Personen mit der Berechtigung für Hochspannungskomponenten installiert werden können, sowie verschiedene Netzwerk- und Datenverbindungen mussten manuell erstellt und angepasst werden.



Tabelle 2: Parameter des im Prüfstand gemessenen System 1.

Parameter	Einheit	Wert
<b>Nachheizung</b>		
Leistungsgeregelte Sole-Wasser Wärmepumpe		
Wärmeleistung 0/35.	[kW]	3.3
Wärmeleistung 0/50	[kW]	2.9
Max. Vorlauftemperatur (Verdichterbetrieb)	[°C]	65
<b>Speicher (thermisch)</b>		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	0.9
Solarwärmeübertrager	[-]	Intern
Warmwasservolumen	[m <sup>3</sup> ]	0.2
Höhe	[m]	2.0
<b>Speicher (elektrochemisch)</b>		
Dreiphasiges Batteriesystem mit Laderegler und Wechselrichter für die Be- und Entladung.		
Kapazität (total)	[kWh]	6.9
Maximale Entladetiefe	[%]	0.9
Max. Beladeleistung	[kW]	2.1
Max. Entladeleistung	[kW]	1.9
<b>Solarkreis</b>		
Unabgedeckte Hybridkollektoren zur Kombination von Solarthermie und Photovoltaik plus Wechselrichter.		
Fläche (brutto)	[m <sup>2</sup> ]	37
Nennleistung (elektrisch)	[kWp]	7.1 kW
Konversionsfaktor	[-]	0.69
Wärmeverlustkoeffizient	[W/(m <sup>2</sup> K)]	12.83
Windabhängigkeit	[W/(m <sup>2</sup> K)/(m/s)]	1.23
AC-Nennleistung Wechselrichter	[kW]	8.2 kW
Netzanschluss Wechselrichter	[-]	3-NPE 400 V / 230 V

### 7.2.1 Systemtest

Es wurde ein 6-Tages Test nach der vorgestellten Methode durchgeführt. Die Resultate sind in Tabelle 3 und in Abbildung 21 dargestellt.

Der Netzbezug des Systems betrug insgesamt 49.4 kW. Die PV-T Kollektoren lieferten 108.4 kWh Strom und 124.0 kWh Wärme. Von der Solarwärme wurden 20.2 kWh direkt in den Speicher eingebracht, der Rest diente zur Regeneration des Erdreiches.

Mehr als 54 % des photovoltaisch erzeugten Stromes wurden selbst verbraucht ( $R_{\text{eig}}$ ) und ein Autarkiegrad ( $R_{\text{aut}}$ ) von fast 50 % erreicht. Allerdings wurde durch den Einsatz einer Batterie



auch zwangsläufig der elektrische Gesamtverbrauch erhöht (mit entsprechend positiven Effekt auf den Autarkiegrad und den Eigenverbrauch). Die Netzaufwandszahl ( $R_{net}$ ) zeigt, dass der Strombezug ab Netz nur 21 % des gesamten Nutzenergiebedarfes (Wärme und Strom) ausmacht. Mit anderen Worten, das System stellt ca. 5-mal mehr Nutzenergie in Form von Haushaltsstrom, Raumheizung und Warmwasser zur Verfügung als es Strom ab Netz bezieht. Gleichzeitig kann das System mehr Strom ins Netz einspeisen als es bezieht (Plus-Energiebilanz).

Tabelle 3: Übersicht der Messergebnisse des 6-Tages Tests von System 1.

Netzbezug	[kWh]	42.8
Netzeinspeisung	[kWh]	49.4
PV-Ertrag	[kWh]	108.4
Therm. Energieeintrag Kollektorkreis	[kWh]	124.0
El. Energiebedarf Wärmepumpe	[kWh]	41.2
Raumwärme	[kWh]	121.0
Warmwasser	[kWh]	51.0
Haushaltsstrom	[kWh]	54.21
Durchschnittliche Speichertemperatur	[°C]	36.1
$R_{eig}$	[-]	54.4
$R_{aut}$	[-]	49.8
$R_{net}$	[-]	20.9

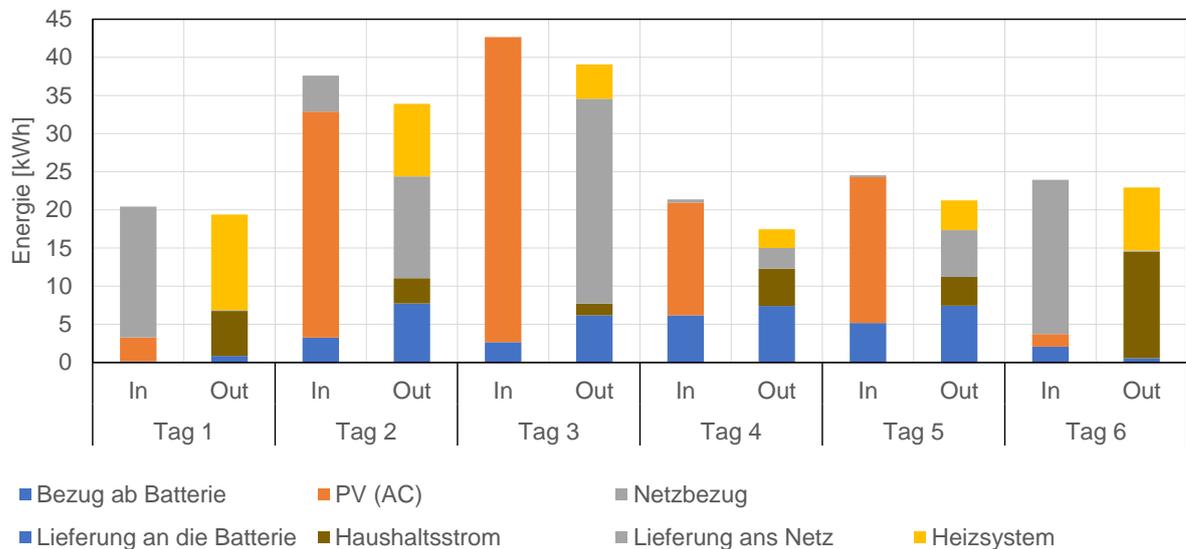


Abbildung 21: Tageswerte des 6-Tages Test von System 1.

Die Resultate des Systemtests lassen sich auf Jahreswerte extrapolieren (mit Ausnahme des thermischen Energieeintrages durch den Kollektorkreis). Der Effekt der Regeneration des Erdreiches ist dabei allerdings nicht berücksichtigt. Die für den Test emulierten Erdsonden sind für einen Betrieb ohne Regeneration ausgelegt. In einer realen Installation erlaubt die aktive Regeneration des Erdreiches eine kleinere Dimensionierung der Erdsonden. In Tabelle 4 sind



die auf Jahreswerte extrapolierten Resultate des Systems zu finden. Die Kennzahlen bleiben dabei unverändert.

*Tabelle 4 Auf Jahreswerte extrapolierte Resultate des Systemtests von System 1.*

Netzbezug	[MWh]	2.60
Netzeinspeisung	[MWh]	3.01
PV-Ertrag	[MWh]	6.59
Raumwärme	[MWh]	7.39
Warmwasser	[MWh]	3.04
Haushaltsstrom	[MWh]	3.31

### 7.2.2 Fehlerresistenz und Kompaktheit

Die Bewertung nach der Bewertungsmatrix für die Kompaktheit und die Fehlerresistenz ergibt ein mässiges Ergebnis für die Kompaktheit und ein gutes Ergebnis für die Fehlerresistenz.

Ausschlaggebend für das Resultat zur Kompaktheit sind die grosse Anzahl an Einzelteilen und die daraus resultierende lange Installationszeit. Für die lange Installationszeit sind allerdings mehrheitlich die elektrischen Komponenten des Systems verantwortlich: Einzelne Komponenten konnten nur mit einem Zugang zum Internet in Betrieb genommen werden, elektrische Messgeräte waren zur Überwachung und zur Steuerung des Systems notwendig und Temperaturfühler und Pumpen mussten einzeln verdrahtet werden.

Die Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit könnte vor Allem durch die Regelung des Systems verbessert werden: Bezeichnungen im Klartext und eine aktive Übermittlung von Fehlermeldungen würden den Betrieb der Anlage deutlich vereinfachen.

*Tabelle 5: Resultat System 1.*

Kompaktheit	Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit
	



### 7.3 System 2

System 2 bestand aus einer Sole-Wasser WP, zwei thermischen Speichern (Warmwasser und Heizungspuffer) sowie einem PV-Feld. Ein übergeordneter Regler steuert die gesamte Anlage.

Die Wärmepumpe hat eine doppelte Umschaltung für den Betrieb Warmwasser und Raumheizung bereits im Gehäuse integriert. Die Wärmepumpe arbeitet im Normalbetrieb so, dass der Komfortbedarf im Gebäude sicher gedeckt wird. PV-Überschuss wird durch einen eigenen Regler erkannt und zur Überheizung der beiden thermischen Speicher genutzt um einen möglichst hohen Eigenverbrauch zu erzielen. In Abbildung 22 ist ein vereinfachtes hydraulisches Schema der Anlage zu sehen. Die rein elektrischen Komponenten sind in diesem Schema nicht eingezeichnet. In Tabelle 6 sind die Spezifikationen des Systems dargestellt.

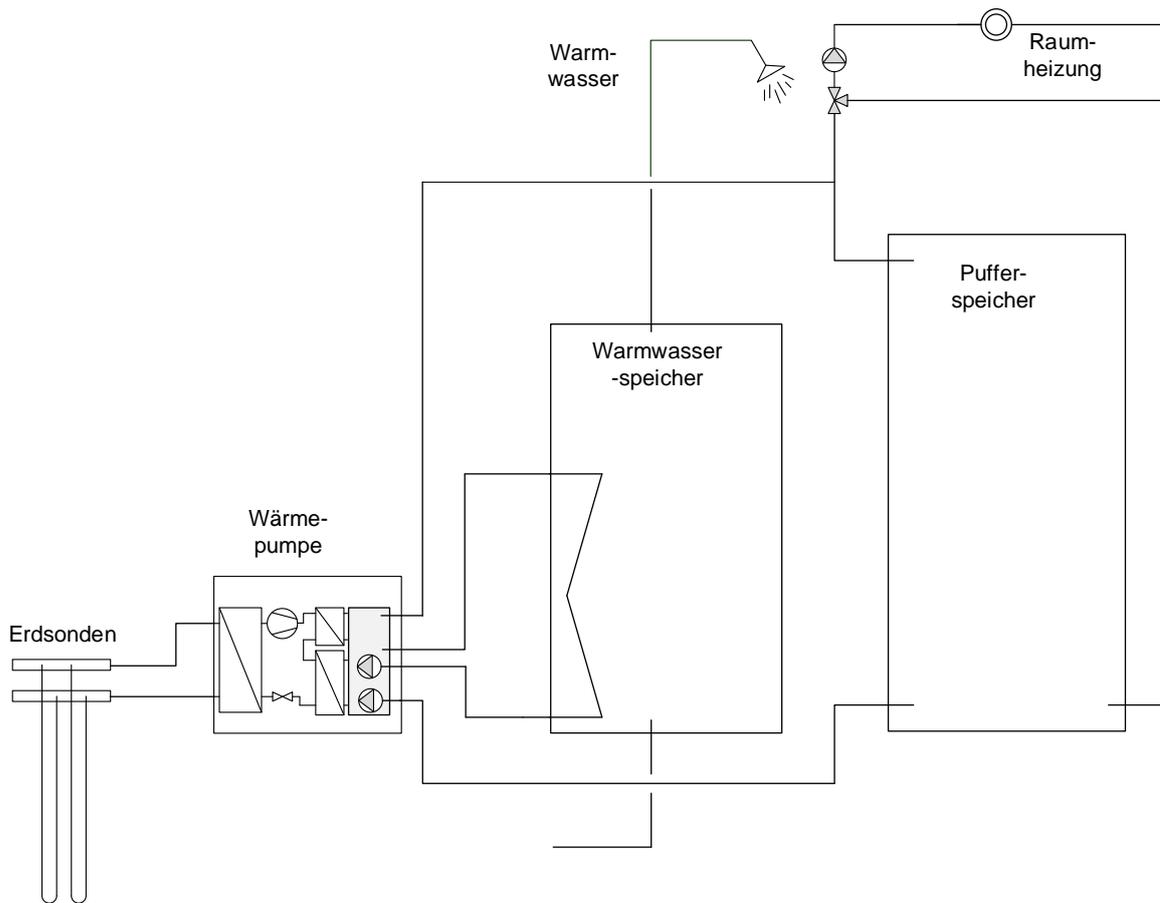


Abbildung 22: Vereinfachtes hydraulisches Schema des zweiten getesteten Systems.



Tabelle 6: Parameter des im Prüfstand gemessenen System 2.

Parameter	Einheit	Wert
<b>Nachheizung</b>		
Leistungsgeregelte Sole-Wasser Wärmepumpe		
Wärmeleistung 0/35.	[kW]	14.3
Wärmeleistung 0/50	[kW]	10.5
Max. Vorlauftemperatur (Verdichterbetrieb)	[°C]	60
<b>Speicher (thermisch)</b>		
Warmwasserspeicher:		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	0.4
Höhe	[m]	1.7
Heizungspuffer		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	1.6
Höhe	[m]	2.0
<b>Solarteil</b>		
PV-Feld und Wechselrichter		
Fläche (brutto)	[m <sup>2</sup> ]	30.3
Nennleistung (elektrisch)	[kWp]	5.8
AC-Nennleistung Wechselrichter	[kW]	13.5
Bemessungsleistung (AC) (bei 230 V, 50 H)	[kW]	7
Netzanschluss Wechselrichter	[-]	3-NPE 400 V / 230 V

### 7.3.1 Systemtest

Die Resultate des 6-Tage Tests von System 2 sind in Tabelle 6 und in Abbildung 23 dargestellt.

Das System wurde mit dem Ziel eines möglichst hohen Eigenverbrauchs des PV-Stroms geregelt. Von den 102.6 kWh PV-Ertrag wurden insgesamt 52.8 kWh in das Stromnetz eingespeist. Bei einem el. Energiebedarf der Wärmepumpe von 63 kWh und der Haushaltsgeräte von 36.2 kWh wurden insgesamt 71.7 kWh ab Netz bezogen.

Der Eigenverbrauchsquotient beträgt annähernd 50 % (ohne die Verwendung einer Batterie), der Autarkiegrad 41 %. Zum Decken der gesamten Nutzenergie (thermisch und elektrisch) wurden 34.5 % Strom ab Netz bezogen.



Tabelle 7: Übersicht der Messergebnisse des 6-Tages Tests von System 2.

Netzbezug	[kWh]	71.7
Netzeinspeisung	[kWh]	52.8
PV-Ertrag (AC)	[kWh]	102.6
El. Energiebedarf Wärmepumpe	[kWh]	63.0
Raumwärme	[kWh]	121.0
Warmwasser	[kWh]	50.8
Haushaltsstrom	[kWh]	56.7
Durchschnittliche Speichertemperatur Warmwasserspeicher	[°C]	44.3
Durchschnittliche Speichertemperatur Heizungspuffer	[°C]	40.3
$R_{eig}$	[-]	48.5
$R_{aut}$	[-]	41.0
$R_{net}$	[-]	34.5

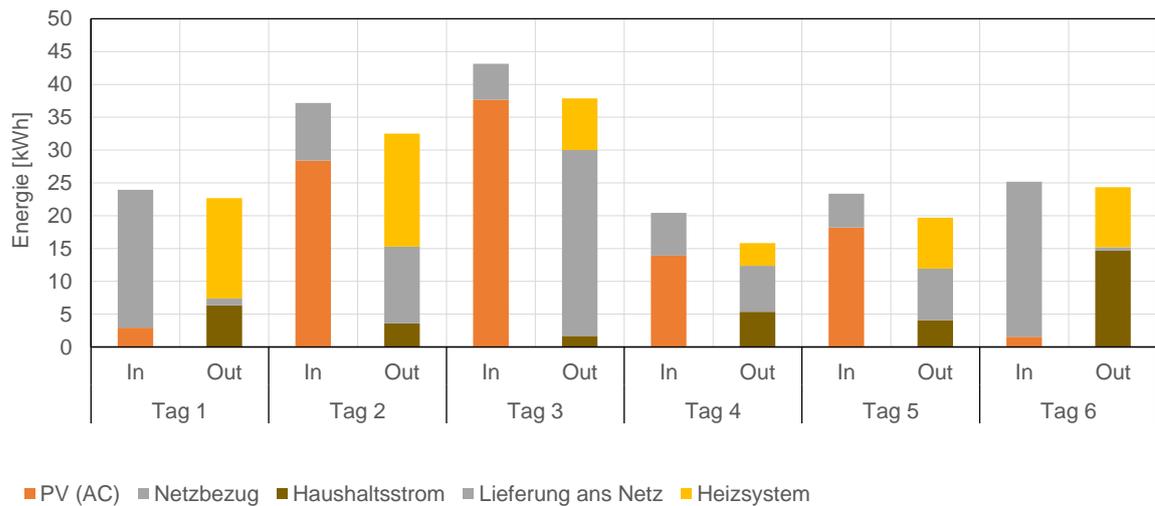


Abbildung 23: Tageswerte des 6-Tages Test von System 2.

Die auf Jahreswerte extrapolierten Daten sind in Tabelle 7 zu finden. Die gezeigten Kennzahlen aus dem 6-Tages Test ( $R_{eig}$ ,  $R_{aut}$  und  $R_{net}$ ) bleiben dabei unverändert.



*Tabelle 8: Auf Jahreswerte extrapolierte Resultate des Systemtests von System 2.*

Netzbezug	[MWh]	4.36
Netzeinspeisung	[MWh]	3.21
PV-Ertrag	[MWh]	6.24
Raumwärme	[MWh]	7.39
Warmwasser	[MWh]	3.04
Haushaltsstrom	[MWh]	3.31

### **7.3.2 Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit**

Eine Bewertung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit wurde an System 2 nicht durchgeführt.



## 7.4 System 3

System 3 vereint einen Kombispeicher mit dem Enthitzer und Kondensator einer Wärmepumpe in einem Gerät. Der Kompressor der Luft-Wasser Wärmepumpe ist in einer Aussen-einheit verbaut. Thermische Kollektoren bringen über einen internen Wärmeübertrager Solarwärme in das System. In Abbildung 24 ist ein vereinfachtes hydraulisches Schema der Anlage zu sehen. In Tabelle 9 sind die Parameter der Anlage beschrieben.

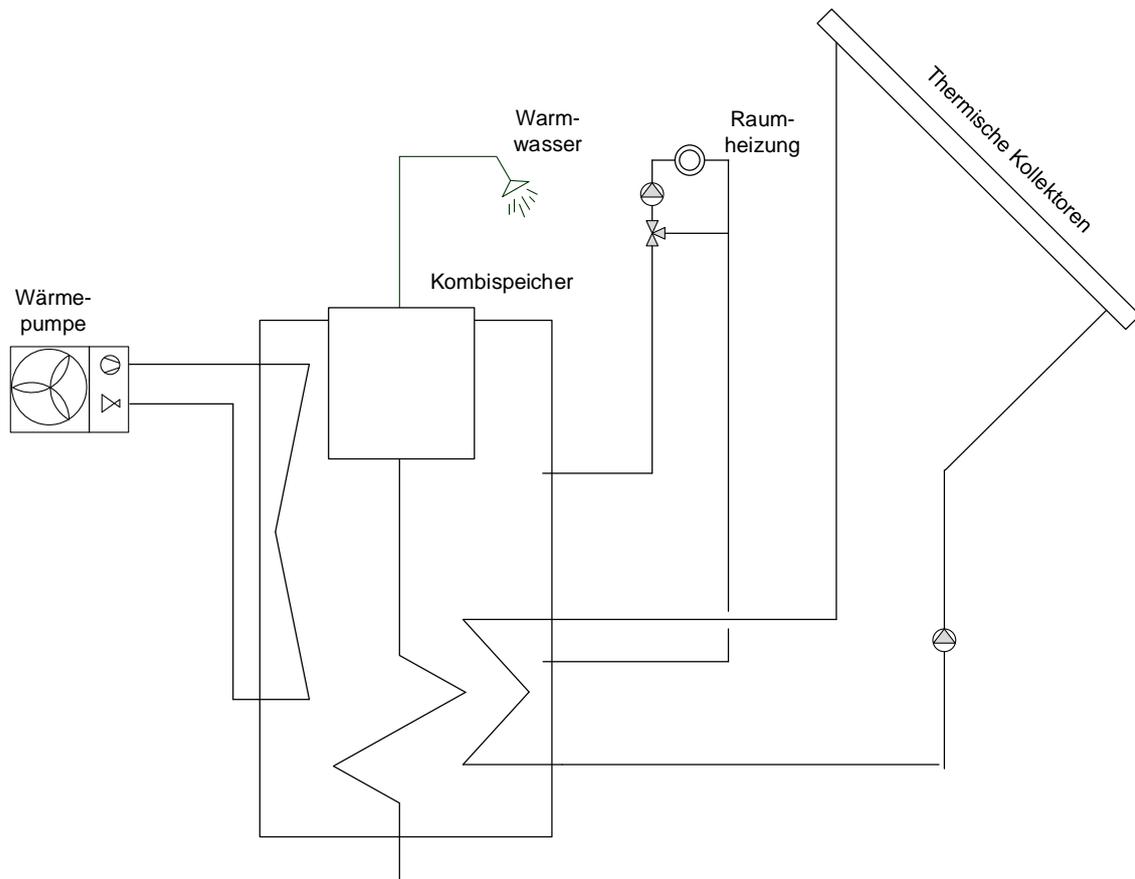


Abbildung 24: Vereinfachtes hydraulisches Schema des dritten getesteten Systems.



Tabelle 9: Parameter des im Prüfstand gemessenen System 3.

