



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 2012, 13. August 2012

Projekt OPTIGEN

**Optimierung der Einbindung eines 28m³
Wasser-Speichers in die Beheizung und die
WW-Versorgung eines EFH mit W/W-
Wärmepumpe und Solarkollektoren**

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Viessmann (Schweiz) AG, CH-8957 Spreitenbach
EIA-FR (Ecole d'ingénieurs et d'architectes Fribourg), CH-1705 Fribourg
STE-FR (Service de transports et d'énergie Fribourg), CH-1701 Fribourg

Auftragnehmer:

EIA-FR
Boulevard de Pérolles 80
CH-1705 Fribourg
www.eia-fr.ch

Autoren:

Peter Kurmann,	EIA-FR, peter.kurmann@hefr.ch
Thierry Mesot,	EIA-FR, thierry.mesot@hefr.ch
Thierry Ursenbacher,	EIA-FR, thierry.ursenbacher@hefr.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500503-01 / SI/500503

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Simulationen und Monitoring eines Pilotobjekts (EFH mit 272m² EBF, gebaut nach SI-A380/1:2009) mit thermischen Solarkollektoren (40m²), einer W/W Wärmepumpe (6.2kW) mit Erdwärmesonde (150m) sowie zwei thermischen Speicher mit Wasser (Speicher A: geschichtet, 1.65m³, Speicher B: ungeschichtet, 28m³) sollen die Schwachstellen der konventionellen, heute üblichen Heizungssteuerungen verdeutlichen. Allgemein wird von Gebäude-technikern, Besitzern und auch von Wissenschaftler eine grosse Effizienzsteigerung von der Kombination zwischen Solarthermie + Wärmepumpen erwartet. Verschiedene bestehende Anlagen in Mitteleuropa [1] bestätigen jedoch, dass trotz sehr guten einzelnen Komponenten, die Interaktionen zwischen den Elementen das grösste Potential zur Besserung der Energiebilanz, aber auch die grösste Gefahr zur Verschlechterung der Anlage birgt. Aufgrund tiefgreifender Analysen an einer kombinierten Solar+WP Installation werden die wichtigsten Punkte analysiert, die für eine gute Energie- und Kostenbilanz entscheidend sind.

Im Schlussbericht dieses Projekts (OPTIGEN) werden die Resultate des 2-Jährigen Forschungsprojektes zusammengefasst, welches vom *Bundesamt für Energie* und dem *Service de Transport et Energie Fribourg* unterstützt und an der *Ingenieursschule für Technik und Architektur Freiburg* ausgeführt wurde.

Nach einer kurzen Beschreibung des Untersuchungsobjektes wird aufgezeigt, wie die thermische Simulation der gesamten Anlage aufgebaut wurde, und wie letztere mit Messdaten validiert wurde. Mit dem validierten Simulationsmodell wurden mehrere Systemvariationen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Steuerungstechniken auf die Energieeffizienz und die operativen Kosten darzulegen.

Die Simulationen (sowie die reelle Anlage) zeigen klar, dass mit der Kombination Solar+WP sehr gute WP JAZ (4.6-4.8) und auch Anlagen JAZ (bis 4.6) erreicht werden können. Zudem stellte sich heraus, dass die Ladestrategie des Saisonspeichers eine Schlüsselrolle spielt beim Stromverbrauch. Wird dieser immer vollständig geladen (max. 80°C), führen hohe thermische Verluste zu einem höheren Stromverbrauch als ohne Saisonspeicher. Eine ausgeklügelte Steuerung ist also absolut notwendig, sobald mehrere thermische Speicher in einer Installation integriert sind.

Während die Einschalthysterese der Solaranlage auf die Systemeffizienz wenig Einfluss hat (1-2% weniger Kosten während Heizperiode, 6-9% ausserhalb der Heizperiode), kann mit einer Anpassung der Sperrzeiten der WP deutlich an Betriebskosten gespart werden (bessere Auslastung der Niedrigtarif-Zeiten) für den gleichen Komfort: 10-20% Einsparung bei der Stromrechnung. Insgesamt konnten durch Verbesserungen bei der Systemsteuerung, ohne jegliche „Hardware“ Anpassung, 17% an Stromkosten, und 5.5% an Primärenergie eingespart werden.

Abstract

Simulations of a pilot object (single family home with 272m² heated surface area, built in 2009 respecting the SIA80/1 norm) with solar thermal panels (40m²), a W/W heat pump (6.2kW) with a geothermal borehole (150m) as well as two thermal storages containing water (A: stratified, 1.65 m³, B: non-stratified, 28m³) will help identify the weak spots of conventional, commonly used system controls for domestic space heating and DHW production. The combination of HP with solar thermal panels is believed to guarantee a huge efficiency gain for the installation. However, several existing systems throughout Europe [1] have not met the high expectations and proven, that the interactions between good individual components provides high potential to improve, but also to worsen system performance.

In this final report, the main results of the two-year research project (OPTIGEN) at the *University of applied Sciences Fribourg*, financed by the *Swiss Federal Office of Energy* and the *Office of Transport and Energy of Fribourg* are summarized and documented.

An Introduction on the physical properties of the installation and the analysed house is followed by explanations on modelling of the entire system in Matlab-Simulink. Details on validation with monitoring results are given, various applied optimisation strategies are explained, and their influence on system balance (electricity costs and energy consumption) compared.

The simulations (and the actual house) have proven that high HP SPF (4.6-4.8) and also system SPF (up to 4.6) can be achieved with the combination Solar+HP. The loading strategy of the seasonal storage plays a key role in the system efficiency. If the seasonal storage is permanently loaded to its maximum (80°C), high thermal losses lead to unnecessary high electricity consumptions. A system with a seasonal storage must therefore absolutely also contain an advanced control regulation to be more efficient than a standard system.

A less important factor for system efficiency is the solar on-off hysteresis, with only 1-5% efficiency gain possible. The HP operating time restriction however, has a major impact on operational costs (better use of low and high electricity rates), and permits 10-20% annual economies on the electricity bill. The combination of all improvements of the control system parameters revealed an annual saving of 17% in electricity costs and 5.5% in primary energy consumption, without any hardware manipulation!

Danksagung

Die Forschungsarbeit zum Thema Energieproduktion und Verwaltung mit Solar+WP an Einfamilienhäusern wurde vor allem dank der finanziellen Unterstützung des Bundesamtes für Energie (BFE), repräsentiert durch Prof. T. Kopp, ermöglicht. Wir danken Prof. T. Kopp und dem BFE herzlich für das entgegengesetzte Vertrauen. Einen weiteren grossen finanziellen Anteil des Projekts wurde durch das Amt für Verkehr und Energie – Staat Freiburg (STE) gesponsert, und auch die Abteilung für aF&E der Ingenieurschule Freiburg hat finanzielle Mittel zur Verfügung gestellt.

Von der technischen Seite möchte ich vor allem der Forschungsgruppe der IEA-Task44, Annex 38, insbesondere R. Dott von der FHNW einen grossen Dank aussprechen. Der rege Austausch zwischen Wissenschaftler und Forscher aus der Schweiz und anderen Ländern erlaubte immer wieder Probleme bei der Analyse unter Fachleuten zu diskutieren und verschiedene Lösungsansätze auszuprobieren.

Betreffend Hardware ist dem Besitzer, und Projektleiter der Anlage „Hauteville“, Prof. T. Ursenbacher grossen Dank für die Hilfe betreffend Systemsteuerung, Aufbau und Gebäude Eigenschaften zu gebühren, sowie T. Mesot, der die gesamte Gebäudesteuerung geschrieben hat und sämtliche Temperatur, Durchfluss und sonstige Messgeräte regelmässig überprüft und wartet.

Glossar

WP / HP	Wärmepumpe / Heatpump
EWS	Erdwärmesonde
JAZ_{WP} / SPF_{HP}	Jahresarbeitszahl Wärmepumpe / Seasonal performance factor of Heatpump
JAZ_{sol}	Wirtschaftliche Effizienz der Solaranlage (Solarwärme/Strom für Solarpumpe) während einem Jahr
COP_{sol}	Wirtschaftliche Effizienz der Solaranlage (Solarwärme/Strom für Solarpumpe)
c_p	Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]
U-Wert	Wärmeübertragungs Koeffizient [W/m ² K]
BWW / DHW	Brauch-Warmwasser / Domestic hot water
W/W	Wasser / Wasser (Quelle und Senke der WP)
EFH	Einfamilienhaus
EBF	Energiebezugsfläche
Quelle	Quellenseite der Wärmepumpe (Erdwärmesonde oder Saisonspeicher)
Senke	Senkenseite der Wärmepumpe (Heizung oder Warmwasser)
Nutzspeicher	Thermischer Speicher für täglichen Bedarf (Speicher A)
Saisonspeicher	Thermischer Speicher für „solares Doping“ der Wärmepumpe und Speicherung überflüssiger Solarwärme im Sommer (Speicher B)
SH	Space Heating (Raumheizung)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract	3
Danksagung.....	4
Glossar	5
Inhaltsverzeichnis	6
1. Einleitung / Projektziele	8
1.1. Beschreibung des Pilotobjekts	8
1.2. Hydraulisches Schema.....	9
1.3. Heiz- und Brauch-Warmwasserbedarf.....	11
2. Simulation	13
2.1. Verwendung vom Carnot Toolbox vom Solarinstitut Jülich	13
2.2. „Blitz“ - Einführung Carnot Blockset.....	14
3. Vergleich Simulation/Messung	15
3.1. Validierung Solarkreislauf.....	15
3.2. Validierung Heizkreislauf.....	17
3.3. Validierung der Wärmepumpe.....	18
4. Optimierungsstrategien	21
4.1. Optimierung der Regulierung der Solaranlage bei direkter Solarwärmennutzung	21
4.1.1. Prioritätsregeln für Zirkulation in Richtung Speicher A oder B.....	22
4.1.2. Beste Schalthysterese für Solarzirkulation.....	26
4.1.3. Analytischer Nachweis für optimale Lösung	28
4.2. Optimierung der WP durch „solares Doping“ der WP-Quelle	29
4.2.1. Wärmebedarf definieren.....	30
4.2.2. Betriebskosten der Solaranlage und Wärmepumpe.....	31
4.2.3. Beste Betriebsbedingungen	32
4.3. Optimierung der Sperrzeiten der Wärmepumpe	34
4.3.1. Analytische Lösung für Kostenoptimum	37
4.4. Verwaltung vom Saisonspeicher	37
4.4.1. Strategie 1: solare Autonomie verlängern	38
4.4.2. Strategie 2: thermische Verluste reduzieren.....	39
4.5. Kritische Betrachtung	39
5. Varianten für Simulation und Vergleich.....	40
5.1. Varianten 1A, 1B, 1C:.....	41
5.2. Varianten 2A, 2B, 2C	41
5.3. Varianten 3.1A, 3.2A, 3.3A, 3.4A.....	41
5.4. Varianten 4.1A, 4.2A, 4.3A, 4.4A.....	42
5.5. Simulationsparameter	42
6. Resultate.....	44
6.1. Vergleich und Diskussion	46
6.2. Optimale Lösung mit genetischen Algorithmen.....	47
6.2.1. Aufbau einer Analyse in ModeFrontier.....	47

6.2.2.	Korrelationsmatrix	48
6.2.3.	Beste Lösungen.....	49
7.	Schlussfolgerungen.....	53
7.1.	Regeln zur optimierten Gebäudesteuerung	53
7.1.1.	Bekannte Energiespartipps für Jedermann:	53
7.1.2.	Neue Energiespartipps aufgrund der Untersuchungen	54
7.2.	Andere Untersuchungen zum Thema	55
8.	Bewertung der Arbeit und Ausblick.....	57
8.1.	Bewertung.....	57
8.2.	Ausblick	57
9.	Referenzen.....	59
10.	Anhang.....	60
10.1.	Eigenschaften der technischen Anlage	60
10.1.1.	Wärmepumpe.....	60
10.1.2.	Speicher A.....	61
10.1.3.	Speicher B.....	63
10.1.4.	Solarkollektoren, getestet nach SPF Standardtest	64
10.1.5.	Zirkulationspumpen	65

1. Einleitung / Projektziele

Die heute zur Verfügung stehenden Anlagen zur „umweltfreundlichen“ Gebäudeheizung und Warmwasser Erzeugung (Wärmepumpen, Erdsonden, Solarkollektoren etc.) sind zwar sehr beliebt und weit verbreitet, jedoch machen oft schlechte Ansteuerungen - vor allem bei komplexen Systemen - deren Vorteile zunichte, so dass die theoretisch mögliche, maximale Leistungen nicht erreicht werden. Die Folge davon ist, dass die Amortisationszeit länger wie vorgesehen ausfällt, und in der Gesamtbilanz der Anlage mehr niederneuerbare Energie verbraucht wird. Auf der Basis von Simulationen auf Matlab-Simulink [2] und Lesosai [3] werden Optimierungs-Algorithmen [4] angewendet, um die Steuerung und den Betrieb einer Pilotanlage zu verbessern. Die Hauptziele bei der Optimierung sind: Reduktion des Verbrauchs von Primärenergie und Senkung der Betriebskosten. Nebenziele des Projekts sind: Spitzenstromzeiten vermeiden, Risiko-basierte Regelung der WW-Bereitstellung, Lerneffekte von Systemregelung und Wettervorhersagen in Steuerung integrieren.

Insbesondere werden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Anlagen untersucht, um die grössten Verbesserungspotentiale zu finden, und um Konflikte bei der Steuerung zu identifizieren, welche die Energiebilanz verschlechtern. Aus den Resultaten sollen einfache Regeln zur optimierten Steuerung für kombinierte Solar Kollektoren – WP Anlagen, bzw. Integration von Saisonspeichern folgen, welche dazu dienen, an heute zur Verfügung stehenden Steuerungen den Stromverbrauch zu senken und somit die Energiebilanz der Systeme zu verbessern.

In diesem Bericht werden die Resultate verschiedener Optimierungsstrategien dargestellt, und mit der ursprünglichen Referenzanlage verglichen. Dabei wurden hauptsächlich Stromverbrauch und tarifabhängige Stromkosten berücksichtigt, aber auch die Effizienz der zwei thermischen Speicher.

1.1. Beschreibung des Pilotobjekts

Das Pilotobjekt, das in Hauteville (FR) in der Nähe des Gleyerzersees liegt, hat eine EBF von 272 m² und wird von einer 4-köpfigen Familie bewohnt.

Das Haus wurde an einer sonnigen Lage (leichte Abschattung am Morgen wegen Voralpen im Osten) gebaut und das um 30° geneigte Dach mit den Solarkollektoren ist nach Westen ausgerichtet. Das Gebäude wurde bereits in der Planungsphase von der EIA-FR mitentwickelt und finanziell unterstützt. Als Bedingung für diese Unterstützung mussten alle Systeme und Kreisläufe mit Temperatursonden, Durchflussmeter und Stromzähler ausgerüstet werden und alle Monitoring Daten vollumfänglich der EIA-FR zur Verfügung gestellt werden.

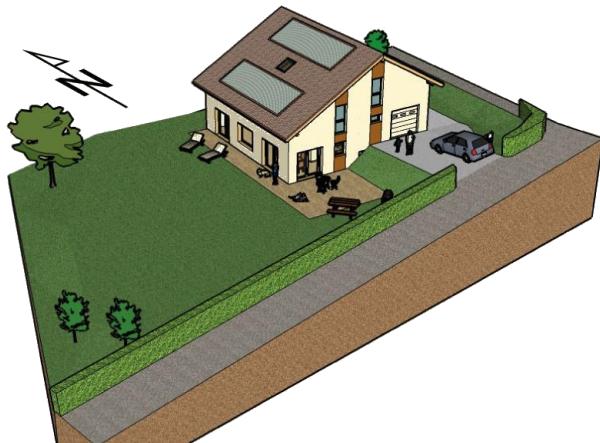


Abb. 1: Pilotobjekt mit Solar Kollektoren, Wärmepumpe und 28m³ Saisonspeicher

Die Solarkollektoren sind Flachkollektoren von Winkler Solarsysteme und wurden direkt im Dach integriert. Die Leitungen sind zwischen der Wandstruktur (Backstein-Mauer) und der Isolation verlegt, bzw. unter den Dachziegeln auf dem Dach.

Die Wärmepumpe ist eine NATURA WW106 von SATAG mit 6.2kW Leistung. Sowohl der quellenseitige wie der wärmeseitige Kreislauf sind mit Wasser (ohne Antifriermittel wegen besserem c_p) gefüllt. Die Erdsonde hat eine Tiefe von 150m und führt in Sandstein (Subalpine Molasse).

Der Nutzspeicher ist ein „Geysir“ von Zeeh Heiztechnik und hat eine Schichten-Trennscheibe sowie Schicht-Leitbleche und einen Wärmetauscher mit Schichteinspeisung für den Solar-Kreislauf, um die thermische Schichtung zu gewährleisten. Das Sanitäre WW wird mit einem reinen Durchlaufsystem zubereitet. Der „saisonale“ Speicher besteht aus einem 28m³ Edelstahltank welcher mit einer 10cm dicken Schicht EPS Schicht isoliert wurde (U-Wert: 0.37 W/m²K), jedoch keine physikalische Schichtentrennung hat.

Das Haus hat in allen Zimmern Bodenheizungen (insgesamt auf einer Fläche von 185 m²).

1.2. Hydraulisches Schema

Die komplette Verbindung der verschiedenen Installationen erlaubt viele verschiedene Kombinationen bei der Steuerung des Gesamtsystems. Unten werden tabellarisch die verschiedenen Ansteuerungsmöglichkeiten der einzelnen Anlagen dargestellt.

Anlage	Quellen	Senken
Solarkollektoren	Sonne Umgebungstemperatur	Nutzspeicher Saisonspeicher
Erdsonde	Erdreich	Wärmepumpe
Nutzspeicher	Solarkollektoren Wärmepumpe	Brauch-Warmwasser BWW Bodenheizung
Saisonspeicher	Solarkollektoren	Wärmepumpe Bodenheizung BWW Nutzspeicher
Wärmepumpe	Erdsonde Saisonspeicher	Nutzspeicher Bodenheizung

Tab. 1: Anlagen mit Quellen und Senken

Die Steuerung wurde vorerst mit „standard“ Einstellungen geregelt. Das heisst, dass die Solaranlage bei einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Speicher die Zirkulationspumpe ein- und ausschaltet. Mit dem gleichen Prinzip wird auch die Wärmepumpe

pe ein- und ausgeschaltet um die erforderlichen Temperaturen für WW-Versorgung wie auch Bodenheizung zu gewährleisten (Temperatur-Differenz Regler).

Die Bodenheizung ist mit einer witterungsabhängigen Temperaturregelung gesteuert. Diese läuft unabhängig von den anderen Kreislaufen.

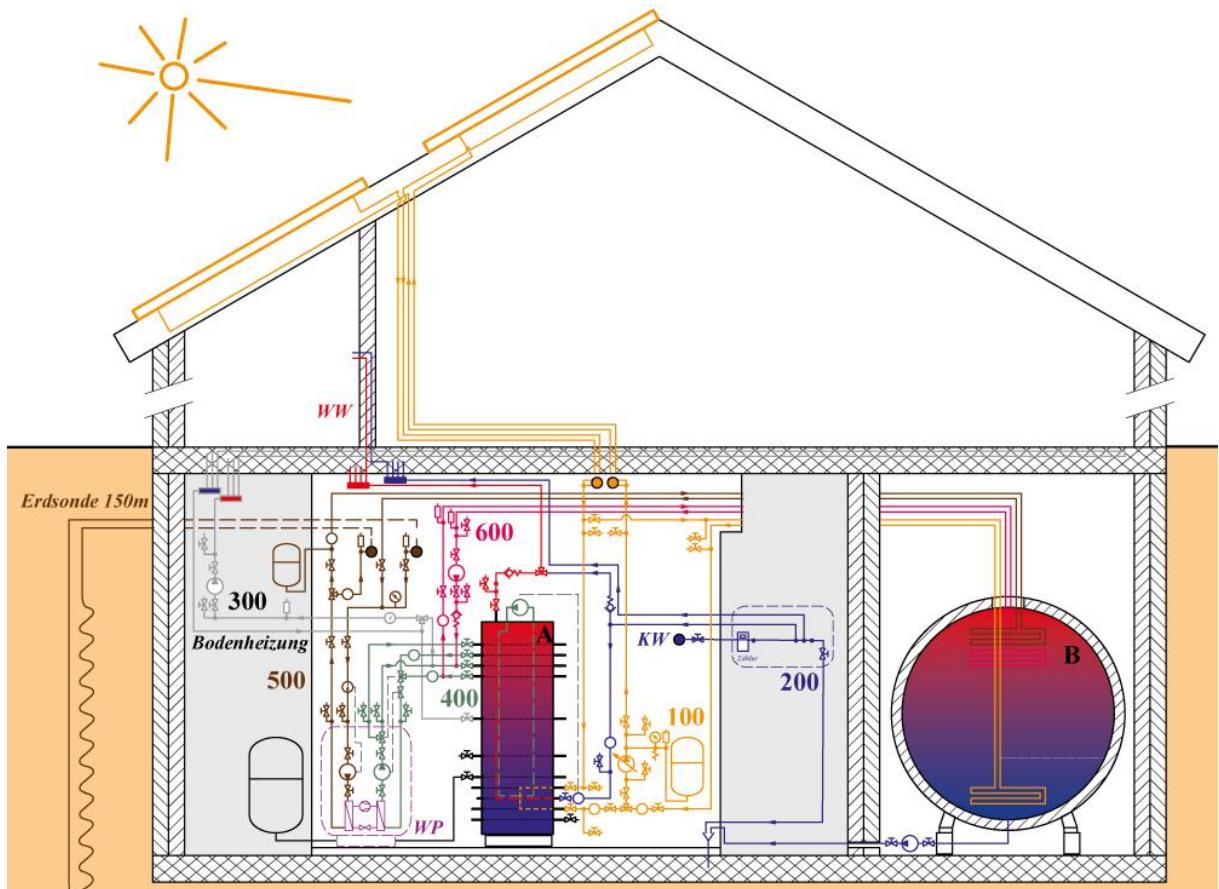


Abb. 2: Hydraulisches Schema von der technischen Anlage des Pilotobjekts. Gelb: Solarkreislauf; Blau: Kaltwasser; Pink: Saisonspeicher „B“ zu Nutzspeicher „A“; Braun: Vom Saisonspeicher zur Wärmepumpe; Grün: Von der Wärmepumpe zum Nutzspeicher (zwei Schichthöhen); Grau: Bodenheizung; Rot: sanitäres Warmwasser

Alle Anlagen, sowie Verbindungsrohre und Zirkulationspumpen sind durch Temperatursonden, Durchflussmesser, Stromzähler etc. angeschlossen und ermöglichen somit eine vollständige Überwachung der Vorgänge.

Die verschiedenen 100er Zahlen (siehe Abb. 2) entsprechen jeweils einem Kreislauf.

- Gelb (100): Solar Kreislauf
- Blau (200): Kaltwasser
- Grau (300): Bodenheizung
- Grün (400): Wärmepumpen Senke Kreislauf
- Braun (500): Wärmepumpe Quellenseitig (Erdsonde oder Saisonspeicher)
- Violett (600): Verbindung zwischen Saisonspeicher (B) mit Nutzspeicher (A)

1.3. Heiz- und Brauch-Warmwasserbedarf

Mit dem Heizwärmebedarfs-Nachweis nach SIA380/1:2009 wurde eine jährliche Wärme menge von 11'700 kWh ermittelt. Für den BWW-Bedarf zudem einen Bedarf von 3'800 kWh (siehe Abb. 3).

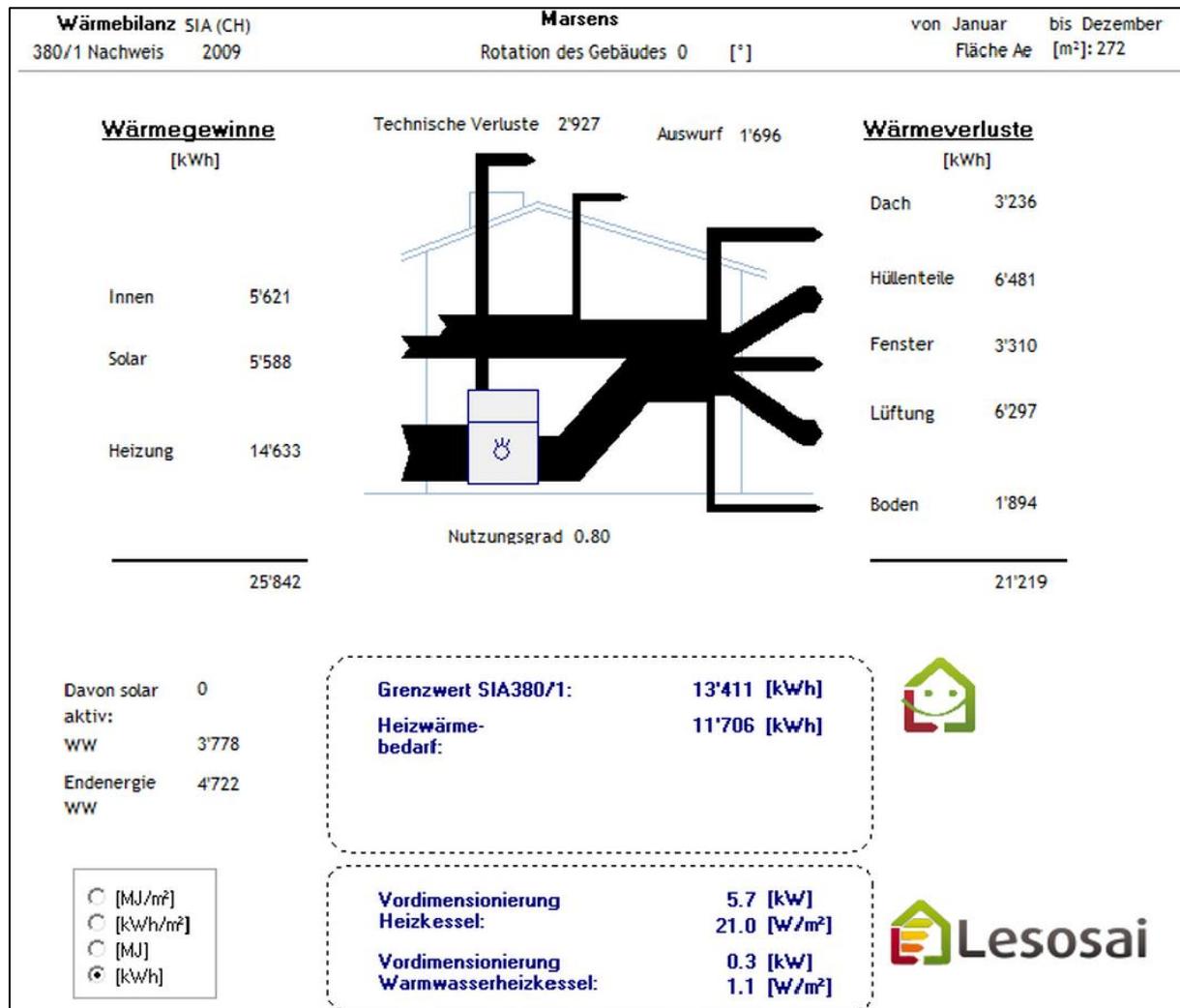


Abb. 3: Wärmebilanz nach SIA 380/1:2009

Geht man von einem durchschnittlichen täglichen Warmwasserverbrauch von 35l/Person bei 55°C in einem 4-Personen Haushalt aus, kommt man auf 140l zu 55°C. Beim untersuchten Nutzspeicher handelt es sich um einen Hygienespeicher (Frischwasser wird durch einen Wärmetauscher direkt erhitzt beim Verbrauch), wir können daher gut von einer Temperatur von 45-50°C am Heisswasserhahn, bzw. Dusche ausgehen, was mit dem entsprechenden Mischverhältnis einem täglichen Volumen von 155-170l entspricht, ohne hygienische Probleme durch Legionellenbildung zu vernachlässigen.

Mit der Wärmekapazität von Wasser ($c_p = 4200 \text{ J/kgK}$) und einer angenommenen Dichte von 1 kg pro Liter gerechnet, brauchen wir als Energiemenge um das Frischwasser von 10°C auf 45°C aufzuheizen:

$$E_{WW-Verbrauch} = mc_p \Delta T = 170 \cdot 4200 \cdot (45 - 10) = 25 \text{ MJ} = 7 \text{ kWh}^*$$

*für 55°C und 170l würden 9kWh gebraucht

Damit sich die Benutzer nicht verbrennen, wird das Heisswasser in einem Mischventil auf 45°C begrenzt. Bei einer durchschnittlichen täglichen Laufzeit des Heisswassers von ~33min ($\Delta t = 2000s$) können wir für die 7 kWh (E_{WW}) den Durchfluss (\dot{M}) des Heisswassers berechnen:

$$\dot{M} = \frac{E_{WW}}{c_p \Delta T \Delta t} = \frac{25e6}{4200 \cdot (45 - 10) \cdot 2000} = 0.085 \text{ kg/s}$$

Da sich die Temperatur im Speicher stets ändert, entsteht ein variabler Durchfluss in Funktion der Temperatur. Dabei wird angenommen, dass die Zuleitung stets bei 10°C ist.

$$\dot{M}(T) = \frac{25e6}{4200 \cdot (T - 10) \cdot 2000} = \frac{2.976}{T - 10} \text{ kg/s}$$

Diese Formel für einen variablen, temperaturabhängigen Durchfluss wurde in die Simulation integriert, um eine realitäts-nahe Berechnung zu ermöglichen. Die Wärmekapazität und Dichte wurden dabei als konstant angenommen, obwohl diese sich zwischen 45-55°C leicht ändern. Wie man auf der Abb. 4 sieht, nimmt der Durchfluss des Warmwassers im Hygiene-speicher mit abnehmender Speicher-Temperatur zu.

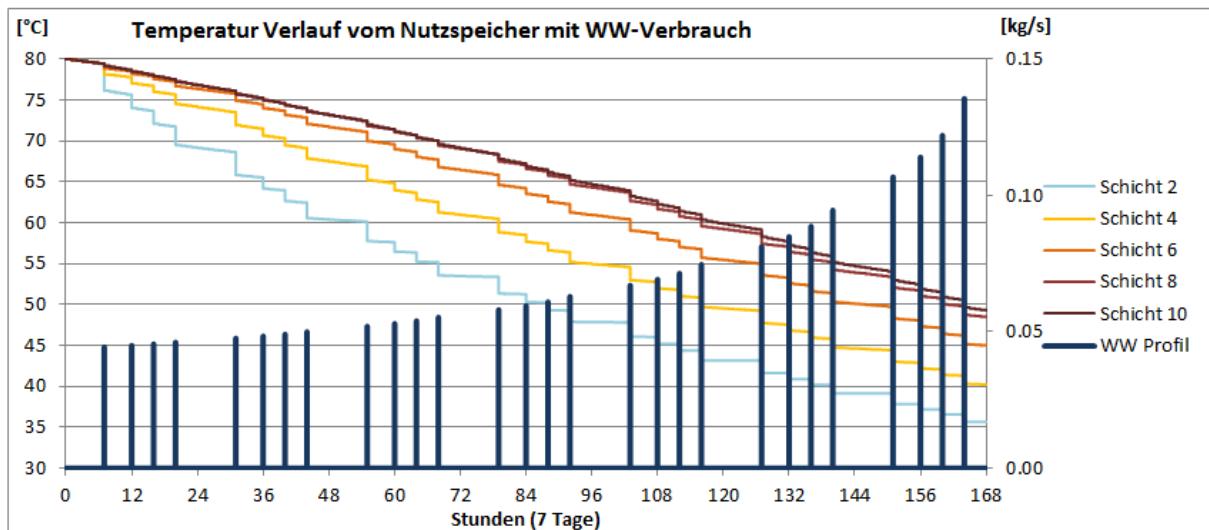


Abb. 4: Temperaturverlauf des Nutzspeichers und Veränderung des Durchflusses für WW-Versorgung

2. Simulation

Die gesamte Anlage wurde sowohl mit Polysun [5], wie auch mit dem Carnot Toolbox in Matlab-Simulink [2] simuliert. Die Ergebnisse wurden mit analytischen Untersuchungen einzelner Bauteile (manuelle Berechnungen der einzelnen Wärmeflüsse) sowie mit anderen Auswertungsmethoden (Lesosai [3], Berechnung nach SIA-Norm [6], Bsol [7]) verglichen und wenn nötig korrigiert, siehe Abb. 5.

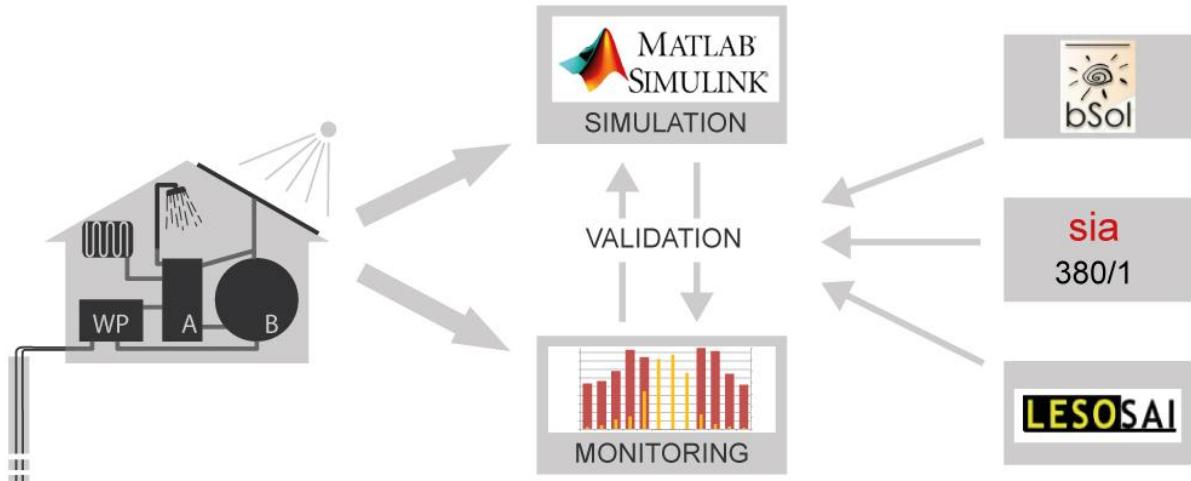


Abb. 5: Die wichtigen Wärmeflüsse und Temperaturen werden im 2-Minuten Takt registriert. Die Simulation wurde hauptsächlich mit gemessenen Daten aus dem Monitoring, aber auch mit anderen Programmen sowie den SIA Normen validiert.

Durch den Vergleich der Simulation mit theoretischen Berechnungen und reellen Messdaten konnten alle Komponenten der Simulation bis zu einer zufriedenstellenden Übereinstimmung angepasst werden, um ein vollständig validiertes Abbild der reellen Anlage zu erhalten.

2.1. Verwendung vom Carnot Toolbox vom Solarinstitut Jülich

Die gesamte Gebäudetechnik wurde mit dem Carnot Blockset [2] in Matlab-Simulink nachgebaut. Die Arbeit mit Matlab-Simulink war aus zwei Gründen unerlässlich. Erstens erlaubt Matlab-Simulink eine vollständige Kontrolle aller Parameter und Berechnungen, sowie die Möglichkeit, komplexe Regelungstechnik in die Simulation zu integrieren und sämtliche gewünschte Resultate herauszulesen. Zweitens kann Matlab-Simulink problemlos mit Software verbunden werden, welche Versuchspläne mit genetischen Algorithmen durchführen lässt [4]. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die hydraulische Verschaltung und Benutzer Schnittstelle mit Matlab-Simulink gegeben. Wie in Abb. 6 zu sehen ist, kann in Simulink mithilfe von vorbereiteten „Blocks“ eine Heizungsanlage zusammengesetzt und simuliert werden. Für die Steuerung sind bereits Module vorhanden, welche jeweils entsprechend der Anlage angepasst werden können. Für das Wetter kann Meteodata z.B. aus Meteonorm [8] importiert werden, aber auch eigene Messungen verwendet werden. Nachfolgend werden in einer kurzen Einführung einige Funktionen vom Carnot Blockset gezeigt, welche zum Teil aus dem Benutzer Handbuch stammen.

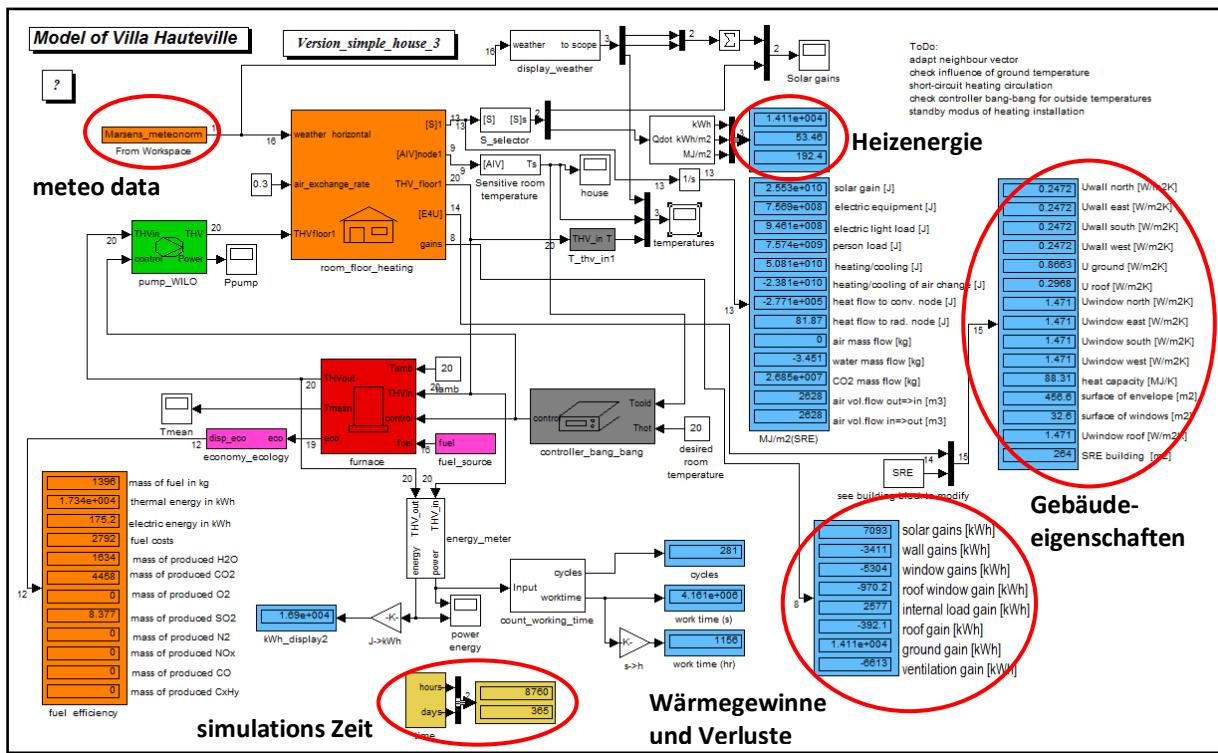


Abb. 6: Gebäudesimulation mit dem Carnot blockset in Matlab-Simulink [2]

2.2. „Blitz“ - Einführung Carnot Blockset

Wenn man in Matlab „Carnot“ ins „Command Window“ eintippt, erscheint die „Carnot“ Bibliothek (siehe Abb. 7) welche alle nötigen Module für die Gebäudesimulation enthält.

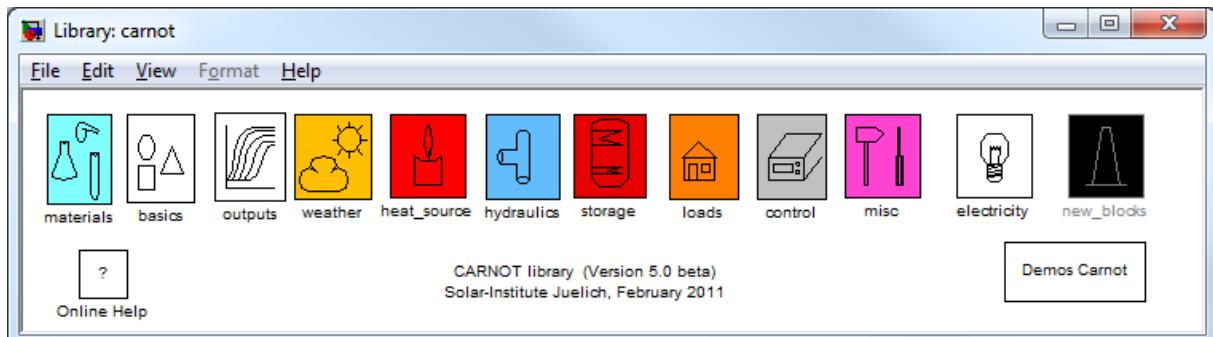


Abb. 7: Carnot Bibliothek mit allen Modulen für die Gebäudesimulation

Die Module können über verschiedene Leitungen (Pfeile) miteinander verbunden werden. Leitungen, welche Module wie Speicher, Kollektor oder Pumpe miteinander verbinden, übertragen einen Vektor (Abb. 8), der alle notwendigen Zustandsgrößen des Mediums (Art des Mediums, Temperatur, Druck, usw.) enthält. Dieser Vektor heißt Thermo-Hydraulic-Vektor, kurz THV. Andere Leitungen übertragen nur einen einzigen Wert, z.B. gibt der Controller nur eine 1 oder 0 aus, um die Pumpen ein- bzw. auszuschalten. Eine Leitung lässt sich durch Ziehen mit der linken Maustaste einfügen.

Die einzelnen Module können meistens durch Doppelklicken weiter verändert werden. Beim Modul Wärmepumpe kann z.B. die Leistungskurve vom Hersteller, sowie Verlustkoeffiziente oder thermische Kapazitäten der Quellen und Senken Kreisläufe eingegeben werden.

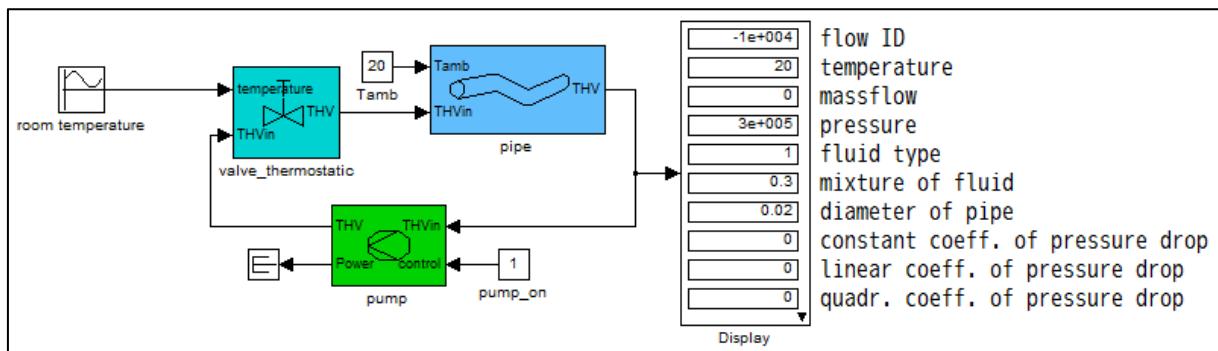


Abb. 8: THV-Leitung werden für das Verbinden der Module verwendet

Für weitere gehende Informationen kann das Handbuch vom Carnot Blockset im Internet oder in den Projektdateien von diesem Bericht gefunden werden (In Internet-Suchmaschine die Stichworte: „Anleitung Carnot Blockset“ oder „Matlab Simulink Carnot“ eingeben). Der Blockset mit Kurzanleitung kann über das Solar-Institut Jülich bezogen werden [2].

3. Vergleich Simulation/Messung

Dank der installierten Messtechnik werden alle wichtigen thermodynamischen Informationen der Anlage im 2-minuten Takt aufgezeichnet. Der Elektrizitätsverbrauch wird nur im Stunden-Takt aufgezeichnet, aufgrund der Genauigkeit der Messinstrumente.

Um die Simulationen zu validieren, wurde nicht versucht eine exakte Übereinstimmung der Temperaturkurven zu erreichen, sondern eine Konvergenz beim Langzeitverhalten der Schaltungen und Energieflüsse.

Für den Vergleich zwischen Simulationsmodell und Messwerten wurden die thermodynamischen Eigenschaften des Solarkreislaufs, der Heizung und der Wärmepumpe verglichen. Der Warmwasserverbrauch für den Haushalt wurde indirekt über das Verhalten des Wärmespeichers A validiert. Nachfolgend sind die Auswertungen der Vergleichswoche KW05/2011 aufgeführt.

3.1. Validierung Solarkreislauf

Für die Validierung des Solarkreislaufs wurden die Messdaten mehrerer Wochen ausgewertet und zusammengestellt. Die gemessene Globalstrahlung sowie die Aussentemperatur der Messwerte wurden extrahiert und in der Simulation verwendet.

Für den Vergleich wurden nur die Ein- und Ausgangstemperaturen der Solarkollektoren bei konstantem Massenstrom verglichen, die übrigen thermodynamischen Eigenschaften können daraus abgeleitet werden.

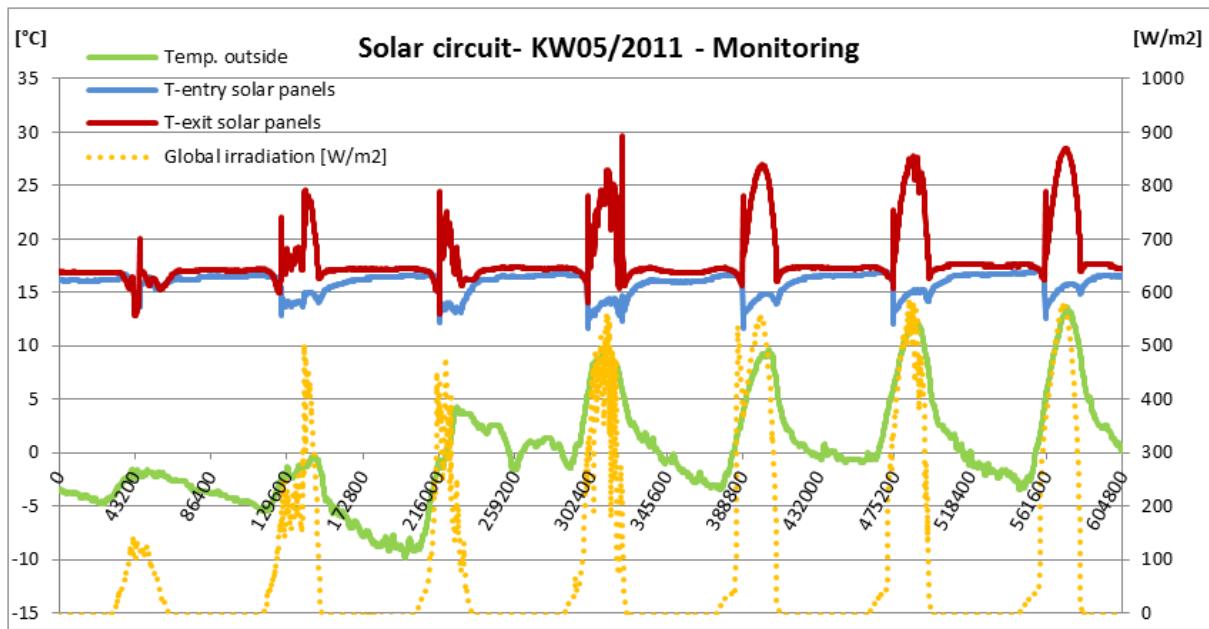


Abb. 9: Gemessene Werte aus KW5/2011

Die Überlagerung der Messung mit der Simulation (siehe Abb. 10) zeigt zwar eine Abweichung der absoluten Temperatur von 0.5-1.5°C, dafür jedoch eine sehr gute Übereinstimmung beim Verhalten der Schaltungen und Temperaturen. Weil mit der Simulation eine Systemoptimierung angestrebt wird, und keine Produktentwicklung, ist ohnehin nur das Langzeitverhalten von Bedeutung, und die Temperaturabweichung kann toleriert werden. Außerdem haben die eingesetzten Temperatursonden eine Genauigkeit von $\pm 0.3^\circ\text{C}$, eine bessere Übereinstimmung zwischen Messwerten und Simulation wäre darum für diesen Fall überflüssig.

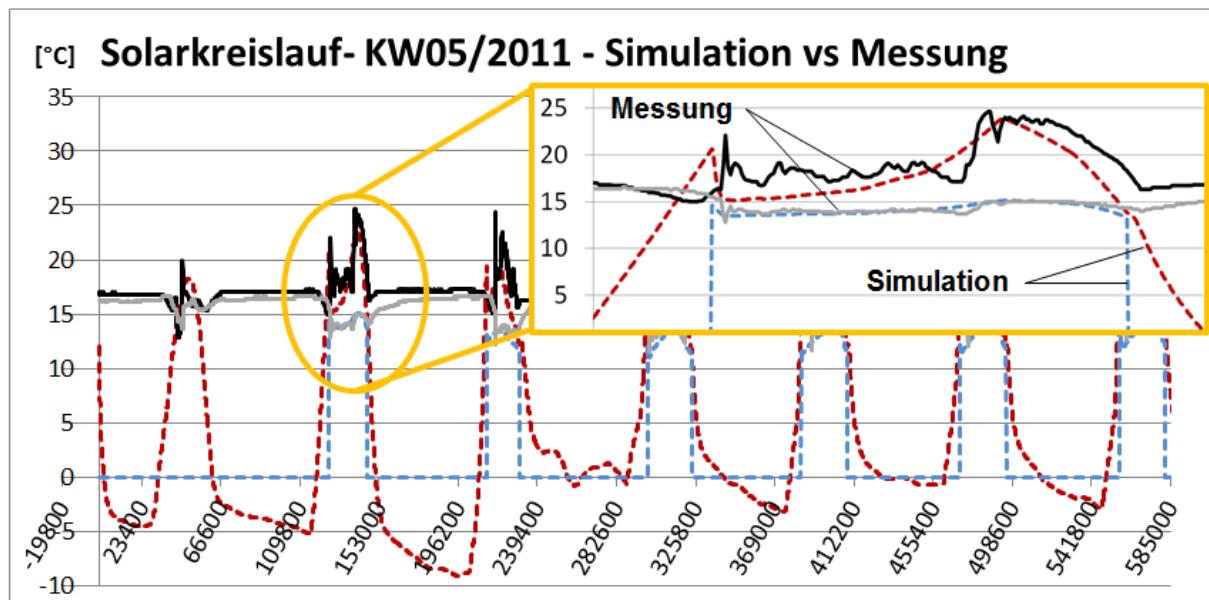


Abb. 10: Vergleich Simulation mit Messung während einer Woche im Februar (KW05/2011)

Bei der Validierung des Solarkreislaufs wurden einige Abweichungen gefunden die folgendermassen behoben wurden:

- Einschaltzeitpunkt der Kreislaufpumpe: In der Simulation wurden die auf dem Dach gemessenen Irradiationswerte nochmals mit der Orientierung korrigiert, bzw. verklei-

nert. Da die Messung bereits in der Orientierung der Solarkollektoren stattfand, war diese zweite Korrektur überflüssig und hat den Einschaltzeitpunkt verfälscht.

- Durchfluss: Größere Energiemengen in der Simulation deuteten auf höheren Durchfluss, oder falsche Annahmen für die Irradiation hin. Tatsächlich war die Durchflussmenge in der Simulation falsch eingestellt. Sie wurde entsprechend den reellen Werten angepasst.

3.2. Validierung Heizkreislauf

Für den Vergleich der Heizkreisläufe wurden wiederum sowohl beim reellen Objekt, wie auch bei der Simulation, die Eingangs- und Ausgangstemperaturen des Heizungskreislaufs grafisch dargestellt. Aus verschiedenen Gründen konnte das Verhalten des Heizungskreislaufs nicht genau nachgebildet werden, die Simulation ist ein Kompromiss zwischen den korrekten Wärmemengen, die vom thermischen Speicher in die Bodenheizung fliesst, und ein korrektes Verhalten der Steuerung, welche die Temperaturschwankungen im Haus begrenzt, um die gewünschte Wärme zu garantieren. In Abb. 11 sieht man, dass die durchschnittlichen Temperaturniveaus zwar ähnlich sind, die Simulation jedoch impulsartig verläuft, während die gemessenen Werte ein ausgeglichenes Verhalten zeigen. In Wirklichkeit wird der Heizkreislauf nur dann mit Wärme aus dem Speicher versorgt, wenn seine Temperatur nicht mehr der Heizkurve entspricht. Da bei der Simulation nur das Versorgen des Heizkreislaufes mit Wärme nachgebildet wurde, sieht man offensichtlich auch nur das dazugehörige impulsartige Verhalten.

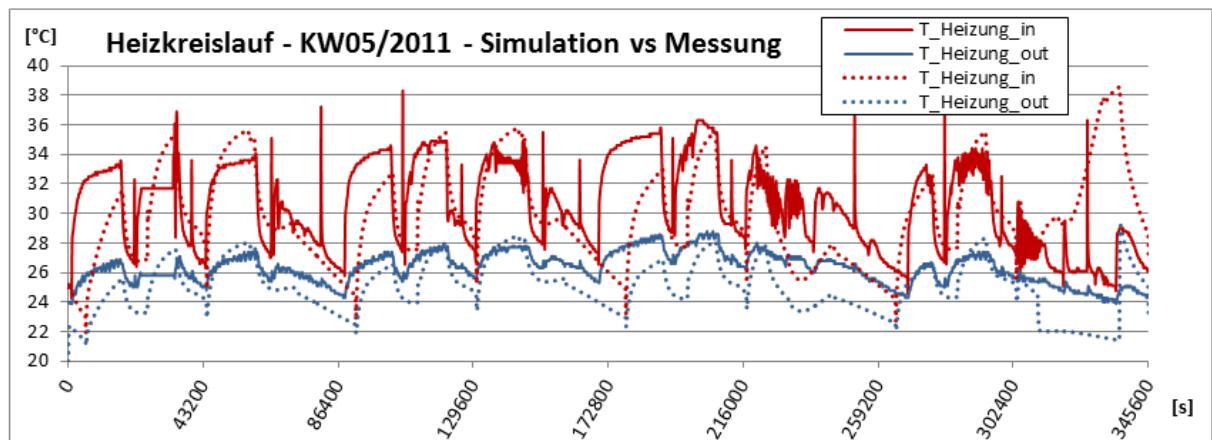


Abb. 11: Vergleich zwischen gemessenen Temperaturen im Heizkreislauf (volle Linien) und den simulierten Temperaturen in Matlab-Simulink (punkt-Linien)

Während die wirkliche Schaltung also die Temperaturen von Vor- und Rücklauf des Heizkreislaufes anzeigt, ist in der Simulation nur jeweils die impulsartige Einspeisung des Heizkreislaufes aus dem Speicher zu sehen.