Parameter	Einheit	Wert
<b>Nachheizung</b>		
Leistungsgeregelte Luft-Wasser Wärmepumpe		
Wärmeleistung 0/35.	[kW]	14.3
Wärmeleistung 0/50	[kW]	10.5
Max. Vorlauftemperatur (Verdichterbetrieb)	[°C]	60
<b>Speicher (thermisch)</b>		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	1.0
Höhe	[m]	2.0
Solarwärmeübertrager	[-]	intern
Warmwasservolumen	[m <sup>3</sup> ]	0.3
<b>Solarteil</b>		
Thermische Kollektoren		
Fläche (brutto)	[m <sup>2</sup> ]	11.2
Konversionsfaktor $\eta_0$	[-]	0.88
Verlustbeiwert $a_1$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	4.1
Verlustbeiwert $a_2$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	0.01

#### 7.4.1 Systemtest

Die Resultate des 6-Tages Tests von System 3 sind in Tabelle 10 dargestellt.

Zur Deckung des Wärmebedarfes von 121 kWh Raumwärme und 49.2 kWh Warmwasser wurden 43.1 kWh el. Energie ab Netz bezogen. Damit ergibt sich eine Arbeitszahl des solarunterstützten Luft-Wasser Heizsystems im 6-Tages Test von 4.0.

Tabelle 10: Übersicht der Messergebnisse von System 3.

El. Energiebedarf Heizsystem	[kWh]	43.1
Therm. Energieeintrag Kollektorkreis	[kWh]	80.9
Raumwärme	[kWh]	121.1
Warmwasser	[kWh]	49.2
Durchschnittliche Speichertemperatur	[°C]	52.0
AZ <sub>System</sub>	[-]	4.0 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Die Arbeitszahl wird mit einem WW-Bedarf von 50 kWh berechnet.



Abbildung 25 zeigt den Bedarf an elektrischer Energie für das Heizsystem (Wärmepumpe inklusive Pumpen und Regler) zur Deckung des täglichen Wärmebedarfs. Da das getestete System keine Solarstromanlage enthält wurde, anders als in den Darstellungen zu System 1 und System 2, der Haushaltsstrom sowie der Netzbezug nicht dargestellt.

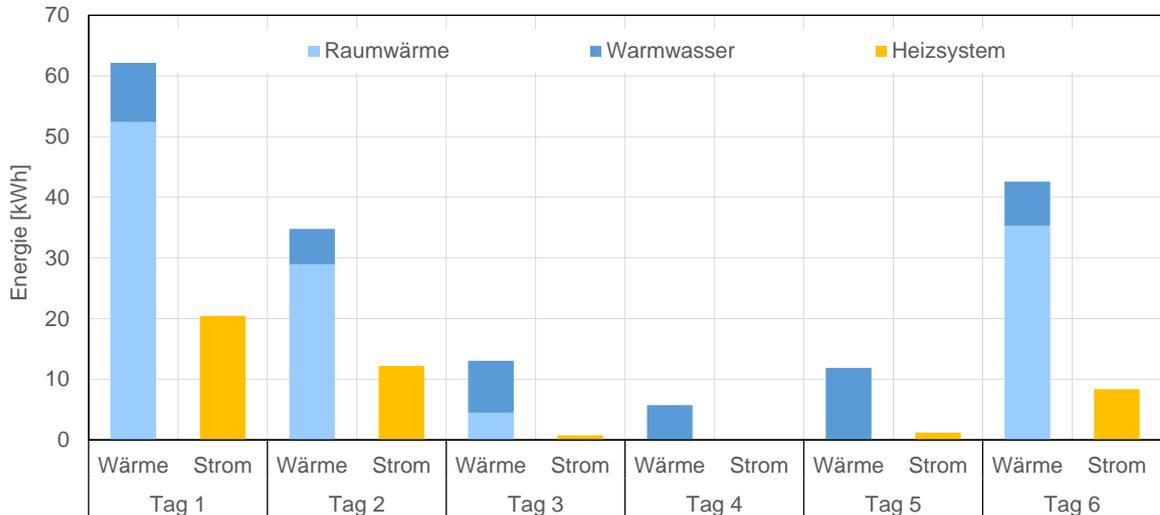


Abbildung 25: Tageswerte des 6-Tages Tests von System 3.

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben ist zur Extrapolation der Resultate von Systemen mit solarthermischen Kollektoren ein Korrekturfaktor nötig, um eine Überbewertung der Solarwärme entgegenzuwirken. Der Korrekturfaktor ist Abhängig von der verwendeten Leistung des Kollektorfeldes bei  $700 \text{ W/m}^2$  Einstrahlung und einer Temperaturdifferenz von 30 K. Für das im System 3 simulierte Kollektorfeld beträgt diese Leistung (nach Formel 2) 4.70 kW. Damit ergibt sich ein Korrekturfaktor für den Bedarf an el. Energie des Heizsystems von 1.12. In Tabelle 11 sind die extrapolierten Resultate des Systemtests dargestellt.

Tabelle 11: Auf Jahreswerte extrapolierte Resultate des Systemtests von System 3.

El. Energiebedarf Heizsystem	[MWh]	2.94
Raumwärme	[MWh]	7.39
Warmwasser	[MWh]	3.04
JAZ <sub>System</sub>	[-]	3.6

## 7.4.2 Fehlerresistenz und Kompaktheit

Die Bewertung nach der Bewertungsmatrix für Fehlerresistenz und Kompaktheit ergibt jeweils ein gutes Ergebnis.

Ein noch besseres Ergebnis in der Kompaktheit wäre durch Verringerung von Grösse und Gewicht des Speichers möglich gewesen. Zudem war durch die bereits bei Lieferung angebrachte Isolation am Prototyp der Aussendurchmesser des Speichers grösser als 79 cm. Im Feld wird die Isolation erst vor Ort angebracht, wodurch das Türmass eingehalten werden kann, jedoch eine zusätzliche Komponente geliefert und installiert werden muss. Das Gewicht



des Speichers mit integriertem Kondensator ist mit über 200 kg als nicht mehr einfach handhabbar einzustufen.

Für ein noch besseres Ergebnis in der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit fehlten Dokumente wie eine bebilderte Installationsanleitung und ein Inbetriebnahmeprotokoll. Das Versprechen des Herstellers, dass diese Dokumente zukünftig vorhanden sein werden, konnte für die Bewertung des Ist-Zustandes nicht berücksichtigt werden.

*Tabelle 12: Resultat System 3.*

Kompaktheit	Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit
	



## 7.5 System 4

System 4 vereint, wie System 3, einen Kombispeicher mit dem Enthitzer und Kondensator einer Wärmepumpe in einem Gerät. Der Kompressor der Luft-Wasser Wärmepumpe ist in einer Ausseneinheit verbaut. Thermische Kollektoren bringen über einen internen Wärmeübertrager Solarwärme in das System. Das Brauchwarmwasser wird über interne Wärmeübertrager bereitet. In Abbildung 26 ist ein vereinfachtes hydraulisches Schema der Anlage zu sehen. In Tabelle 13 sind die Parameter der Anlage beschrieben.

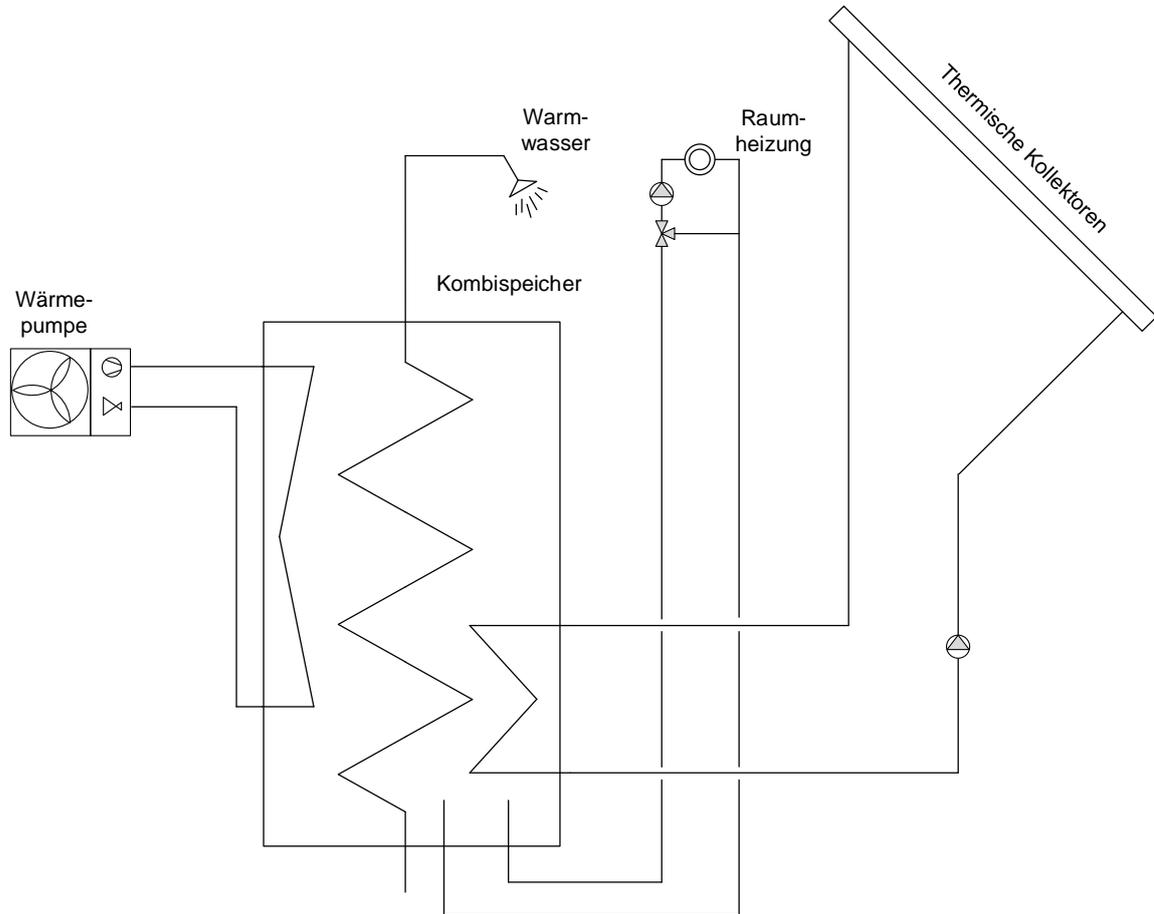


Abbildung 26: Vereinfachtes hydraulisches Schema des vierten getesteten Systems.



Tabelle 13: Parameter des im Prüfstand gemessenen System 4.

Parameter	Einheit	Wert
<b>Nachheizung</b>		
Leistungsgeregelte Luft-Wasser Wärmepumpe		
Wärmeleistung 0/35.	[kW]	14.0
Wärmeleistung 0/50	[kW]	n.a.
Max. Vorlauftemperatur (Verdichterbetrieb)	[°C]	n.a.
<b>Speicher (thermisch)</b>		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	1.0
Höhe	[m]	1.9
Solarwärmeübertrager	[-]	intern
Warmwasservolumen	[m <sup>3</sup> ]	0.3
<b>Solarteil</b>		
Thermische Kollektoren		
Fläche (brutto)	[m <sup>2</sup> ]	11.2
Konversionsfaktor $\eta_0$	[-]	0.88
Verlustbeiwert $a_1$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	4.1
Verlustbeiwert $a_2$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	0.01

### 7.5.1 Systemtest

Die Resultate des 6-Tages Tests von System 4 sind in Tabelle 14 und Abbildung 27 dargestellt.

Zur Deckung des Wärmebedarfes von 121 kWh Raumwärme und 48.2 kWh Warmwasser wurden 38.2 kWh el. Energie ab Netz bezogen. Damit ergibt sich eine Arbeitszahl des solarunterstützten Luft-Wasser Heizsystems von 4.5. Nach Anwendung des Korrekturfaktors für solarthermische Systeme ergibt sich eine Jahresarbeitszahl ( $JAZ_{\text{System}}$ ) von 4.0.

Tabelle 14: Übersicht der Messergebnisse von System 4.

El. Energiebedarf Heizsystem	[kWh]	38.2
Therm. Energieeintrag Kollektorkreis	[kWh]	70.0
Raumwärme	[kWh]	120.8
Warmwasser	[kWh]	48.9
Durchschnittliche Speichertemperatur	[°C]	53.0
$AZ_{\text{System}}$	[-]	4.5 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Die Arbeitszahl wird mit einem WW-Bedarf von 50 kWh berechnet.

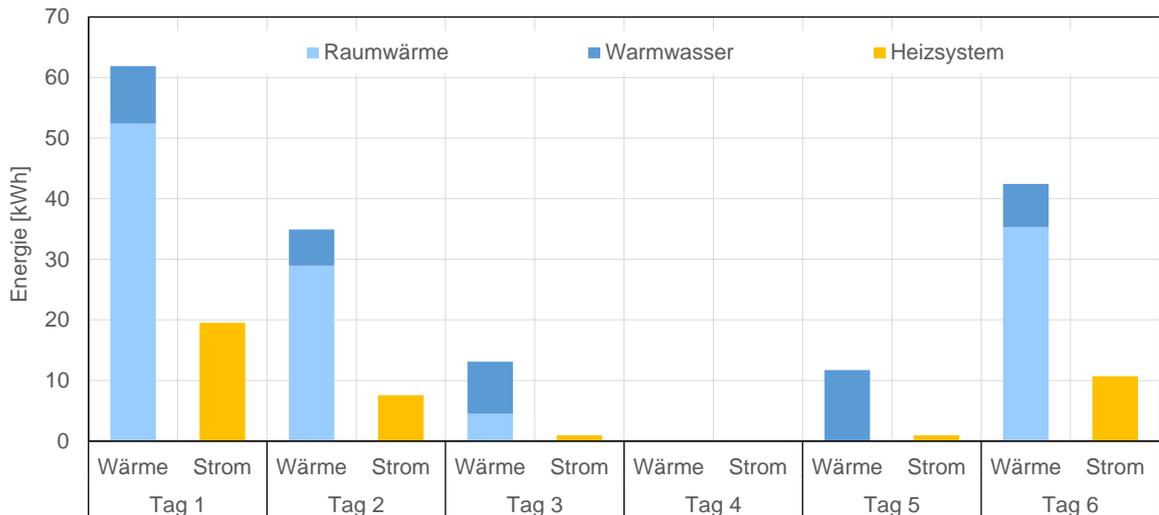


Abbildung 27: Tageswerte des 6-Tages Tests von System 4.

Der Korrekturfaktor für die Extrapolation der Resultate aus System 4 ist  $1.12^{10}$ . In Tabelle 15 sind die auf ein Jahr extrapolierten Resultate des Systemtest dargestellt.

Tabelle 15: Auf Jahreswerte extrapolierte Resultate des Systemtests von System 4.

El. Energiebedarf Heizsystem	[MWh]	2.60
Raumwärme	[MWh]	7.39
Warmwasser	[MWh]	3.04
JAZ <sub>System</sub>	[-]	4.0

## 7.5.2 Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit

Eine Bewertung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit wurde an System 2 nicht durchgeführt.

## 7.6 Realistische Wärmeverluste

Voraussetzung für die Messung der realistischen Wärmeverluste nach der in Kapitel 6 vorgestellten Methode ist die Messung der Energie, die über die Nachheizung an den Speicher geliefert wurde. Nach Abschluss des Systemtests an System 1 wurden dazu Messinstrumente zwischen dem Speicher und der Wärmepumpe installiert und der Prüfzyklus gestartet<sup>11</sup>.

In Abbildung 28 ist der Temperaturverlauf während der Messung dargestellt. Ein wichtiges Kriterium für die Bestimmung der Verluste ist die Speicheränderung im Verlauf der Messung. Die Speichertemperatur sollte zu Beginn und Ende des 24 h Zyklus möglichst identisch sein.

<sup>10</sup> Es wurde das selbe Kollektorfeld simuliert und emuliert wie in System 3.

<sup>11</sup> An den Systemen 2, 3 und 4 war diese Messung nicht möglich: In System 2 verhindern in der Wärmepumpe verbaute Umschaltventile eine korrekte Messung der Wärmelieferung, die Systeme 3 und 4 verwenden jeweils in den Speicher integrierte Kondensatoren.



Dieses Ziel wurde im Test gut erreicht. Lediglich die Temperatur am Speicher unten (TS1) ist erst an Beginn und Ende des Testtag 4 identisch.

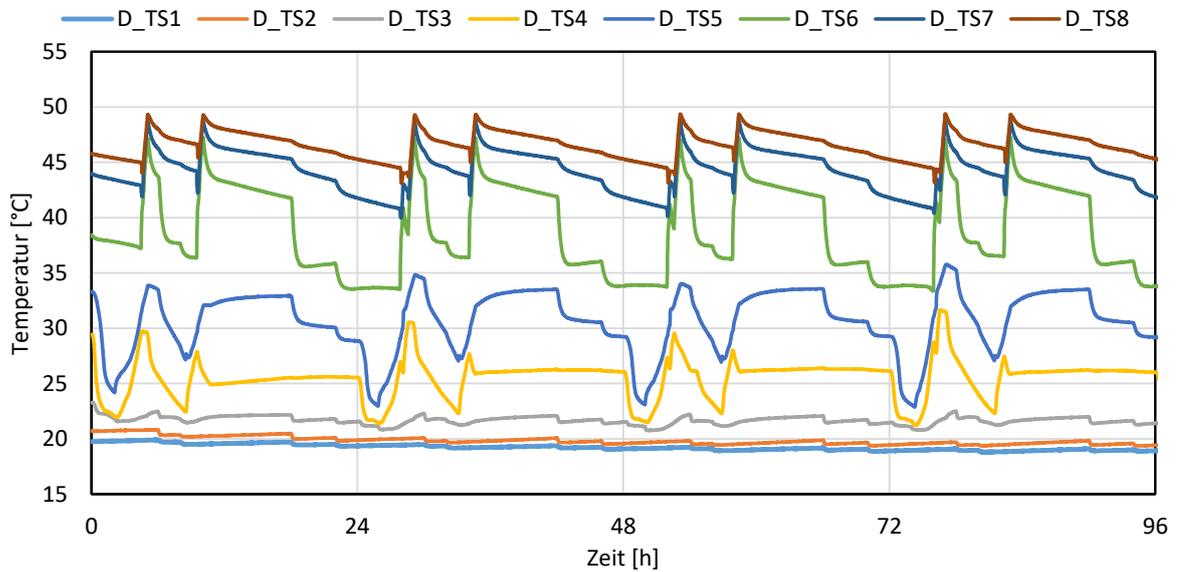


Abbildung 28: Verlauf der Speichertemperatur, gemessen über Anlegefühler an der Speicherwand.

In Abbildung 29 ist die Energiebilanz der einzelnen Tage dargestellt. Die Speicheränderung ist aus den, über Anlegefühler gemessenen Temperaturen im Speicher bestimmt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Speichertemperatur zu Beginn der Messung noch zu hoch war.

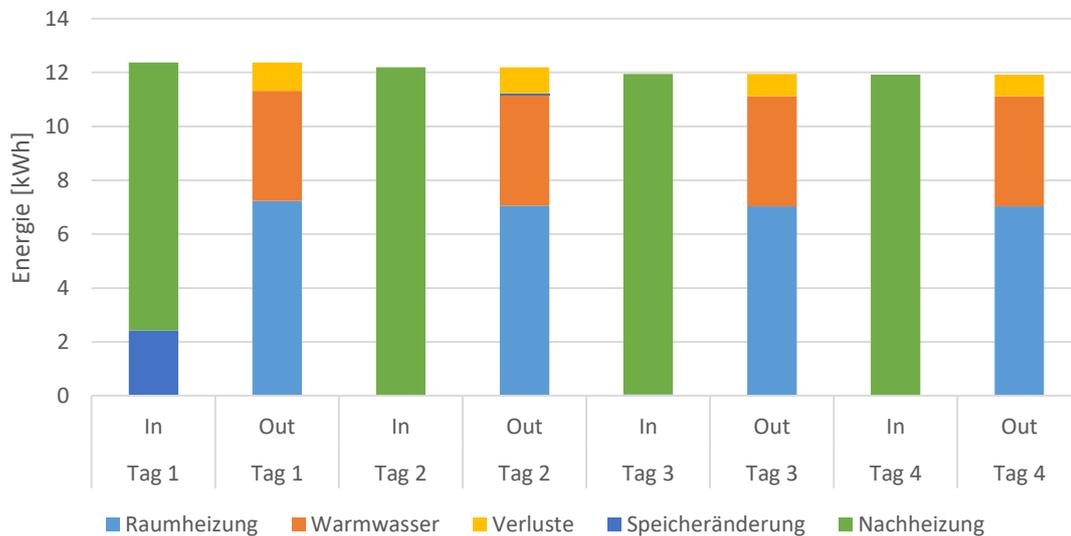


Abbildung 29: Energiebilanz der einzelnen Testtage aus der Messung der realistischen Wärmeverluste.

Die Verluste des Speichers betragen 0.8 kWh/24 h. Mit der über 24 h gemittelten Speichertemperatur von 30.7 °C ergibt sich ein Wärmeverlust von 3.1 W/K.

Die zweifache Standardabweichung der Wärmeverluste beträgt 16.7 %. Die Resultate in tabellarischer Form sind in Anhang F zu finden.



## 8 Schlussfolgerungen

### 8.1 Testmethode

Die wichtigsten Schlussfolgerungen zur Testmethode und deren Anwendbarkeit sind nachfolgend festgehalten:

- Vereinfachung der Messungen  
Die Vereinfachung der Testmethode hat Vorteile für sowohl das Prüfinstitut als auch die Kunden, die ein System zur Messung liefern. Als besonders wichtige Änderung sind dabei die Verkürzung der Testzeit und die direkte Extrapolierbarkeit der Resultate zu nennen. Diese Änderungen führen zu einem deutlich niedrigeren Aufwand der Prüfungen und bauen damit ein Hemmnis für die Anwendung der Systemtests ab.
- Vergleichbarkeit der Resultate  
Die Extrapolierbarkeit durch eine vordefinierte Last im Test ist für verschiedene Systeme gegeben. Dadurch können Systeme mit ähnlicher Anwendung (hier Lieferung von Wärme und Strom für ein Einfamilienhaus) direkt miteinander verglichen werden. Allerdings sind die Ziele für Systeme mit PV-Strom andere als für Systeme mit solarthermischen Kollektoren. Auch werden teilweise unterschiedliche Kennzahlen berechnet, je nachdem ob „nur“ der Wärmebedarf eines Gebäudes oder Wärme- und Strombedarf betrachtet werden.
- Anwendbarkeit für verschiedene Systeme  
Im Verlauf des Projektes wurden Systeme mit solarthermischen Kollektoren, mit PV-Modulen und mit PV-T Kollektoren getestet. Es zeigt sich, dass die dynamischen Betriebszustände im Verlauf der Messung für alle Anwendungsbereiche relevante Aussagen erlauben. Durch die Bestimmung von verschiedenen Kennzahlen kann auch auf die jeweiligen Ziele der Konzepte eingegangen werden.

Um in der Bewertung der Kompaktheit und Fehlerresistenz ein gutes Resultat zu erhalten sind vor allem zwei Bereiche wichtig: Ein hoher Vorfertigungsgrad und der Regler des Gesamtsystems. Dadurch können viele der Bedingungen bereits ab Werk erfüllt werden. Somit erhält ein Kunde die Gewissheit, ein gutes und funktionierendes Produkt zu erhalten. Wenn der hohe Vorfertigungsgrad nicht gegeben ist oder die einzelnen Komponenten über Regler gesteuert werden die nicht miteinander kommunizieren ist der Kunde Abhängig von der Arbeit des Installateurs (oder von der Zusammenarbeit verschiedener Beteiligter). Damit steigt das Risiko für Fehler deutlich an.

### 8.2 Testresultate

Die Erfahrung in Sachen Systemtest am SPF zeigt, dass die Einbindung verschiedener Komponenten in ein Gesamtsystem eine schwierige Herausforderung ist. Die Prüfung der unterschiedlichen Konzepte im vorliegenden Projekt bestätigt dies.

In Kombinationen von PV-Anlagen und Wärmepumpen ist speziell der Aufwand für die Installation und Inbetriebnahme hoch, auch deshalb weil verschiedene Fachpersonen am System arbeiten müssen. Dies ist zum Teil auf die Tatsache zurückzuführen, dass es sich um mehr oder weniger seriennahe Prototypen handelte. Bei der Verdrahtung der elektrischen Komponenten besteht noch weiterer Handlungsbedarf, beziehungsweise müssen klarere Schnittstellen geschaffen und Kommunikationswege etabliert werden. Die in der Bewertungsmatrix geforderte klare Beschriftung und transparente Bezeichnungen in Hard- und Software würden den Aufwand bei der Installation deutlich reduzieren.



### 8.3 Ausblick

Ähnlich einem Fahrzyklus zur Ermittlung von Brennstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen, der Randbedingungen wie Starttemperatur, Schaltpunkte und Zuladung definiert, werden durch den CCT Randbedingungen für die Messung von Systemen zur Bereitstellung von Wärme und Strom im Einfamilienhaus definiert. Auf diese Weise können verschiedenste Systeme geprüft und miteinander verglichen werden: Öl, Gas, Holz, WP, Solar PV und Solar ST, mit oder ohne thermischen Speichern und/oder Batterien.

Dabei erlaubt die Testmethode einen fairen Vergleich der verschiedenen Techniken zur Abdeckung eines standardisierten Bedarfs an Raumheizung, Warmwasser und el. Energie auf der Basis von zugeführter End-Energie und damit bei bekannten Primärenergiefaktoren auch auf Primärenergie-Basis des ganzen Systems.

Die Methode kann auch für neue Techniken die noch nicht auf dem Markt sind angewendet werden, da keine Einzelkomponenten charakterisiert oder simuliert werden müssen. Durch die Möglichkeit der direkten Extrapolation sind die Messungen unabhängig von Simulationsmodellen oder andern Vorarbeiten.

Im Gegensatz zu den EU package labels haben im CCT die Auswirkungen der Regelung, Speicherschichtung, Teillastzustände und der Interaktion zwischen den Komponenten einen grossen Einfluss auf das Resultat.



## 9 Abkürzungsverzeichnis

Die im Bericht verwendeten Abkürzungen sind hier dargestellt.

AZ	Arbeitszahl
CCT	Concise Cycle Test
COP	Leistungszahl („Coefficient of performance“)
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EM	Emulation
EU	Europäische Union
FprEN	Endgültiger Entwurf einer Europäischen Norm
FWM	Frischwassermodul
JAZ	Jahresarbeitszahl
MPP	„Maximum Power Point“
PV	Photovoltaik
RH	Raumheizung
SFH	Einfamilienhaus („Single Family House“)
ST	Solarthermie
ÜSV	Überströmventil
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
3NPE	Dreiphasenwechselstrom



## 10 Symbolverzeichnis

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

### 10.1 Symbole

$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
DN	Nennweite („diamètre nominal“)
$dp$	Druckdifferenz
F	Faktor
h	Spezifische Enthalpie
I	Elektrische Stromstärke
$\dot{m}$	Massenstrom
N	Anzahl
P	Leistung („Power“)
Q	Wärmemenge
$\dot{Q}$	Wärmestrom
R	Kennzahl
t	Zeit
T	Temperatur
U	Elektrische Spannung
UA	Temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient
V	Ventil
W	Arbeit
$\Delta$	Differenz
$\eta$	Wirkungsgrad
$\vartheta$	Temperatur
$\zeta$	Effizienz

### 10.2 Indizes

amb	Umgebung („Ambient“)
annual	Jährlich
aut	Autarkie
axial	Axial
B	Brennstoff
bat	Batterie
boco	Randbedingungen („boundary conditions“)



C	Collector
eig	Eigenverbrauch
el	Elektrisch
ges	Gesamt
HH	Haushaltsstrom
HSys	Heizsystem
in	Eintritt
net	Netz
MAX	Maximum
MIN	Minimum
NB	Netzbezug
NE	Netzeinspeisung
out	Austritt
PV	Photovoltaik
rad	Strahlung („Radiation“)
RH	Raumheizung
RL	Rücklauf
S	System
Sol	Solar
Sp	Speicher
VL	Vorlauf
WW	Warmwasser
6d	6 Tage



## 11 Referenzen

- Bales, C., 2004. Combitest - A New Test Method for Thermal Stores Used in Solar Combisystems. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Battaglia, M., Leconte, A., Chèze, D., Jobard, X., 2016. TYPE 5998 – ISO BUILDING MODEL. SPF Institut für Solartechnik & CEA INES, Rapperswil & Aix-les-bains.
- Chèze, D., Papillon, P., Leconte, A., Persson, T., Bales, C., Haller, M.Y., Haberl, R., 2014. Towards an harmonized whole system test method for combined renewable heating systems for houses, in: Proc. of the EuroSun 2014 Conference. Presented at the Eurosun 2014, ISES Europe, Aix-les-Bains, France.
- Drück, H., Pauschinger, D., 2006. MULTIPOINT Store-Model, Type, 2006. [http://www.trnsys.de/download/en/ts\\_type\\_340\\_en.pdf](http://www.trnsys.de/download/en/ts_type_340_en.pdf).
- Energieeffizienz von Gebäuden — Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008), 2008.
- Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008), 2008.
- Granzotto, M., Chèze, D., Haller, M.Y., 2014. Impact of Small Weather Data Time Steps on the Simulation of Solar and Heat Pump Systems, in: EuroSun 2014. Aix-les-bains, France. <https://doi.org/10.13140/2.1.3042.0486>
- Haberl, R., Haller, M.Y., Frank, E., 2014. Solare Wärmepumpensysteme auf dem Prüfstand - Systemtests von 11 verschiedenen Systemen, in: 24 . OTTI Symposium Thermische Solarenergie. OTTI e.V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.
- Haberl, R., Haller, M.Y., Papillon, P., Chèze, D., Persson, T., Bales, C., 2015. Testing of combined heating systems for small houses: Improved procedures for whole system test methods. Deliverable 2.3 of the MacSheep project. (Final Report), MacSheep - New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance.
- Haller, M., 2015. Complete Report and List of Dissemination Actions of the MacSheep project (Final Report), MacSheep - New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance.
- Haller, M., 2012. TRNSYS Type 832 v5.00 „Dynamic Collector Model by Bengt Perers“ - Updated Input-Output Reference. Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil, Switzerland.
- Haller, M., Vogelsanger, P., 2005a. Combisystem Performance Investigation, in: Hadorn, J.C. (Ed.), Thermal Energy Storage for Solar and Low Energy Buildings - State of the Art by the IEA Solar Heating and Cooling Task 32. IEA-SHC, pp. 41–45.
- Haller, M., Vogelsanger, P., 2005b. Kombi-Kompakt+ Schlussbericht, korrigierte Version von 2005. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Haller, M.Y., Carbonell, D., Mojic, I., Winteler, C., Bertram, E., Bunea, M., Lerch, W., Ochs, F., 2014. Solar and Heat Pump Systems – Summary of Simulation Results of the IEA SHC Task 44/HPP Annex 38, in: Proc. of the 11th IEA Heat Pump Conference. Montreal, Canada.
- Haller, M.Y., Dott, R., Ruschenburg, J., Ochs, F., Bony, J., 2013. The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38.
- Haller, M.Y., Haberl, R., Carbonell, D., Philippen, D., Frank, E., 2014. SOL-HEAP, Solar and Heat Pump Combisystems (BFE Schlussbericht).



- Haller, M.Y., Haberl, R., Persdorf, P., Reber, A., 2015. StorEx - Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern (Schlussbericht), Forschungsprogramm Solarwärme. Bundesamt für ENergie BFE.
- Heinz, A., Haller, M., 2013. Appendix A3 - Description of TRNSYS Type 877 by IWT and SPF. In: ., in: Models of Sub-Components and Validation for the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part C: Heat Pump Models - FINAL - A Technical Report of Subtask C Report C2 Part C.
- Klein, S.A. et al, 2010. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA [WWW Document]. URL <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- Konersmann, L., Haller, M., Vogelsanger, P., 2007. PelletSolar - Leistungsanalyse und Optimierung eines Pellet-Solarkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser. im Auftrag des Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Miara, M., Günther, D., Kramer, T., Oltersdorf, T., Wapler, J., 2011. Wärmepumpen Effizienz-Mess-technische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Fraunhofer ISE Freibg. Ger.
- Perch-Nielsen, S., Ribi, F., Biel, T., 2013. Masterplan Solarwärme Schweiz 2035, SWISSOLAR. Zürich.
- Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2017), 2017.
- Türk, O., Brunner, A., Bohren, A., Haller, M.Y., 2016. Vergleich der Testmethoden für Wärmespeicher, in: 26. OTTI Symposium Thermische Solarenergie. OTTI e.V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.
- Vogelsanger, P., 2002. The Concise Cycle Test Method - A Twelve Day System Test - A Report of IEA SHC - Task 26, International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme.
- Wetter, M., 2011. Generic optimization program. User manual, Version 3.1.0. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkley, USA.
- Wetter, M., Huber, A., 1997. Vertical borehole heat exchanger EWS Model.



## **Anhang A Beschreibung der Testmethode**

Institut für Solartechnik SPF  
Hochschule für Technik Rapperswil HSR  
CH- 8640 Rapperswil  
www.solarenergy.ch

# Concise Cycle Test

Version 1.0, März 2018

## Beschreibung der Prüfmethode

<b>1</b>	<b>Allgemeine Grundlagen.....</b>	<b>2</b>
1.1	Systemtest.....	2
1.2	Jahresarbeitszahl.....	2
<b>2</b>	<b>Prüfeinrichtung.....</b>	<b>3</b>
2.1	Funktionsweise.....	3
2.2	Testraum.....	3
<b>3</b>	<b>Geprüftes System.....</b>	<b>6</b>
3.1	Systemgrenzen.....	6
3.2	Schnittstelle zwischen Prüfeinrichtung und geprüftem System.....	10
3.3	Regler.....	11
3.4	Wärmeträger.....	11
<b>4</b>	<b>Testmethode.....</b>	<b>12</b>
4.1	Rahmenbedingungen Klima und Gebäude.....	12
4.2	Testablauf.....	12
4.3	Raumheizung.....	14
4.4	Warmwasserbereitung.....	17
4.5	Solarthermische Kollektoren.....	18
4.6	PV Module.....	19
4.7	Haushaltsstrom.....	20
4.8	Wärmeerzeuger.....	21
4.8.1	Generell.....	21
4.8.2	Wärmepumpe.....	22
4.8.3	Heizkessel.....	22
<b>5</b>	<b>Testresultat.....</b>	<b>23</b>
5.1	Messpunkte.....	23
5.2	Bestimmung der Kenngrößen.....	24
<b>6</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis und Symbolverzeichnis.....</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Referenzen.....</b>	<b>29</b>

# 1 Allgemeine Grundlagen

## 1.1 Systemtest

Das effiziente Funktionieren von Systemen zur Bereitstellung von Wärme (und möglicherweise von Strom) in Wohngebäuden hängt stark von der richtigen Auslegung bzw. Konzipierung, Installation und Regelung der Komponenten und der Hydraulik ab. Besonders dann, wenn verschiedene Wärmequellen in einem System kombiniert werden, spielt deren Integration in das Gesamtsystem eine besondere Rolle. Dabei muss auf die besonderen Anforderungen der einzelnen Komponenten (wie z.B. Brennwertkessel, Pelletkessel oder Wärmepumpen) bei der hydraulischen Einbindung und der Regelstrategie geachtet werden. Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem hat dann einen massgeblichen Einfluss auf die Energieeffizienz der Anlage.

Die „Concise Cycle Test“ Methode (CCT) ist eine am SPF entwickelte dynamische Methode zur Prüfung von Systemen zur Wärmebereitstellung, die sich sowohl für das Testen von monovalent betriebenen Anlagen als auch für Anlagen mit Solarwärme-Unterstützung eignet. Dabei werden nicht einzelne stationäre Betriebszustände gemessen, sondern es muss in einem dynamischen, 6-tägigen Prüfzyklus ein komplettes Gebäude mit Wärme versorgt werden. Dieser Prüfzyklus wurde so konzipiert, dass eine direkte Extrapolation der Ergebnisse auf die Leistungsdaten eines ganzen Jahres möglich ist. Das Verfahren liefert somit Resultate für alle Betriebszustände aus allen Jahreszeiten, und dies weit schneller, präziser und kostengünstiger als jegliche Feldtests.

## 1.2 Jahresarbeitszahl

Der **Coefficient of Performance** (COP) einer Wärmepumpe ist das Verhältnis von erzeugter Wärmeleistung zur eingesetzten elektrischen Leistung. Die Leistungszahl ist abhängig vom Betriebspunkt, weshalb die Angabe der Leistungszahl allein nicht aussagekräftig ist. Sowohl die Temperatur auf der Senke als auch die der Wärmequelle beeinflussen den COP.

Wird die abgegebene Wärmeleistung und die aufgenommene elektrische Arbeit über ein ganzes Jahr gemessen und integriert zu entsprechenden Energiemengen, so kann damit die **Jahresarbeitszahl** (JAZ) bestimmt werden.

Das oft genannte Verhältnis 75 % Umweltenergie und 25 % Strom ergibt eine JAZ von 4. Dabei spielt allerdings die Systemgrenze eine wichtige Rolle. Je nachdem, welche Komponenten berücksichtigt werden, variiert das Ergebnis stark. Um ein komplettes Heizsystem bewerten zu können ist es wichtig die Bilanzgrenze so zu legen, dass auch alle Komponenten enthalten sind.

Dennoch ist die JAZ ein individueller Wert und kann nur als Richtwert gelten und ist im Feld nicht reproduzierbar. Sie ist abhängig vom Heizsystem selbst, aber auch von der Bauweise und der Dämmung des Gebäudes, dem Heizkreisverteilsystem, der klimatischen Lage, der Wärmequelle und schliesslich dem Nutzerverhalten. Deshalb kann das Erreichen einer bestimmten Jahresarbeitszahl auch nicht garantiert werden.

Um die Arbeitszahl als Vergleichsmaßstab verwenden zu können müssen alle Einflussfaktoren berücksichtigt und im Idealfall identisch sein.

## 2 Prüfeinrichtung

### 2.1 Funktionsweise

Auf dem Prüfstand wird der realitätsnahe Betrieb eines kompletten Heizsystems im hardware-in-the-loop Verfahren ermöglicht. Dazu simuliert und emuliert<sup>12</sup> der Prüfstand während dem Prüfzyklus ein komplettes Gebäude, dessen Wärmebedarf – und gegebenenfalls auch der Strombedarf - gedeckt werden muss. Dabei sind die zu Grunde gelegten Lasten für Raumwärme, Warmwasser und Haushaltsstrom vorab festgelegt um einen direkten Vergleich der geprüften Systeme zu ermöglichen.

In Abbildung 1 ist das Prinzip des Tests dargestellt. Die in blau hinterlegten Komponenten müssen bzw. können real installiert werden. Alle anderen Komponenten werden in einem Simulationsmodell nachgestellt und aufgrund der dort berechneten Werte für Leistung, Temperatur und Massenstrom emuliert. Das Verfahren zur Simulation und Emulation kann wie folgt beschrieben werden:

- Durch die Prüfstandssoftware werden am Ende jeden Zeitschrittes<sup>13</sup> aktuelle Messwerte an die Simulationssoftware übergeben.
- In der Simulation wird entsprechend der Eingabedaten das Verhalten der jeweiligen Komponente berechnet und an die Prüfstandssoftware übermittelt.
- Während jedem Zeitschritt steuert die Prüfstandssoftware die Emulation, während die Simulationssoftware pausiert. Erst am Ende des Zeitschrittes werden die neuen Messdaten an die Simulationssoftware übergeben, und die Regel-Zielgrößen für den nächsten Zeitschritt durch die Simulationssoftware ermittelt.

### 2.2 Testraum

Zur Installation des geprüften Systems steht ein eigener Raum zur Verfügung. Dieser „Technikraum“ wird auf  $20\text{ °C} \pm 0.5\text{ K}$  temperiert, wobei darauf geachtet wird dass sich keine Temperaturschichtung über die Höhe des Raumes ausbildet.

Fixe Positionen für die Anschlüsse zur Verbindung mit dem geprüften System bestehen nur für den Kollektorkreis. Durch die Kollektorkreisleitung besteht hier ein genügend grosser Spielraum für den Anschluss. Alle anderen Anschlüsse werden durch flexible Schläuche realisiert um die Verbindung und Temperaturmessung so dicht als möglich am Prüfling ausführen zu können. In Abbildung 2 ist eine Skizze des Prüfraums zu sehen. Eingezeichnet ist auch eine Klimakammer, die zur Konditionierung der Aussenluft (z.B. für Luft/Wasser-Wärmepumpen) verwendet wird.

---

<sup>12</sup> Mit Emulation bezeichnet man die Nachahmung des bekannten Verhaltens eines Systems durch ein anderes, technisches System. In diesem Falle die Nachahmung des Verhaltens eines Gebäudes durch die Hardware des Prüfstandes.

<sup>13</sup> Die Zeitschritte sind die Länge des Zeitintervalls einer dynamischen bzw. transienten Simulation. Bei einer solchen Simulation wird der zeitliche Fortschritt in einzelne Abschnitte aufgeteilt (diskretisiert) und die Lösung schrittweise für aufeinanderfolgende Zeitschritte berechnet. Je nach Anwendungsfall können die Zeitschritte unterschiedlich gewählt werden.

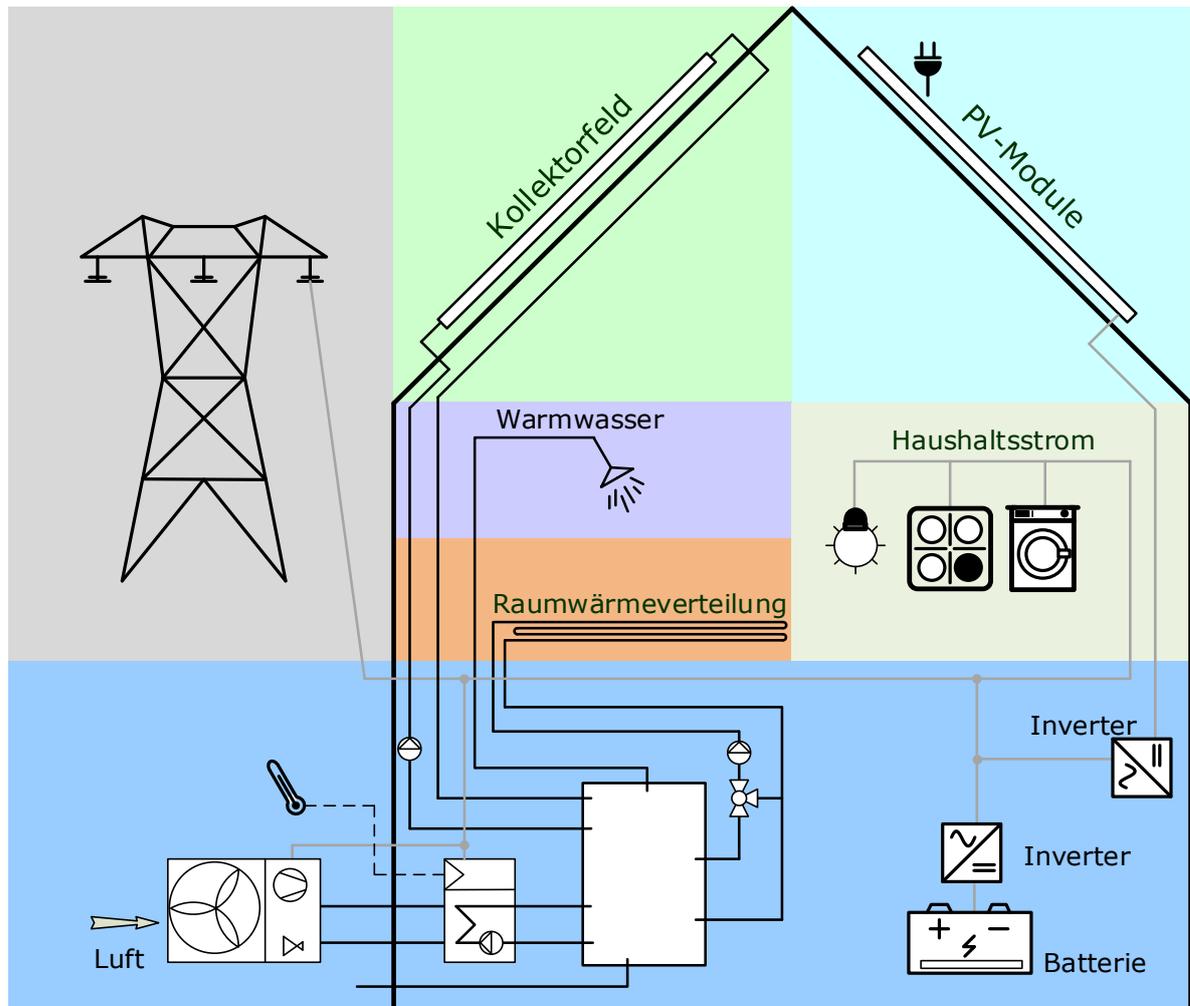


Abbildung 1: Prinzip des CCT: Die in blau hinterlegten Komponenten müssen bzw. können real installiert werden. Durch den Prüfstand wird das Gebäude inklusive der Gebäudehülle und der vorhandenen Umweltwärme als Quelle einer Wärmepumpe simuliert und emuliert.