Für die Steuerung der Zimmertemperaturen wurde eine kleine Verbesserung in die Simulation eingebaut. Diese Verbesserung garantiert eine bessere Deckung des Heizbedarfes, vor allem bei sehr langen Kaltperioden: Bei der reellen Anlage wird die Heizungs-Steuerung in Funktion der Außentemperatur, die Einspeisung von heissem Wasser aus dem thermischen

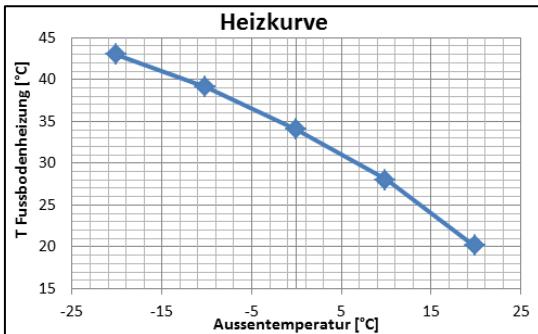


Abb. 12: Heizkurve für Fußbodenheizung

Speicher regulieren. Bei der Simulation ist man einen Schritt weiter gegangen, und zwar wird in Funktion der Aussentemperatur, bereits die WP geregelt, und nicht nur der Heizkreislauf. Zwar wird die WP damit bei tieferen Temperaturen schlechtere COP aufweisen, aber die Heizung reagiert schneller auf Veränderungen der Aussentemperatur und verspricht einen grösseren thermischen Komfort im Haus.

Dank dem Vergleich zwischen Simulation und Messung konnten die folgenden Parameter, bzw. Steuerungen angepasst bzw. korrigiert werden:

- Heizleistung in Simulation war zu gross: die Durchflussmenge im Heizkreislauf war falsch eingestellt und musste korrigiert werden.
- Raumtemperatur in Simulation schwankt $\pm 1^\circ$: Dieses Verhalten entspricht nicht der Realität, und würde zu einem unangenehmen Hausklima führen. Die Regelung wurde auf ± 0.2 angepasst.
- Die Heizung kühlte zu schnell ab: Die Wassermenge in der Bodenheizung wurde falsch geschätzt, und führte zu einer zu raschen Abkühlung. Eine grössere Wassermenge führt nun zu einer höheren thermischen Trägheit, und folglich einer langsameren Abkühlung.
- Bei längeren Kaltperioden reichte die Heizleistung bei der Simulation nicht aus. Die Heizkurve wurde daher angepasst um höhere Vorlauf Temperaturen zur Verfügung zu haben, indem anstatt eine lineare Kurve eine quadratische genommen wurde (siehe auch Abb. 12)

3.3. Validierung der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wurde für die Simulation mit den Herstellerangaben parametrisiert. Die Vorlauftemperatur und Stromverbrauch sind also nicht berechnete Werte, sondern Funktionen der Quellen- und Senkentemperatur. Um eine Wertematrix zu konstruieren, wurden die Leistungskurven linearisiert, und im entsprechenden Block in Simulink eingegeben (siehe Abb. 15).

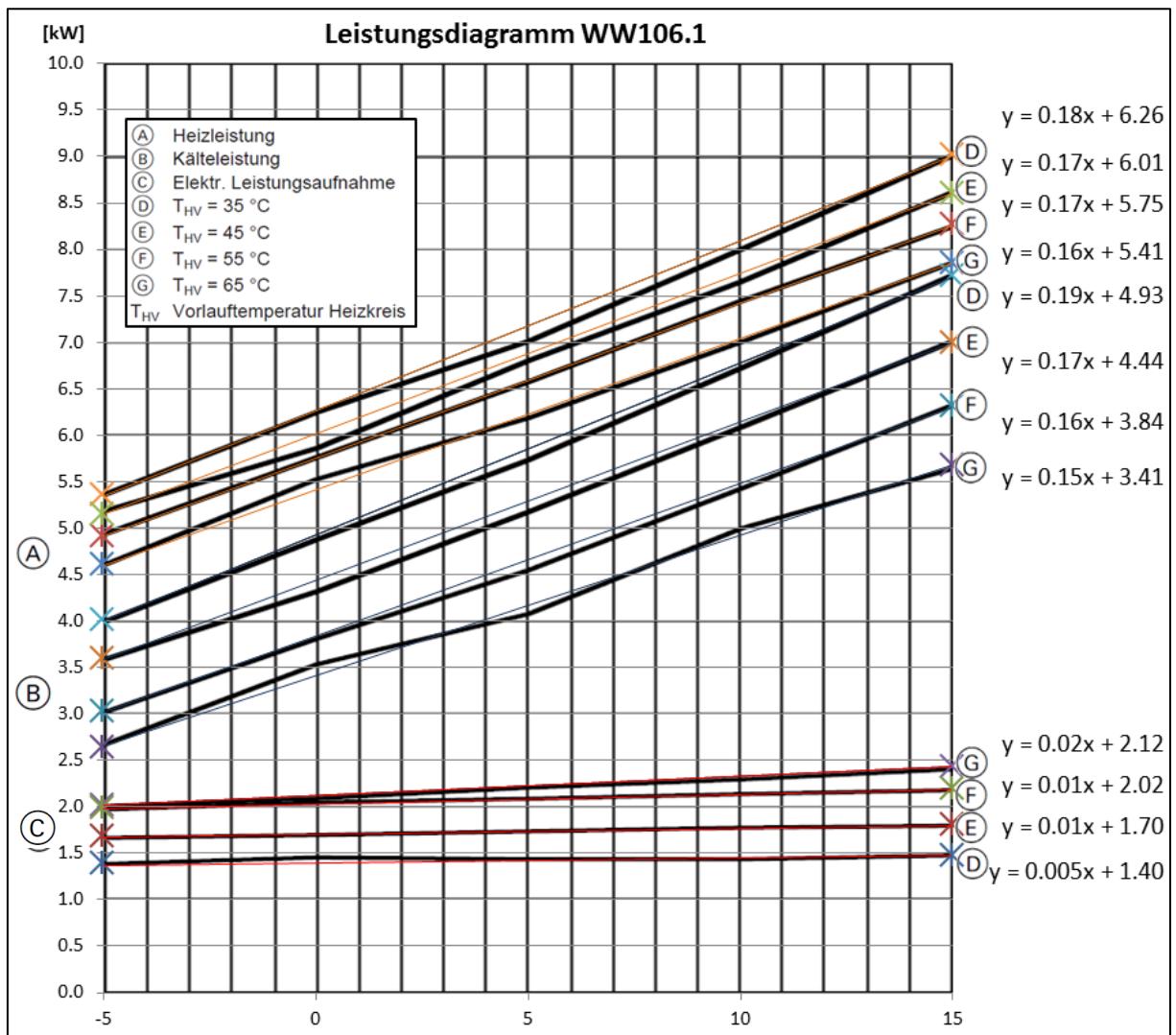


Abb. 13: Leistungsdiagramm der verwendeten BW106.1 Satag Wärmepumpe, mit Heizleistung, Quellenleistung und elektrischer Leistungsaufnahme für 4 verschiedene Vorlauftemperaturen. Rechts sind die Gleichungen der linearisierten Kurven welche für die Simulation eingesetzt wurden.

Wie man in Abb. 13 und Abb. 15 sieht, gehen die Herstellerwerte nur bis 15°C Quellentemperatur. Da bei der Anlage jedoch bis zu 25°C gefahren wird, müssen diese Werte geschätzt, bzw. durch Linearisierung berechnet werden, was ein gewisser Fehler bedeutet, aber notwendig für die Berechnungen ist.

Beim Vergleich der Simulation mit den gemessenen Werten (siehe Abb. 14), sieht man, dass die Einschaltzeitpunkte, sowie das Erwärmen sehr gut übereinstimmen. Die gemessenen Daten zeigen jedoch oft mehr Heizzyklen beim Hochtemperatur Anschluss der WP als die Simulation. Dieses Verhalten stammt von einem unregelmässigen Warmwasser Bezug, welches zwar beim reellen täglichen Verbrauch üblich ist, aber bei der Simulation nicht nachgebildet wurde (täglich konstantes Profil, auch am Wochenende). Auch beim Niedrigtemperaturausgang sieht man eine gute Übereinstimmung der Ein- und Ausschaltzeiten. Die Temperaturen bei der Simulation sind hier jedoch meistens höher, was zu weniger Einschaltzyklen führt. Im Allgemeinen entspricht das Verhalten der Simulation aber sehr gut den reellen Werten und ermöglicht ein zufriedenstellendes Modell für die Simulation von optimierten Steuerungsvarianten der Anlage.

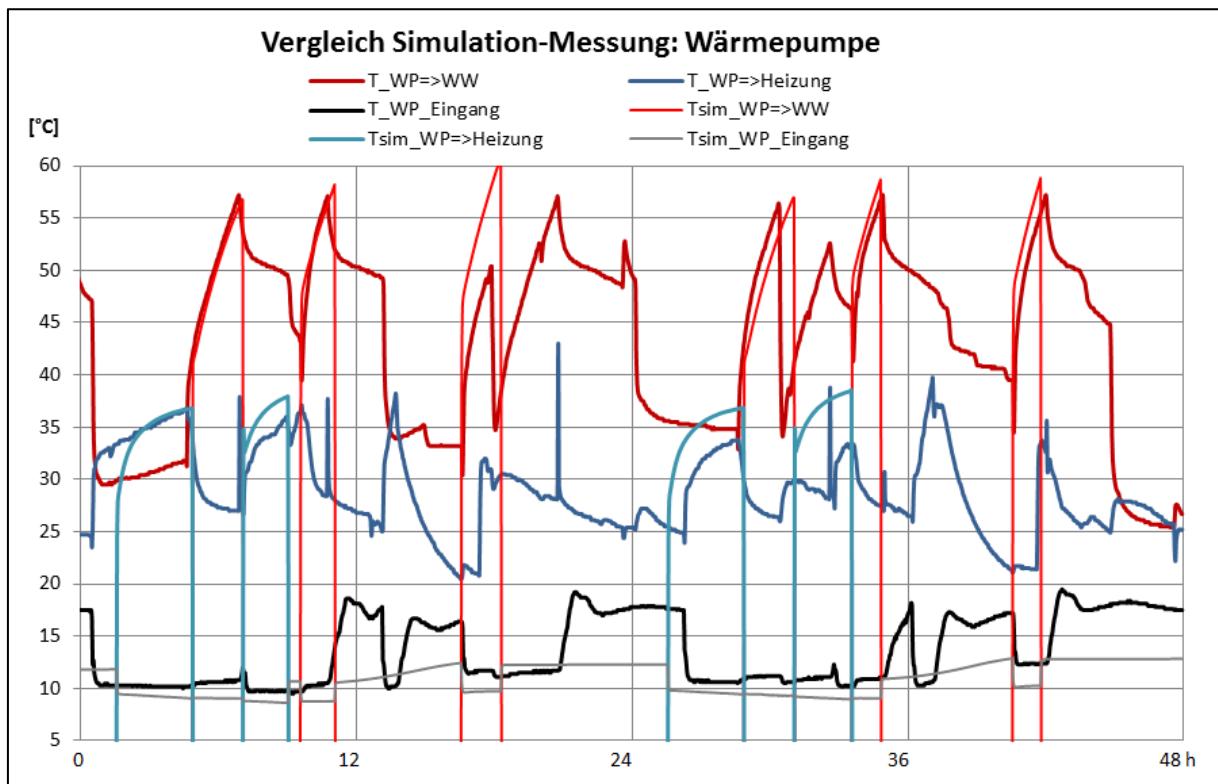


Abb. 14: Validation des Verhaltens der WP mit Quellentemperatur, sowie Hoch- (WW) und Niedrigtemperaturausgänge (Heizung)

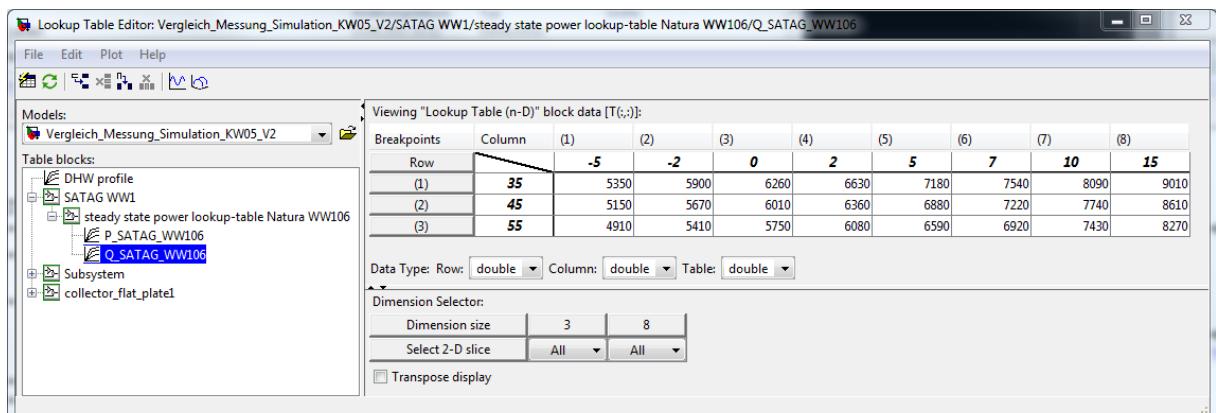


Abb. 15: Eingabe der Leistungskurven der WP in Simulink

4. Optimierungsstrategien

Aufgrund der vorangehenden Analysen und Untersuchungen wurden mehrere mögliche Strategien zur Reduktion vom Stromverbrauch und Energiebedarf erarbeitet. Bei der Solaranlage stellt sich immer die Frage, welche Schalthysterese sich am besten auf die Wärmeerträge auswirkt, und welcher Speicher beladen werden soll. Dann stellt sich wiederum die Frage, ob es sich im Winter überhaupt lohnt, den Saisonspeicher aufzuladen, um die Quellentemperatur der WP zu erhöhen, oder ob zu viel Strom in der Solarpumpe verbraucht wird. Im Sommer wird bei den meisten Solarthermischen Kollektoren zu viel Wärme produziert. Lohnt es sich, diese Wärme im Saisonspeicher zu halten, oder sind die thermischen Verluste zu hoch? Bei der WP selber sind auch verschiedene Parameter zu beachten. Z.B. der Einfluss der Schalthysterese: kleine Temperaturunterschiede bedeuten dass die WP viele Zyklen macht von kurzer Dauer, während grössere Temperaturunterschiede weniger Zyklen von längerer Dauer verursachen. Dazu kommen die Strombezugs Sperrzeiten der Elektrizitätswerke und die benutzereingestellten Sperrzeiten, welche im Zusammenspiel mit den Hoch- und Niederstromtarifen einen grossen Einfluss auf die Betriebskosten haben können.

Um die verschiedenen Strategien besser zu analysieren, bzw. deren Auswirkungen zu sehen, wurden die folgenden Optimierungen individuell betrachtet:

Strategie	Optimierungsziele
1. Beste Hysterese für Solaranlage	Wirkungsgrad der Solaranlage erhöhen Stromkosten senken
2. Optimale Sperrzeiten für WP	Stromkosten senken
3. Verwaltung vom Saisonspeicher	Weniger thermische Verluste Höhere Effizienz Einfluss auf WP JAZ
4. Solarwärme in Nutzspeicher A oder Saisonspeicher B?	Effizienz der thermischen Speicher erhöhen

Um die vier obenstehenden Strategien zu simulieren, wurden verschiedene Voruntersuchungen durchgeführt. Für die Einschalthysterese der Solaranlage und die Suche der optimalen Sperrzeiten für die Wärmepumpe wurden heuristische Optimierungsalgorithmen eingesetzt. Siehe „4.1 Optimierung der Regulierung der Solaranlage“ und „4.3 Optimierung der Sperrzeiten der Wärmepumpe“ für die Problemstellung und detaillierte Untersuchungen.

4.1. Optimierung der Regulierung der Solaranlage bei direkter Solarwärmenutzung

Die Solarwärme wird in der Anlage „Hauteville“ sowohl direkt zur Deckung von täglichem Heizwärme und Warmwasser – Bedarf gebraucht, wie auch indirekt zur Verbesserung der JAZ der Wärmepumpe. Während die direkte Benutzung der Solarwärme immer sparsamer ist, als den Betrieb der Wärmepumpe, gibt es bei der indirekten Benutzung Grenzwerte, die für einen wirtschaftlich effizienten Betrieb nicht unterschritten werden sollten. Bei der direkten Benutzung der Solarwärme ist zu beachten, dass die Sonne nicht auf Abruf scheint, und daher keinen zeitlichen Zusammenhang zwischen Wärmeproduktion und Wärmebedarf existiert, was einen thermischen Buffer (Speicher) notwendig macht. Um die JAZ_{sol} zu verbessern, muss also auch die Effizienz der thermischen Speicher in Funktion der Zeit untersucht werden (Kapitel 4.1.1 - 4.1.3). Bei einer indirekten Nutzung der Solarwärme muss zur Optimierung die minimale Globalstrahlung gefunden werden, bei der ein „solares Doping“ wirtschaftlich interessant ist (siehe Kapitel 4.2 - 4.2.3).

4.1.1. Prioritätsregeln für Zirkulation in Richtung Speicher A oder B

Um während den Sommermonaten möglichst unabhängig von der Wärmepumpe zu sein, wurde untersucht, auf welche Temperatur der Speicher aufgeladen werden muss, um auch Schlechtwetterperioden unabhängig durchzustehen. Ein vollständig auf 80°C aufgeheizter Speicher von 1'650l kann im Sommer (kein Heizbedarf, nur WW-Bedarf) trotz hohen thermischen Verlusten 5-6 Tagen Unabhängigkeit bieten, siehe Abb. 16.

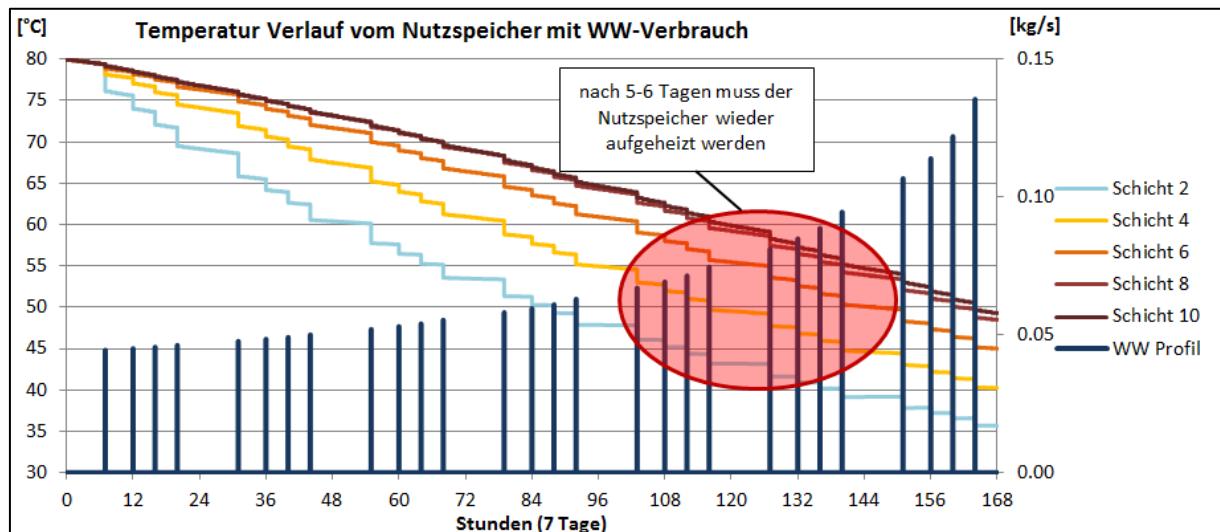


Abb. 16: Temperaturverlauf (linke Skala) von Nutzspeicher A (1'650l) während einer 7-tägigen Entladung durch Warmwasser Verbrauch ohne Wärmezufuhr (Durchflussmenge von WW-Profil auf Skala rechts), aus PL-OPTIGEN-012 [9]

Während der Überwachung im Frühjahr und Herbst fiel jedoch auf, dass der meist kältere Saisonspeicher immer zuerst aufgeladen wird, und zum Teil der Nutzspeicher gar nicht zu einer Ladung kommt. Das parallele Aufladen von Saisonspeicher und Nutzspeicher verhinderte also die Möglichkeit längere Schlechtwetter Perioden ohne WP zu überstehen, obwohl genügend Sonnenenergie vorhanden gewesen wäre.

Der Widerspruch besteht darin, dass beim Betrieb mit einem tieferen Temperaturniveau (Betrieb mit Saisonspeicher), die Kollektorausgangstemperatur tiefer ist, als beim Betrieb mit einem höheren Temperaturniveau (Betrieb mit Nutzspeicher). Gegebenenfalls würde die Leistung der Solarkollektoren nämlich ausreichen, um den Nutzspeicher zu laden.

Um dieses Problem zu umgehen, wurde ein Algorithmus geschrieben, welcher zwar die Kollektorausgangstemperatur als Entscheid für ein Anfahren der Solarpumpe behält, diesen Entscheid aber während dem Betrieb laufend anhand der Globalstrahlung und der produzierten Wärmemenge überprüft, um einen eventuellen Wechsel vom Aufladen des Nutzspeichers zum Aufladen des Saisonspeichers in Betracht zu ziehen (Abb. 17):

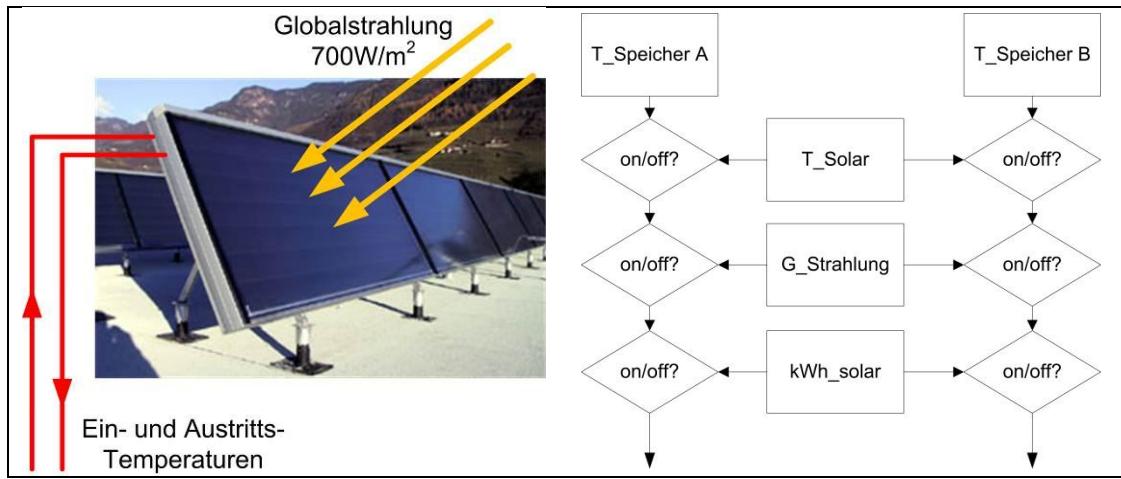


Abb. 17: Schaltung (schematisch) für Entscheidung welcher Speicher geladen wird

Um die optimierte Solarsteuerung richtig einzustellen wurden Voranalysen über potentielle Wärmegewinne der Solarkollektoren durchgeführt. In der Tabelle 1 können wir sehen, ab welcher Globalstrahlung welche Temperatur theoretisch erzielt werden kann:

Eintritt	Austrittstemperatur [°C] bei Globalstrahlung $G_{\text{xxx}} [\text{W/m}^2]$											
	G_{100}	G_{200}	G_{300}	G_{400}	G_{500}	G_{600}	G_{700}	G_{800}	G_{900}	G_{1000}	G_{1100}	G_{1200}
10	11.1	11.6	12.2	12.8	13.4	14.0	14.5	15.1	15.7	16.3	16.8	17.4
14	14.7	15.2	15.8	16.4	17.0	17.5	18.1	18.7	19.3	19.8	20.4	21.0
18	18.3	18.8	19.4	20.0	20.6	21.1	21.7	22.3	22.8	23.4	24.0	24.6
22		22.4	23.0	23.6	24.1	24.7	25.3	25.8	26.4	27.0	27.6	28.1
26			26.5	27.1	27.7	28.2	28.8	29.4	29.9	30.5	31.1	31.6
30			30.1	30.7	31.2	31.8	32.4	32.9	33.5	34.0	34.6	35.2
34				34.2	34.8	35.3	35.9	36.4	37.0	37.6	38.1	38.7
38					38.3	38.8	39.4	40.0	40.5	41.1	41.6	42.2
42						42.3	42.9	43.5	44.0	44.6	45.1	45.7
46							46.4	47.0	47.5	48.1	48.6	49.2
50								50.4	51.0	51.5	52.1	52.6
54									54.4	55.0	55.6	56.1
58										58.5	59.0	59.5
62											62.4	63.0
66												66.4

Tabelle 1: Mögliche Austrittstemperaturen in Funktion der Eintrittstemperatur und Globalstrahlung

Es ist einfach erkennbar, dass z.B. eine Temperatur von 42°C beim Solarkollektoreintritt, bei 600W/m^2 Einstrahlung das Glykol-Wasser Gemisch um 0.3°C erwärmt. Dies entspricht mit einer Durchflussmenge von 0.3 kg/s , mit der Gleichung $mc_p\Delta T$ einer Wärmeleistung von $0.3 \cdot 3560 \cdot 0.3 = 320 \text{ W}$. Wir können nun mit den in Tabelle 1 rot eingekreisten Temperaturen eine Gleichung erstellen, welche in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur (T_{Eintritt}) der Kollektoren eine minimale Globalstrahlung (G_{\min}) definiert und erhalten die in Abb. 18 gezeigte Kurve:

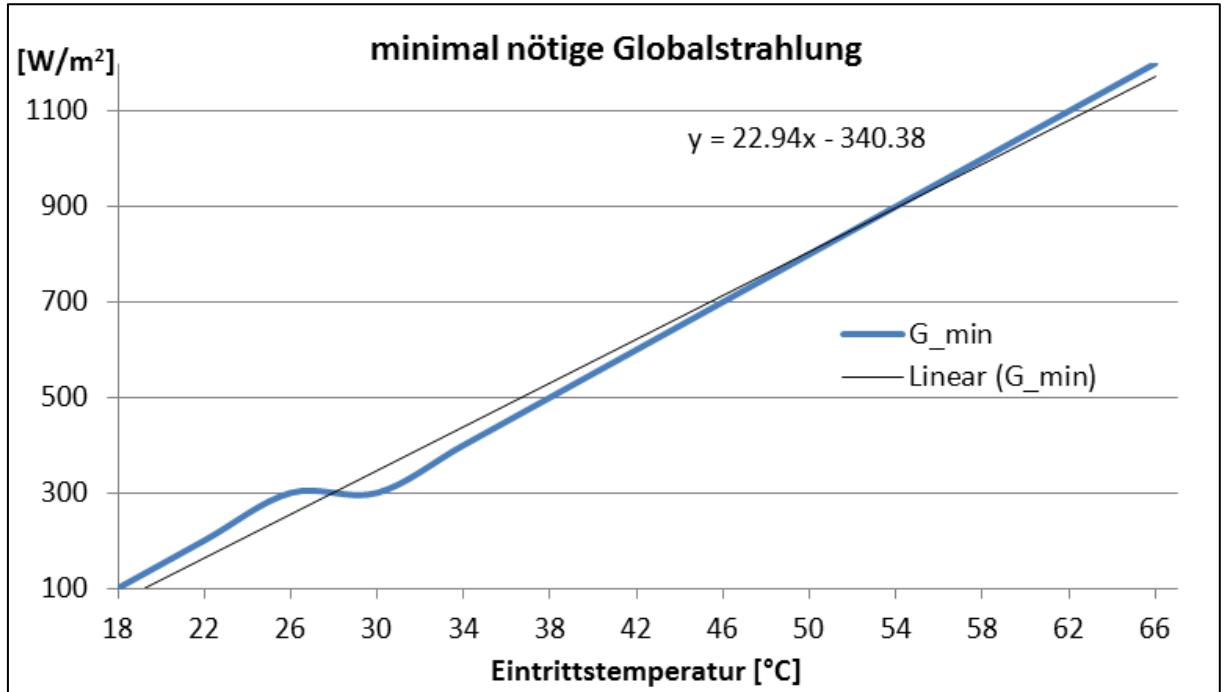


Abb. 18: Minimal nötige Globalstrahlung in Funktion der Eintrittstemperatur

Bei bewölktem Himmel ist die Gefahr gross, dass kurzzeitig die Globalstrahlung hoch genug ist, um der Steuerung falsche Signale zu geben. Daher wird zusätzlich zur Globalstrahlung die Wärmemenge der letzten 15min gezählt. Die minimale Wärmemenge (E_{min}), die einen Wechsel des solaren Kreislaufs vom Speicher B in den Speicher A erlaubt kann folgendermassen berechnet werden:

$$\dot{m}c_p\Delta T\Delta t = E_{min}$$

wobei \dot{m} der Durchfluss (=0.3kg/s), c_p die spezifische Wärme (abhängig von der Temperatur), ΔT die Temperaturdifferenz (=0.3°C), und Δt die Zeit (=15min) ist. Der Minimalwert für die Wärmemenge ist jedoch abhängig von verschiedenen Kriterien, und muss nach Messungen auf dem Pilotobjekt angepasst werden.