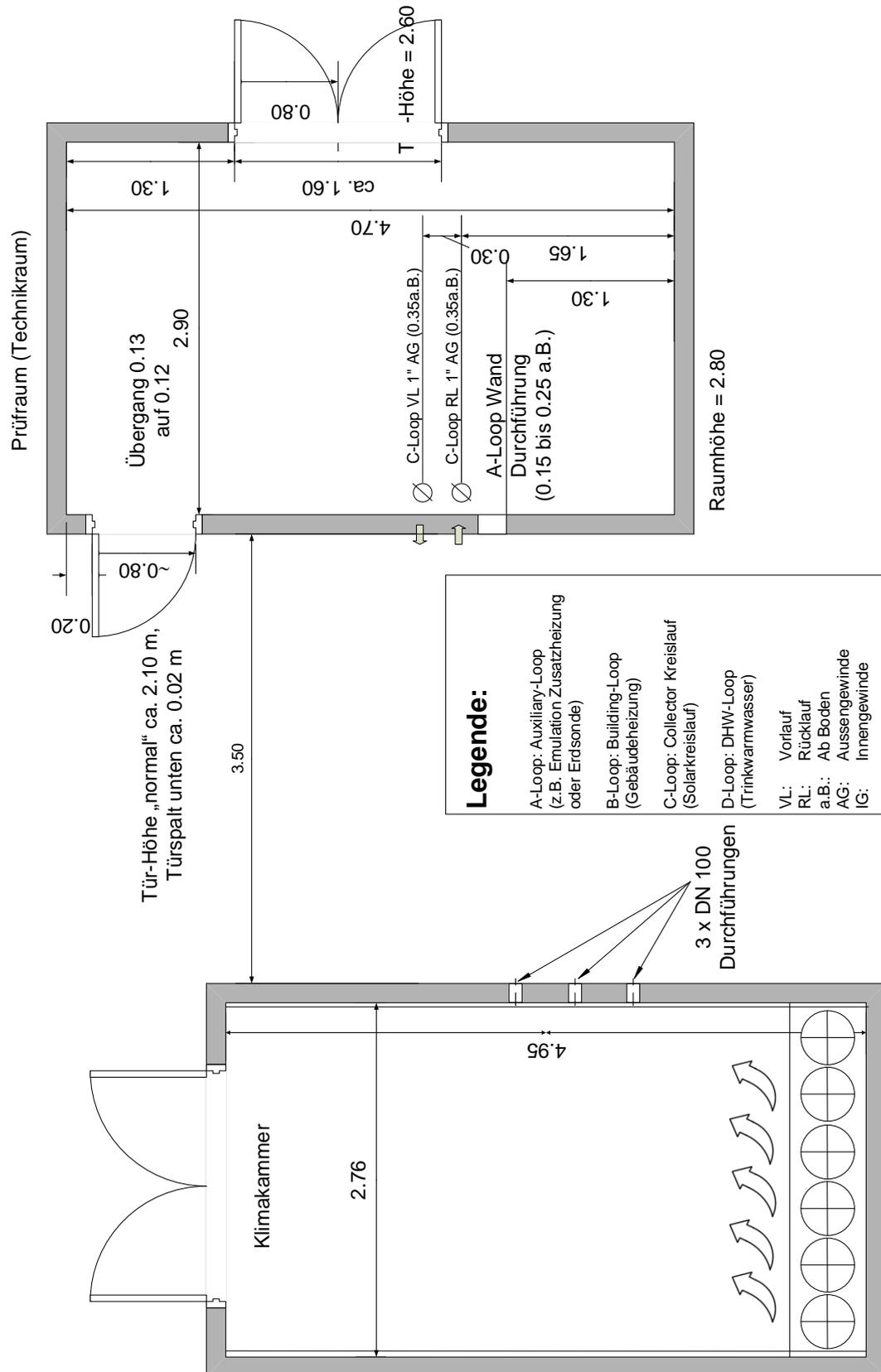


Abbildung 2: Skizze des Aufstellungsraums für die Systemprüfung.

## 3 Geprüftes System

### 3.1 Systemgrenzen

Mit Hilfe des CCT können viele verschiedene Systeme gemessen und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Es ist sowohl möglich, monovalente Systeme zu testen, wie auch Anlagen, die solarthermische Kollektoren verwenden oder auch PV-Module.

Für die Installation auf dem Prüfstand werden mindestens folgende Komponenten benötigt:

#### **Speicher, Warmwasser und Heizkreis**

Ein Speicher wird mindestens für die Warmwasserbereitung benötigt. Ein Wärmespeicher für die Raumheizung ist optional. Zwingend notwendige Komponenten sind:

- Speicher inklusive Isolation
- Expansionsgefäß für Speicher und Raumwärmeverteilung
- Mischerguppe Heizkreis mit:
  - ...Vorlauf-Temperaturbegrenzung für die Fussbodenheizung (Thermostat), und...
  - ...Pumpe für die Raumwärmeverteilung (falls nicht schon im Wärmeerzeuger integriert)
- Sicherheitsarmaturen (Überdruckventil)

Die Warmwasserbereitung ist per Frischwasserspeicher, internen oder externen Wärmeübertragern möglich. In Kombination mit Solarwärme oder anderen Wärmeerzeugerkonzepten die zu Temperaturen über 65 °C im Speicher führen können ist ein Übertemperatur- bzw. ein Verbrühungsschutz notwendig. Es wird derzeit keine Zirkulation für die Warmwasserleitungen im Gebäude installiert oder getestet.

#### **Wärmeerzeuger**

##### *Generell*

- Zur Regelung nötige Temperaturfühler. Zum Beispiel...
  - ...Temperaturfühler zur Messung der Aussentemperatur (zur Berechnung der nötigen Vorlauftemperatur des Heizkreises), inklusive 8 Meter Fühlerkabel.
  - ...Temperaturfühler zur Messung der aktuellen Heizkreis-Vorlauftemperatur
- Alle weiteren Komponenten, die für den Betrieb des Wärmeerzeugers in einer Feldinstallation benötigt werden.

##### *Wärmepumpe*

Neben der Wärmepumpe selbst werden weitere Komponenten benötigt:

- Bei Luft-Wasser Wärmepumpen:
  - Ausseneinheit (zur Platzierung in der Klimakammer).
  - Verbindungsleitung zwischen Ausseneinheit und der Installation im Technikraum (Kältemittelleitung inklusive Kältemittel oder wasserführendes System).

##### *Wärmeerzeuger auf Brennstoff-Basis*

Wichtig für die Messung des Wärmeerzeugers ist es, den Energieverbrauch genau erfassen zu können. Deshalb können mit dem CCT nur Geräte geprüft werden, die Brennstoffe mit einer homogenen Beschaffenheit verwenden. Diese sind zum Beispiel: Holzpellets, Erdgas oder Heizöl.

Es können nur Wärmeerzeuger geprüft werden, die Wärme über ein hydraulisches Heizsystem in das zu beheizende Gebäude zu bringen. Eine direkte Wärmeübertragung per Konvektion oder Strahlung wie z.B. bei einem sogenannten Schwedenofen kann derzeit im CCT nicht geprüft werden.

Teil des Systems ist neben dem Wärmeerzeuger selbst:

- Der Anschluss an den Kamin.
- Geräte zum Fördern oder dem Transport des Brennstoffes.
  - Bei Ölkesseln: Eine Ölpumpe, ein Filter und Leitungen zur Verbindung mit dem Öltank.
  - Bei Pelletkesseln: Ein Saugzuggebläse oder eine Förderschnecke.
- Sonstige Komponenten wie eine Rücklaufhochhaltung für Pelletkessel oder ein Kondensatablauf für Geräte mit Brennwertnutzung.
- Entsprechende Sicherheitseinrichtungen.

*Andere Energiequellen, zum Beispiel chemische Reaktionen*

- können Analog den zuvor definierten Grundsätzen für Wärmepumpen und Brennstoff-Systeme getestet werden. Das Testverfahren ist diesbezüglich vollkommen offen gegenüber neuen Technologien die heute noch gar nicht auf dem Markt sind. Grundvoraussetzung ist die Möglichkeit, eine saubere Energiebilanz erstellen zu können.

### **Verrohrungen und Ventile**

Die Messstellen im Systemtest sind in jedem Fall so nahe wie möglich am Prüfling. Am Beispiel der Raumheizung bedeutet dies, dass die Messung direkt nach dem Mischer der Raumwärmerversorgung stattfindet. Die Verbindung von dieser Messstelle bis zum Prüfstand wird durch das SPF erstellt.

Innerhalb des getesteten Systems werden alle Verrohrungen und Armaturen benötigt. Am Beispiel eines Kombispeichers der durch eine Wärmepumpe bewirtschaftet wird, bedeutet dies, dass die Verbindung zwischen Wärmepumpe und Speicher, inklusive aller benötigten Ventile und Armaturen, durch den Hersteller erfolgen muss. Die Verbindungen müssen nicht fix verrohrt werden. Der Einsatz von druckfesten Schläuchen oder Wellrohren ist für die Prüfung möglich, sofern sie der üblichen Installationspraxis des Herstellers und seiner Installationspartner im Feld entspricht. Auf Wunsch können auch Messstellen (Vor- und Rücklauftemperatur, Volumenstrom) innerhalb des geprüften Systems eingerichtet werden. Dadurch können zusätzliche Informationen über das Verhalten der Anlage gewonnen werden. Diese Messstellen sollten vorab besprochen werden (zum Beispiel zwischen der Wärmepumpe und dem Speicher oder zwischen der Wärmepumpe und der Ausseneinheit).



### **Kollektorkreis**

Falls ein System mit thermischer Solarenergienutzung getestet wird, müssen diese Komponenten vorhanden sein:

- Kollektor-Temperaturfühler (wird an der Hardware des Teststandes montiert)
- Sämtliche Armaturen für den Solarkreis: Pumpe, Ventile, Temperaturfühler etc.
- Expansionsgefäß für den Solarkreis
- Regelgerät für den Solarkreis inklusive Stromversorgungskabel
- Sämtliche Rohr-Verbindungen für die Montage und das Anschliessen von Solararmaturen und Solarleitung

Das Kollektorfeld ist nicht Teil des getesteten Systems<sup>14</sup>. Daher wird das Kollektorfeld während des Tests simuliert und emuliert. Zu diesem Zweck muss der Kollektor im Vorfeld mit dem Standard-Prüfverfahren der EN ISO 9806 geprüft worden sein, und die Kollektor-Kennwerte müssen aus diesen Prüfungen übernommen werden können.

Die Kollektorkreisleitung kann ebenfalls durch den Prüfstand emuliert werden, es besteht aber auch die Möglichkeit die Leitung inklusive Isolation und Kollektorfühlerkabel real am Prüfstand zu installieren (10 m Vorlauf + 10 m Rücklauf).

### **Photovoltaik**

Wird ein System mit photovoltaischer Energieerzeugung getestet, so sind die PV-Module nicht Teil des getesteten Systems (vgl. „Kollektorkreis“). Der PV-Ertrag wird simuliert und durch eine Gleichstromquelle emuliert. Ein Wechselrichter sollte möglichst geliefert und installiert werden. Falls dies nicht möglich ist würde ein passender Wechselrichter durch das SPF gestellt werden. Optional ist die Lieferung einer Batterie plus der dazu nötigen Komponenten (zum Beispiel Batteriewechselrichter und/oder Laderegler, LAN Kabel für die Internetverbindung, Messgeräte zur Ermittlung der elektrischen Energieströme in der Hausinstallation).

### **Elektroinstallation**

Der Anschluss an das Stromnetz sowie die Versorgung des Haushaltsstroms erfolgt über einen 3-Phasen Stecker, die Sicherung (Heizsystem, gegebenenfalls Haushaltsstrom und Wärmepumpe) erfolgt über eine C25 Sicherung.

Für Systeme, die PV-Module und ggf. einen elektrischen Energiespeicher beinhalten wird im Gebäude auch der Haushaltsstrom berücksichtigt. Die elektrischen Verbraucher im Einfamilienhaus werden nach einem vordefinierten Lastprofil gesteuert. Um den PV-Strom auch für diese Verbraucher nutzbar zu machen, müssen diese über eine eigene Verbindung aus dem System versorgt werden. Dazu ist es unter Umständen nötig, einen Schaltschrank zu installieren. Die genauen Details der Installation sollten in einer Vorbesprechung geklärt werden.

---

<sup>14</sup> Der Grund dafür ist, dass es nicht praktikabel ist, ein Kollektorfeld von 10 - 30 m<sup>2</sup> unter einen Sonnensimulator zu stellen, um reproduzierbare Bedingungen für die Strahlung auf das Kollektorfeld bereitzustellen.

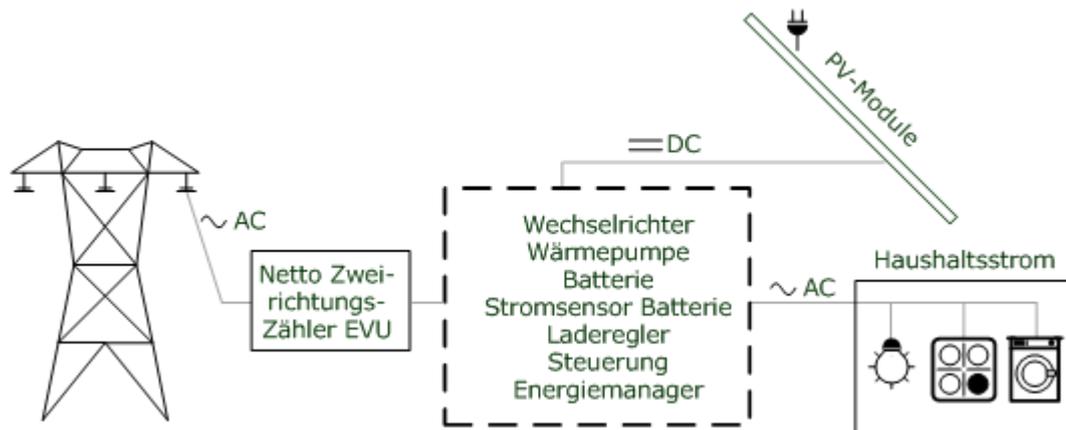


Abbildung 3: Elektroinstallation des geprüften Systems.

Die Systemgrenzen für ein Beispielsystem sind in Abbildung 4 dargestellt. Die obligatorischen Komponenten des Systems sind alle Komponenten, die nötig sind um das Gebäude mit Raumwärme und Warmwasser zu versorgen. Optional sind der PV-Teil mit Wechselrichter und Batterie sowie der solarthermische Teil.

Im Fall einer Luft-Wasser Wärmepumpe verschiebt sich die Systemgrenze. Die Ausseneinheit mit dem Kondensator ist dann Teil des geprüften Systems und muss geliefert und installiert werden.

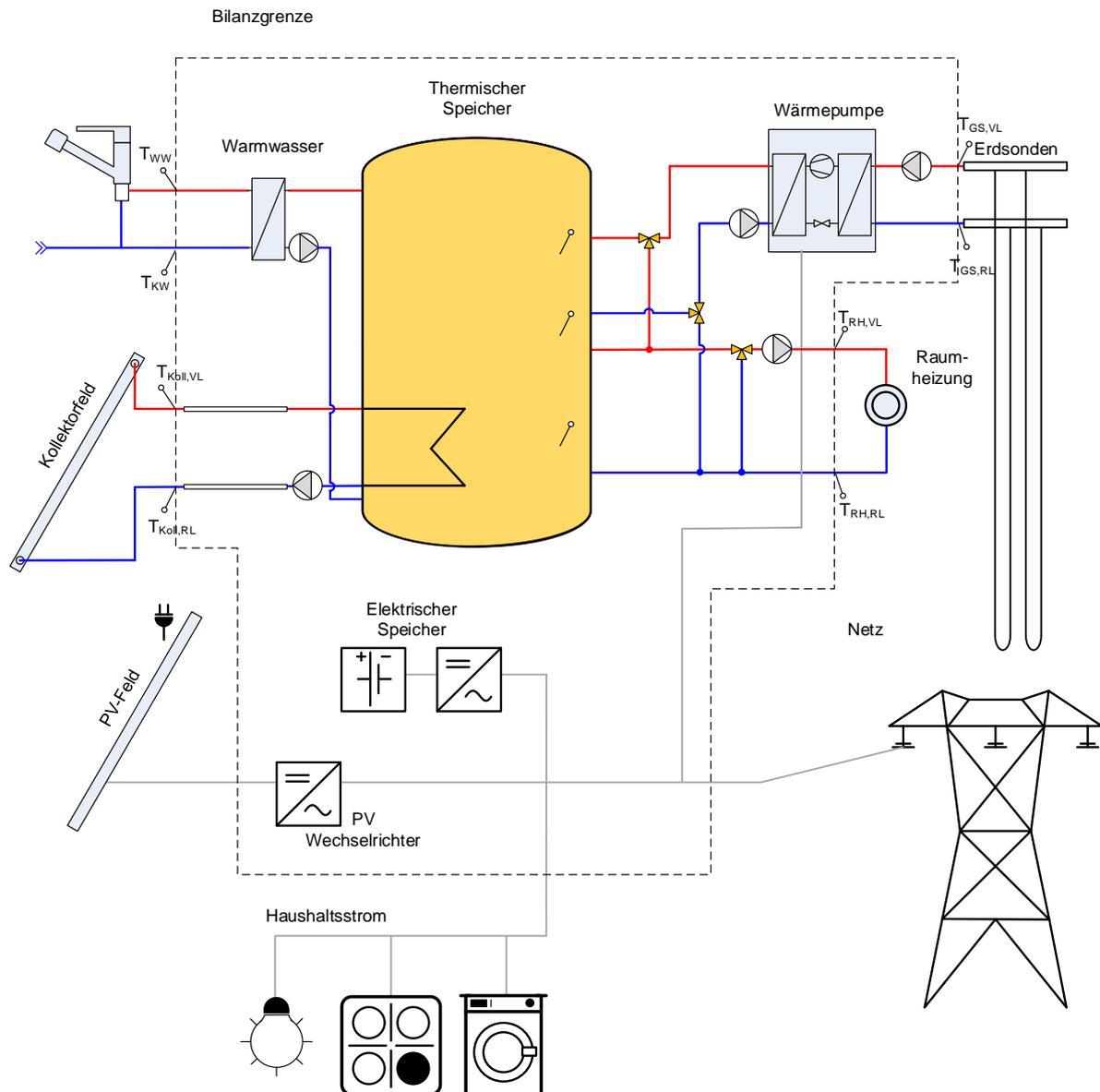


Abbildung 4: Vereinfachtes hydraulisches Schema, das die Systemgrenzen eines Beispielsystems zeigt.

### 3.2 Schnittstelle zwischen Prüfeinrichtung und geprüftem System

Die Verbindungsstücke zwischen der Prüfeinrichtung und dem geprüften System enthalten jeweils einen in das Wärmeträgermedium eingetauchten Temperatursensor, der so platziert ist, dass er direkt angeströmt wird. Ausserdem ist immer ein Wärmesiphon von mindestens 14 cm effektiver Höhe enthalten. Die Anschlüsse werden jeweils so nahe als möglich an der Systemgrenze des Prüflings platziert und durch das SPF isoliert.

### 3.3 Regler

Alle Regler, die zur Regelung der Anlage benötigt werden, sind Teil des geprüften Systems. Für die Einstellungen im Test gibt es Vorgaben, die für eine erfolgreiche Prüfung erfüllt sein müssen. Diese Vorgaben sind:

- Funktionen mit Abhängigkeit von der Vergangenheit sollten möglichst abgestellt werden. Falls dies nicht möglich ist kann evtl. kein Test durchgeführt werden.
- Funktionen von Regelung und Steuerung sollten so weit wie möglich offengelegt und in entsprechenden Dokumenten erklärt werden.
- Die Regelung der Heizungsvorlauftemperatur gehört zum System. Die Wärmeabgabeleistung der Wärmeverteilung ist so ausgelegt, dass ein Durchfluss von rund 700 L/h (bei Ausstemperatur  $-10\text{ °C}$  und Vorlauftemperatur  $34\text{ °C}$ ) ausreicht, um eine Raumtemperatur von  $20\text{ °C}$  zu gewährleisten.
- Die thermische Masse des Gebäudes kann im eigentlichen CCT nicht als Speicher verwendet werden<sup>15</sup>. Dies bedeutet auch, dass sommerliche Überschusswärme nicht in die Heizkreisverteilung abgegeben werden darf. Um die Bewirtschaftung der thermischen Masse des Gebäudes zu testen müssen eigens darauf zugeschnittene Zusatztests gefahren werden.
- Die Anlage funktioniert vollständig automatisch, inkl. einer Umstellung von Sommer- auf Winterbetrieb.

Werden Informationen über den aktuellen Bedarf an elektrischer Energie im Gebäude benötigt, so müssen auch die entsprechenden Messinstrumente installiert und mit dem Regler verbunden werden. Die durch das SPF aufgenommenen Messdaten stehen für das geprüfte System nicht als Grundlage der Regelung zur Verfügung.

### 3.4 Wärmeträger

Die Eigenschaften der verwendeten Fluide müssen bekannt sein. Dies gilt insbesondere für die Wärmekapazität ( $c_p$ ) und Dichte als Funktion der Temperatur und des Mischungsverhältnisses (Konzentration) bei Stoffgemische (z.B. Frostschutzmittel im Kollektorkreis, Solekreis von Sole/Wasser Wärmepumpen).