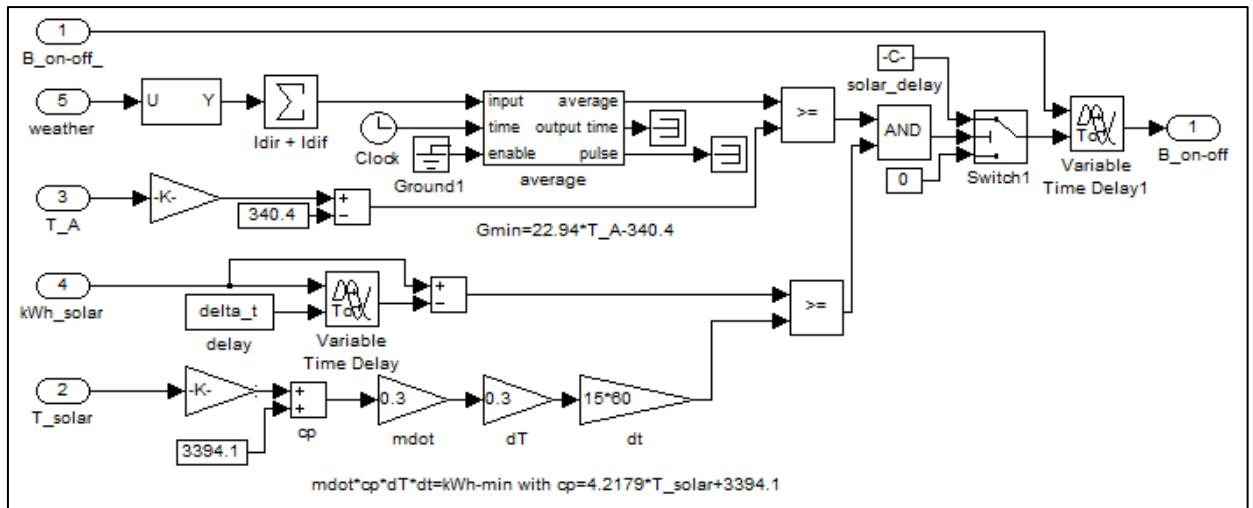


Abb. 19: Neue optimierte Solarsteuerung in Simulationsmodell mit Prioritätsbedingungen

Die kombinierte Schaltung mit den oben erwähnten zusätzlichen Bedingungen wurde in die Simulink Simulation integriert (siehe Abb. 19). Man sieht in der Schaltung, dass der Durchschnittswert der Globalstrahlung, sowie die summierte Wärmemenge grösser sein müssen als die minimal definierten Werte, um die Bedingung „AND“ zu erfüllen. Ist diese erfüllt, wird der solare Kreislauf in Richtung Speicher B um die gewählte Zeit verzögert, und lässt somit zu, dass die Solarkollektoren den Speicher A mit einem höheren Temperaturniveau auflädt.

Vergleicht man die Austrittstemperatur der Solarkollektoren zwischen Standardsteuerung (siehe Abb. 20) und optimierter Steuerung, sieht man, dass die Optimierung unter bestimmten Bedingungen ein Laden der Speichers A ermöglicht, während die Standardsteuerung nur den Speicher B (Saisonspeicher) lädt.

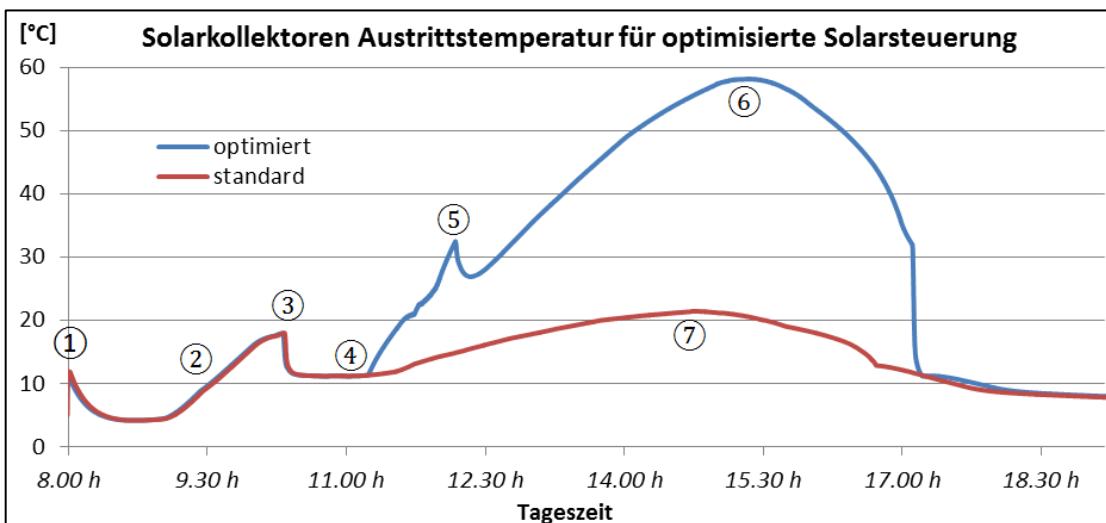


Abb. 20: Vergleich zwischen optimierter und Standard-Solarsteuerung

Die obige Simulation (Abb. 20) wurde mit tiefen Anfangstemperaturen für Speicher A ($T_{init}=25^{\circ}\text{C}$) wie auch für Speicher B ($T_{init}=10^{\circ}\text{C}$) durchgeführt. Die Klimadaten stammen aus Meteonorm [8] und entsprechen einem klimatischen 3.Januar. Um das Verhalten der Austrittstemperatur der Solarkollektoren besser zu verstehen, wurde die Abb. 20 in mehrere Phasen aufgeteilt:

1. Anfangstemperatur der Solarkollektoren bei 12°C
2. mit den ersten Sonnenstrahlen beginnen sich die Kollektoren zu erwärmen
3. die Einschalttemperatur für das Laden von Speicher B wurde erreicht
4. die optimierte Schaltung hat die Bedingungen erfüllt für ein theoretisches Laden von Speicher A und blockiert das Laden von Speicher B während 15min
 - 4a. die optimierte Schaltung überprüft die Bedingungen erneut und blockiert das Laden von Speicher B erneut um 15min (kleiner Knick in der Kurve)
5. die Einschalttemperatur für das Laden von Speicher A wurde erreicht
6. Kollektortemperaturen bis zu 57°C im Nutzspeicher
7. Kollektortemperaturen bis zu 23°C im Saisonspeicher

Es ist klar, dass die energetische Effizienz mit der optimierten Steuerung schlechter ausfallen wird, da die Kollektortemperaturen und somit alle Temperaturen im Kreislauf höher sind und höhere thermische Verluste aufweisen. Trotzdem lohnt sich die Steuerung, da die täglich gebrauchte Wärme für den Haushalt quasi kostenlos mit der Sonne erzeugt werden kann. Aus diesem Resultat können daher mehrere Schlüsse gezogen werden:

- die optimierte Schaltung erhöht die solare Unabhängigkeit
- die Wärmetauscher im Speicher A vermag nicht die gesamte Wärme zu übertragen, diese mangelnde Effizienz im Wärmetauscher ermöglicht jedoch höhere Temperaturen im Kollektor wegen einem kleineren Temperaturhub

- ohne optimierte Schaltung würden die beiden Speicher unvermeidlich parallel aufgeladen
- die energetische Effizienz darf wegen der zeitabhängigen thermischen Verlusten für die Optimierung nicht beachtet werden, da Sie für die jährliche Systembilanz eine untergeordnete Rolle spielt.

4.1.2. Beste Schalthysterese für Solarzirkulation

Die Schalthysterese der Solarzirkulation bestimmt, ab welcher Temperatur die Solaranlage zu operieren beginnt, und wann sie wieder ausschaltet. Bei einer Schalthysterese von (5 - 10) wird die Solarpumpe in Betrieb gesetzt, sobald die Kollektor-Temperatur um 10K höher ist als die Speicher-temperatur, und wird zirkulieren, bis nur noch eine Differenz von 5K vorhanden ist.

Umso höher die zwei Temperaturen sind, desto grösser ist der wirtschaftliche Wirkungsgrad der Kollektoren (JAZ_{sol} bzw. COP_{sol}), da für eine konstante Pumpenleistung mehr Wärme erzeugt wird:

$$JAZ_{sol} = \frac{SolarWärme}{Solarstrom}$$

Andererseits, sprechen tiefere Temperaturen für einen höheren technischen Wirkungsgrad der Anlage, da weniger thermische Verluste anfallen bei kleineren Temperaturdifferenzen zwischen mittlerer Kollektor-Temperatur und Umgebungstemperatur.

$$\eta_{techn} = \eta_0 - \left(\left(a_1 \frac{\Delta T}{G} \right) + \left(a_2 \frac{\Delta T^2}{G} \right) \right)$$

Mit:

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen Übertragungsmedium und Aussentemperatur

G : globale Sonneneinstrahlung [W/m^2]

a_1 : linearer Verlustfaktor [W/m^2K]

a_2 : quadratischer Verlustfaktor [W/m^2K^2]

η_0 : optischer Wirkungsgrad

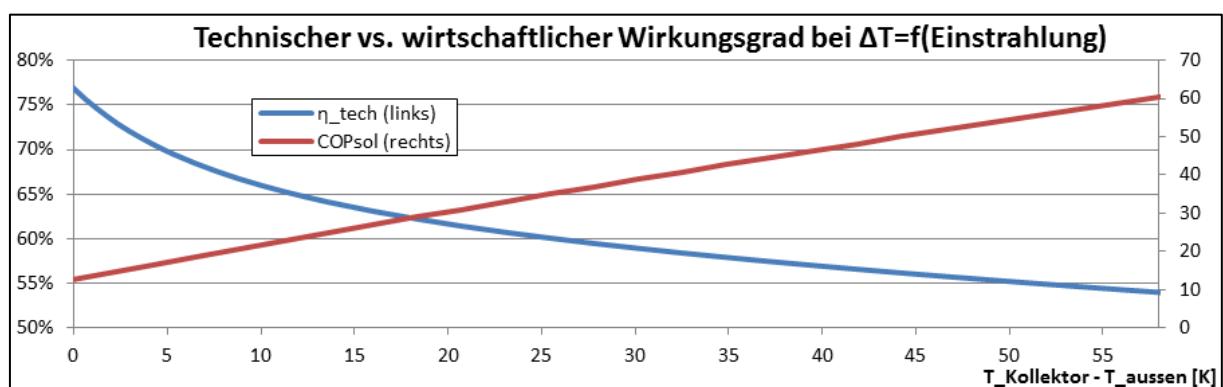


Abb. 21: Der technische Wirkungsgrad (Skala links) hat ein umgekehrt proportionales Verhältnis zum wirtschaftlichen Wirkungsgrad (Skala rechts)

Bei der Visualisierung der zwei Wirkungsgrade in Abb. 21, bei Standardbedingungen, wird eine Kontroverse sichtbar. Während für technisch gesehen gute Bedingungen (wenig thermische Verluste), kleine Temperaturunterschiede die besten **technischen** Wirkungsgrad (η_{tech}) erzielen, werden grosse Temperaturunterschiede die besten **wirtschaftlichen** Wirkungsgrade (COP_{sol}) erzielen. Nüchtern betrachtet kann also eine wirtschaftlich gut funktionie-

nierende Regelung mehr Wärmeenergie aus der gleichen Primärenergie (Strom für Pumpe) erzeugen, wie eine technisch optimal funktionierende Regelung!

Um die Schalthysterese zu vergleichen, und die Auswirkung von Veränderungen abzuschätzen, wurde ein Kalenderjahr abhängig von der Solarirradiation in vier zeitliche Perioden aufgeteilt (siehe Abb. 22) und diese unabhängig voneinander simuliert. Dabei wurden jeweils alle möglichen Hysteresis-Paarungen zwischen 1-10°C mit mindestens 4°C Unterschied simuliert.

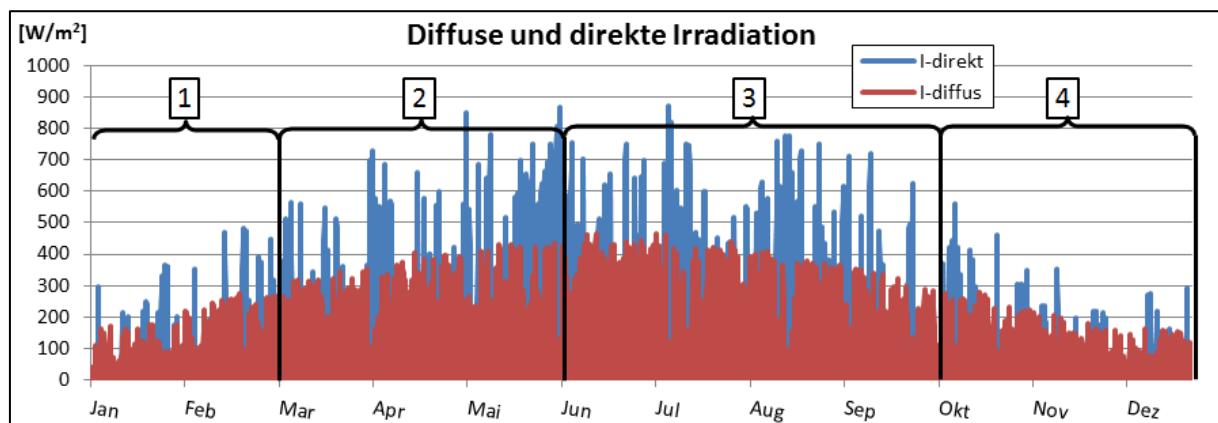


Abb. 22: Aufteilung eines Kalenderjahres in Funktion der diffusen und direkten Irradiation

		Hyst Aus	Hyst An	Solarstrom kWh	Stromkosten Sfr	Gesamtstrom kWh	
Kosten Differenz	Best	248.8	248.8	45.4	248.8	1379.4	Jan-Feb
	Worst	252.9	252.9	46.6	249.0	1380.3	
	Differenz	4.1	2%	49.7	249.7	1383.7	
	monatlich	2.0	Sfr	63.0	252.1	1395.7	
				65.3	252.5	1397.9	
				67.3	252.9	1399.9	
Kosten Differenz	Best	148.9	148.9	122.6	148.9	796.5	Mar-Mai
	Worst	154.7	154.7	124.1	149.2	797.8	
	Differenz	5.8	Sfr	125.8	149.5	799.4	
	monatlich	1.9	Sfr	149.0	154.6	825.7	
				152.3	154.7	826.5	
				150.6	154.7	826.8	
Kosten Differenz	Best	33.1	33.1	140.5	33.1	167.9	Jun-Sep
	Worst	37.7	37.7	141.9	33.4	169.4	
	Differenz	4.6	Sfr	143.1	34.0	170.7	
	monatlich	1.2	Sfr	164.2	37.4	188.9	
				159.8	37.4	187.1	
				161.3	37.7	188.4	
Kosten Differenz	Best	292.6	292.6	59.1	292.6	1600.8	Okt-Dez
	Worst	298.8	298.8	66.2	293.9	1607.3	
	Differenz	6.2	Sfr	78.6	294.0	1609.4	
	monatlich	2.1	Sfr	71.5	297.6	1623.7	
				86.8	298.5	1631.0	
				77.7	298.8	1628.8	

Abb. 23: Einfluss der solaren Schalthysterese auf gesamte Stromkosten, mit Auswertung der besten und schlechtesten drei Lösungen

Für die Auswertung wurden jeweils nur der Stromverbrauch der Solarpumpe, die gesamten Stromkosten und -verbrauch der drei billigsten und drei teuersten Lösungen verglichen, da der Einfluss der Solarhysterese auf die übrigen Zielsetzungen (JAZ der WP, und die Speichereffizienz) nur sehr gering ist. Die Analyse (Abb. 23) verdeutlicht, dass tiefe Ausschalthysterese (z.B. 1 – 5), zu hohem Stromkonsum in der Solarpumpe führt, da die Solaranlage während einem grösseren Temperaturbereich und bei schlechtem COP_{sol} arbeiten wird. In der Heizperiode (Okt-Feb) ist der Einfluss der Solarsteuerung auf die Stromkosten allerdings sehr klein. Eine Verbesserung von lediglich 2% kann erreicht werden, im Gegensatz zu 4% in der Zwischensaison (Mar-Mai), und 12% ausserhalb der Heizsaison (Jun-Sep). Die energetischen Gründe für diese Verbesserung wurden in der Abb. 21 verdeutlicht, grössere Temperaturdifferenzen zwischen Kollektor und Speicher führen zu höherem wirtschaftlichem Wirkungsgrad.

Optimal wäre natürlich, jeden Monat oder gar täglich entsprechend der Globalstrahlung die Hysterese anzupassen. Eine entsprechende Analyse fehlt aber zurzeit, und die Einstellung einer Hysterese von 4 – 8 übers ganze Jahr hinweg wird im Objekt „Hauteville“ eingestellt, da diese aufgrund der Untersuchungen das ganze Jahr hinüber den besten Kompromiss darstellt.

4.1.3. Analytischer Nachweis für optimale Lösung

Ist die optimalste Lösung die Variante mit minimalen Stromkosten, müssen die solaren Stromkosten/kWh Wärme definiert werden. Die Schwierigkeit in einer solchen Analyse besteht darin, dass Solarwärme abhängig der Solarstrahlung ist. Viel Globalstrahlung wird also billige Solarwärme produzieren, und wenig Globalstrahlung „teure“ Solarwärme. Resultierend ist eine Grenze, bei der die Solarkosten in Funktion der Globalstrahlung gleich teuer sind wie die WP-Kosten um die gleiche Wärmemenge bei identischem Temperaturniveau (wichtig!) zu produzieren. Bei der Installation „Hauteville“ ist es zudem möglich, die Solarwärme als „Doping“ für die Wärmepumpe zu benutzen. Es gilt also, die zwei optimalen Grenzen zu finden:

1. Minimale Globalstrahlung, bei welcher Solarwärme billiger ist, wie WP-Wärme bei Nachttarif
 - a. Warmwasser Zubereitung (55°C)
 - b. Heizwärme Vorbereiten (35°C)
2. Minimale Globalstrahlung, bei welcher Solarwärme billiger ist, wie die Einsparung dank dem „solaren Doping“ der WP

Für das Optimum vom Fall 1a, muss also 170 l à 55°C geliefert werden, d.h. ~9kWh pro Tag. Die Stromkosten für die Solarpumpe sind 0.21 CHF/kWh, während die WP bei Niedertarif operieren kann zu 0.12 CHF/kWh. Man sieht auf Abb. 24, dass die Kosten für Solarwärme auch bei sehr geringer Globalstrahlung noch tiefer sind als die Kosten für die Wärmepumpe.

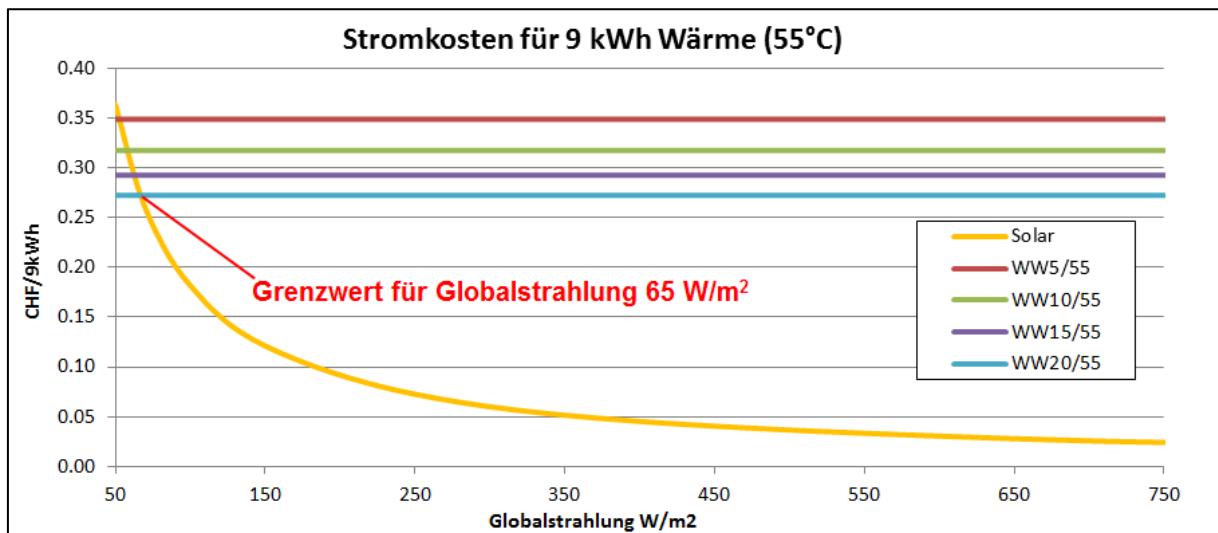


Abb. 24: Energiekosten für eine 9kWh Wärme bei 55°C. Bei direkter Benutzung der Solarwärme ist die Solaranlage praktisch immer billiger im Betrieb als die WP (WW20/55 heisst Quelle bei 20°C und Senke bei 55°C)

Für den Fall 1b (Wärmeproduktion für Heizung à 35°C) ist die COP der WP höher. Folglich sinkt dessen Stromverbrauch und der Grenzwert für die Globalstrahlung steigt (siehe Abb. 25).

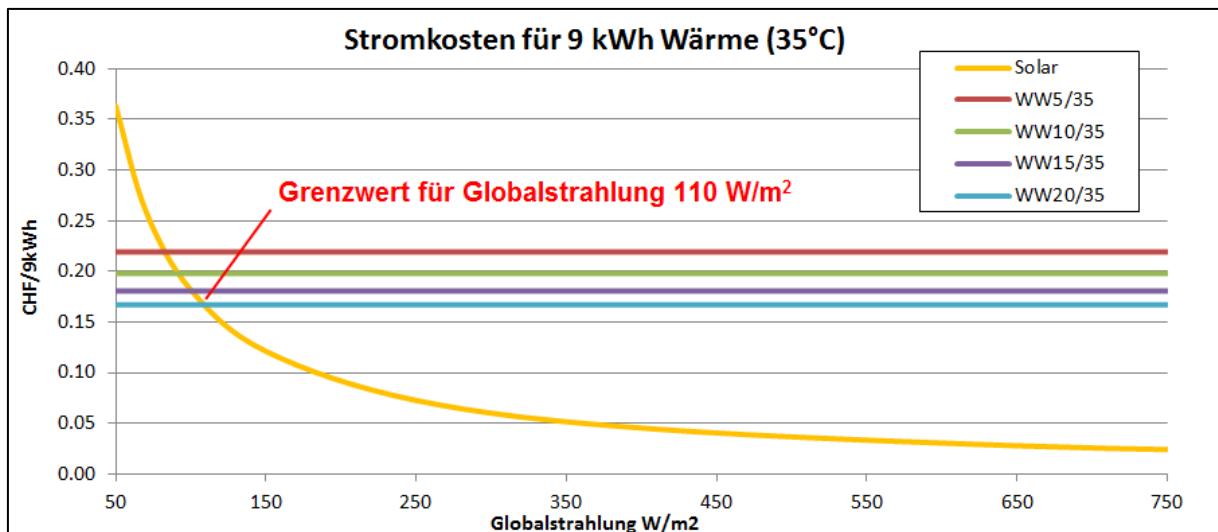


Abb. 25: Energiekosten für eine 9kWh Wärme bei 35°C. Bei direkter Benutzung der Solarwärme ist die Solaranlage praktisch immer billiger im Betrieb als die WP (WW20/35 heisst Quelle bei 20°C und Senke bei 35°C)

Beim Fall 2 (Solarwärme als „Doping“ für die WP), wird abgeschätzt, wie viel Stromkosten mit einer Erhöhung der Quellentemperatur der WP gespart werden können. Da dieses Thema nicht nur für diese Arbeit, aber auch für die Energieforschung im Bereich Solar+WP von Bedeutung ist, wird dazu ein eigenes Kapitel gewidmet (Kapitel 4.2).

4.2. Optimierung der WP durch „solares Doping“ der WP-Quelle

In den Wintermonaten stehen in der Schweiz die meisten thermischen Solarkollektoren wegen mangelnder Sonneneinstrahlung still. Das erreichte Temperaturniveau kann im Speicher nicht effizient genutzt werden, und andere Energiequellen für die Beheizung und WW-Produktion werden notwendig. Um auch im Winter solare Wärme nutzen zu können, muss

entweder die Leistung der Solaranlage erhöht werden (mehr Fläche, Winkel anpassen, Durchfluss verringern, etc.), oder der Temperaturbedarf gesenkt werden, indem die Wärme nur indirekt, als Quelle für eine WP gespeichert wird („solares Doping“ der Wärmepumpe), und somit durch die Erhöhung des COPs der WP eine effizientere Wärmeproduktion erlaubt. Die Wirtschaftlichkeit des „solaren Dopings“ der WP hängt vor allem von den Eigenschaften der WP selber, aber auch von der wirtschaftlichen Effizienz der Solaranlage ab. Diese wiederum hängt direkt von der Effizienz der Zirkulationspumpe ab, welche schlussendlich auch entscheidend für das Optimierungspotential sein wird. Nachfolgend wird Schritt für Schritt erklärt, welche Ansteuerung für das „Doping“ die kostengünstigste Lösung darstellt, und ab wann auf ein „solares Doping“ verzichtet werden sollte.

4.2.1. Wärmebedarf definieren

Beim „solaren Doping“ geht es darum, dass die Solarwärme wegen mangelnder Sonneneinstrahlung nicht direkt für Heizung und WW-Produktion verwendet werden kann, sondern durch eine WP aufgewertet werden muss. Dieser Fall tritt in den Wintermonaten auf, wenn die Sonne am wenigsten Globalstrahlung liefert, und die Außentemperaturen mehr thermische Verluste verursachen. Der Wärmebedarf besteht daher aus einem Anteil für die Heizung, sowie einem Anteil für die WW-Produktion.

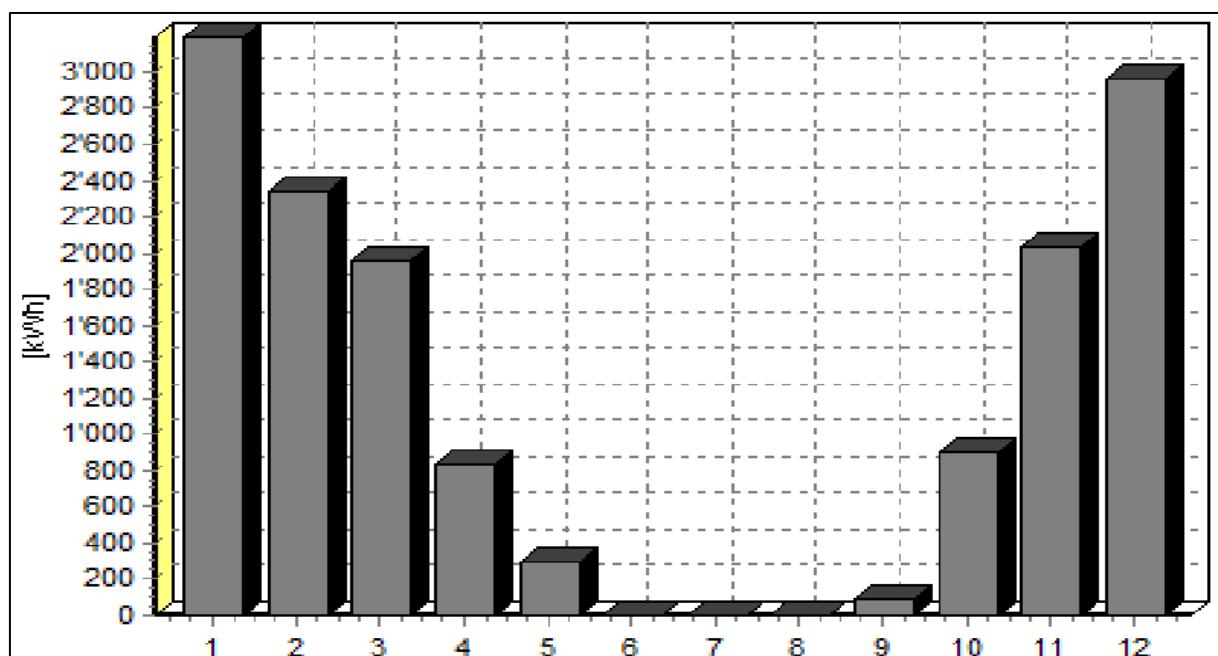


Abb. 26: Monatlicher Wärmebedarf für Heizung aus thermischer Analyse nach SIA380/1 (Lesosai)

Wenn man den jährlichen Heizwärmebedarf nach Monaten aufteilt anschaut (Abb. 26) kommt man im Winter auf einen täglichen Heizwärmebedarf von 65 – 100 kWh. Dazu kommt ein täglicher WW-Bedarf von 7-10 kWh. Für den grössten Heizbedarf, 100 kWh/Tag, und einem WW-Bedarf von 10kWh/Tag, ergeben sich die in Abb. 27 aufgeführten Energiemengen, wobei die Quellen und Senken Energien, Wärmemengen darstellen, und die Energie die dem Kompressor zugeführt wird, eine elektrische Energie bedeutet.

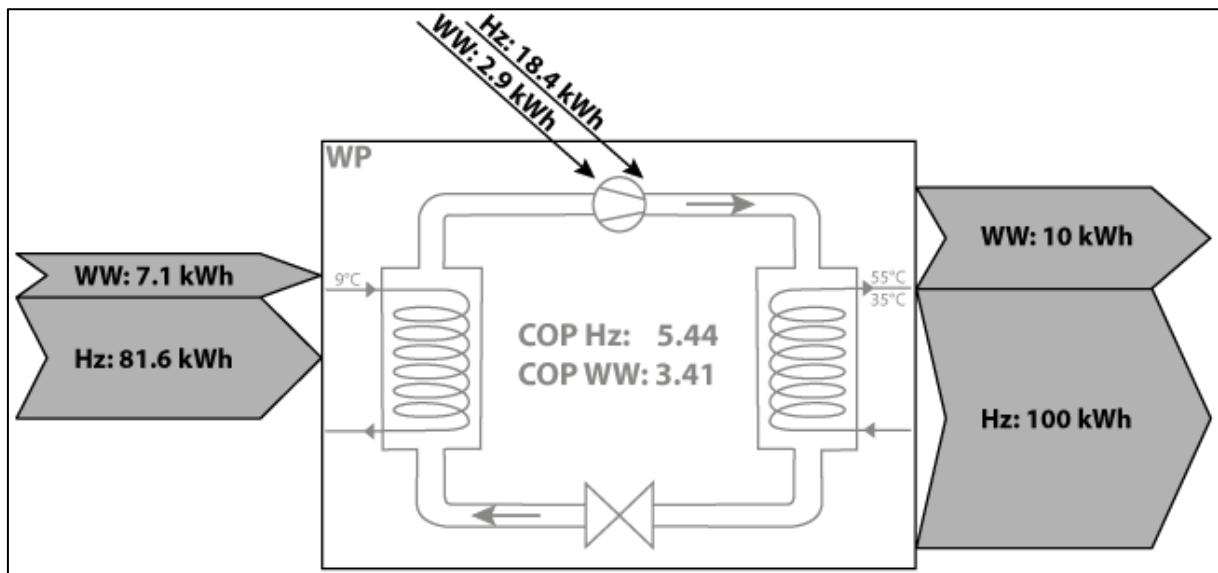


Abb. 27: Wärmepumpe-Energiebilanz für WW und Heizwasser Produktion bei WP-Quellentemperatur von 9°C nach den Leistungskurven aus Abb. 14

Bei der oben abgebildeten Situation ändert sich die COP in Funktion der Quellentemperatur. Die Senkentemperaturen von 35°C für die Bodenheizung und 55°C für die WW-Zubereitung bleiben konstant. Diese Annahme ist zwar nicht korrekt, denn auch die Senkentemperatur ändert sich während dem Aufladen des Speichers. Das Resultat wird aber nur wenig zum Vorteil der Solaranlage verfälscht, während die Berechnung deutlich übersichtlicher und verständlicher wird.

4.2.2. Betriebskosten der Solaranlage und Wärmepumpe

Bei der Kostenberechnung der technischen Anlagen spielt der Stromtarif eine wichtige Rolle. Während der Kompressor der WP in der Nacht zu Niedertarif Stromzeiten operiert werden kann, beschränkt sich die Benutzung der Solarpumpe logischerweise auf die Tageszeit bei Hochtarif.

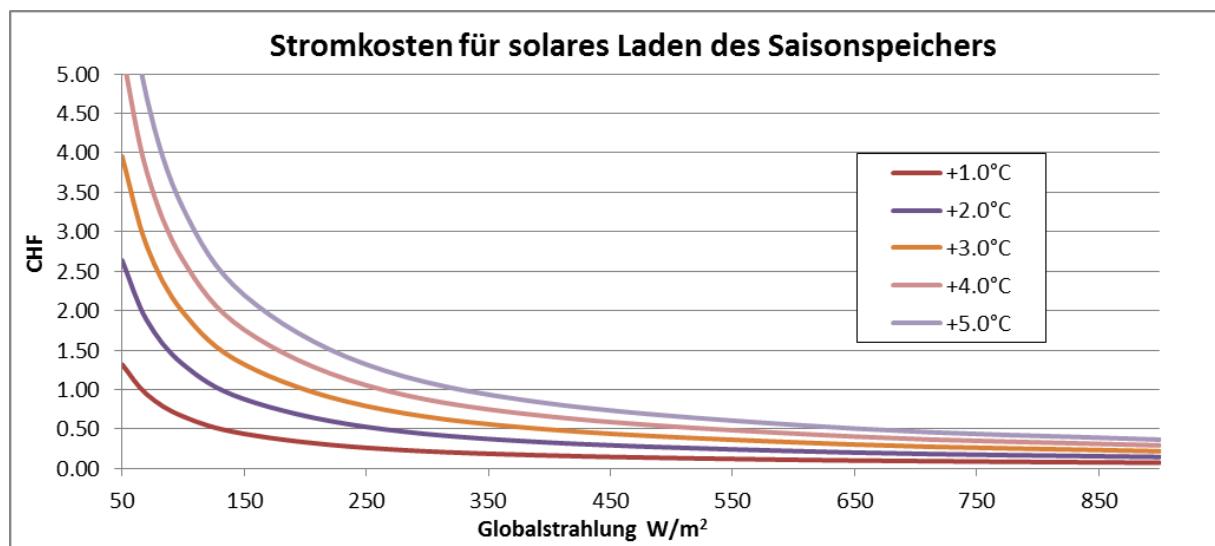


Abb. 28: Stromkosten für ein solares Laden des Saisonspeichers (28m³)

Um die Kosten für das „solare Doping“ zu berechnen, wurden die Kosten der Solarpumpe in Abhängigkeit der Globalstrahlung für eine Erwärmung des Saisonspeichers von 1-5°C berechnet (siehe Abb. 28). Die Erwärmung des Saisonspeichers stellt gleichzeitig eine Erhö-

hung der Quellentemperatur der WP dar. Nun müssen die Kosten für die Benutzung der WP berechnet werden. Für den in Abb. 27 gezeigten Fall mit einer Quellentemperatur von 9°C werden $18.4+2.9\text{kWh} = 21.3\text{kWh}$ an Strom gebraucht. Für einen Niedertarif von 0.12 CHF/kWh ergibt dies Gesamtkosten von $21.3 \cdot 0.12 = 2.62$ CHF.

Bei einer Erhöhung der Quellentemperatur von 5°C (von 9 auf 14°C) würden wegen der Verbesserung des COPs nur noch 2.38 CHF gebraucht. Vergleicht man die Einsparnis mit den Stromkosten für die Solaranlage, kann man sehen, ab welcher Globalstrahlung sich ein „solares Doping“ finanziell lohnt. In Abb. 29 sieht man, dass die Erhöhung der Quellentemperatur einen fast linearen Einfluss auf die Stromkosten hat. Durch eine Erhöhung um 10°C kann eine Einsparung von 8 Rappen/kWh erzielt werden.

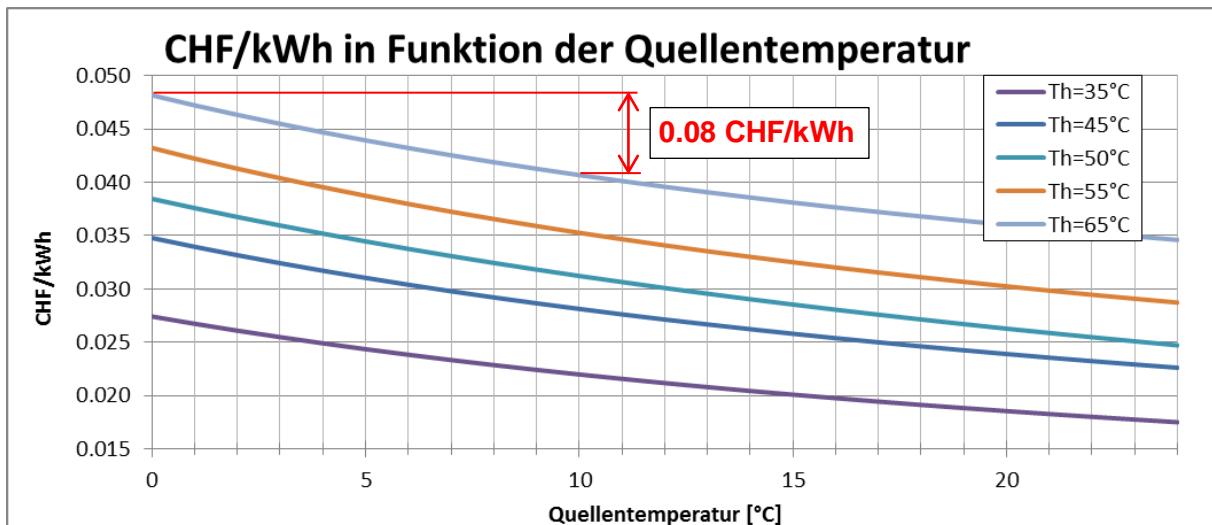


Abb. 29: Stromkosten der WP-Wärme Produktion in Funktion der Quellentemperatur. Für eine Erhöhung der Quellentemperatur von 10°C können 0.08 CHF/kWh eingespart werden

Die Werte in Abb. 29 entsprechen dem Einsparpotential pro kWh Quellenenergie, da die Solaranlage für die Strategie „solares Doping“ indirekt genutzt wird und somit die Quellenenergie ersetzt, und nicht die Senkenenergie.

4.2.3. Beste Betriebsbedingungen

Mit der Kostenanalyse und der Abschätzung des Bedarfs können nun verschiedene Szenarien dargestellt werden um die optimalen Ansteuerungsparameter besser zu definieren. Der erste Fall wird analog zur Abb. 27 die Situation mit dem grössten Heizbedarf im Winter darstellen. Beim zweiten Fall wird von einem kleineren Heizbedarf (40 kWh/Tag, entspricht dem Bedarf im April oder Oktober) ausgegangen, und beim dritten Fall vom Sommerbetrieb ohne Heizbedarf.

1. Wintersaison:

- 100 kWh Heizbedarf mit 35°C Senkentemperatur
- 10 kWh WW-Bedarf mit 55°C Senkentemperatur

2. Zwischensaison:

- 50 kWh Heizbedarf mit 35°C Senkentemperatur
- 10 kWh WW-Bedarf mit 55°C Senkentemperatur

3. Sommersaison:

- 10 kWh WW-Bedarf mit 55°C Senkentemperatur

Um die optimalen Einstellungen für jede Situation zu finden, müssen die Kostenkurven der Solaranlage mit der Kosteneinsparnis – Kurve der Wärmepumpe übereinander gezeichnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Solarenergie indirekt benutzt wird, d.h. man muss

die Solarkosten/kWh mit der Quellenenergie der WP betrachten, und nicht mit der Senkenenergie. In Abb. 30 sieht man die minimale Globalstrahlung, unter welcher ein „solares Doping“ der WP aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchgeführt werden sollte. Wenn wir also für die oben erwähnten Betriebssituationen die Betriebsbilanz mit einer Quellentemperatur von 9°C durchführen, erhalten wir:

Saison	Wärmebedarf	Stromkosten Ohne „Doping“	Stromkosten mit „Doping“ Grenzwerte + 10°C und 400 W/m ² Globalstrahlung
Wintersaison	110 kWh	2.62 CHF (WP)	2.18 (WP) + 0.44 (Solar) = 2.62 CHF
Zwischensaison	60 kWh	1.71 CHF (WP)	1.43 (WP) + 0.28 (Solar) = 1.71 CHF
Sommersaison	10 kWh	0.36 CHF (WP)	0.30 (WP) + 0.04 (Solar) = 0.34 CHF

Tabelle 2: Betriebsbilanz mit solarem "Doping" der WP mit den minimal-Bedingungen für wirtschaftlichen Betrieb

Dabei wurden nur die augenblicklichen Betriebskosten berücksichtigt. Die Energie, welche für die einmalige Erhöhung der Saisonspeichertemperatur aufgewendet wird (siehe Abb. 28), müsste auf die Laufzeit der „Doping“ Strategie aufgeteilt zusätzlich addiert werden, und würde den Grenzwert für einen wirtschaftlichen Betrieb (siehe Abb. 29) nach oben verschieben (d.h. höhere Globalstrahlung und höheres ΔT „Doping“).

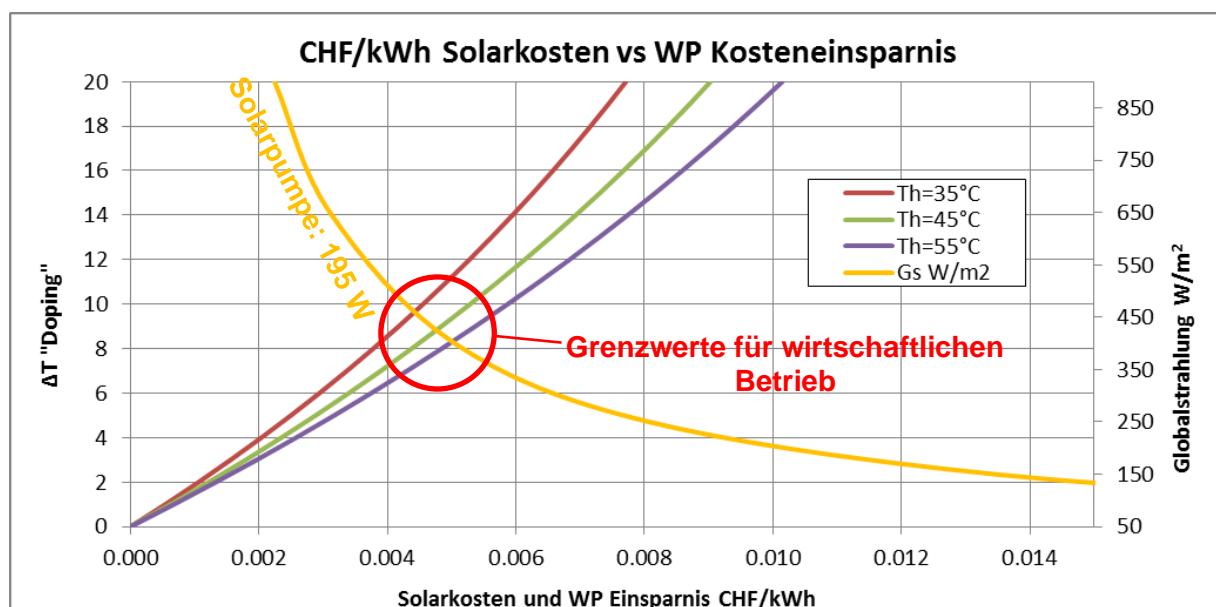


Abb. 30: Minimale Globalstrahlung und ΔT „Doping“ für effiziente indirekte Solarwärme Nutzung ist zwischen 400-450 W/m² bei einer minimalen „Doping“ Temperaturdifferenz von 8-10°C

Obwohl die Graphik so weit wie möglich von der Systemkonfiguration „entkoppelt“ wurde, sind die Resultate nur für die analysierte Anlage „Hauteville“ gültig. So wird sich die Situation in Funktion der Solarpumpen Leistung, sowie der Effizienz der WP deutlich verändern, wie man auf der Abb. 31 sieht.

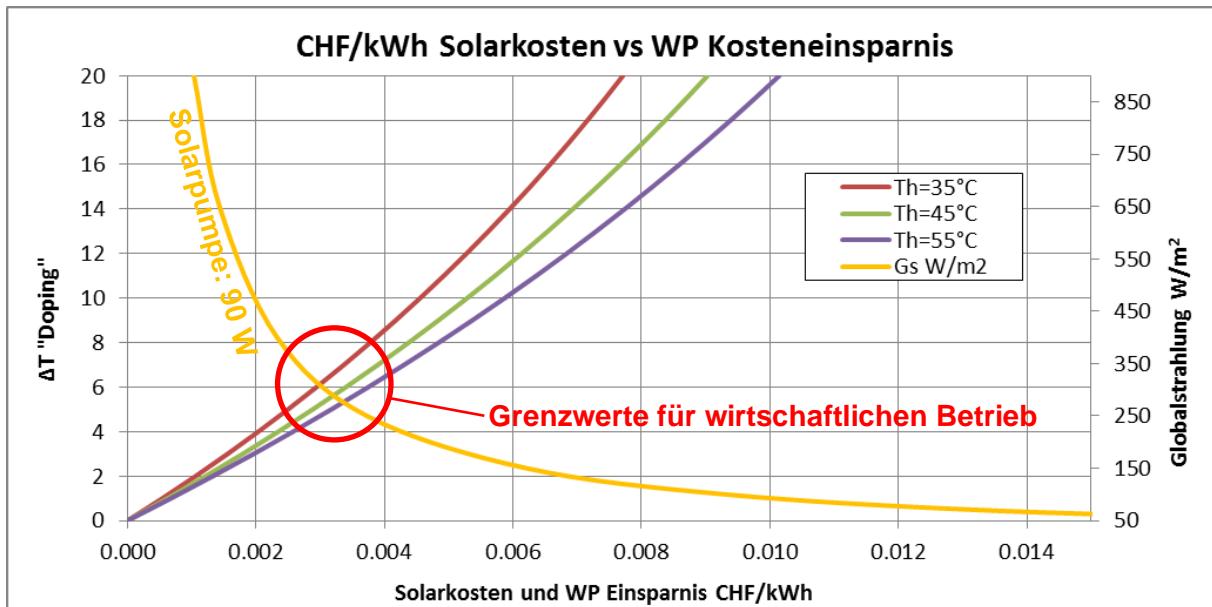


Abb. 31: Optimale Betriebsbedingungen für effizientere Solarpumpe (90 W anstatt 195 W)

Die Analysen zeigen, dass der indirekte Einsatz von Solarwärme trotz erhöhten Verlusten und höherem Stromtarif in den berechneten Systemgrenzen einen wirtschaftlichen Gewinn erzielen kann. Die oben gezeigten Resultate sind jedoch nur gültig für das analysierte EFH. Für andere Anlagen müssen die folgenden Punkte angepasst werden:

1. Stromkosten: für die WP kann angenommen werden, dass sie während der Niedertarifzeit Strom beziehen kann (wenn vorhanden). Die Umwälzpumpe der Solaranlage muss immer zu Hochtarif-Kosten gerechnet werden.
2. Umwälzpumpe der Solaranlage: Bei konstanter Drehzahl (bzw. Stromleistungsbezug) kann diese direkt für die Kosten/kWh benutzt werden. Für Drehzahl geregelte Pumpen müssen die Leistungsabhängige Kosten/kWh berechnet werden.
3. Mit Hilfe der Leistungsdiagramme der WP muss der Einfluss einer Erhöhung der Quellentemperatur auf die COP der WP bzw. auf dessen Stromverbrauch neu berechnet werden.

4.3. Optimierung der Sperrzeiten der Wärmepumpe

Es ist üblich, dass der Stromlieferant für grosse Stromkonsumenten Sperrzeiten zu Stromspitzenlast Zeiten definiert. Zusätzlich ist in vielen Gebieten während der Nacht bzw. Wochenende einen anderen Stromtarif wie am Tag gültig (siehe z.B. Abb. 32 aus dem Produktenkatalog von Groupe-E).

Preiselemente	Grundpreis (CHF/Jahr)		Arbeitspreis (Rp./kWh)			
			Hochtarif (7-21 Uhr)		Niedertarif (21-7 Uhr)	
	exkl. MWSt	inkl. MWSt	exkl. MWSt	inkl. MWSt	exkl. MWSt	inkl. MWSt
Energielieferung	–	–	10.00	10.80	6.35	6.86
Netznutzung	92.40	99.79	7.87	8.50	3.91	4.22
swissgrid	–	–	1.11	1.20	1.11	1.20
Abgaben und Leistungen an das Gemeinwesen	Je nach Kanton und Gemeinde der Verbrauchsstätte werden im Auftrag der zuständigen Behörden durch Groupe E weitere kommunale, kantonale oder eidgenössische Abgaben, Leistungen und Gebühren erhoben. Die aktuellen Preise können unter www.groupe-e.ch eingesehen werden.					

Abb. 32: Tarifprogramm "Easy Comfort 2012" für Groupe - E Kunden

Die WP lässt sich auch problemlos nach individuellen Bedürfnissen programmieren. So kann z.B. am Nachmittag die WP immer gesperrt werden, damit die (wenn vorhanden) Solaranlage anstelle der WP die Möglichkeit hat, den Wärmebedarf zu decken.

Für die Anlage „Hauteville“ sind zurzeit die nachfolgenden Sperrzeiten programmiert:

Einschaltzeiten WP:

WW: 5h00-7h00, 10h00-11h00, 17h00-20h00 erlaubt (vom Benutzer gewählt)

Heizung: 3h00-19h00 erlaubt (vom Benutzer gewählt)

Groupe-E: 11h-12h15 blockiert (vom Stromlieferant definiert)

Dabei wird mit der Steuerung für WW der Hochtemperatur- und mit Heizung der Tieftemperatur Anschluss der WP gesperrt.

Da für die Simulation die Anzahl Variationen zu gross war um alle zu testen, wurde der Versuchsplan mit Hilfe genetischer Algorithmen in ModeFrontier [4] durchgeführt um Zeit zu sparen. Die Ergebnisse waren einerseits überraschend, andererseits die logische Schlussfolgerung der Problemstellung:

- Die Kosten werden kleiner, wenn die WP weniger im Hochtarif arbeitet (weniger CHF/kWh)
- Die Kosten werden kleiner, wenn die WP weniger arbeitet (weniger kWh)

Die optimale Lösung (kleinste Stromkosten) wird also der WP zur Operation ein Zeitfenster geben, welches zwar genügend Wärme für den täglichen Konsum (Heizung und WW-Produktion) produziert, aber sich möglichst vollständig im Niedertarif Zeitraum befindet.