Für Wasser sind die Stoffwerte hinreichend bekannt, andere Wärmeträger können auf Wunsch vor dem eigentlichen Test durch das SPF ausgemessen werden (Zusatzauftrag).

In der Regel werden jedoch alle Fluide vom SPF gestellt und deren Stoffeigenschaften und das Mischungsverhältnis während dem Test laufend kontrolliert.

---

<sup>15</sup> Überhöhungen der Temperatur der thermischen Massen des Gebäudes können nicht genügend schnell wieder abgebaut werden, so dass ein Übertrag von gespeicherter Energie über einen längeren Zeitraum stattfinden würde, was nicht kompatibel ist mit dem Ansatz des CCT, dass an jedem Tag eine fixe und vordefinierte Wärmemenge an das Gebäude geliefert werden muss.

---

## 4 Testmethode

### 4.1 Rahmenbedingungen Klima und Gebäude

Dem Test zugrunde liegt ein 6-Tägiger Prüfzyklus. Zu den definierten Rahmenbedingungen zählen die Wetterdaten (vgl. Abbildung 5) sowie vordefinierte Lastprofile für Raumheizung, Warmwasser und Haushaltsstrom. Alle Profile sind aufeinander abgestimmt mit dem Ziel, im Test ein Ergebnis zu liefern, das direkt auf Jahreswerte skalierbar ist

Grundlage der Wetterdaten sind Messdaten einer Wetterstation in Zürich. Das dem Test hinterlegte Gebäude hat einen Energiebedarf von 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) bei 150 m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche (EBZ). Haushaltsstrom und Warmwasserbedarf entsprechen einer vierköpfigen Familie.

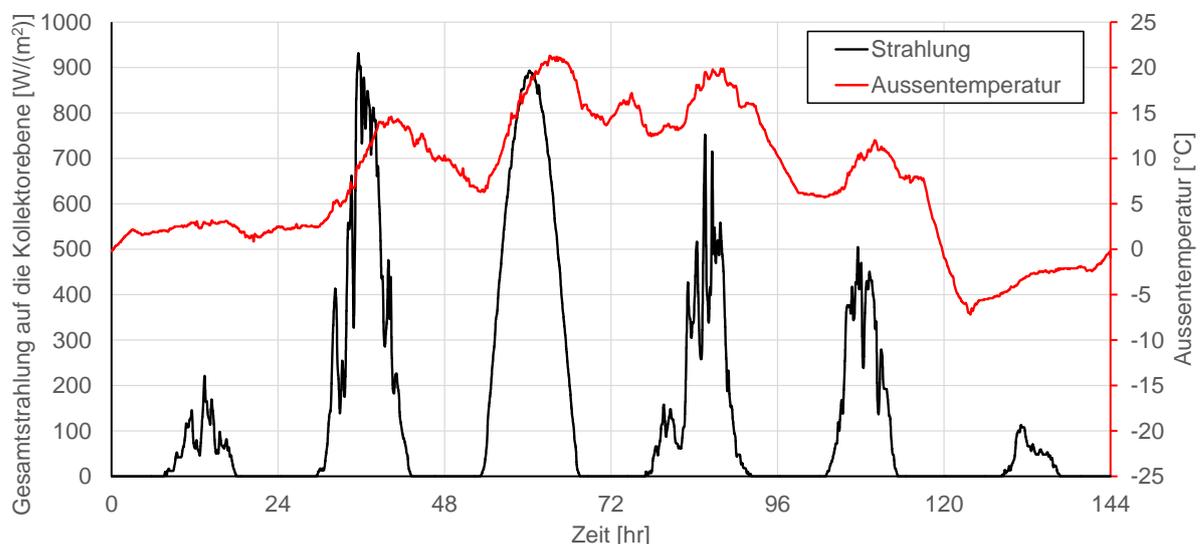


Abbildung 5: Wetterdaten des CCT.

### 4.2 Testablauf

Der Hersteller oder ein vom Hersteller beauftragter Installateur installiert das System im Testraum. Danach wird der Regler bzw. werden die Regler vom Installateur parametrieren. Zu diesem Zweck sind einige Vorversuche erforderlich, um die Drehzahl der Pumpen, die Heizkurve des Reglers und die Brauchwassermischventile zu überprüfen.

Vor dem eigentlichen Testbeginn müssen alle enthaltenen Speicher konditioniert werden. Das heisst, dass im thermischen Speicher (Warmwasserspeicher oder Kombispeicher) die Brauchwarmwasserzone zwischen 45 °C und 55 °C und der Raumheizungsteil bei etwa 30 °C sein sollten. Falls ein elektrischer Speicher enthalten ist muss dieser bis knapp über der maximalen Entladetiefe entladen sein<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> Der Test startet und endet mit einem Wintertag. Der „Vortag“ zu Testbeginn ist entsprechend ein Tag mit wenig Strahlungsangebot und hohem Verbrauch an elektrische Energie. Dementsprechend kann die Batterie um Mitternacht kaum mehr nutzbare Energie enthalten.

---

Nach dem Start des Tests sind bis zu dessen Abschluss keine Änderungen oder Eingriffe am System oder dessen Reglern mehr erlaubt. Das geprüfte System muss autonom arbeiten, um den Bedarf des Gebäudes an Raumwärme, Warmwasser und ggf. Haushaltsstrom zu decken.

Nach 6 Tagen bzw. 144 Stunden ist das Ende des Prüfzyklus erreicht. Der Test wird dann aber noch nicht abgebrochen sondern läuft nahtlos weiter, wobei der Test wieder bei Tag 1 beginnt. Das Testende ist erst erreicht, wenn das sogenannte Concise Cycle Kriterium erreicht ist. Dadurch wird sichergestellt, dass innerhalb des Systems keine Energie gespeichert wird, bzw. dass der Zustand des Systems am Anfang und Ende des Tests identisch ist. Das Concise Cycle Kriterium für den Abbruch, bzw. das erfolgreiche Abschliessen des Tests, besteht aus mehreren Punkten:

- **Energiebedarf**  
Am Ende dieses siebten Test-Tage kann der Verbrauch an Brennstoff oder elektrischer Energie in der Periode 0 h bis 144 h (vgl. Phase „A“ in Abbildung 6) mit dem Verbrauch an Brennstoff oder elektrischer Energie in der Periode 24 h bis 168 h (Phase „B“) verglichen werden. Sind diese Werte identisch ( $\pm 1\%$ ), so kann davon ausgegangen werden, dass der Energiegehalt der verwendeten Speicher zu Beginn und Ende des Tests identisch war. Trifft dies nicht zu, so war die Konditionierung der Speicher nicht ungenügend und der Test wird fortgesetzt, um den Vergleich von Phase „B“ mit Phase „C“ anzustellen.
- **Speichertemperatur**  
Die Speichertemperatur wird mittels Anlegefühlern an der Speicherwand gemessen. Über diese Temperaturmessung kann eine mittlere Speichertemperatur bestimmt werden. Diese Temperatur muss zu Beginn und am Ende des Testzyklus identisch sein ( $\pm 0.2\text{ K}$ ). Wenn die Temperatur nicht übereinstimmt bedeutet dies, dass die Konditionierung des Speichers nicht korrekt war und sich der Energiegehalt des Speichers während der Testperiode verändert hat. In diesem Fall muss der Test für mindestens 24 h weiter laufen um am Ende des nächsten Tages erneut den Vergleich zwischen Anfangs- und Endtemperatur zu ziehen.
- **Ladezustand der Batterie**  
Falls eine Batterie Teil des geprüften Systems ist muss überprüft werden, ob der Ladezustand der Batterie zu Beginn und am Ende des Testzyklus identisch ist. Dies kann entweder über die Anzeige der Batterie selbst erfolgen, oder mittels der Bilanzierung der zugeführten und abgegebenen elektrischen Leistung.

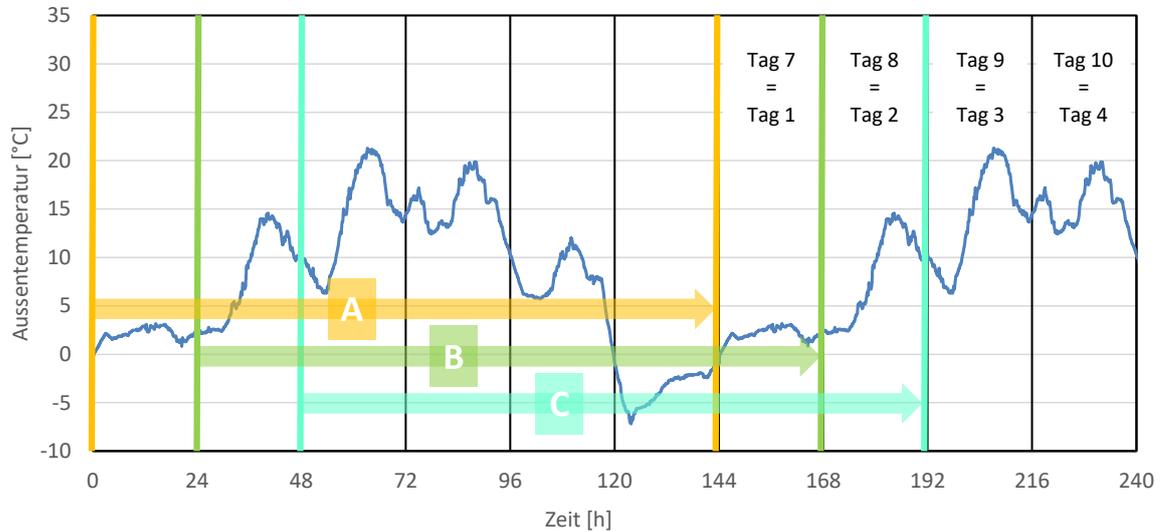


Abbildung 6: 6-Tages Test-Sequenz als Zyklus, der nahtlos aneinandergereiht, respektive wiederholt, wird. Der Test kann erfolgreich abgeschlossen werden, wenn die Auswertung von zwei aufeinanderfolgenden Phasen identisch ist ( $A = B$  oder  $B = C$  etc.).

### 4.3 Raumheizung



Abbildung 7: Raumwärmeverteilung.

Im Hintergrund der Messung läuft die Simulation eines Gebäudes inklusive einer Fussbodenheizung. Dazu wurden die Berechnungen der EN ISO 13790 ("Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008)," 2008) in ein Simulationsmodell übertragen. Diese Simulation berechnet die Reaktion der Fussbodenheizung auf die tatsächlich gemessene Vorlauftemperatur und den Massenstrom in der Heizkreisverteilung. Durch den Prüfstand wird diese Reaktion mit Hilfe eines Wärmeübertragers emuliert, der Wärme an den Kühlkreislauf des Prüfstandes abgibt.

Die Sollheizleistung im Verlauf des Tests wurde vorab definiert und in ein Profil übertragen. Dieser Sollwert entspricht derjenigen Wärmemenge die nötig ist, um die Raumtemperatur im Gebäude bei exakt 20 °C zu halten<sup>17</sup>. Um dem geprüften System die Möglichkeit zu geben, die Raumwärme nach der eigenen Regelstrategie zu liefern, wurde neben dem laufenden Sollwert auch eine maximale Abweichung von dieser Grösse definiert (vgl. Abbildung 8). Überschreitet die Wärmelieferung an das Gebäude diesen Sollwert, so wird die Wärmelieferung durch den Prüfstand gedrosselt.

<sup>17</sup> Die vorgängige Definition der Raumheizungslast ist nötig, um eine identische Last für alle Prüfungen zu fixieren. Erst durch eine genaue Definition der Rahmenbedingungen und Massnahmen zur Einhaltung dieser Bedingungen können die Ergebnisse aller Tests direkt miteinander verglichen werden.

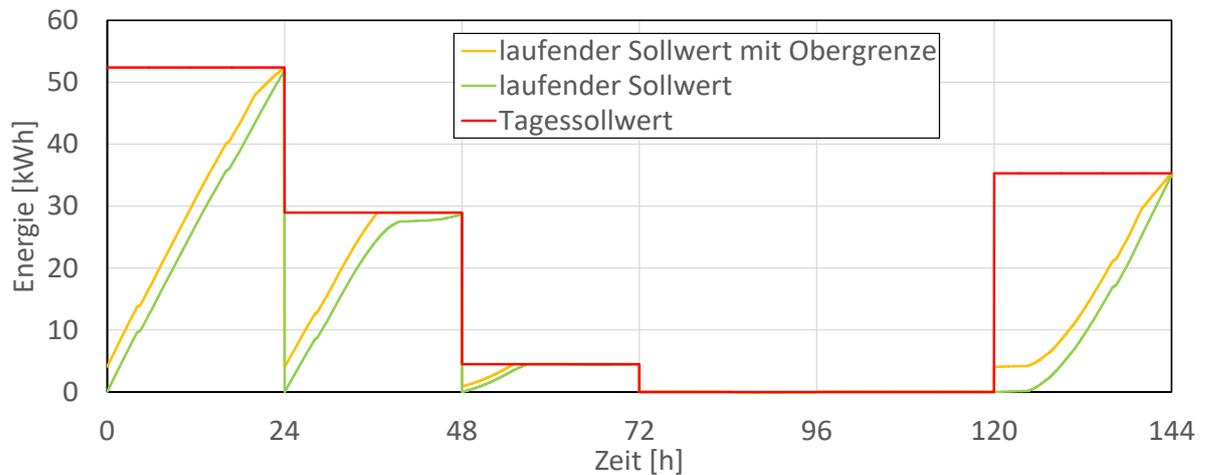


Abbildung 8: Vordefinierte Raumheizungslast als Tagessollwert. Die gelbe Linie zeigt die Obergrenze der kumulierten Energie im Verlauf der Messung. Bei Überschreiten dieser Linie wird die Energielieferung an das Gebäude durch den Prüfstand gedrosselt.

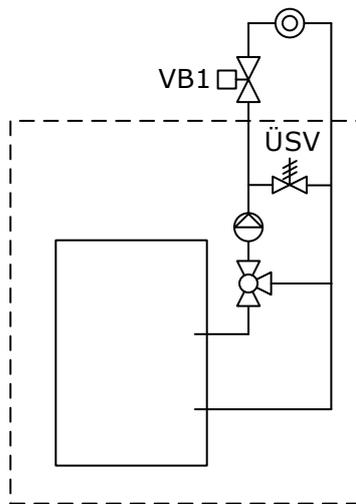


Abbildung 9: Begrenzung der Raumwärmelieferung durch den Prüfstand.

Um die Lieferung an Raumwärme zu begrenzen wird der Massenstrom im Heizkreis durch den Prüfstand begrenzt. Hierzu wird das in Abbildung 9 gezeigte Ventil „VB1“ verwendet.

Dieses Ventil wird nach 2 Kriterien angesteuert: Bei Überschreiten der Raum-Solltemperatur mit 50 %/K (Emulation eines Thermostatventils) und bei Überschreiten des laufenden Energie-Sollwertes mit 25 %/kWh. Entsprechend wird das Ventil sowohl komplett geschlossen wenn die Raumtemperatur 22 °C erreicht, als auch wenn der laufende Energie-Sollwert um 4 kWh überschritten ist. Bei Erreichen des Tagessollwertes für die Energielieferung wird das Ventil komplett geschlossen.

Um einen Schaden an der Heizkreispumpe oder anderen Komponenten zu verhindern kann auf Herstellerseite ein Überströmventil (ÜSV) (vgl. Abbildung 9) installiert werden.

Ziel der gesamten Systemtestmethode ist es, Heizsysteme unter realistischen Betriebsbedingungen zu testen. Dies impliziert, dass der Prüfling seine eigene Steuerungs- und Steuerstrategie verwendet. Die Regelparameter müssen jedoch so angepasst werden, dass der Wärmebedarf des emulierten Gebäudes gedeckt wird. Da die Testsequenz eine Kurzzeit-Testsequenz darstellt, müssen die folgenden Punkte beachtet werden:

- Die Mittelwertbildung der Umgebungstemperatur als Kriterium für die Heizperiode und zur Bestimmung der Vorlaufsoltemperatur für die Raumheizung muss deaktiviert, oder auf  $\leq 1$  h verkürzt werden.
- Heizperiode: Die Schwellen für Start und Stopp der Heizperiode für das emulierte Gebäude sind idealerweise auf  $14\text{ °C}$  (Beginn der Heizperiode) bzw.  $16\text{ °C}$  (Ende der Heizperiode) einzustellen.
- Keine Nachtabenkung

Zur Bestimmung der korrekten Heizkurve wurde die Kennlinie in Abbildung 10 erstellt. Diese zeigt die nötige Vorlauftemperatur des Heizsystems in Abhängigkeit des Massenstroms zur Deckung des Wärmebedarfes bei Auslegetemperatur. Nach der Installation des Systems kann der Massenstrom über die Heizkreisverteilung abgelesen werden (Abhängig vom Druckverlust des Systems, der Heizkreispumpe und der eingestellten Stufe). Dieser Massenstrom wird auf der x-Achse eingetragen. Am Schnittpunkt mit der Kennlinie kann die korrekte Temperatur abgelesen werden. Mit dieser Temperatur wird wiederum die Steigung der Heizkurve bestimmt.

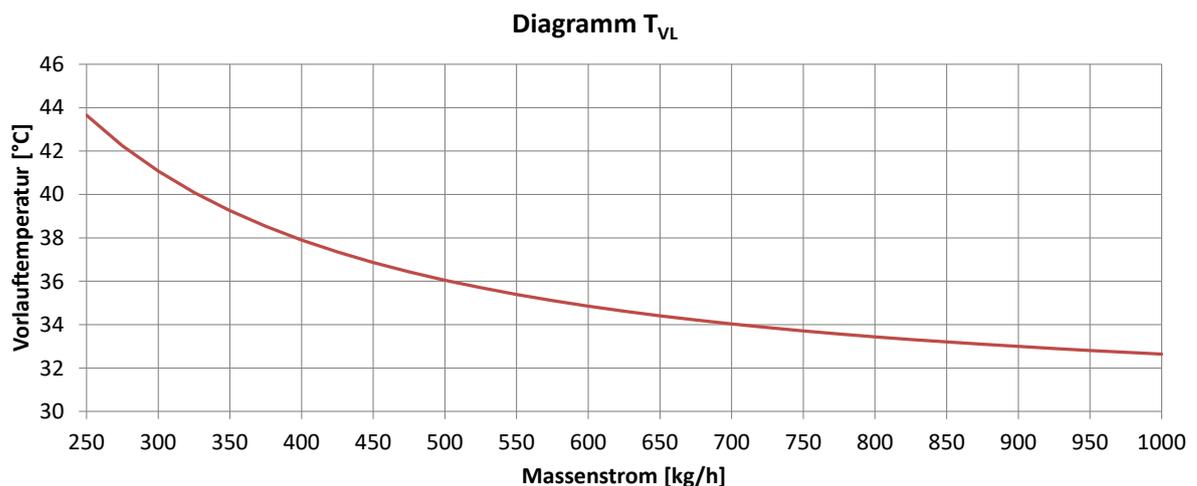


Abbildung 10: Nötige Vorlauftemperatur der Raumheizung in Abhängigkeit des Massenstroms zur Deckung des Wärmebedarfes bei Auslegetemperatur (ohne interne Lasten).

#### 4.4 Warmwasserbereitung

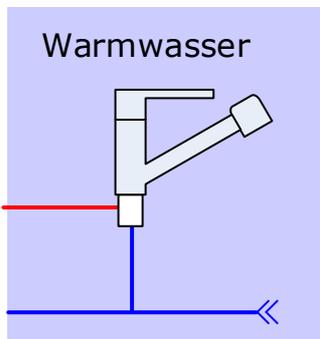


Abbildung 11: Warmwasserbereitung

Dem Test ist ein Warmwasserzapfprofil hinterlegt (vgl. Abbildung 12). Insgesamt beträgt der WW-Bedarf über die 6 Tage 47.6 kWh. Die Zapfungen sind weder im Tagesverlauf noch an den verschiedenen Tagen gleichmässig verteilt. Stattdessen sind die Zapfungen typisch für einen 4-Personen Haushalt mit jeweils grösseren Bezügen am Morgen (Dusche) und teilweise am Abend (Badewanne).

Die Kaltwassertemperatur wird stimmig zu den Wetterdaten konditioniert und liegt zwischen 8.7 °C und 16.2 °C. Der Volumenstrom liegt zwischen 5 l/min und 18 l/min am Punkt der Zapfung (Hahn / Duschbrause). Das heisst, nachdem der Nutzer eine Beimischung von Kaltwasser an der Mischarmatur induziert hat um eine gemischte Temperatur von 40 °C zu erreichen. Während der Zapfungen mit grossem Volumenstrom muss eine Vorlauftemperatur von 45 °C erreicht werden. Dies ist unabhängig davon, ob ein interner Wärmeübertrager oder ein Frischwassermodul (FWM) eingesetzt wird. Ein Verbrühungsschutz, der die Temperatur auf maximal 52.5 °C begrenzt, wird als Teil des Systems betrachtet, wenn die Speichertemperaturen 65 °C überschreiten können.

Während der Zapfungen mit grossem Volumenstrom muss eine Vorlauftemperatur von 45 °C erreicht werden. Dies ist unabhängig davon, ob ein interner Wärmeübertrager oder ein Frischwassermodul (FWM) eingesetzt wird. Ein Verbrühungsschutz, der die Temperatur auf maximal 52.5 °C begrenzt, wird als Teil des Systems betrachtet, wenn die Speichertemperaturen 65 °C überschreiten können.