Kosten Differenz		WW:			Heizung:	Wärme an Haus	Stromkosten Sfr	*Achtung!				
		4h00-7h00	14h00-16h00		1h00-17h00	4624	220					
Best	220.0 Sfr				1h00-17h00	4604	232	Jan-Feb				
Worst	269.0 Sfr				16h00-17h00	4696	241					
Differenz	49.0 Sfr	18%			5h00-23h00	4670	262					
monatlich	24.5 Sfr				5h00-21h00	4601	266					
					9h00-13h00	17h00-18h00	4652	269				
Kosten Differenz		3h00-5h00			5h00-22h00	2634	137	Mar-Mai				
					18h00-19h00	2h00-18h00	2646	140				
Best	137.0 Sfr				9h00-15h00	5h00-21h00	2632	146				
Worst	170.0 Sfr				9h00-11h00	17h00-22h00	2645	164				
Differenz	33.0 Sfr	19%			9h00-13h00	17h00-18h00	2645	165				
monatlich	11.0 Sfr				0h00-5h00	9h00-11h00	16h00-18h00	2601	170			
Kosten Differenz		5h00-7h00			1h00-21h00	207	35	Jun-Sep				
						1h00-17h00	207	35				
Best	35.0 Sfr					3h00-5h00	207	35				
Worst	37.0 Sfr					9h00-11h00	16h00-18h00	208	37			
Differenz	2.0 Sfr	5%				9h00-16h00	17h00-23h00	208	37			
monatlich	0.5 Sfr					9h00-13h00	18h00-24h00	208	37			
Kosten Differenz		4h00-5h00			1h00-21h00	5400	236	*Achtung!				
					16h00-17h00	0h00-21h00	5410	250				
Best	236.0 Sfr					17h00-18h00	0h00-21h00	5415	261			
Worst	282.0 Sfr					9h00-16h00	16h00-22h00	5417	278			
Differenz	46.0 Sfr	16%				2h00-4h00	12h00-16h00	5417	281			
monatlich	15.3 Sfr					2h00-6h00	12h00-16h00	16h00-23h00	3h00-20h00	5401	282	Okt-Dez

Abb. 33: Auswertung der optimalen Sperrzeiten mit ModeFrontier mit besten und schlechtesten drei Lösungen bezüglich Stromkosten (*Achtung: Energieleistung ungenügend für konstante 21°C im Haus)

Anhand der Auswertungen in Abb. 33 können verschiedene Schlüsse über das Verhalten der Anlage auf unterschiedliche Ansteuerungen sowie neue Einsparmöglichkeiten gemacht werden:

- Wie in der Zusammenstellung von Abb. 33 gekennzeichnet, kann zwar der Betrieb mit Niedrigtemperatur die richtige Wärmemenge für WW und Heizung liefern, aber die Wärmeleistung ist zu gering, um bei allen Bedingungen das notwendige Temperaturniveau zu halten (min 45°C für WW und 21°C Haustemperatur).
- Da im Sommer (Jun-Sep) die WP überflüssig ist, haben die Ansteuerungen keinen Einfluss auf die Betriebsbilanz.
- Trotz der physikalischen Temperaturschichten Trennung im Speicher gibt es einen grossen Wärmeaustausch innerhalb des Speichers, sodass ein Aufladen der oberen Schichten (Hochtemperatur) nach kurzer Zeit auch die tieferen Schichten (Niedertemperatur) beeinflusst.

Die Analysen zeigen eindeutig, dass die billigste Lösung ein Betrieb zu 100% im Niedertarif wäre. Um dies möglich zu machen, müsste aber entweder die Vorlauftemperatur der WP erhöht werden, oder das Volumen des Speichers vergrössert werden, um einen genügend grossen thermischen Buffer zur Überbrückung der Hochtarifzeiten zur Verfügung zu haben.

Wie das nachfolgende Kapitel zeigt, ist dies aber in der Anlage „Hauteville“ nicht möglich, ohne den Speicher zu ersetzen, daher wurden die folgenden Einstellungen gewählt:

Einschaltzeiten WP optimiert:

WW: 0h00-7h00, 21h00-23h59 erlaubt (vom Benutzer gewählt)

Heizung: 0h00-23h59 erlaubt (vom Benutzer gewählt)

Groupe-E: 11h-12h15 blockiert (vom Stromlieferant definiert)

4.3.1. Analytische Lösung für Kostenoptimum

Aus Kapitel „4.2.1 Wärmebedarf definieren“ wissen wir, dass der Wärmebedarf im schlimmsten Fall für die Heizung 100 kWh/Tag und für den WW-Verbrauch 10 kWh/Tag beträgt.

Um einen energetisch sinnvollen Betrieb zu führen, ist der Niedrigtemperatur Vorlauf der WP auf 35°C und der Hochtemperatur Vorlauf auf 55°C eingestellt. Für die eingesetzte Speichergröße von 1.65m³ müssen damit täglich mehrere Aufheizzyklen gefahren werden. Soll nun der Bedarf innerhalb der Niedertarif Zeit bereitgestellt werden, müssen wir aus den Leistungskurven der WP berechnen, wie viel Zeit dazu benötigt wird. Dazu nehmen wir die Wärmeleistung bei zwei Situationen und konstruieren eine Leistungskurve in Funktion der Vorlauftemperatur.

Leistungen für Quellentemperatur 10°C und Senkentemperatur 25°C resp. 55°C (aus Abb. 13)

$$P_{WP} 10/25 = 8.3kW$$

$$P_{WP} 10/55 = 7.4kW$$

Durch Linearisierung ergibt sich die Leistungskurve in Funktion der Vorlauf(Senke) - Temperatur

$$P_{WP} 10/x = -0.03x + 9.05kW$$

Nun können wir die Dauer zur Deckung des Wärmebedarfs anhand der Integration des gesamten Wärmebedarfs (110 kWh) durch die Leistung in Funktion der Vorlauftemperatur berechnen

$$Zeit_{hr} = \frac{1}{55 - 25} \int_{25}^{55} \frac{110}{-0.03x + 9.05} dx = 14 \text{ hr}$$

Offensichtlich können wir aufgrund der Wärmeleistung der WP nicht weniger als 14h für die Deckung des Wärmebedarfs einplanen, und eine Erhöhung der Vorlauftemperatur wie im vorhergehenden Kapitel vorgeschlagen würde diese Zeit noch verlängern. Da aber die Niedertarif Zeit zwischen 21h00 – 7h00 liegt, haben wir nur 10h zur Verfügung.

Auch der Vorschlag, ein grösseres Speichervolumen zu nehmen, würde bei der Anlage „Hauteville“ keinen Vorteil bringen, da die Wärmeleistung der WP der begrenzende Faktor darstellt.

Um den Niedertarif also gut auszunutzen und genügend Leistung für die Erwärmung des Gebäudes zu haben, wurde die Sperrzeit für den Niedrigtemperaturanschluss (Heizung) komplett aufgehoben, und der Hochtemperaturanschluss (WW) auf Niedertarif beschränkt, wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt.

4.4. Verwaltung vom Saisonspeicher

Der Saisonspeicher wurde vor allem konzipiert um die Solaranlage besser nutzen zu können. Während der Sommerzeit, wenn die Solarwärme den täglichen Bedarf deutlich übertrifft, kann damit überschüssige Solarenergie gespeichert werden für die Heizung im Herbst, bzw. zur Überbrückung von Schlechtwetterperioden; und im Winter, wenn die Globalstrahlung nicht mehr ausreicht um brauchbare Temperaturen für Heizung (min 30°C) oder Warmwasser (min 50°C) zu produzieren, kann er als Quelle für die WP gebraucht werden („solares Doping“).

1. Überschüssige Solarenergie speichern
 - a. Für Heizung im Herbst
 - b. Zur Überbrückung von längeren Schlechtwetterperioden
2. Tieftemperaturspeicher um mehr solare Energie zu gewinnen
 - a. „Solares Doping“ der WP
 - b. Effizienzsteigerung der Solaranlage

Während dem Betrieb und auch nach den ersten Simulationen wurde jedoch klar, dass die gespeicherte Energie vom Sommer nur zu einem Teil zurückgewonnen werden kann aufgrund von thermischen Verlusten. Tatsächlich geht in den Sommermonaten bei hohen Saisonspeicher-Temperaturen beinahe gleichviel Wärme verloren, wie täglich gewonnen werden kann.

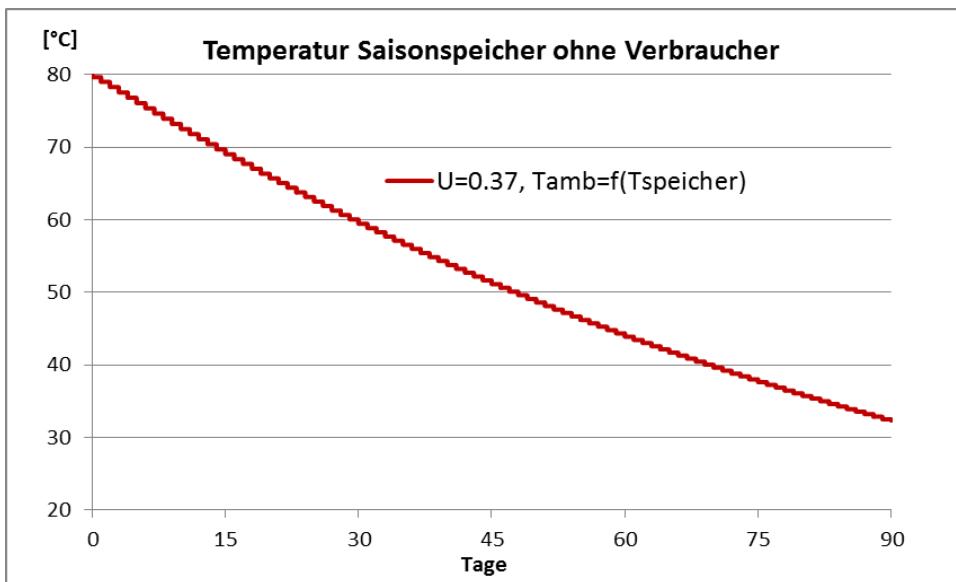


Abb. 34: Wegen Wärmeverluste nimmt die Temperatur im Saisonspeicher mit einer Isolation von 0.37 W/m²K auch ohne Verbraucher rapide ab (Graphik und Analyse aus „News aus der Wärmepumpenforschung“ [9])

Wenn man die Speichereffizienz als Division aller „outputs“ über „inputs“ berechnet, kommt man auf eine Jahresbilanz von 68-70%. Fast ein Drittel der Solarenergie geht also ungenutzt verloren!

Zwei Strategien wurden daher entwickelt, welche zwar widersprüchlich sind (eine Strategie fördert die solare Energiegewinnung und die andere verhindert sie) aber zusammen die energetische sowie wirtschaftliche Jahresbilanz der Anlage leicht zu verbessern vermögen.

4.4.1. Strategie 1: solare Autonomie verlängern

Durch eine Verbindung zwischen Saison- und Nutzspeicher wurde bis anhin, bei entsprechenden Bedingungen einen Wärmetransfer manuell zugeschaltet. Um den Betrieb zu automatisieren, wurde in Matlab-Simulink eine Schaltung entwickelt, welche die Nutzspeicher-temperatur mit der Saisonspeicher Temperatur vergleicht, und bei Bedarf automatisch einschaltet.

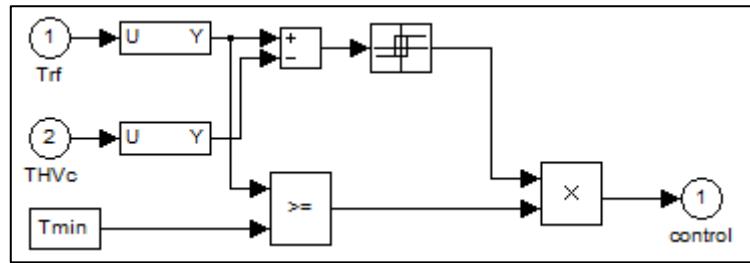


Abb. 35: Schaltung für Wärmetransfer von Saison- nach Nutzspeicher zur Überbrückung von längeren Schlechtwetter Perioden

Links in Abb. 35 werden die Temperaturen von Saisonspeicher (Trf) und Nutzspeicher (THVc) eingelesen, subtrahiert und mit einer Hysterese verglichen (verhindert Schwingungen in der Schaltung).

- Wenn $Trf > (THVc + 5)$ ist, wird die Transferpumpe eingeschaltet und läuft solange bis $Trf = THVc$
- Unterhalb von $45^{\circ}C$ ($Tmin$) läuft die Transferpumpe hingegen nicht.

4.4.2. Strategie 2: thermische Verluste reduzieren

Um den Verlust zu begrenzen und die Speichereffizienz über ein Jahr hinweg zu verbessern wurde die maximale Temperatur des Speichers bis Mitte August auf $27^{\circ}C$ begrenzt. Diese Grenze wurde wegen der maximal möglichen Quellentemperatur der WP (max. $25^{\circ}C$) gewählt.

Somit konnten die thermischen Verluste auf ein Minimum gehalten werden, ohne die ursprüngliche geplante Nutzung des Saisonspeichers negativ zu beeinflussen.

4.5. Kritische Betrachtung

Die Optimierungsstrategien zeigen klar, wo viel Verbesserungspotential besteht und wo nur wenig zu holen ist. So können mit den Prioritätsregeln für die Steuerung der Solarwärme Richtung Speicher A oder B keine grossen Verbesserungen aufweisen, während eine Anpassung der Sperrzeiten wegen der grossen Differenz zwischen Niedertarif und Hochtarif Stromkosten bezüglich Stromkosten sehr viel ausmacht.

Des Weiteren sind die Optimierungen betreffend Saisonspeicher manchmal widersprüchlich. So wird die Prioritätsregelung (Kapitel 4.1.1) verhindern, dass der Saisonspeicher aufgeladen wird zugunsten des Nutzspeichers. Die Strategie zur optimalen Verwaltung des Saisonspeichers (Kapitel 4.4.2) hält die Temperatur im Saisonspeicher tief, während die Strategie zur erhöhten solaren Autonomie (Kapitel 4.4.1) versucht die hohen Temperaturen des Saisonspeichers besser auszunutzen.

Mit der Kombination aller Strategien kann also nicht die Summe aller Energie- bzw. Kosten- gewinne erwartet werden, da die Wechselwirkung der Varianten untereinander auch einen grossen, z.T. negativen Einfluss darstellt.

5. Varianten für Simulation und Vergleich

Um aufzuzeigen, wie die Anlage effizienter betrieben werden kann, und wo Sparpotential vorhanden ist, einerseits im gesamten Energieverbrauch, andererseits in den Elektrizitätskosten, wurden verschiedene Varianten mit einem Referenzmodell verglichen.

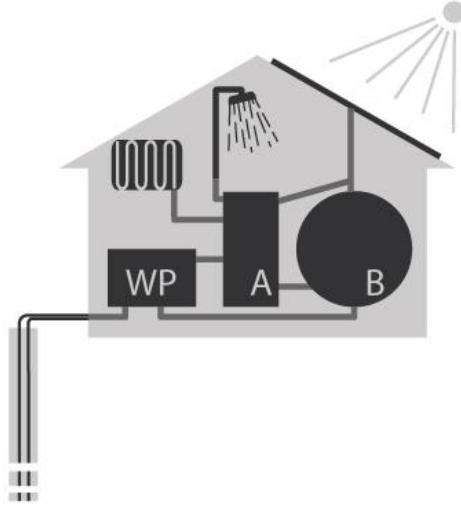
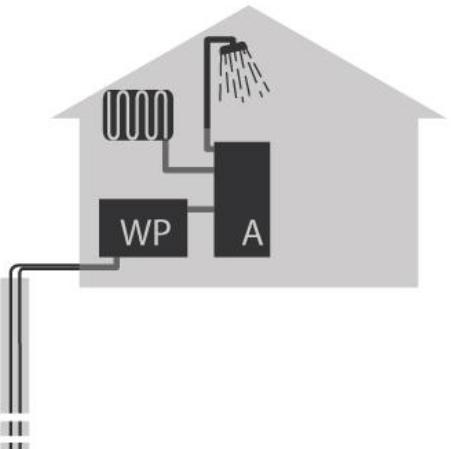
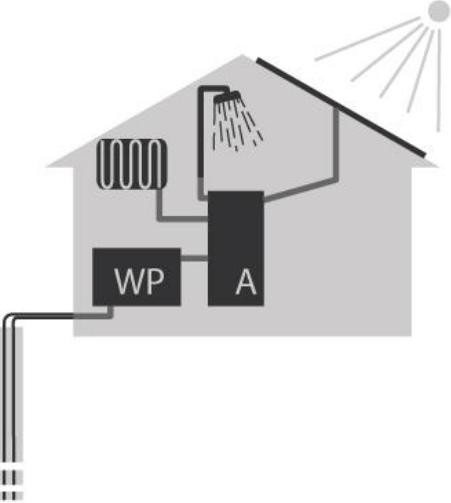
Modell und Beschreibung	Schema
<p>A: Referenzmodell</p> <p>Dieses Modell entspricht der tatsächlichen Anlage. Die Solarthermie liefert Wärme an Speicher A oder B. Speicher B dient neben der EWS als zweite Quelle für die Wärmepumpe um dessen JAZ zu verbessern.</p> <p>Komponenten:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Erdwärmesonde – Wärmepumpe – Nutzspeicher A – Saisonspeicher B – Solarthermie 	
<p>B: Ohne Solaranlage</p> <p>Zum Vergleich wird die Anlage ohne Solaranlage simuliert. Der Speicher B wird natürlich dadurch auch überflüssig</p> <p>Komponenten:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Erdwärmesonde – Wärmepumpe – Nutzspeicher A 	
<p>C: Ohne Saisonspeicher</p> <p>Wenn der Saisonspeicher B weggelassen wird, kann die Sonne nur direkt genutzt werden. Die JAZ der WP wird dadurch verschlechtert, es wird aber weniger Sonnenenergie ungebraucht eingelagert.</p> <p>Komponenten:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Erdwärmesonde – Wärmepumpe – Nutzspeicher A – Solarthermie 	

Tabelle 3: Schema der simulierten Varianten A, B und C

5.1. Varianten 1A, 1B, 1C:

Die erste Gruppe (siehe Tabelle 3) dient vor allem als Referenz für die übrigen Simulationsmodelle. Sie entsprechen der aktuellen Konstellation der Anlage und berücksichtigen keinerlei Stromnetz-Sperrzeiten oder Benutzereinstellungen für die Wärmepumpe.

5.2. Varianten 2A, 2B, 2C

Die zweite Gruppe berücksichtigt sowohl die WP-Sperrzeiten des Energielieferanten, sowie die vom Installateur, bzw. Hausbesitzer eingestellten WP-Sperrzeiten. Die Sperrzeiten werden normalerweise ausgelegt um einen maximalen Komfort zu haben, und um die WP möglichst nur dann einzusetzen, wenn Wärme gebraucht wird. Die Sperrzeiten sind in Kapitel „5.5 Simulationsparameter“ definiert.

5.3. Varianten 3.1A, 3.2A, 3.3A, 3.4A

Die dritte Gruppe integriert Optimierungen in die Referenzanlage 2A. Dabei wird jeweils nur eine Optimierungs-Strategie angewendet, um dessen Einfluss deutlicher zu sehen. Die Optimierungen betreffen:

3.1A: Eine optimierte Solarschaltung, wobei die solare Wärme bei ausreichender Solarstrahlung jeweils mit mehr Priorität den Nutzspeicher A auflädt, sobald die Solarstrahlung dies zulässt

→ mit der globalen Solarstrahlung eines Messgeräts kann das Wärmepotential der Solaranlage berechnet werden und somit vom tief-Temperatur Zyklus des Saisonspeichers in den hoch-Temperatur Zyklus des Nutzspeichers gewechselt werden, vergleiche dazu die Untersuchungen in [10], bzw. in Kapitel „0

Optimierungsstrategien“.

3.2A: Optimierung der benutzerdefinierten Sperrzeiten für die WP

Mehrere Simulationsversuche haben klar aufgezeigt, dass es zwar weniger energieeffizient, dafür umso kosteneffizienter ist, den Speicher für WW und Heizung bevorzugt während der Nacht aufzuladen. Diese Entdeckung ist nichts neues, haben doch viele Häuser heute noch elektrische Boiler die nur in der Nacht aufladen (früher konnten die EW nicht die nötigen Stromspitzen liefern). Daher wurde für die Produktion von WW (höheres Temperaturniveau) die Hochtarifzeit komplett blockiert, während für die Produktion von Heizungswärme (tieferes Temperaturniveau), der Steuerung freien Lauf gewährt wurde.

3.3A: Optimierte Ladestrategie für den Saisonspeicher

Um die hohen thermischen Verluste zu verhindern, bzw. verkleinern, wurde das Aufladen des Saisonspeichers zwischen Januar bis Anfangs August auf maximal 27°C begrenzt. So mit kann die WP trotzdem während dem Grossteil des Jahres bei optimalen Bedingungen arbeiten, und weniger ungebrauchte solare Wärme wird im Saisonspeicher verloren.

3.4A: Transfer der Wärme vom Saisonspeicher direkt in den Nutzspeicher zur Überbrückung sonnenfreier Tage:

Wenn die Temperatur im Nutzspeicher A (obere Schichten) mindestens 5°C kälter ist als die vom Saisonspeicher B, wird ein Transfer der Wärme aktiviert. Somit können längere sonnenfreie Perioden mithilfe der Wärme des Saisonspeichers problemlos überbrückt werden, und die Effizienz des Saisonspeichers wird erhöht.

5.4. Varianten 4.1A, 4.2A, 4.3A, 4.4A

Hier werden für 4.1A alle vorhergehenden Optimierungen kombiniert, ausser für 4.2A, bei welcher die Variante 3.3A (Laden des Saisonspeichers monatlich begrenzt) weggelassen wird. Für 4.3A wurde die Leistung der Solarpumpe halbiert, während für 4.4A die WP komplett gesperrt wird für Hochtarif.

4.1A: Kombination aller Optimierungen (Optimierte Solarschaltung, optimierte WP-Sperrzeiten, optimierte Ladestrategie für Saisonspeicher, Wärmetransfer zwischen Saisonspeicher in Nutzspeicher)

4.2A: Kombination aller Optimierungen plus Bedingungen für wirtschaftlichen Betrieb der WP mit Saisonspeicher als Quelle („solares Doping“)

4.3A: Identisch mit 4.1A, aber mit Hocheffizienz Solarpumpe: 90 W max. mit 0.16 kg/s Durchfluss

4.4A: Identisch mit 4.1A, aber WP nur in Niedertarif Zeit laufen lassen

5.5. Simulationsparameter

Das WW wird in einem Durchlauferhitzer im Nutzspeicher A erwärmt. Dadurch entfällt die Gefahr von Legionellenbildung bei tieferen Temperaturen und 40 – 55°C heisses Wasser kann den Bedarf zufriedenstellend decken. Die Heiz-Temperaturen sind ebenfalls tief (25-35°C), dank einer Niedertemperatur - Fussbodenheizung.

Einschaltzeiten WP

WW: 5h00-7h00, 10h00-11h00, 17h00-20h00 erlaubt (vom Benutzer gewählt)

Heizung: 3h00-19h00 erlaubt (vom Benutzer gewählt)
Groupe-E: 11h-12h15 blockiert (vom Stromlieferant definiert)

Temperaturen WP

WW: Einschalten bei 40°C Speichertemperatur/ Ausschalten bei 55°C
Heizung: Einschalten bei 25°C / Ausschalten bei 35°C

Sonstige Konstanten

Solarpumpe: Durchfluss 0.25 kg/s bei 195W

Heizbedarf Haus: 13'000 kWh/Jahr

WW-Bedarf: 2'500 kWh/Jahr

Für die Elektrizitätskosten wurden die Stromtarife von 2011 von „Groupe-E“ angenommen (Hochtarif: 20.5 Rp, 7h-21h täglich, Niedertarif: 12.3 Rp, 21h-7h täglich). Die Effizienzen der Speicher wurde mit der Division „gebrauchte Energie“/„erzeugte Energie“ gerechnet. Die interne Energieänderung kann weggelassen werden, da jeweils zu Beginn und Ende des Jahres dieselbe Temperatur im Saisonspeicher B ist. Die Temperaturdifferenz im Nutzspeicher A zwischen Beginn und Ende der Simulation wird vernachlässigt.

6. Resultate

Für jede Simulation wurden die wichtigsten Resultate ausgewertet um einen Vergleich des Energieverbrauchs bzw. die Jahresarbeitszahlen (JAZ) herauszulesen. Dabei ist die JAZ der Anlage folgendermassen berechnet worden:

$$JAZ_{Anlage} = \frac{Q_{total}}{E_{elec}} = \frac{15'500kWh}{E_{elec}}$$

Wobei Q_{total} =die Heizwärme + WW-Wärmemenge ist, und $E_{elec} = E_{WP} + E_{solar} + 70kWh$ der gesamte Stromverbrauch darstellt (Geräte plus Hilfsaggregate)

		Solar Wärme [kWh]	Solar Strom [kWh]	WP Wärme [kWh]	WP Strom [kWh]	JAZ WP	JAZ Anlage	Stromkosten [CHF]
1A:	Referenzmodell	13070	440	14910	3216	4.64	4.16	689
1B:	Ohne Solaranlage	-	-	16510	3939	4.19	3.87	719
1C:	Ohne Speicher B	4406	235	13077	3047	4.29	4.62	594

Tabelle 4: Resultate der Varianten 1, mit Wärme und Strom in kWh und Kosten in CHF, Tabellenbestwerte jeweils grün gekennzeichnet

Anhand der Resultate der Varianten 1A, 1B und 1C sieht man sofort, dass zwar die JAZ für A1 am höchsten ist (grün gekennzeichnet), jedoch die Variante 1C insgesamt deutlich weniger elektrische Energie benötigt (daher höhere Anlagen JAZ), und auch viel weniger Stromkosten verursacht. In diesem Fall wäre daher die direkte Solarnutzung vorteilhaft trotz schlechterer JAZ der WP.

		Solar Wärme [kWh]	Solar Strom [kWh]	WP Wärme [kWh]	WP Strom [kWh]	JAZ WP	JAZ Anlage	Stromkosten [CHF]
2A:	Referenzmodell	12950	441	14786	3120	4.74	4.27	703
2B:	Ohne Solaranlage			16430	3852	4.27	3.95	751
2C:	Ohne Speicher B	4400	235	13083	3048	4.29	4.62	597

Tabelle 5: Resultate der Varianten 2, mit Wärme und Strom in kWh und Kosten in CHF, Tabellenbestwerte jeweils grün gekennzeichnet

Wenn die WP nur während den vorgegebenen Zeiten (vom Benutzer und Stromversorger definiert) operieren darf, ergibt sich ein Vorteil für die JAZ der WP. Die direkte Solarnutzung bleibt jedoch die beste Lösung, da insgesamt weniger elektrische Energie verbraucht wird,

und auch weniger Stromkosten anfallen. Insgesamt führen die Sperrzeiten für alle Varianten zur einer Erhöhung der Stromkosten da öfter zu Hochtarifzeiten Wärme produziert wird.

		Solar Wärme [kWh]	Solar Strom [kWh]	WP Wärme [kWh]	WP Strom [kWh]	JAZ WP	JAZ Anlage	Stromkosten [CHF]
3.1A:	Optimierte Solarschaltung	12554	372	14505	3073	4.72	4.41	679
3.2A:	Optimierte Sperrzeiten	12999	445	14860	3117	4.78	4.27	620
3.3A:	Optimierte Ladestrategie für Saisonspeicher	11324	418	14503	3068	4.73	4.36	687
3.4A:	Wärmetransfer von Saisonspeicher B zu Nutzspeicher A	12932	438	14576	3093	4.71	4.30	692

Tabelle 6: Resultate der Varianten 3, mit Wärme und Strom in kWh und Kosten in CHF, Tabellenbestwerte jeweils grün gekennzeichnet

Durch die Optimierung der Solarschaltung (3.1A) kann zwar eine grosse Effizienzsteigerung erreicht werden ($JAZ_{sol}=12554/372=33.7$), dies vermag allerdings weder die Effizienz des Saisonspeichers zu erhöhen, noch die Stromkosten entscheidend zu senken. Dafür kann mit der Anpassung der Sperrzeiten (3.2A) ein Kostenersparnis von 10-20% (je nach Monat) erreicht werden. Auch die optimierte Ladestrategie des Saisonspeichers (3.3A) sowie die Wärmetransfer dessen in den Nutzspeicher A (3.4A) steigern die JAZ der Anlage, allerdings wiederum mit geringem Einfluss auf die Stromkosten. Bei 3.1A wird insgesamt am wenigsten Strom verbraucht, und die Stromkosten sind bei 3.2A am tiefsten. Eine Kombination dieser Varianten verspricht daher eine optimale Kompromisslösung.

		Solar Wärme [kWh]	Solar Strom [kWh]	WP Wärme [kWh]	WP Strom [kWh]	JAZ WP	JAZ Anlage	Stromkosten [CHF]
4.1A:	Kombination von 3.X	11197	367	14151	3000	4.72	4.52	583
4.2A:	„Doping“ Bedingungen	12311	297	13850	3006	4.61	4.60	569
4.3A:	90W Solarpumpe	11065	179	14141	3001	4.71	4.77	543
4.4A:	Nur Niedertarifstrom	10976	356	11873	2636	4.50	5.06	436

Tabelle 7: Resultate der Varianten 4, mit Wärme und Strom in kWh und Kosten in Sfr, Tabellenbestwerte jeweils grün gekennzeichnet

Bei der Lösung 4.4A wurde der grösste Stromkonsument, die WP, für die WW-Produktion und für die Heizung nur zu Niedertarifzeiten gefahren. Dadurch verschlechtert sich die JAZ der WP, aber die Stromkosten sinken um 25%. Allerdings muss man in Kauf nehmen, dass der Heizbedarf in den kalten Tagen nicht mehr gedeckt ist. Die Vorlauftemperatur für die Heizung wurde zwar prophylaktisch von 35 auf 40°C erhöht, um genügend Wärme zur Verfügung zu haben für die Heizung während der Strom Niedertarifzeit, aber bei Außentemperaturen unter 5°C reicht diese nicht aus, und die Zimmertemperatur würde kontinuierlich sinken (siehe Abb. 36). Eine Zusatzheizung in Form eines Cheminées oder ein Senken des Heizbedarfs (z.B. durch das nicht-Beheizen von leeren Bürozimmern oder Schlafzimmern) könnte die fehlende Energie erbringen.



Abb. 36: Wenn die WP nur in der Nacht mit Niedertarif Strom betrieben wird (Variante 4.4A), kann der Heizbedarf im Winter nicht genügend gedeckt werden. Das Speichervolumen müsste dazu vergrössert werden

6.1. Vergleich und Diskussion

Geht es darum das Referenzmodell, bzw. die bestehende Anlage durch eine Anpassung der Gebäudesteuerung zu verbessern, kann das grösste Potential aus einer Anpassung der Sperrzeiten der WP gewonnen werden. Die Variante 3.2A verspricht gegenüber der Variante 2A eine Einsparung von 12% an Stromkosten.

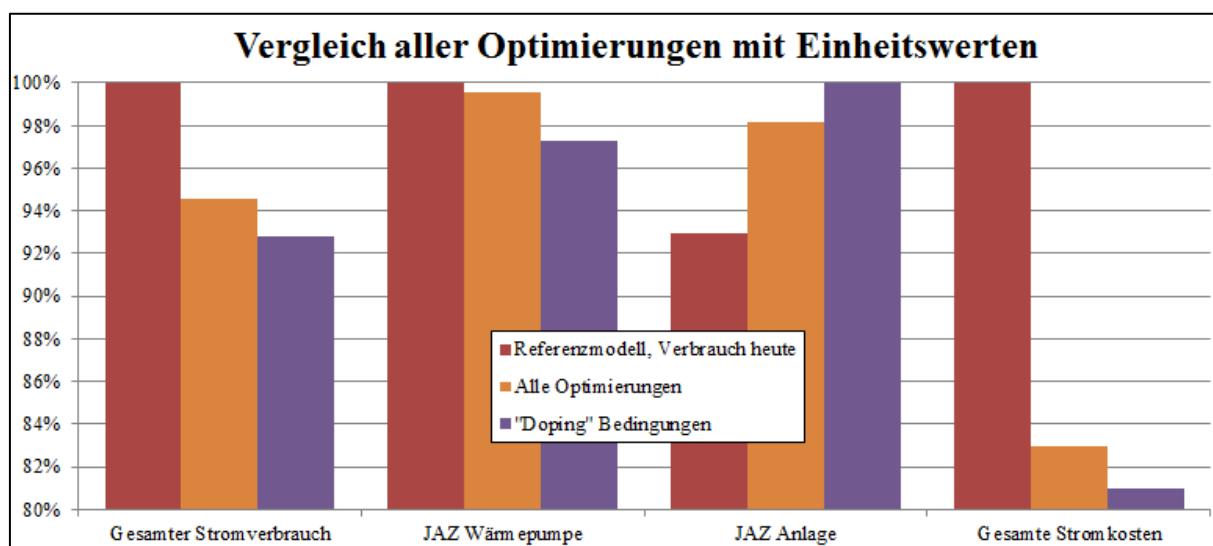


Abb. 37: Auf 100% genormte Werte für „Gesamter Stromverbrauch“, „Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe und Anlage“ und „Gesamte Stromkosten“ für die Varianten 2A, 4.1A und 4.2A

Der Einsatz des Saisonspeichers bringt zwar für die WP immer eine grosse Effizienzsteigerung bei der JAZ (von 4.3 ohne Speicher bis 4.78 mit Speicher), die JAZ der Anlage steigt jedoch nicht linear mit der WP JAZ, sondern hängt davon ab, wie effizient die Wärmeproduktion der Solaranlage läuft, bzw. dessen Wärmespeicherung im Saisonspeicher. Dabei ist

weniger das Temperaturniveau wichtig, sondern der Zeitfaktor. Tatsächlich wird die gespeicherte Wärme immer erst lange nach ihrer Produktion wieder gebraucht. Zudem wird der Einsatz von Solarwärme wegen einer überdimensionierten Zirkulationspumpe (195W) überdurchschnittliche Betriebskosten verursachen, da die Solarwärme immer im Strom Hochtarif läuft. Eine Ausweichung dieser Pumpe könnte den Stromverbrauch der Solarzirkulation, und somit auch deren Stromkosten, halbieren ohne negative Einflüsse wegen dem geringeren Durchfluss (siehe Variante 4.4A in Kapitel 6 Resultate).

Wird der Saisonspeicher ganz weggelassen, wird die Solaranlage gezwungen, nur dann zu produzieren, wenn die Temperatur höher ist als der Nutzspeicher. Die technische Effizienz der Solaranlage ist dann zwar niedriger, wegen thermischen Verlusten, aber die wirtschaftliche Effizienz: Kosten/kWh ist besser. Die Variante mit „solarem Doping“ der WP ergibt zwar nur eine WP JAZ von 4.6, dafür ist aber auch die Anlage JAZ = 4.6, und die Stromkosten sind am tiefsten.

Bei den oben gezeigten Resultaten wird klar, dass der Saisonspeicher in der eingesetzten Konfiguration nur einen kleinen Vorteil im Vergleich zur direkten Solarwärme Nutzung bringt. Für Anlagen, welche wegen der Bodenbeschaffenheit oder sonstigen Bedingungen jedoch keine EWS bauen dürfen, kann die indirekte Solarwärmennutzung als Quelle der WP mithilfe eines grossen, gut isolierten Speichers aber sowohl wirtschaftlich, wie auch energetisch sehr sinnvoll sein.

6.2. Optimale Lösung mit genetischen Algorithmen

Dank eingehender Analyse der Anlage und den dazugehörenden Messungen konnten die meisten Optimierungsmöglichkeiten analytisch oder empirisch gefunden werden. Daraus folgten die verschiedenen Optimierungsstrategien, welche alle analytisch nachgewiesen und berechnet wurden. Nun gibt es aber bei komplexen Systemen immer auch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten des Systems, die auf den ersten Blick nicht sichtbar sind, und oft auch dem zweiten Blick verschollen bleiben. Um auch den Einfluss solcher Wechselwirkungen auf die Systembilanz analysieren zu können, wurde im Simulationsmodell verschiedene Steuerungsparameter, aber auch konstante Größen, wie Speicher-volumen und Isolation der thermischen Speicher als Variablen definiert und in ModeFrontier, einer Software zur Verwaltung und Ausführung von Versuchsplänen mit heuristischen Algorithmen eingeführt.

Durch eine Variation der definierten Parameter konnte zudem die Sensibilität letzterer auf die Zielsetzungen: Gesamte Stromkosten, gesamter Stromverbrauch, JAZ WP, Effizienz Saisonspeicher, gefunden werden. Diese zeigt auf, welche Parameter für welche Zielsetzung von Entscheidung sind, und welche nur eine kleine Rolle spielen.

6.2.1. Aufbau einer Analyse in ModeFrontier

Die Integration einer Matlab-Simulation in ModeFrontier ist denkbar einfach. Nachdem im Simulationsmodell die Variablen definiert wurden, wird in ModeFrontier mit dem exakt gleichen Namen (Grossschreibung beachten) der variable Bereich für jeden Wert bestimmt. Die Variablen werden darauf mit dem Eingang des Matlab-blocks im „Workflow“ verbunden. ModeFrontier verbindet sich mit dem „Workspace“ von Matlab; sowohl die Variablen, wie auch die Resultate, werden von ModeFrontier da gesucht. Für eine erfolgreiche Kommunikation muss also ein einzelner Wert (array) mittels des Blocks „To Workspace“ von Simulink an den „Workspace“ gesendet werden.

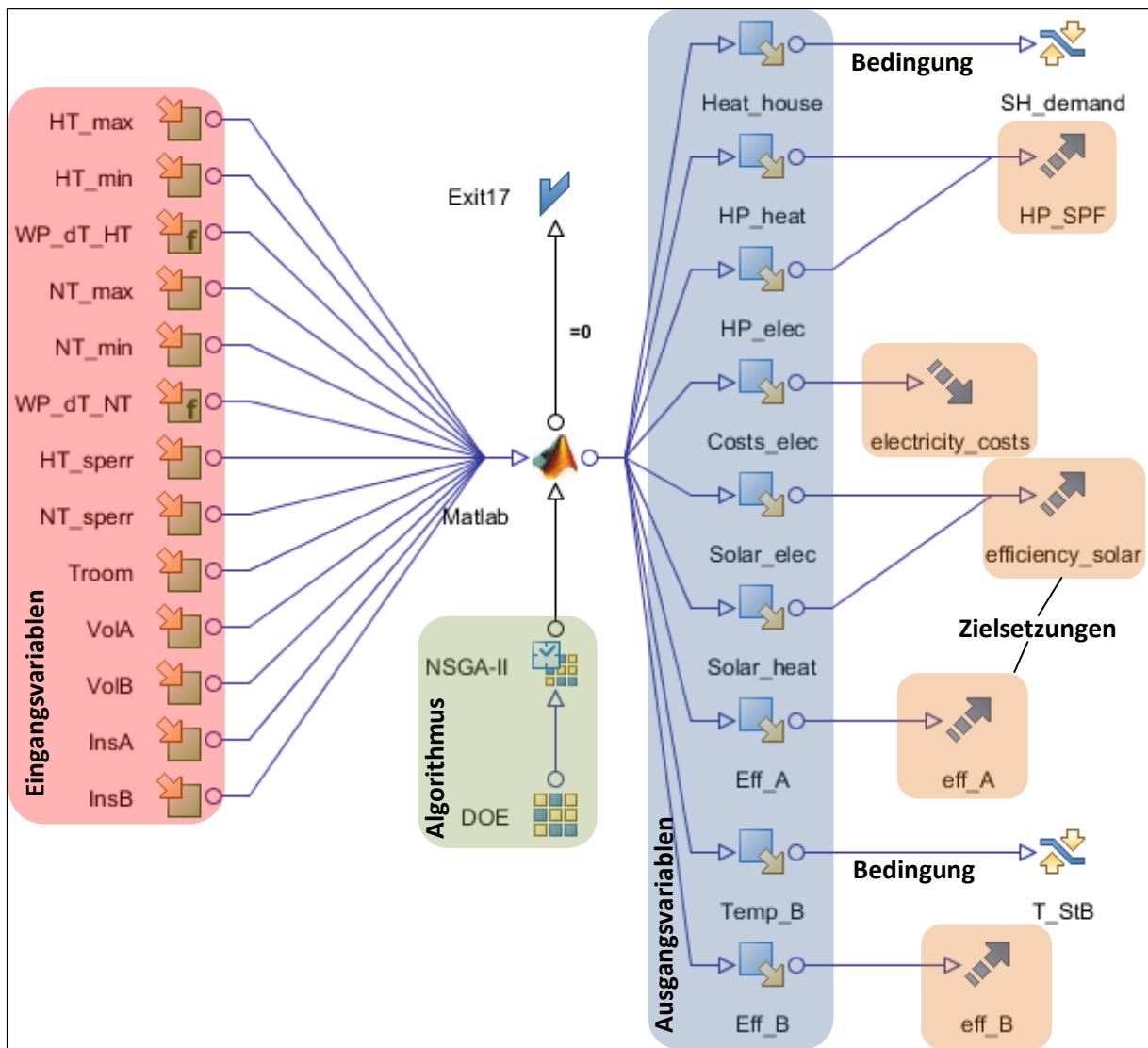


Abb. 38: Integration eines Matlab-Simulink Modells in ModeFrontier

Die Werte der Ausgangsvariablen können direkt in ModeFrontier weiter bearbeitet und in Bedingungen integriert werden. Ist eine Bedingung nicht erfüllt, wird ModeFrontier dies für die Wahl der nächsten Eingangsvariablen berücksichtigen.

6.2.2. Korrelationsmatrix

Die Wechselwirkungen der verschiedenen Eingangsvariablen und Zielsetzungen werden in der Korrelationsmatrix dargestellt (Abb. 39). Die Stromkosten werden am meisten von der Sperrzeit des Niedertemperatur-Anschlusses beeinflusst, die JAZ_{sol} hängt stark vom Volumen des Saisonspeichers, und der Isolation der beiden thermischen Speicher ab. Während die meisten Wechselwirkungen logisch erscheinen, sind andere wiederum kaum nachvollziehbar, aber offensichtlich das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels zahlreicher Faktoren.

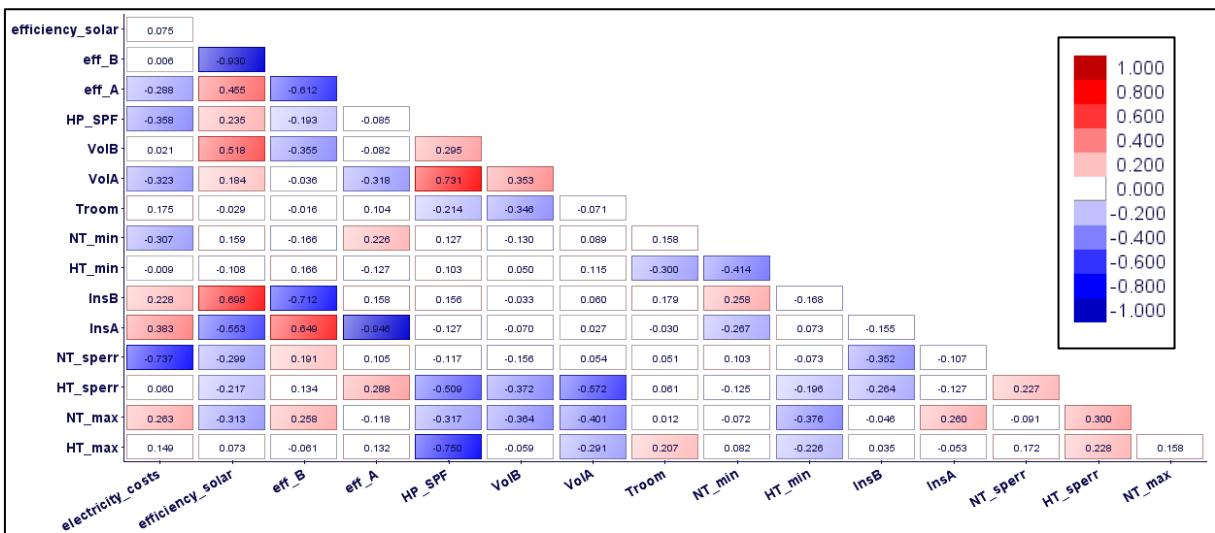


Abb. 39: Die Korrelationsmatrix zeigt Wechselwirkungen zwischen Variablen und Zielsetzungen

Nachvollziehbare Beziehungen sind z.B.:

- Die Vorlauftemperatur für WW beeinflusst indirekt proportional die JAZ der WP
 - Die Isolation der Speicher beeinflusst direkt proportional ihre Effizienz
 - Die Sperrzeit der WP wirkt sich stark auf die Stromkosten aus

Schwieriger nachvollziehbar sind allerdings die folgenden Beziehungen:

- Eine schlechtere Isolation des Speichers A bewirkt eine höhere Effizienz des Speichers B???
 - o Grund: Da der Speicher A mehr Wärme verliert, kann der Wärme-output von Speicher B vergrössert werden, und somit die Effizienz!
 - Eine schlechtere Isolation des Speichers B bewirkt eine höhere Effizienz der Solaranlage???
 - o Grund: Wegen höheren thermischen Verlusten kann auch mehr Solarenergie bezogen werden, die Systemeffizienz ist aber damit schlechter!

Diese und andere Resultate sind der Beweis dafür, dass wir mit für uns logischen, linearen Überlegungen, bei einem komplexen Zusammenspiel von unterschiedlichen Faktoren schnell an eine menschliche Grenze stossen. Programme wie ModeFrontier können uns dabei helfen, zuvor „unsichtbare“ Zusammenhänge zu finden und neue Lösungen, bzw. Optimierungen zu entwickeln. Wir dürfen aber nicht blind den Resultaten trauen, wie obige Kurzanalyse der Korrelationsmatrix gezeigt hat, sondern müssen die gefundenen „optimalen“ Lösungen vorsichtig analysieren und mit anderen Lösungen vergleichen um nicht Fehlschlüsse zu ziehen und aus der Optimierung eine Verschlechterung der Anlage zu machen.

6.2.3. Beste Lösungen

Für jedes der gegebenen Zielsetzungen wurde durch ModeFrontier die optimale Parametersierung berechnet. Wegen widersprüchlichen Zielsetzungen gibt es daher keine allgemein gültige Lösung, sondern eine optimale Kompromisslösung. Aus der Gesamtheit der Simulationen (siehe Graphik der „Parallel Coordinates“ auf Abb. 40) sieht man die möglichen optimalen Lösungen für Stromkosten (minimal CHF 537 möglich), JAZ der WP (maximal 4.93 möglich), sowie JAZ der Solaranlage (maximal 35.7 möglich).

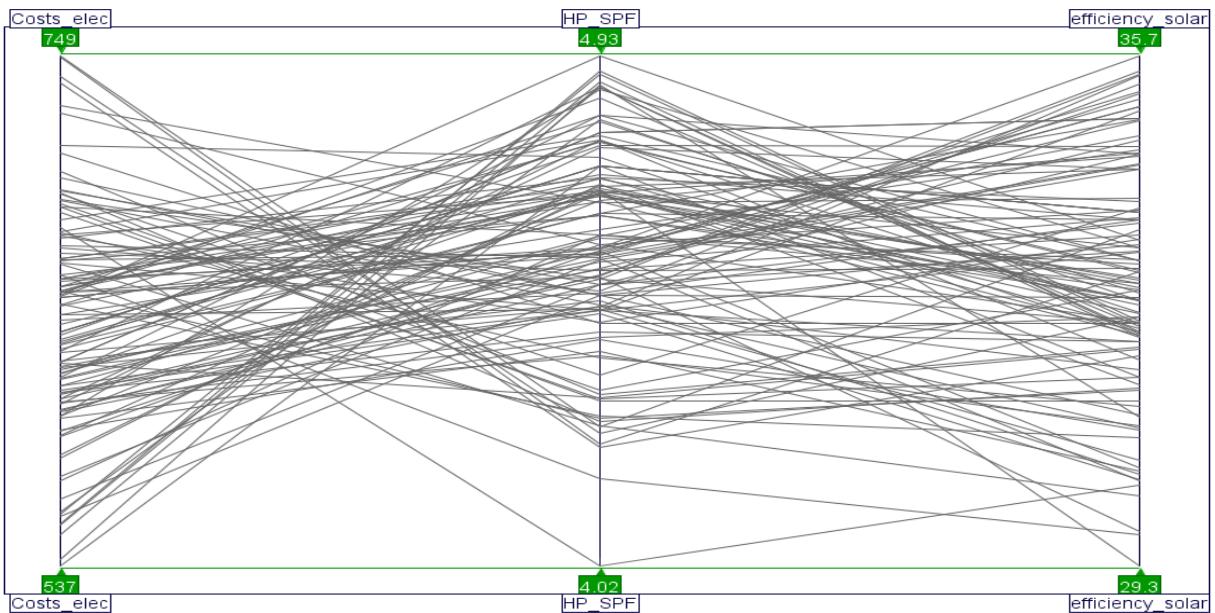


Abb. 40: Alle Simulationen mit Bestwerten: Stromkosten minimal 537 CHF möglich, JAZ WP maximal 4.93 möglich und JAZ Solaranlage maximal 35.7 möglich

Wir können nun jede Zielsetzung isolieren und ihre Auswirkung auf die anderen Zielsetzungen anschauen.

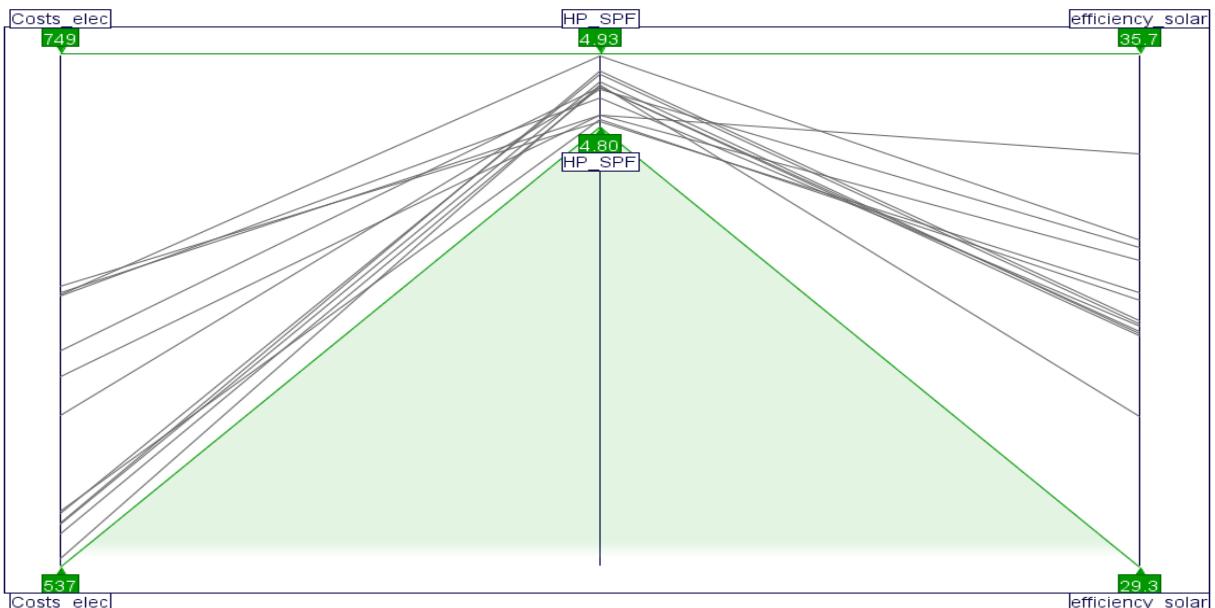


Abb. 41: Einfluss der JAZ der WP auf andere Zielsetzungen

Bei der Begrenzung der Lösungen auf die besten Werte bezüglich WP sieht man, dass hohe JAZ_{WP} auch tiefe Stromkosten ermöglichen. Die JAZ_{sol} der Solaranlage bleibt jedoch im Mittelmaß der Möglichkeiten.

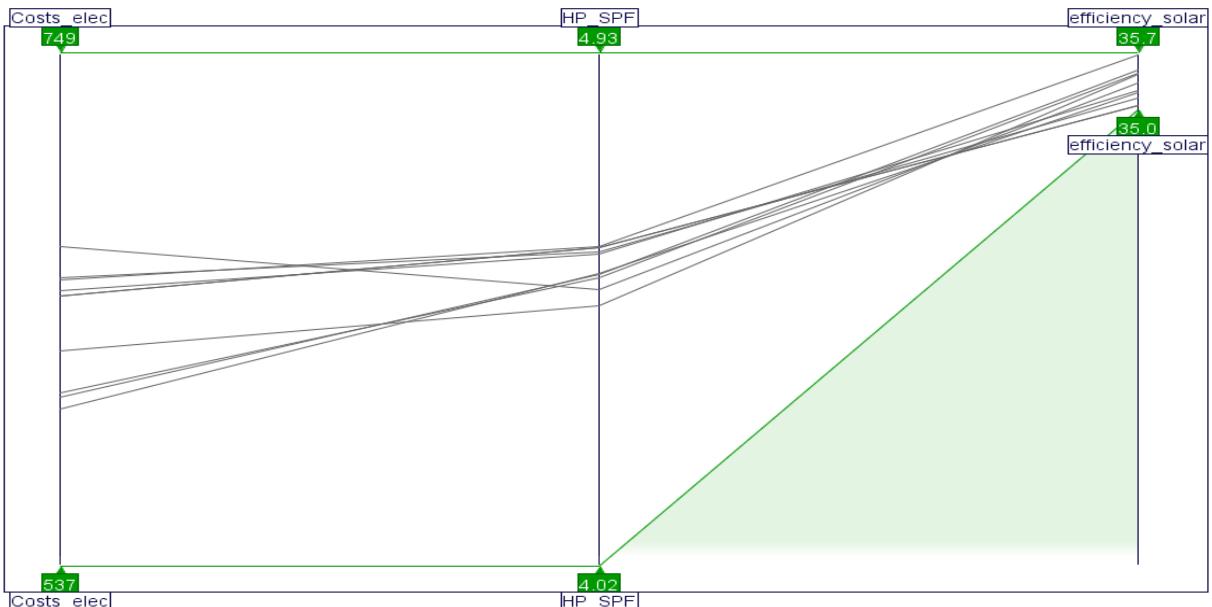


Abb. 42: Einfluss der JAZ der Solaranlage auf andere Zielsetzungen

Wenn die JAZ_{sol} erhöht werden will, müssen Abstriche auf Seiten der Stromkosten und JAZ der WP gemacht werden. Dies hängt auch sehr von der Leistung der Zirkulationspumpe der Solaranlage ab. Bei leistungsstarken Zirkulationspumpen werden hohe solare Erträge hohe Stromkosten verursachen, und bei effizienten, stromsparenden Zirkulationspumpen umgekehrt.