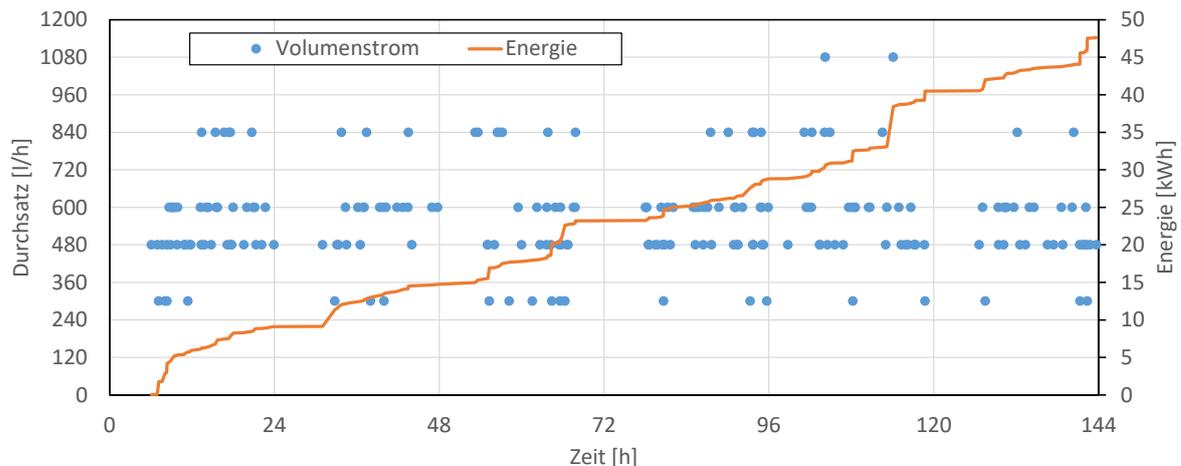


Abbildung 12: Zapfprofil für Warmwasser. Gezeigt wird die kumulierte Energie im 6-Tages Zyklus. Zu jeder einzelnen Zapfung ist zusätzlich der (gemischte) Durchsatz dargestellt.

In Abbildung 13 ist für zwei verschiedene Systeme die Abgrenzung zwischen dem Prüfstand und dem geprüften System zu sehen. Das eingezeichnete Mischventil ausserhalb der Bilanzgrenze ist Teil des Prüfstands. Es wird auf 40 °C eingestellt, um die Mischung an der Entnahmestelle zu emulieren. Mit dieser Massnahme werden realistische Volumenströme im System in Abhängigkeit der gelieferten Temperatur des Warmwassers gewährleistet. Der Verbrühungsschutz seitens des geprüften Systems kann durch einen Passivmischer oder durch einen entsprechenden Sollwert im FWM gewährleistet werden.

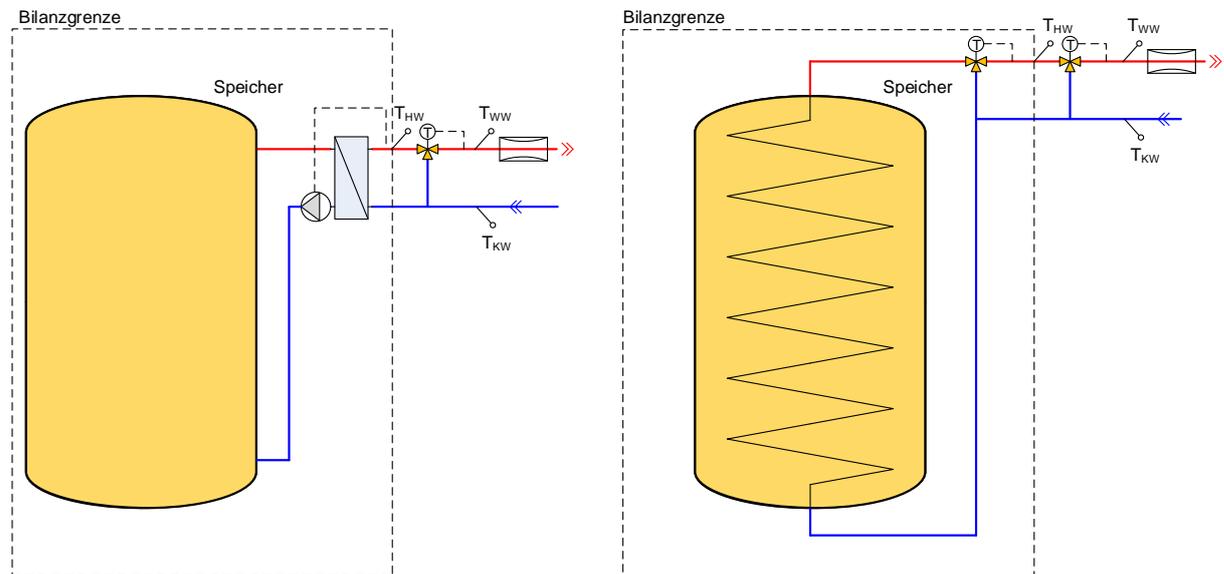


Abbildung 13: Hydraulisches Schema des Warmwasserteils, das die Systemgrenze zwischen dem Prüfstand und dem geprüften System zeigt.

#### 4.5 Solarthermische Kollektoren

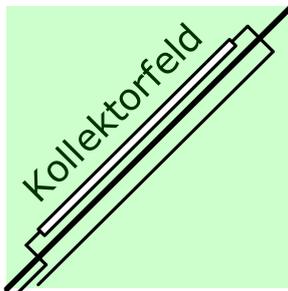


Abbildung 14: Solarthermische Kollektoren

In Kapitel 3.1 ist beschrieben, dass ein Kollektorfeld nicht real installiert, sondern durch den Prüfstand emuliert wird. Hierfür muss durch den Hersteller der Kollektortyp und die Anzahl bzw. Grösse des Kollektorfeldes<sup>18</sup> bestimmt werden. Dieses Kollektorfeld wird dann in einem Simulationsmodell abgebildet. Die dazu benötigten Kennwerte (vgl. Tabelle 16) müssen aus Prüfungen nach EN ISO 9806 ("Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2017)," 2017) verfügbar sein, und diese Prüfung muss von einem zertifizierten Prüfinstitut durchgeführt worden sein. Zusätzlich wird eine Zeichnung benötigt, aus der die hydraulische Verschaltung des Kollektorfeldes hervorgeht.

Es ist möglich, auch spezielle Kollektortypen einzubinden. In diesen Fällen müssen zusätzlich zu den Parametern aus Tabelle 16 auch die Parameter  $a_3$  bis  $a_8$  aus der ISO 9806:2017 bekannt sein. Dies ist z.B. dann nötig, wenn der Kollektor als Quelle für eine Wärmepumpe verwendet und unter der Umgebungstemperatur betrieben wird. Die Details für solche speziellen Anwendungsfälle müssen vorab mit dem SPF geklärt werden<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Es können Kollektorfelder bis zu einer Bruttofläche von 15 m<sup>2</sup> emuliert werden.

<sup>19</sup> Für ungedeckte Kollektoren, PVT-Kollektoren oder andere Spezialfälle sind evtl. Vorabmessungen des Kollektors nötig. Ggf. kann auch auf bereits vorhandene Messdaten und Simulationsmodelle zurückgegriffen werden.

Die Simulation des Kollektorfeldes dient dazu, die Temperatur sowohl im Betrieb als auch im Stillstand zu berechnen und durch Emulation bereitzustellen. Meist benötigt das geprüfte System die Kollektortemperatur während dem Test, um darauf basierend die Anlage zu regeln. Zu diesem Zweck muss ein Kollektorfühler geliefert und in einer Konditionierungsbox platziert werden, welche laufend die aktuelle Temperatur abbildet.

Die Kollektorkreisleitung (vgl. Kapitel 3.1) wird im Testraum installiert. Dazu wird die Leitung als Spirale an der Decke aufgehängt. Grund für dieses Vorgehen ist die Trägheit des Kollektorkreises, die nicht durch Simulationen abgedeckt werden kann. Ein Expansionsgefäß, ausgelegt auf die Grösse des Kollektorfeldes, muss ebenfalls installiert werden. Das Frostschutzgemisch im Kollektorkreis wird durch das SPF gestellt.

Tabelle 16: Daten für die Simulation und Emulation des Kollektorfeldes.

Grösse	Einheit	Beschreibung
A	m <sup>2</sup>	Fläche eines Kollektors (Referenzfläche, üblicherweise die Bruttofläche)
$\eta_0$	-	Konversionsfaktor (optischer Wirkungsgrad) <sup>(a)</sup>
a <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> K)	Wärmedurchgangskoeffizient <sup>(a)</sup>
a <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient <sup>(a)</sup>
C <sub>eff</sub>	kJ/( m <sup>2</sup> K)	Spezifische Wärmekapazität eines Kollektors <sup>(a)</sup>
IAM		Einfallswinkelkorrektor (Incident Angle Modifier); Angabe als b <sub>0</sub> und b <sub>1</sub> , Ambrosetti-r oder als Tabelle (im Fall von Vakuumröhrenkollektoren bidirektional)
dp	bar	Druckverlust eines Kollektors <sup>(b)</sup>
$\dot{m}$	kg/h	Massenstrom aus dem Kollektortest

<sup>(a)</sup> bezogen auf die Referenzfläche

<sup>(b)</sup> falls der Druckverlust nicht gemessen wurde erfolgt eine Abschätzung aufgrund einer Zeichnung des Kollektors/Absorbers

## 4.6 PV Module

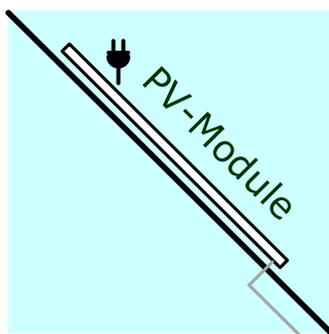


Abbildung 15: PV-Feld.

Ein Emulator liefert im Test Gleichstrom nach einer Simulation des PV-Feldes. Dabei wird aufgrund der Strahlungsdaten aus dem Wetterdatensatz die Modultemperatur und die aktuelle Leistung bestimmt und umgesetzt.

Durch den Hersteller kann der Modultyp sowie die Anzahl der Module im Rahmen der Möglichkeiten des Emulators gewählt werden. Die Spezifikationen des Emulators sind in Tabelle 17 dargestellt. Aus dem Datenblatt des PV-Moduls müssen die Parameter aus Tabelle 18 ersichtlich sein, die zur Bestimmung der I/V Kurve des Moduls benötigt werden.

Zur Verbindung des Emulators mit einem Wechselrichter sind alle gängigen Verbindungen vorhanden. Falls durch den Hersteller kein Wechselrichter geliefert wird kann durch das SPF ein Gerät gestellt werden<sup>20</sup>.

Tabella 17: Technische Daten des PV-Emulators.

Grösse	Einheit	Bereich
P	kW	0 ... 10 kW
U	V	0 ... 1000 VDC
I	A	0 ... 13 A

Tabella 18: Daten für die Simulation und Emulation des PV-Feldes.

Grösse	Beschreibung
FFv	$V_{MPP}/V_{OC}$ ; Spannung im Maximal Power Point (MPP) geteilt durch Leerlauf-Spannung (OC = Open Circuit)
FFi	$I_{MPP}/I_{SC}$ ; Strom im MPP geteilt durch Kurzschluss-Strom (SC = Short Circuit)
$\alpha$	Änderung von $I_{SC}$ mit der Temperatur der Zelle
$\beta$	Änderung von $V_{OC}$ mit der Temperatur der Zelle
$V_{LZH}$	Einstrahlungs-Abhängigkeit von $V_{MPP}$ : $V_{MPP} @ 200 \text{ W/m}^2 / V_{MPP} @ 1000 \text{ W/m}^2$

## 4.7 Haushaltsstrom

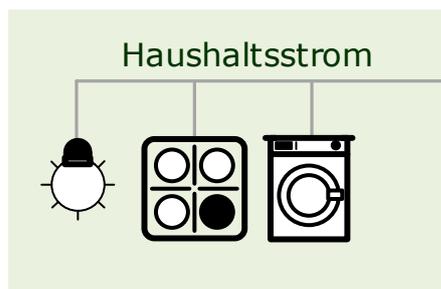


Abbildung 16: Haushaltsstrom.

Bei Verwendung von PV-Modulen im Systemtest spielt zur Bestimmung von Kennzahlen wie Eigenverbrauch, Autarkiegrad oder Netzaufwandszahl auch der Bedarf an el. Energie für Haushaltsgeräte eine Rolle. Deshalb ist dem Test ein Profil für den Verbrauch an Haushaltsstrom hinterlegt.

In Abbildung 17 ist die kumulierte Energie während des 6-Tages Test dargestellt. Wie für das Warmwasser Zapfprofil gilt auch für den Haushaltsstrom, dass die Verteilung typisch ist und nicht regelmässig für Tage oder im Tagesverlauf. Insgesamt beträgt der Bedarf für Haushaltsstrom 54.2 kWh. Der Bezug ist in Stufen aufgeteilt mit Leistungen zwischen 34 Watt (Grundlast) und 4.9 kW. Die Häufigkeit der einzelnen Stufen ist in Abbildung 18 dargestellt. Das Profil hat eine zeitliche Auflösung von 1 min.

<sup>20</sup> SMA STP 7000TL, max. Generatorleistung (DC) 13500 Wp, Bemessungsleistung (AC) (bei 230 V, 50 Hz) 7000 W

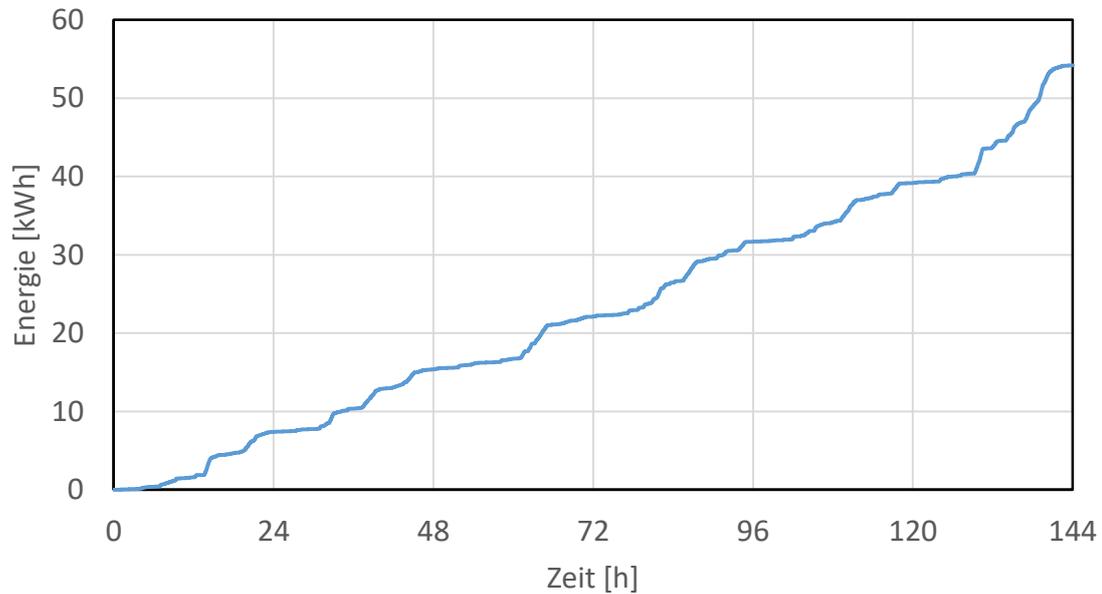


Abbildung 17: Haushaltsstromprofil im CCT. Gezeigt wird die kumulierte Energie im 6-Tages Test.

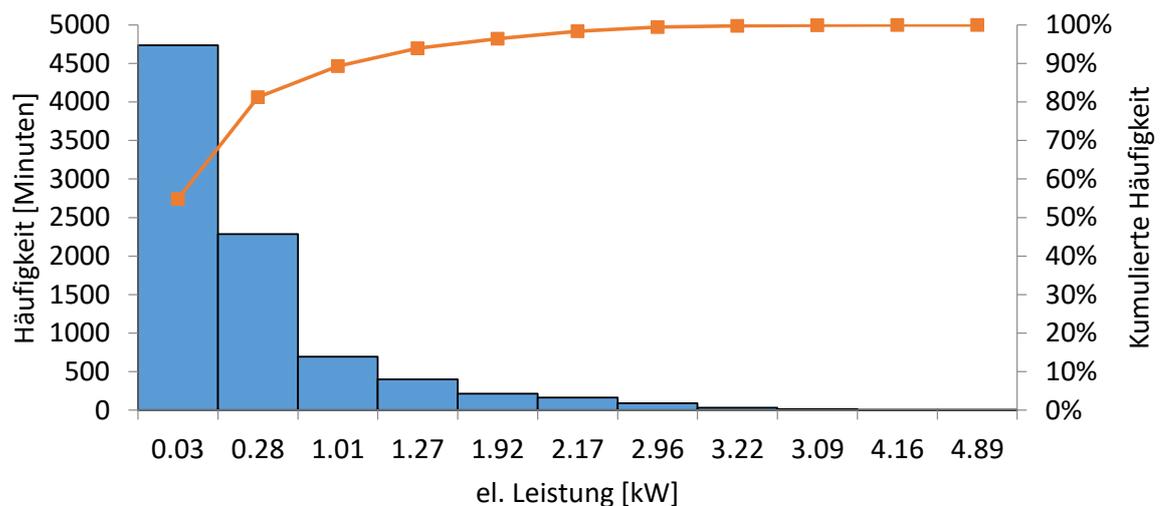


Abbildung 18: Häufigkeit der elektrischen Leistung im Haushaltsstromverbrauch nach den Leistungsstufen.

## 4.8 Wärmerezeuger

### 4.8.1 Generell

Alle Zusatzheizungen und Notheizungen, die zum Decken des Komfortbedarfs für Heizung und Warmwasser benötigt werden, sind Teil des zu prüfenden Systems und müssen entsprechend geliefert und installiert werden. Durch den Prüfstand werden jeweils die Rahmenbedingungen geschaffen, um die Zusatzheizung nutzen und deren Bedarf an Brennstoff oder el. Energie messen zu können.

#### 4.8.2 Wärmepumpe

Bei der Verwendung von Wärmepumpen wird die Umweltwärme entsprechend der Wetterdaten des Tests zur Verfügung gestellt.

Im Fall von **Sole/Wasser**-Wärmepumpen wird durch den Prüfstand eine Erdsonde a 123 m Länge simuliert und emuliert. In der Simulation entspricht die Temperatur des Erdreichs der Temperatur der zugehörigen Jahreszeit. Auf diese Weise werden realistische Quelltemperaturen zur Verfügung gestellt. Die installierte Wärmepumpe muss eine Pumpe mit einer genügend hohen Förderleistung verbaut haben. Der Druckverlust über die Erdsonde ist in Abbildung 19 dargestellt.

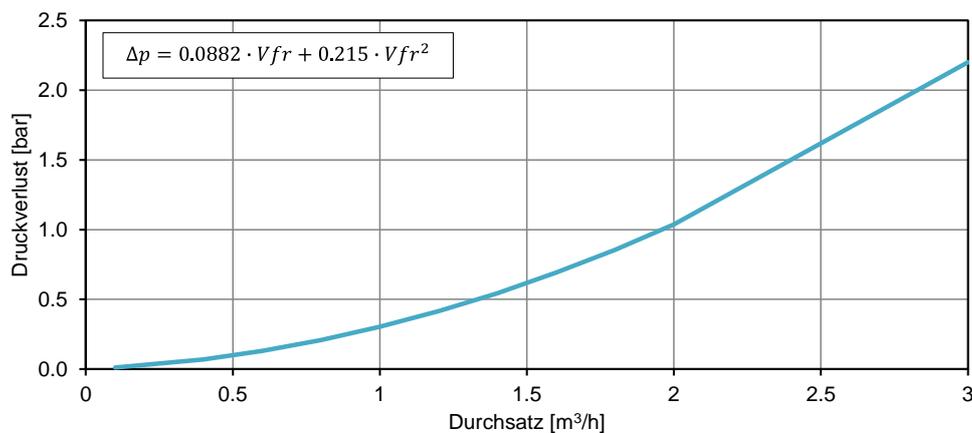


Abbildung 19: Druckverlust der Erdsonden in Abhängigkeit des Durchflusses.

Im Fall von **Luft/Wasser**-Wärmepumpen wird durch den Prüfstand die Aussenluft entsprechend der Wetterdaten zur Verfügung gestellt. Zu diesem Zweck muss die Ausseneinheit mit dem Verdampfer in der Klimakammer des Prüfstandes installiert werden. Die Verbindung zwischen der Ausseneinheit und der Installation im Technikraum ist Teil des zu prüfenden Systems und muss durch den Hersteller zur Verfügung gestellt und installiert werden. Zur Abschätzung der benötigten Leitungslänge (Kältemittel oder Glykol) kann die Skizze des Aufstellungsraums (Abbildung 2 in Kapitel 2.2) verwendet werden.

#### 4.8.3 Heizkessel

Am Prüfstand steht ein Anschluss an einen Kamin zur Verfügung. Bei diesem Anschluss wird immer ein Unterdruck von 10 Pa gewährleistet. Neben dem Kamin steht auch ein Brennstofflager zur Verfügung. Im Fall von Pelletkesseln wird dieses Lager auf eine konstante Luftfeuchtigkeit konditioniert<sup>21</sup>.

---

<sup>21</sup> Untersuchungen haben ergeben, dass der Feuchtegehalt von Holzpellets relativ schnell der Feuchte der Umgebungsluft folgt. Um Änderungen des Heizwertes der Pellets zu verhindern wird deshalb die Umgebungsluft konditioniert.

---

## 5 Testresultat

### 5.1 Messpunkte

#### Thermische Messstellen

Die zur Bilanzierung wichtigen thermischen Grössen werden jeweils mit eingetauchten Temperaturfühlern im Vor- und Rücklauf sowie mit einem Volumen- oder Massenstrommessgerät erfasst. Aus diesen Werten wird dann sekundlich die Leistung berechnet, die wiederum zu Energien aufkumuliert wird:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot [h(\vartheta_{in,i}) - h(\vartheta_{out,i})] \quad \text{Formel 16}$$

$$Q = \sum \dot{Q} \cdot \Delta t \quad \text{Formel 17}$$

Die thermische Last (Nutzwärme) im Test besteht aus der Raumheizungslast und dem Warmwasserbedarf:

$Q_{RH}$  In die Raumheizverteilung eingespiesene Energie.

$Q_{WW}$  In die Warmwasserverteilung eingespiesene Energie. Die Energie wird aufgeteilt in einen Anteil „nutzbarer“ und „nicht nutzbarer“ Energie. Als nutzbar wird die Wärme nach dem Erreichen der Mindesttemperatur von 40 °C bezeichnet.

Für die Berechnung der Nutzwärme wird entsprechend nur der Anteil „nutzbarer“ Energie verwendet.

Zusätzlich zur Bestimmung der Nutzwärme können auch Messstellen innerhalb der Systemgrenzen definiert werden. Diese können zum besseren Verständnis des Systems dienen, sind aber zur Bestimmung der Kenngrössen nicht notwendig. Mögliche Messstellen sind zwischen dem Wärmeerzeuger und dem Speicher oder zwischen externen Wärmeübertragern und dem Speicher.

Standardmässig wird die Messung der Temperatur im Speicher durchgeführt. Dazu wird ein Fühlerband mit acht Anlegefühlern, die äquidistant verteilt sind, auf die Aussenwand des Speichers aufgeklebt.

Weitere Anlegefühlern können an Positionen wie z.B. dem primärseitigen Rücklauf eines Frischwassermoduls, vor und nach Umschaltventilen oder im Kältemittelkreis einer Wärmepumpe angebracht werden.

#### Brennstoffverbrauch

Im Fall von Systemen mit Heizkesseln wird der Verbrauch des Brennstoffes kontinuierlich gemessen. Zusammen mit der Analyse des Brennstoffes kann daraus die zugeführte Leistung bestimmt werden.

#### Elektrische Messstellen

Zur Messung der elektrischen Leistung stehen mehrere Messgeräte zur Verfügung, die je nach System Anwendung finden. Galvanisch eingebunden kann die Leistung in verschiedenen Stufen gemessen werden, wenn möglich auf mehrere Messstellen verteilt. Zusätzlich stehen Rogowski-Spulen zur berührungslosen Messung bereit.

Die Grösse die immer bestimmt wird, ist der Netzbezug:

$W_{NB}$  Gesamte bezogene elektrische Arbeit ab Netz.

Einzel gemessen werden z.B. der Verbrauch eines Reglers oder der Verbrauch von Pumpen (Solarkreis- oder Raumheizungspumpe).

Für Systeme mit PV-Anlage werden weitere Grössen ermittelt:

$W_{PV}$  Produzierter PV-Strom. Die Messung erfolgt gleich- und wechselstromseitig, zur Bilanzierung wird die Messung des Wechselstroms verwendet.

$W_{HH}$  Im Gebäude benötigter Haushaltsstrom.

$W_{NE}$  Netzeinspeisung.

Zum besseren Verständnis und zur Funktionskontrolle werden Grössen bestimmt wie z.B.:

$W_{BatLad}$  Elektrische Energie, die zur Ladung der Batterie aufgewendet wird (AC, d.h. gemessen vor dem Batteriewechselrichter).

$W_{BatEnt}$  Elektrische Energie, die durch Entladung der Batterie zur Verfügung steht (AC, d.h. gemessen nach dem Batteriewechselrichter).

$W_{el,HSys,WP}$  Verbrauch der Wärmepumpe (Kompressor).

Der elektrische Gesamtenergieverbrauch wird als  $W_{ges}$  bezeichnet. Dieser besteht aus dem elektrischen Energiebedarf für Haushaltsstrom und dem elektrischen Verbrauch des Heizsystems (inklusive Batteriesystemverluste). Der gesamte Strom, der von der PV-Anlage geliefert aber nicht eingespiessen wurde, plus der Netzbezug, ergibt den Gesamtenergieverbrauch:

$$W_{ges} = W_{PV} - W_{NE} + W_{NB} \quad \text{Formel 18}$$

## 5.2 Bestimmung der Kenngrössen

Der Testzyklus des CCT ist für Systeme mit PV-Modulen oder solarthermischen Kollektoren gleichermaßen geeignet. Ziel der Methode ist eine direkte Extrapolation der Resultate auf Jahreswerte. Diese Extrapolation muss dabei die Leistung der solarthermischen Kollektoren über einen Korrekturfaktor berücksichtigen, um einer Überbewertung der Solarwärme entgegenzuwirken. Der Korrekturfaktor ist abhängig von der verwendeten Leistung des Kollektorfeldes bei  $700 \text{ W/m}^2$  Einstrahlung und einer Temperaturdifferenz von 30 K.

Die Korrektur wird auf den Energieverbrauch des Wärmeerzeugers angewendet. Im Fall einer Wärmepumpe also auf den Bedarf an el. Energie. Die Korrektur erfolgt nach folgenden Formeln:

$P_{CC}$  Leistung des Kollektorfeldes bei 700 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und einer Temperaturdifferenz von 30 K.

$$F_C = 1 + (-0.002 * P_{CC}^2 + 0.035 * P_{CC}) \quad \text{Formel 19}$$

$$W_{NB} = \left( \frac{W_{NB,CCT} \cdot 365}{6} \right) \cdot F_C \quad \text{Formel 20}$$

$$JAZ = \frac{Q_{RH,CCT} + Q_{WW,CCT}}{W_{NB,CCT} * F_C} \quad \text{Formel 21}$$

Wie in den Kapiteln 4.3 Raumheizung und 4.4 Warmwasserbereitung beschrieben, ist die zu deckende Last im Test vordefiniert. Auf diese Weise können geprüfte Systeme direkt miteinander verglichen werden. Im Warmwasserkreis gibt es dabei eine spezielle Komponente: Im WW-Zapfprofil ist die Warmwasserenergie mit 47.6 kWh definiert. Die Wärme wird dabei erst gezählt, wenn die Temperatur als nutzbar (> 40 °C) gezapft wird. Die Energiemenge vor dem Erreichen dieser Schwelle wird als nicht nutzbar eingestuft. Erfahrungsgemäss beträgt diese Energie ca. 5 % der Gesamtenergie. Zur Berechnung der Kennzahlen wird als Warmwasserbezug mit 50 kWh gerechnet. Systeme, die sehr schnell die Solltemperatur erreichen, haben dadurch einen Vorteil gegenüber langsameren Systemen die entsprechend höhere Verluste haben.

Im Fall von Systemen, die Heizkessel für die Nachheizung verwenden, werden aus der Nutzwärme und dem Brennstoffbedarf verschiedene Nutzungsgrade berechnet. Der einfachste System-Nutzungsgrad berücksichtigt nur den Energieeintrag durch den Brennstoff in Form des oberen Heizwertes (Formel 22). Bezüglich der Ausnutzung des gesamten thermischen Energieeintrags ist auch der System-Nutzungsgrad unter Berücksichtigung des solaren Energieeintrages relevant (Formel 23). Der System-Nutzungsgrad (Formel 24) berücksichtigt die Energie-Einträge durch den Brennstoff und gewichtete elektrische Hilfsenergie, und gibt damit Auskunft über die Menge nicht-solarer Energie welche im Verhältnis zur Nutzenergie aufgewendet werden muss. Die Ausnutzung des gesamten Energieeintrags (Brennstoff + Solar + Elektrisch) wird mit (Formel 25) berechnet.

$$\zeta_{S,B} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B} \quad \text{Formel 22}$$

$$\zeta_{S,B+Sol} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B + Q_{Sol}} \quad \text{Formel 23}$$

$$\zeta_{S,B+el} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B + F_{el} \cdot W_{NB}} \quad \text{Formel 24}$$

$$\zeta_{S,B+Sol+el} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{Q_B + Q_{Sol} + F_{el} \cdot W_{NB}} \quad \text{Formel 25}$$

Im Fall von Systemen mit Wärmepumpen als Nachheizung wird die **Arbeitszahl** des Heizsystems bestimmt. Diese zeigt die Effizienz der gesamten Anlage und beinhaltet entsprechend auch die Verluste des Speichers / der Speicher und der Hydraulik (Formel 26).

$$AZ_{System} = \frac{Q_{RH} + Q_{WW}}{W_{el,HSys}} \quad \text{Formel 26}$$

Für Systeme, die PV-Anlagen enthalten, werden noch weitere Kennzahlen bestimmt.

Der **Gesamt-Nutzenergiebedarf** ergibt sich aus der Summe des Haushaltsstrombedarfs sowie den thermischen Energielieferungen für Raumheizung und Warmwasser:

$$E_{use} = Q_{RH} + Q_{WW} + W_{HH} \quad \text{Formel 27}$$

Das **Eigenverbrauchsverhältnis** gibt an, welcher Anteil des lokal produzierten PV-Stroms selbst verbraucht wird:

$$R_{eig} = \frac{W_{ges} - W_{NB}}{W_{PV}} \quad \text{Formel 28}$$

Die Unabhängigkeit vom externen Stromnetz wird durch den **Autarkiegrad** beschrieben:

$$R_{aut} = \frac{W_{ges} - W_{NB}}{W_{ges}} \quad \text{Formel 29}$$

Das Eigenverbrauchsverhältnis und der Autarkiegrad sind unter Umständen eine irreführende Kenngrösse. Durch den Einsatz einer Batterie wird zwangsläufig der elektrische Gesamtverbrauch erhöht<sup>22</sup>. Durch den grösseren Gesamtverbrauch, der jeweils im Zähler der Formeln zu finden ist, erhöht sich sowohl das Eigenverbrauchsverhältnis als auch der Autarkiegrad, und zwar je mehr je höher die Verluste der Batterie sind.

Deshalb wird als weitere Kennzahl die Netzaufwandszahl bestimmt. Sie beschreibt das Verhältnis der ab Netz bezogenen Energie zum Gesamt-Nutzenergiebedarf:

$$R_{net} = \frac{W_{NB}}{E_{use}} \quad \text{Formel 30}$$

---

<sup>22</sup> Eine Batterie hat immer einen Wirkungsgrad < 1. Durch die Wechselrichter von AC zu DC bei der Beladung und von DC zu AC bei der Entladung sowie durch die Zelle selbst entstehen Verluste. Diese Verluste erhöhen den Gesamtverbrauch eines Systems.

---

## 6 Abkürzungsverzeichnis und Symbolverzeichnis

Die im vorliegenden Bericht verwendeten Abkürzungen sind hier dargestellt.

AZ	Arbeitszahl
CCT	Concise Cycle Test
COP	coefficient of performance (Leistungszahl)
DN	Nennweite („diamètre nominal“)
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus („Single Family Home“)
FprEN	Endgültiger Entwurf einer Europäischen Norm
FWM	Frischwassermodule
JAZ	Jahresarbeitszahl
PV	Photovoltaik
RH	Raumheizung
ÜSV	Überströmventil
WP	Wärmepumpe
WW	Brauchwarmwasser

Im Folgenden sind die Symbole aufgeführt, die im vorliegenden Bericht verwendet wurden. Die Symbole sind alphabetisch sortiert, zunächst nach lateinischen Buchstaben, anschließend nach griechischen.

### **Symbole:**

$\dot{m}$	Massenstrom
$P_{CC}$	Leistung des Kollektorfeldes bei 700 W/m <sup>2</sup> Einstrahlung und einer Temperaturdifferenz von 30 K.
Q	Wärmemenge
$\dot{Q}$	Wärmestrom
R	Kennzahl
t	Zeit
P	Leistung
T	Temperatur
UA	Temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient
V	Ventil
W	Arbeit



$\Delta$	Differenz
$\eta$	Wirkungsgrad

**Indizes:**

amb Umgebung („Ambient“)

annual Jährlich

aut Autarkie

axial Axial

bat Batterie

C Collector

eig Eigenverbrauch

el Elektrisch

ges gesamt

HH Haushaltsstrom

HSys Heizsystem

in Eintritt

net Netz

MAX Maximum

MIN Minimum

NB Netzbezug

NE Netzeinspeisung

out Austritt

rad Strahlung („Radiation“)

RH Raumheizung

RL Rücklauf

VL Vorlauf

WW Warmwasser

6d 6 Tage

## 7 Referenzen

Energieeffizienz von Gebäuden — Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008), 2008.

Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2017), 2017.

R. Bründlinger, B. M. Burger und F. P. Baumgartner, «prEN 50530 - the new European standard for performance characterisation of PV inverters, » 23 May 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228652218>.



## Anhang B Bewertung der Kompaktheit

Zur Bewertung der Kompaktheit werden verschiedene Kriterien einzeln bewertet. Die Einzelwerte können sich zwischen -1 (Minimum) und 1 (Maximum) bewegen.

Als Resultat der Kompaktheit wird der Mittelwert der Teilergebnisse ausgewiesen:

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \quad \text{Formel 31}$$

Die Einteilung dieses Mittelwertes erfolgt dann in folgenden Schritten (symmetrisch um Null):

	0.6 bis 1.0
	0.2 bis 0.6
	-0.2 bis 0.2
	-0.6 bis -0.2
	-1.0 bis -0.6

(bei Werten auf der Grenze jeweils die höhere Kategorie)

Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien beschrieben:

- **Anzahl der gelieferten Einheiten:**

Zur Bewertung wurde die Anzahl üblicherweise mit einem Standardsystem gelieferten Komponenten  $N_{Komp, std}$  als Referenzwert verwendet. Mit dieser Zahl wird die Zahl der gelieferten Komponenten  $N_{Komp, del}$  verglichen, und das Resultat mit 0.2 multipliziert:

$$K_1 = MAX(MIN(1; (N_{Komp, std} - N_{Komp, del}) \cdot 0.2); -1) \quad \text{Formel 32}$$

Folgende Komponenten werden als Standard eingestuft (mit diesen Komponenten wird als Teilergebnis eine „0“ erzielt):

- Speicher mit Isolation (wird die Isolation einzeln geliefert so zählt diese als zusätzliches Teil)
- Wärmeerzeuger
- Hydraulikgruppe zur Verbindung von Speicher, Wärmeerzeuger und Raumheizung
- Expansionsgefäß Sole
- Je eine Leitung zwischen der Hydraulikgruppe und dem Wärmeerzeuger (Leitungen zählen als ein Teil, auch wenn sie aus mehreren Rohren und Bögen zusammengesetzt sind).
- Expansionsgefäß Heizung
- Expansionsgefäß Solar
- Solarbaugruppe
- Frischwassermodul



Nicht gezählte Komponenten sind:

- Kollektorkreisleitung
- Ein Gefäß für das Glykolgemisch vor der Befüllung

- **Abmessungen und Gewicht der gelieferten Einheiten**

Bewertet wird:

- Die Anzahl der Teile, die nicht durch eine Standardtür passen.
- Die Anzahl der Teile die nicht ohne die Entfernung der Isolation oder anderer Teile durch eine Standardtür passen.
- Die Anzahl der Teile die einzeln mehr als 150 kg wiegen.

Dieses Teilergebnis wird berechnet mit:

$$K_2 = \text{MAX}\left(-1; 1 - N_{\text{Teile}} \cdot \frac{2}{3}\right) \quad \text{Formel 33}$$

- **Regler**

Bewertet wird die Anzahl der Regler, die im System verbaut sind. Dabei werden auch Regler, die im Wärmeerzeuger verbaut sind als einzelne Regler gezählt.

$$K_3 = \text{MAX}(-1; 2 - N_{\text{Regler}}) \quad \text{Formel 34}$$

- **Anzahl Stunden zur Installation und Inbetriebnahme**

Bewertet wird die Anzahl der Stunden zur Installation und Inbetriebnahme ( $t_{\text{inst}}$ ).

$$K_4 = \text{MAX}\left(\text{MIN}\left(1; -\frac{1}{12} \cdot t_{\text{inst}} + \frac{4}{3}\right); -1\right) \quad \text{Formel 35}$$

Damit ist dieses Kriterium mit einer Installationszeit von 8 Stunden und weniger „++“, unter 14 Stunden „+“, bis 18 Stunden „0“, bis 23 Stunden „-“, und darüber „--“.

- **Wärmedämmung**

Es werden zwei Fälle unterschieden:

Umfasst die vorgefertigte Isolation auch die Hydraulik:  $K_5 = 1$

Die Hydraulik wird nicht von der vorgefertigten Wärmedämmung umfasst:  $K_5 = 0$



## Anhang C Bewertung der Fehlerresistenz und Ausfallsicherheit

Analog zur Kompaktheit werden auch zur Fehlerresistenz einzelne Kriterien mit Teilergebnissen zwischen -1 und 1 bewerten und als Mittelwert zu einem Gesamtergebnis verrechnet. Dazu werden eine Reihe von Entscheidungsfragen (Ja-/Nein-Fragen) gestellt und bewertet. Zur Bestimmung der Kennzahlen wird „Ja“ als 1 und „Nein“ als 0 definiert. Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien und die Berechnung der Einzelergebnisse dargestellt:

### • **Lieferung**

Entscheidungsfragen:

- Stückliste: Wurde eine Stückliste erstellt und ist diese komplett?
- Hydraulikschema: Ist das Schema korrekt? Stimmen die Bezeichnungen der Anschlüsse im Schema mit der Bezeichnung am Speicher überein?
- Entspricht die Lieferung der Stückliste und ist sie komplett?

Berechnung:

$$F_1 = \frac{2}{3} \cdot N_{\text{Lieferung}} \quad \text{Formel 36}$$

### • **Anzahl und Vollständigkeit der Dokumente**

Bewertet wird das Vorhandensein folgender Dokumente mit Ja (sofern diese nutzbar sind) oder Nein:

- Bebilderte Installationsanleitung
- Bedienungsanleitung
- Inbetriebnahme Protokoll (Solar und Nachheizung) Aus dem Protokoll müssen (unter anderem) folgende Punkte ablesbar sein: Parametrierung im Regler, Druckverhältnisse bei der Inbetriebnahme, Volumen der Wärmeträgerflüssigkeit.
- Wartungsanleitung (Solar und Nachheizung)

Berechnung:

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot N_{\text{Dok}} - 1 \quad \text{Formel 37}$$

### • **Eindeutige Anschlüsse**

Bewertet wird die Anzahl der Anschlüsse ( $N_{\text{Anschl.}}$ ), die falsch montiert werden können. Alle Anschlüsse mit identischem Durchmesser ohne klare Kennzeichnung durch ein Farbschema können falsch verbunden werden. Das Farbschema muss, auch ohne Handbuch etc., eindeutig sein (z.B. rot für die heisse und blau für die kalte Seite der Verbindung).

Falls keiner der Anschlüsse falsch montiert werden kann gilt:

$$F_3 = 1 \quad \text{Formel 38}$$

Falls mindestens einer der Anschlüsse falsch montiert werden kann gilt folgende Formel:

$$F_3 = \text{MAX}(-1; -0.2 \cdot N_{\text{Anschl.}}) \quad \text{Formel 39}$$



- **Eindeutige Angaben zu Sensorplatzierung und -anschluss**

Entscheidungsfragen:

- Verbindung zum Regler/Wärmeerzeuger: Ist die Verbindung eindeutig?
- Platzierung am Speicher/in der Hydraulik: Ist die Position eindeutig?
- Beschriftung: Sind die Sensoren beschriftet?

Berechnung:

$$F_4 = -1 + N_{Sensor} \cdot \frac{2}{3} \quad \text{Formel 40}$$

- **Pumpen**

Entscheidungsfrage: Ist die Stromversorgung der Pumpe über eine eindeutige Verbindung herzustellen?<sup>23</sup>

$$F_5 = N_{Pumpe} \quad \text{Formel 41}$$

- **Füllverhalten**

Entscheidungsfragen:

- Kann die vorhandene Solarkreispumpe für die Befüllung verwendet werden?
- Sind die Anschlüsse an der Solargruppe vorhanden und auf eine Befüllanlage abgestimmt?
- Ist für die Befüllung eine Entlüftung vorgesehen und richtig platziert?

Berechnung:

$$F_6 = -1 + \frac{3}{N_{Füll}} \quad \text{Formel 42}$$

- **Frostschutz**

Entscheidungsfrage: Ist das Frostschutzgemisch bereits vorgemischt?

Berechnung:

$$F_7 = N_{Frost} \quad \text{Formel 43}$$

- **Regler**

Entscheidungsfragen:

- Ist die Bezeichnung der Variablen auf dem Display im Klartext?
- Werden Fehler oder Störungen übermittelt?
- Werden Fehler automatisch erkannt?
- Werden quittierte Fehler weiterhin angezeigt (Fehlerhistorie)?

---

<sup>23</sup> Eine eindeutige Verbindung der Pumpe wird als Standard angesehen, somit können keine „Pluspunkte“ gesammelt werden.



Berechnung:

$$F_8 = -1 + \frac{N_{Regler}}{2} \quad \text{Formel 44}$$

- **Wärmemengenzähler**

Entscheidungsfragen: Sind folgende Wärmemengenzähler vorhanden:

- Raumheizung
- Warmwasser
- Kollektorkreis
- Zusatzheizung

Berechnung

$$F_9 = -1 + \frac{N_{WMZ}}{2} \quad \text{Formel 45}$$

- **Stagnationsverhalten**

Entscheidungsfragen:

- Ist die Stagnationstemperatur kleiner als 150 °C?
- Ist die Position und Hydraulik der Sicherheitsgruppe korrekt? (Kann das Überdruckventil auslösen? Stichwort Rückschläger)
- Ist das Expansionsgefäß (Volumen und Vordruck) stimmig zum Auslösedruck im Überdruckventil?

Berechnung

$$F_{10} = -1 + \frac{2}{3} N_{Stag.} \quad \text{Formel 46}$$

- **Schwerkraftzirkulation**

Entscheidungsfragen:

- Wird die Schwerkraftzirkulation im Kollektorkreis bis zu einem Differenzdruck von 0.03 bar effektiv verhindert?
- Wird die Schwerkraftzirkulation im Heizkreis bis zu einem Differenzdruck von 0.02 bar effektiv verhindert?

Berechnung:

$$F_{11} = -1 + \frac{1}{2} N_{Zir.} \quad \text{Formel 47}$$

- **Rohrinterne Gegenstromzirkulation**

Bewertet wird der Mittelwert der gemessenen Effizienz der Siphonierung:

$$F_{12} = -1 + 2 \cdot \eta_{Siphon, gewichtet} \quad \text{Formel 48}$$



## Anhang D Wärmeverluste im Jahresverlauf

In Abbildung 31 sind Resultate einer Jahressimulation mit einem Heizsystem mit Wärmepumpe und solarthermischen Kollektoren zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung dargestellt. Beide Wärmequellen beladen einen Kombispeicher, der sowohl für die Raumheizung als auch für die WW-Bereitung verwendet wird. Gezeigt wird die mittlere Speichertemperatur für die einzelnen Tage eines Jahres, zusammen mit der Wärmelieferung an das Gebäude und dem Bedarf an el. Energie für das Heizsystem.

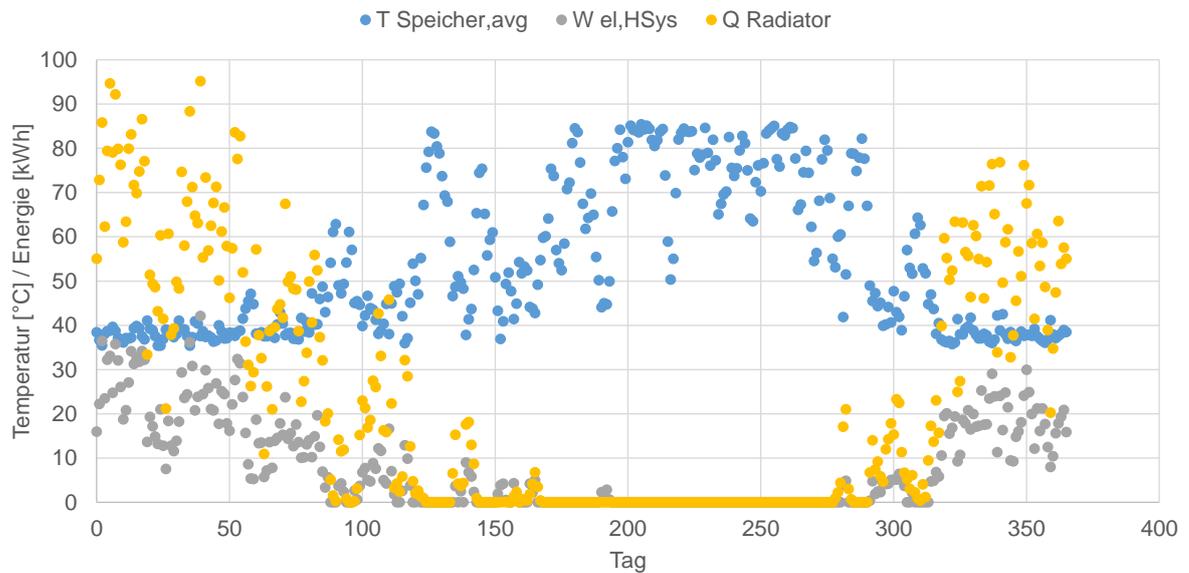


Abbildung 31: Mittlere Speichertemperatur ( $T_{\text{Speicher,avg}}$ ), elektrischer Energiebedarf eines Heizsystems ( $W_{\text{el,HSys}}$ ) und Eintrag in die Raumheizung ( $Q_{\text{Radiator}}$ ) pro Tag im Verlauf eines Jahres.



In Abbildung 32 sind die Tagesresultate der Simulation nach der Speichertemperatur sortiert. Dabei ist deutlich zu sehen, dass nahezu alle Tage während der Heizperiode eine Speichertemperatur  $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  haben.

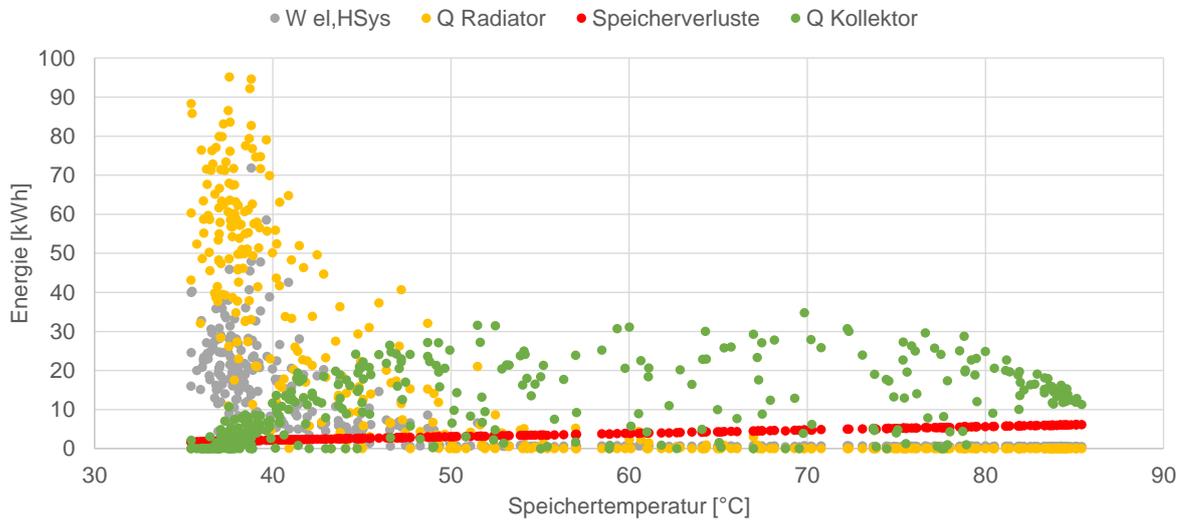


Abbildung 32: Tageswerte eines simulierten Jahres für Bedarf an el. Energie, Raumheizungslast, Speicherverluste und Kollektorertrag, sortiert nach der mittleren Speichertemperatur des entsprechenden Tages.

Abbildung 33 zeigt die Simulationsergebnisse eines Heizsystems mit Kombispeicher und Wärmepumpe ohne solarthermische Anlage. Die mittlere Speichertemperatur bleibt in diesem Fall im gesamten Jahr nahezu konstant, es ist lediglich eine minimal höhere Speichertemperatur bei höherem Heizwärmebedarf zu sehen, dabei bleibt die mittlere Temperatur aber immer deutlich unter  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

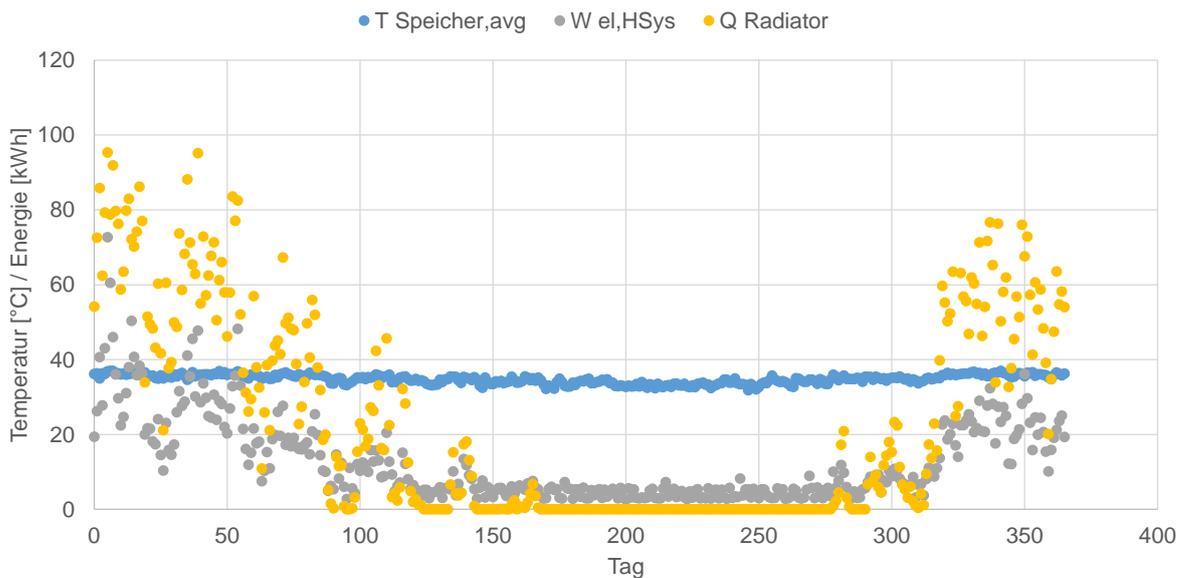


Abbildung 33: Simulation eines Heizsystems ohne solarthermische Kollektoren. Mittlere Speichertemperatur, elektrischer Energiebedarf einer Wärmepumpe und Eintrag in die Raumheizung pro Tag im Verlauf eines Jahres.



## Anhang E Emulation der Kollektorkreisleitung

Durch den Prüfstand werden die Eintrittstemperatur in den Kollektorkreis ( $T_{C,in}$ , siehe Abbildung 35) und der Durchsatz ( $\dot{m}_C$ ) gemessen und an das Simulationsprogramm übergeben. Abhängig vom gemessenen Durchsatz wird der Betriebszustand bestimmt: „Conditioning“ wenn die Kollektorkreispumpe keinen Durchsatz liefert oder „Normal Operation“ während des Betriebes. In beiden Fällen werden durch die Simulation zwei Temperaturen bestimmt und an den Prüfstand übergeben: Die Temperatur des Kollektorfeldes für eine Emulationsbox, in der der reale Temperaturfühler installiert wird ( $T_{C,EM-Box}$ ) und die Austrittstemperatur der Kollektorkreisleitung ( $T_{C,out}$ )<sup>24</sup>. Die Austrittstemperatur  $T_{C,out}$ , die im Glykolkreis tatsächlich emuliert wird, beträgt im Betriebszustand „Conditioning“  $(T_{C,out} + T_{C,EM-Box})/2$ . Diese Temperatur wird durch den Prüfstand so lange gehalten, bis der Betriebszustand auf „Normal Operation“ wechselt. Durch den Prüfling kann die Kollektorkreispumpe jederzeit gestartet werden. Der Zeitpunkt des Einschaltens ist nicht auf die Zeitschritte der Simulation abgestimmt. Nach dem Einschalten der Pumpe wird die beschriebene Temperatur für einen Zeitraum von 1 s bis 59 s gehalten. Danach erfolgt eine neue Berechnung der Temperaturen. Die Austrittstemperatur beträgt nun im Zustand „Normal Operation“ die tatsächlich simulierte Austrittstemperatur  $T_{C,out}$ .

Ein gängiger Wert für ein Kollektorfeld sind  $15 \text{ m}^2$  Kollektorfläche mit einem spezifischen Durchsatz von  $30 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$ . Für diesen Fall beträgt die Ausstosszeit 31 s. Beim Start der Kollektorkreispumpe nach einem neuen Zeitschritt wird durch die beschriebene Methode die korrekte Temperatur emuliert. Weicht eine Grösse von diesen Rahmenbedingungen ab oder startet die Pumpe kurz vor dem Start eines neuen Zeitschrittes, so ist eine Kompensation des Fehlers erforderlich. Deshalb wird der gemittelte Wert aus der realen Messung während des letzten Zeitschrittes ebenfalls an das Simulationsprogramm übergeben. Mit diesen tatsächlichen Werten wird nun die Berechnung erneut durchgeführt und eine allfällige Differenz zum vorausberechneten Wert im folgenden Zeitschritt korrigiert.

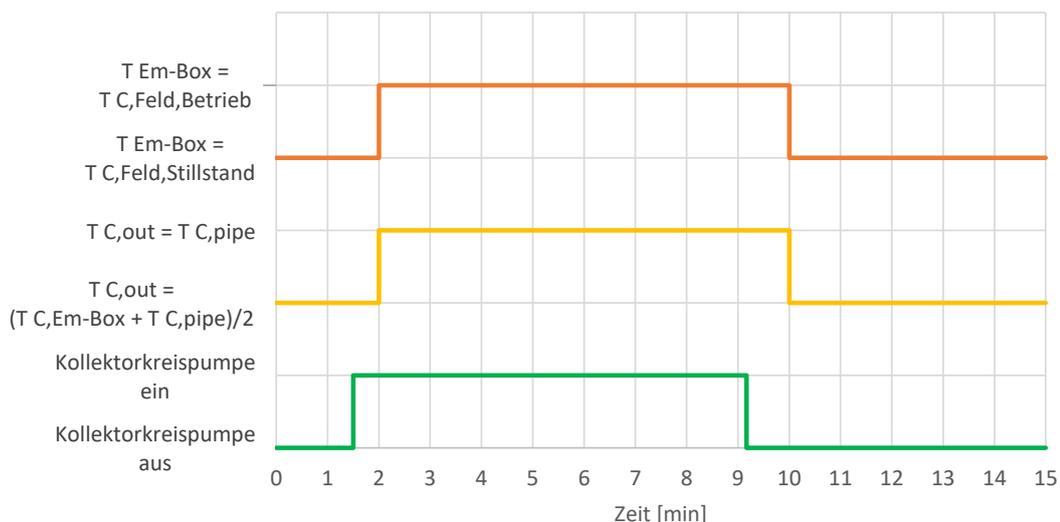


Abbildung 34: Temperaturen in Simulation und Emulation in Abhängigkeit von der Kollektorkreispumpe im Sytemtest.

<sup>24</sup> In der „alten“ Prozedur der Kollektorkreisemulation wurde nur die Kollektortemperatur an den Prüfstand übergeben. Austrittstemperatur und Kollektortemperatur waren identisch.

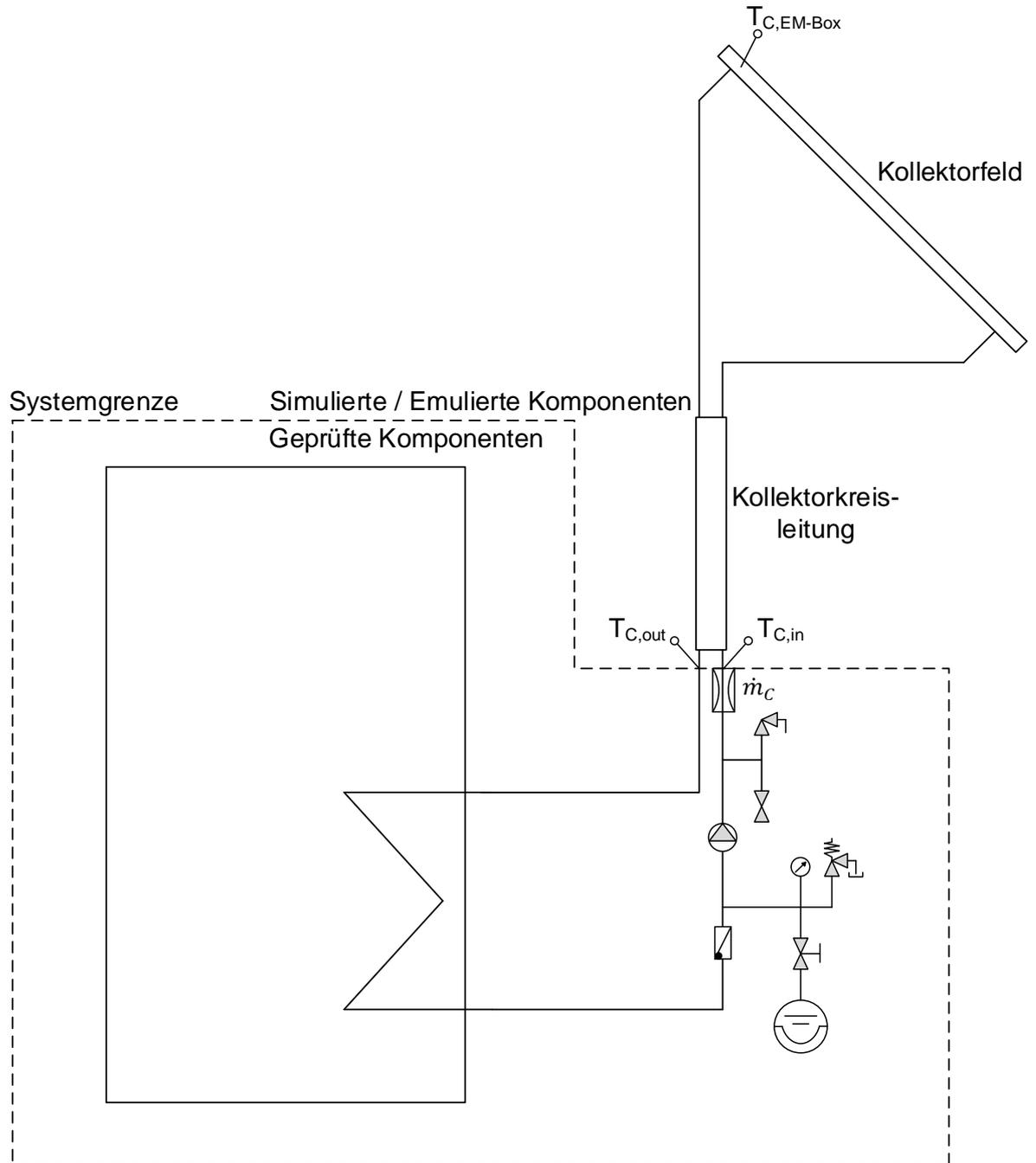


Abbildung 35: Simulation und Emulation des Kollektorfeldes inklusive der Kollektorkreisleitung.



## Anhang F Resultate der Systemtests

*Tabelle 19: Resultate des Systemtest von System 1 in kWh.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Netzbezug	17.15	4.73	0.00	0.42	0.23	20.22	42.76
Netzeinspeisung	0.11	13.34	26.87	2.71	6.14	0.19	49.36
PV-Ertrag	3.14	29.62	40.00	14.80	19.13	1.66	108.35
Therm. Energieeintrag Kollektor	0.00	33.79	59.33	18.22	12.69	0.00	124.03
El. Energiebedarf Wärmepumpe	12.54	9.53	4.50	2.46	3.92	8.26	41.21
Netzbezug Wärmepumpe	11.10	3.61	0.00	0.06	0.02	5.81	20.60
Raumwärme	52.30	28.94	4.47	0.00	0.01	35.29	121.02
Warmwasser (gesamt)	10.91	5.97	8.74	5.81	12.06	7.53	51.02
Haushaltsstrom	7.35	8.03	6.76	9.60	7.51	14.97	54.21
Batteriebeladung	0.84	7.73	6.16	7.39	7.43	0.54	30.10
Batteriebezug	0.13	3.25	2.66	6.16	5.17	2.05	19.42

*Tabelle 20: Resultate des Systemtest von System 1.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Laufzeit der Wärmepumpe [h]	22.03	13.08	9.33	3.67	3.53	15.40	67.05
Mittlere Speichertemperatur [°C]	29.79	37.36	41.23	38.45	37.20	32.58	36.10



*Tabelle 21: Resultate des Systemtest von System 2 in kWh.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Netzbezug	24.79	8.62	2.77	6.99	4.78	23.78	71.73
Netzeinspeisung	0.78	10.41	26.92	6.36	7.76	0.55	52.78
PV-Ertrag	3.24	29.24	38.76	14.53	18.73	1.79	106.29
El. Energiebedarf Wärmepumpe	18.88	17.91	6.19	4.26	6.99	8.80	63.03
Raumwärme	52.35	28.91	4.31	0.00	0.32	35.09	120.98
Warmwasser (gesamt)	10.25	6.01	8.81	6.04	12.12	7.55	50.78
Haushaltsstrom	2.92	28.40	37.63	13.91	18.18	1.54	102.57
Netzbezug Wärmepumpe	18.09	4.77	0.92	1.43	0.38	8.69	34.27

*Tabelle 22: Resultate des Systemtest von System 2.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Laufzeit der Wärmepumpe	10.87	7.53	2.75	2.57	2.17	3.95	29.83
Mittler Temperatur WW-Speicher [°C]	44.62	52.43	53.70	47.48	46.43	41.04	47.62
Mittler Temperatur Puffer [°C]	26.59	38.74	48.80	45.19	46.14	29.82	39.21



*Tabelle 23: Resultate des Systemtest von System 3 in kWh.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Netzbezug	20.44	12.18	0.75	0.13	1.21	8.37	43.09
Therm. Energieeintrag Kollektor	0.23	27.87	36.06	5.88	10.85	0.00	80.89
El. Energiebedarf Pumpen	0.76	0.79	0.63	0.11	0.73	0.66	3.69
Raumwärme	52.39	28.96	4.49	0.00	0.00	35.29	121.12
Warmwasser (gesamt)	9.78	5.84	8.69	5.72	11.89	7.29	49.20

*Tabelle 24: Resultate des Systemtest von System 3.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Laufzeit der Wärmepumpe [h]	5.98	3.25	0.00	0.00	0.00	2.12	11.35
Mittlere Speichertemperatur [°C]	32.44	43.71	60.54	67.62	63.86	43.95	52.02



*Tabelle 25: Resultate des Systemtest von System 4 in kWh.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Netzbezug	19.83	7.57	0.96	0.77	0.84	8.25	38.21
Therm. Energieeintrag Kollektor	0.00	26.35	25.62	6.64	11.39	0.00	70.00
El. Energiebedarf Kollektorkreispumpe	0.02	0.35	0.33	0.19	0.23	0.02	1.15
Raumwärme	52.38	28.94	4.47	0.00	0.11	34.92	120.82
Warmwasser (gesamt)	9.52	5.98	8.62	5.68	11.84	7.23	48.87

*Tabelle 26: Resultate des Systemtest von System 4.*

Tag	1	2	3	4	5	6	Total
Laufzeit der Wärmepumpe	11.43	4.03	0.00	0.00	0.00	5.37	20.83
Mittlere Speichertemperatur [°C]	38.62	46.85	62.45	64.94	59.64	45.57	53.01



## Anhang G Resultate der Messung der realistischen Wärmeverluste

Tabelle 27: Resultate der Messung der realen Wärmeverluste.

Testtag:		1	2	3	4
<b>Kennzahlen</b>					
Raumheizung	[kWh]	7.23	7.06	7.03	7.03
Warmwasser	[kWh]	4.09	4.09	4.09	4.09
Nachheizung	[kWh]	9.95	12.20	11.90	11.92
Speicheränderung	[kWh]	-2.42	0.08	-0.05	-0.01
Verluste	[kWh]	1.05	0.97	0.83	0.80
Mittler Speichertemperatur	[°C]	31.08	30.80	30.76	30.75
Verluste	[W/K]	3.95	3.73	3.20	3.11
<b>Unsicherheit</b>					
Raumheizung	[kWh]	0.08	0.08	0.08	0.08
Warmwasser	[kWh]	0.03	0.03	0.03	0.03
Nachheizung	[kWh]	0.07	0.08	0.08	0.08
Speicheränderung	[kWh]	0.06	0.06	0.06	0.06
Verluste	[kWh]	0.13	0.14	0.13	0.13
<b>Verluste</b>	<b>[%]</b>	<b>12.23%</b>	<b>14.14%</b>	<b>16.30%</b>	<b>16.67%</b>