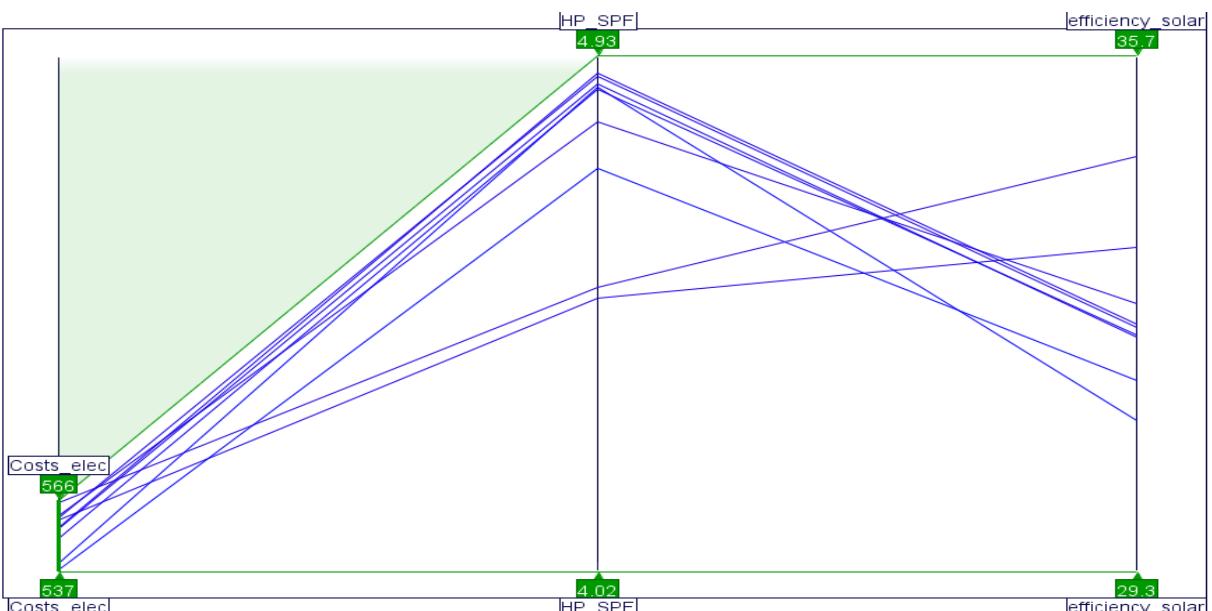


Abb. 43: Einfluss der tiefsten Stromkosten auf andere Zielsetzungen

Wie in Abb. 43 ersichtlich können die tiefsten Stromkosten nur für mittelmässige JAZ_{sol} erzielt werden. Die JAZ_{WP} hingegen bleibt für alle tiefen Stromkosten jeweils hoch.

Wenn eine Zielsetzung in die Tat umgesetzt werden soll, können entweder auf der Korrelationsmatrix (Abb. 39) die Parameter mit den grössten Einflüssen gesucht werden oder mit der Graphik der „Parallel Coordinates“ die entsprechenden Werte gesucht werden. Für eine maximale JAZ_{WP} z.B. sieht man auf der Korrelationsmatrix, dass die Temperatur des Hochtemperatur-Anschlusses der WP, sowie das Volumen des Nutzspeichers A den grössten Einfluss haben. Auf den „Parallel Coordinates“ (Abb. 44) sieht man das gleiche Bild: Ausschliesslich tiefe HT-Werte (Hochtemperatur Anschluss der WP) kombiniert mit grossen

Speicher A Volumen erlauben hohe JAZ_{WP} . Die übrigen Parameter zeigen eine grössere Streuung, was der Beweis für eine kleinere Korrelation ist.

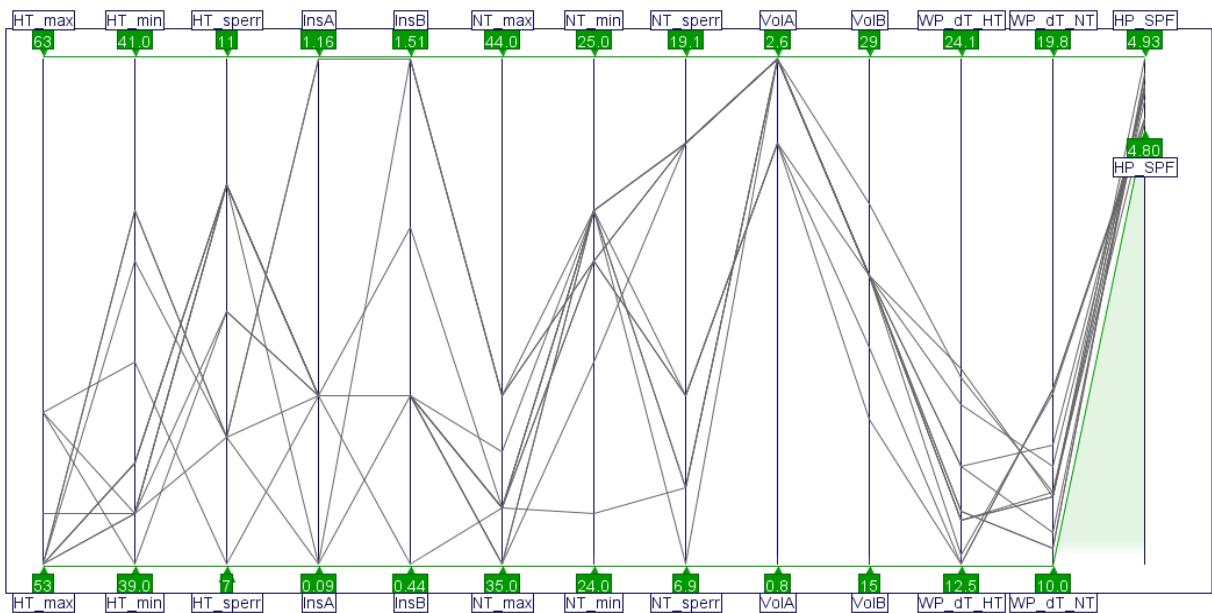


Abb. 44: Parallel Coordinates Graphik mit Zielsetzung JAZ_{WP} und Eingangsvariablen

Zusammenfassend können wir für jede Zielsetzung die wichtigsten 2-3 Parameter sowie die dazugehörigen optimalen Werte aufschreiben (siehe Tabelle 8).

Zielsetzung	Wichtigsten Parameter	Beste Resultate
JAZ_{WP}	Hochtemperatur Anschluss der WP Volumen Nutzspeicher	Tiefe HT-Werte geben bessere Resultate Hohe Volumen geben bessere Resultate
JAZ_{sol}	Isolation Speicher B	Schlechte Isolationen geben bessere Resultate*
	Hochtemperatur Anschluss der WP	Hohe HT-Werte geben bessere Resultate*
Stromkosten	Sperrzeit des NT-Anschlusses der WP Isolation Speicher A	Wenn die WP weniger im Hochtarif läuft, gehen die Kosten auch herunter Bessere Isolationswerte des Speichers A ergeben tiefere Kosten

Tabelle 8: Zusammenfassung der Zielsetzungen mit wichtigsten Einflussfaktoren (*nicht zu empfehlen)

Obwohl in der Tabelle 8 steht, dass eine schlechtere Isolation des Speichers B eine bessere JAZ_{sol} verspricht, ist das Anstreben dieses „Optimalwerts“ nicht empfehlenswert, da die Gesamtbilanz der Anlage schlechter werden würde.

7. Schlussfolgerungen

Die Resultate der Analysen am Objekt „Hauteville“ beweisen, dass auch gut isolierte Gebäude noch Sparpotential bei der jährlichen Stromkosten bzw. Energiebilanz aufweisen. Offensichtlich kann man mit Verbesserungen der Gebäudehülle (Isolation) oder effizienteren Anlagen am meisten Energie sparen. Oft ist dies aber aus finanziellen Gründen nicht (oder nur begrenzt) möglich. So könnte im Objekt „Hauteville“ mit einer Verbesserung der Isolation, mit dem Einbau einer Gebäudelüftung mit Wärmerückgewinnung oder mit einem Austausch der überdimensionierten Solarpumpe viel Energie gespart werden.

Die vorgeschlagenen Verbesserungen in diesem Bericht sind daher absichtlich alle unabhängig von der „Hardware“ der technischen Anlage, und können somit ohne zusätzliche Veränderungen oder Investitionen direkt in der Gebäudesteuerung „gratis“ umgesetzt werden.

Die grösste Kosteneinsparnis (17%) kommt mit einer besseren Ausnutzung der Niedertarif Stromzeiten. Es kann daher für alle Häuser mit WP empfohlen werden, diese im Rahmen des Möglichen auszunutzen. Eine Berechnung der Leistung der WP welche in „Hauteville“ installiert ist, hat gezeigt, dass der Wärmebedarf im Winter bei Vollast nicht vollständig innerhalb der Niedertarifzeit gedeckt werden kann. Eine Kompromiss-Lösung musste angenommen werden. Für Häuser in Planung, welche ein Stromprodukt mit Niedertarif benutzen werden, sollte der thermische Speicher entsprechend dimensioniert werden.

Trotz der Kostenoptimierung, welche sich negativ auf die Primärenergie-Bilanz auswirkt, konnten mit der Anpassung der Steuerung 5.5% an Primärenergie eingespart werden. Im Saisonspeicher B wurden thermische Verluste eingespart durch ein Verhindern des Aufladens bei Nichtgebrauch, und die Steuerung der Solaranlage wurde optimiert, um die Wahl welcher Speicher aufgeladen wird, effizienter zu gestalten. Bei der indirekten Verwendung der Solarwärme als „Doping“ der Quellentemperatur für die WP konnte analytisch gezeigt werden, ab welcher Globalstrahlung sich ein „Doping“ aus finanziellen Gründen lohnen würde.

7.1. Regeln zur optimierten Gebäudesteuerung

Die empirischen Untersuchungen am Objekt „Hauteville“ sowie die Simulationen beweisen, dass mit einfachen Mitteln die Betriebskosten, aber auch der Energiebedarf gesenkt werden kann. Nachfolgend werden verschiedene „Empfehlungen“ bekannt gegeben, und deren Auswirkung auf die Energie- und Kostenbilanz der Anlage.

7.1.1. Bekannte Energiespartipps für Jedermann:

- Nur kurz, dafür mehrmals täglich mit Durchzug lüften (in der Heizsaison)
 - o Grund: Alle Bauteile innerhalb der Gebäudehülle sind im Prinzip thermische Speicher welche die Temperatur konstant halten. Falls zu lange gelüftet wird, kühlen sich diese Bauteile stark ab, und eine grösere Wärmeleistung/Energie ist notwendig um die gewünschte Zimmertemperatur wieder zu erreichen
- „Kippfenster-offen“ Schläfer sollten sich eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung zu tun. Ansonsten auf jeden Fall Heizung im „offenen“ Zimmer ausschalten
 - o Grund: Siehe oben
- Speziell bei schlecht isolierten Häusern mit wenig thermischer Trägheit (Leichtbau Struktur, Fabrikhallen, etc) die Heizung mit Schaltuhr Nachts niedriger stellen oder Ausschalten
 - o Grund: Leichte Konstruktionen haben weniger erwärmte Masse (Wärmekapazität) und lassen sich schnell erwärmen, kühlen aber auch schnell wieder ab.

Bei massiven Konstruktionen wiederum, muss darauf geachtet werden, dass die Masse nicht zu stark abkühlt, sonst braucht die Aufwärmphase zu lange. (Achtung, oft reicht die Wärmeleistung der Heizanlage nicht um zu grosse Temperaturschwankungen zu erlauben)

- Anstatt mit T-Shirt und 23°C in der Wohnung im Winter Pullover anziehen, dann reicht 19-20°C
 - o Grund: Der Temperatur-Gradient ist für die thermischen Verluste entscheidend. Wenn anstatt 10 nur 7°C Differenz zwischen Aussen und Innen vorhanden sind, kann bei einem normalisierten 4-Familien EFH (U-Wert ~0.3 W/m²K) 30% an thermischen Verlusten gespart werden!
- Aufenthaltszimmer wärmer regulieren, Durchgangszimmer kälter (Thermostatventile)
 - o Grund: Wenn man sich bewegt erzeugen die Muskeln Wärme. Zudem ist die Temperatur immer vertikal steigend im Raum verteilt. Beim Sitzen ist man also tendenziell tiefer = kälter.
- Kaputte oder schlecht isolierte Gebäudehüllteile (Mauern, Fenster, Aussentüren, Dach, Boden gegen Aussen/Erdreich) möglichst schnell verbessern bzw. ersetzen
 - o Grund: Auch wenn die Isolation sehr gut ist, ein Durchzug wegen defekten/schlechten Bauteilen verursacht grosse thermische Verluste. Darum wird bei Minergie-Gebäuden auch die Luftdichtigkeit geprüft.

7.1.2. Neue Energiespartipps aufgrund der Untersuchungen

- Thermische Trägheit der Bauelemente in die Dimensionierung der Heizanlage bzw. Konstruktion des Gebäudes miteinbeziehen
 - o Grund: Wird eine Innenmauer, bzw. Boden durch Sonneneinstrahlung (Südfenster) aufgeheizt, dienen diese als passive Wärmespeicher, und zwar ohne Energieverluste, da die Energie ins Haus hinein dissipiert.
 - o Grund: Durch passive solare Energie und entsprechende thermische Trägheit des Gebäudes können schon kleine Heizleistungen den Heizbedarf decken
- Bei kombinierter Solarthermie und WP als Wärmeproduzenten, die Sperrzeiten entsprechend der Saison anpassen.
 - o Grund: Sobald gegen Ende der Heizsaison die Wärmeproduktion im Niedertarif ausreicht, um den Bedarf des Hochtarifs zu decken, soll die WP für den Betrieb im Hochtarif gesperrt werden.
 - o Grund: Wird im Energieprodukt vom Elektrizitätslieferanten keine Unterscheidung zwischen Hoch- und Niedertarif gemacht, soll die WP entsprechend der zu erwartenden Solarwärme Produktion gesperrt werden, um das Potential für solare Autonomie zu steigern
- Speicher genügend gross dimensionieren, um den Wärmebedarf während Stromhochtarif Zeit zu decken.
 - o Grund: Die WP ist ein grosser Stromkonsument. Wenn dieser von billigerem Strom profitieren kann, wird zwar keine Primärenergie eingespart, aber viel Stromkosten
- Wird Solarthermie als Quelle für die WP benutzt, muss eine Kostenberechnung des Einsparpotentials versus die Kosten/kWh Solarwärme verglichen werden, um den Einschaltpunkt der Solaranlage zu definieren

- Grund: Bei tiefen COP_{sol} kann oft keinen wirtschaftlichen Gewinn erreicht werden. Ein energetischer Gewinn (weniger Primärenergieverbrauch) kann leichter erreicht werden, als eine Kosteneinsparung
 - Thermische Verluste in grossen Speichern verlieren abhängig der Speicherdauer viel Wärme. Es muss abgeschätzt werden, wie viel die verlorene Wärme in der Produktion gekostet hat.
- Grund: Solarwärme ist nicht gratis, der Betrieb der Zirkulationspumpe muss jeweils mitberechnet werden.
- Beim Einsatz von mehreren thermischen Speichern muss die Speichereffizienz berechnet werden
 - Grund: Auch gut isolierte thermische Speicher verlieren viel Wärme. Eventuell lohnt sich die Investition für einen zusätzlichen Speicher gar nicht?
 - Grund: Umso kürzer die Speicherzeit, desto kleiner die thermischen Verluste
 - Schalthysterese der Solaranlage richtig einstellen
 - Grund: Natürlich kann mehr Solarwärme gewonnen werden, wenn auch sehr kleine Temperaturunterschiede zwischen Kollektor und Speicher gesammelt werden. Aber diese erzielen nur kleine energetische Gewinne, die wegen thermischen Verlusten oft wirtschaftlich nicht lohnenswert sind.
 - Heizkurve auch für Steuerung der WP benutzen
 - Grund: Die WP kann früher reagieren und kontrolliert den Wärmebedarf mithilfe des Heizspeichers decken. → kleinere WP möglich ohne Komforteinbusse

7.2. Andere Untersuchungen zum Thema

Das Energiesparen, ob Wärme, Elektrizität oder Brennstoff ist schon seit vielen Jahren ein viel erforschtes Thema. Die Gründe dafür sind oft politisch motiviert, aber auch Erfindergeist oder Überzeugung dass die Menschheit allgemein über ihren Verhältnissen lebt sind und wertvolle Ressourcen verschwendet, können Ansporn für Analysen geben. Ohne die Wichtigkeit aller anderen Analysen zum Thema zu vernachlässigen möchte ich hier auf einige gute Sammlungen für Energieforschung in der Schweiz und auch international hinweisen.

<http://www.bfe.admin.ch/energieforschung>

Auf dieser Internetseite des Bundesamtes für Energie befinden sich sowohl eine Datenbank mit allen aktuellen und abgeschlossenen vom BFE unterstützten Forschungsprojekten, wie auch viele nützliche Links und Informationen betreffend Energieforschung und das aktuelle Konzept der Energieforschung des Bundes

<http://www.iea-shc.org/task44/>

Die „International Energy Agency“ IEA ist eine Kooperationsplattform im Bereich der Erforschung, Entwicklung, Markteinführung und Anwendung von Energietechnologien. Sie versucht, durch die Zusammenführung von Spezialisten aus der ganzen Welt, Forschungsthemen in sogenannten Tasks, bzw. Annex voranzutreiben. Das Projekt OPTIGEN ist im Task44, bzw. Annex 38 integriert, welches als Forschungsschwerpunkt die Kombination Solarthermie und Wärmepumpen für EFH hat. Auf der Task Website sind verschiedene Dokumentationen, Links und Berichte zum Thema vorhanden.

<http://www.erdsondenoptimierung.ch>

Wenn man von Wärmepumpen spricht sind oft WP mit Erdwärmesonden gemeint. Für den interessierten Laien, aber auch für den Fachmann steht hier eine sehr gut dokumentierte Website zur Verfügung, die alle nötigen Informationen betreffend EWS beinhaltet.

8. Bewertung der Arbeit und Ausblick

8.1. Bewertung

Das Monitoring System der Anlage „Hauteville“ konnte im Verlauf des Projekts vereinheitlicht übersichtlicher gemacht werden. Unter anderem wurde eine Webseite mit den wichtigsten Temperaturen und Wärmeströme des Hauses aufgeschaltet und erlaubt sowohl die Fernbedienung wie auch Überwachung der Gebäudetechnik von der EIA-FR aus.

Die Simulation der Anlage wurde zufriedenstellend validiert und lieferte gute Resultate für die analysierten Optimierungsstrategien. Obwohl gewisse Strategien kleinere Energieeinsparungen wie erwartet ergaben (Optimierung der Solarsteuerung, Stromverbrauch der solaren Zirkulationspumpe), konnten andere (Optimierung der Sperrzeiten und Ladestrategie des Saisonspeichers) überraschende gute Ergebnisse erzielen.

Die Zusammenarbeit des Projektes im IEA SHC Task44 verläuft sehr konstruktiv. Die Ergebnisse der Untersuchungen vom Projekt OPTIGEN werden in eine Sammlung von Resultaten einfließen, welche Teil eines Ratgebers für zukünftige ähnliche Projekte im Bereich Solarthermie + WP ergeben werden.

8.2. Ausblick

Es konnte bewiesen werden, dass durch geschickte Regelung die WW-Produktion und Beheizung von verschiedenen Typen von EFH kostensparender durchgeführt werden kann. Nun sollten auch Mehrfamilienhäuser, sowie Wohnblocks analysiert werden, wo ein grösserer Wärmekonsum, und somit auch grössere Einsparpotentiale bestehen. Die Ergebnisse können genutzt werden, um die Strombedarfsspitzen der Elektrizitätsnetze vorherzusagen, und auch zu verbessern, um die Stromproduktion effizienter betreiben zu können.

Dank der umfassenden Studie wurden auch neue Ansätze entdeckt, die zu einem Kosten sparenden Betrieb führen können. Diese müssen aber noch eingehend untersucht werden, um ihr Einsparpotential bezüglich Stromkosten und Energieverbrauch abzuschätzen:

Solaranlage

Um für die Solaranlage den Betrieb effizienter an die Anlage anzupassen kann ein Algorithmus gesucht werden, welcher die Solarhysterese täglich den Bedingungen anpasst, um höchste Effizienz und minimale thermische Verluste zu verursachen. Zudem sollte für die Anlage in Hauteville eine Simulation mit einem Durchfluss geregelten Zirkulationspumpe durchgeführt werden, um den Einfluss dessen auf die jährliche Betriebsbilanz zu sehen. Verschiedene Ansätze zur Integration der meteorologischen Bedingungen in die Solarsteuerung könnten ebenfalls gewisse Verbesserungen ermöglichen.

Thermische Speicher

Offensichtlich geht bei hohen Temperaturen im Speicher vor allem im Sommer viel Energie verloren. Daher sollte der Einfluss verschiedener Isolationsstärken untersucht werden.

Bei der Kostenanalyse wurde gesehen, dass der Einfluss von Nieder- und Hochtarif Stromzeiten sehr gross ist. Die thermischen Speicher sollten daher nur mit Niedertarifstrom aufgeheizt werden, und es muss entsprechend das Speichervolumen oder die Temperatur angepasst werden

Stromtarife

Wie oben erwähnt, spielen die Stromtarife eine grosse Rolle bei den Stromkosten, und somit dem Verhalten von Hausbesitzern bei der Wahl der Steuerung. Die Stromlieferanten müssen diese Tatsache besser zur Kenntnis nehmen, und Analysen machen, inwieweit ihre Stromtarife und Sperrzeiten die Spitzenstromzeiten vermeiden, bzw. beeinflussen können. Bei der Planung von neuen Anlagen sollte die Sperrzeit zur Dimensionierung mitverwendet werden, um den grossen Stromkonsumenten (WP) möglichst immer bei Niedertarif laufen lassen zu können. Dazu muss vor allem das Speichervolumen, aber auch die Wärmeleistung der WP ausreichend sein.

Investitionskosten

Da die Investitionskosten, vor allem bei Prototyp Anlagen, sehr schwierig abzuschätzen sind, kann kein Vergleich mit herkömmlichen Heizungsanlagen gemacht werden. Ähnliche Untersuchungen müssen daher mit Marktüblichen Lösungen, bzw. Fertiglösungen durchgeführt werden.

Heizung

Die Einstellung der Heizkurve hängt stark von der Heizleistung, sowie der thermischen Trägheit des Gebäudes ab. Die optimalen Einstellungen können für das ganze Hause ziemlich einfach gefunden werden, die Realität zeigt aber, das Hausbesitzer im Winter bei grosser Heizlast oft die Temperatur in Durchgangs- oder Schlafzimmer individuell regulieren, um z.B. ein wärmeres Wohnzimmer zu haben. Um gute Resultate zu erhalten, muss also zuerst das Besitzerverhalten besser analysiert werden. Wie bei der Solaranlage, sollte ebenfalls mit der Einbindung von meteorologischen Bedingungen versucht werden, die Systembilanz zu verbessern.

9. Referenzen

1. **Solar and Heat Pump Systems** [<http://www.iea-shc.org/task44/>]
2. Jülich-Solar-Institut: **CARNOT-Blockset Version 1.0 User's Guide**. In: Jülich, Germany: Solar-Institut Jülich and Expertcontrol; 2007.
3. E4Tech SS: **Lesosai 7.0 User Manual**. In: *Software SA E4Tech*. Edited by E4Tech. Lausanne; 2010.
4. ESTECO: **modeFRONTIER v4 User Manual**. In. Edited by ESTECO, vol. v4. Trieste; 2010.
5. VelaSolaris: **Polysun User Manual**. In: *Simulation software*. Edited by Solaris V. Rapperswil; 2011.
6. SIA380/1: **SIA380/1:2009, Thermische Energie im Hochbau**. In: *520 380/1*. Edited by SIA. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein; 3.2009.
7. HEVs: **Bsol Users Manual**. In. Edited by HEVs. Sion: HEVs; 2002.
8. Meteotest: **Meteonorm**. In., 6.1 edn. Bern: Meteotest; 2011: weather database.
9. Kurmann P: **Optimierung der Einbindung eines 28m3-Wasserspeichers in die Beheizung und die WW-Versorgung mit WP und Solarthermie**. In: *News aus der Wärmepumpen-Forschung*: 2011; Burgdorf: BFE; 2011.
10. Kurmann P: **Optimierung der Einbindung eines saisonalen thermischen Speichers**. *Projet d'approfondissement MSE*. Fribourg: University of applied sciences Fribourg; 2011.

10. Anhang

10.1. Eigenschaften der technischen Anlage

10.1.1. Wärmepumpe

Die technischen Daten der Wärmepumpe des Typs WW106 (Vitocal) können auf der Herstellerseite gefunden werden. Die Leistungskurve (Abb. 45) zeigt wie viel Heizwärme in Funktion der Vorlauftemperatur und Quellentemperatur geliefert werden kann.

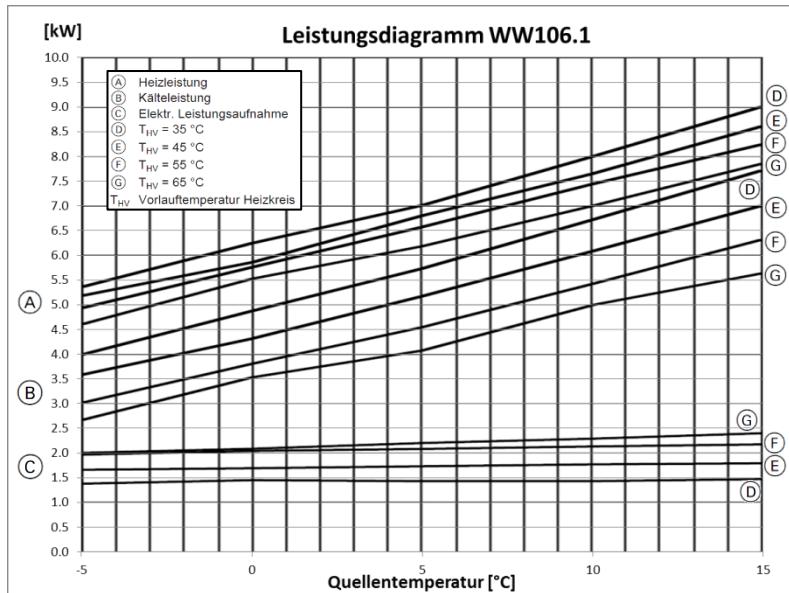


Abb. 45: Leistungsdiagramm der Viessmann Wärmepumpe

Die Wärmepumpe wird in Matlab-Simulink vollständig beschrieben, indem die Leistungskurven für Wärmeleistung sowie elektrische Leistung in einer Suchtabelle eingetragen werden (siehe Abb. 45 bzw. Abb. 46).

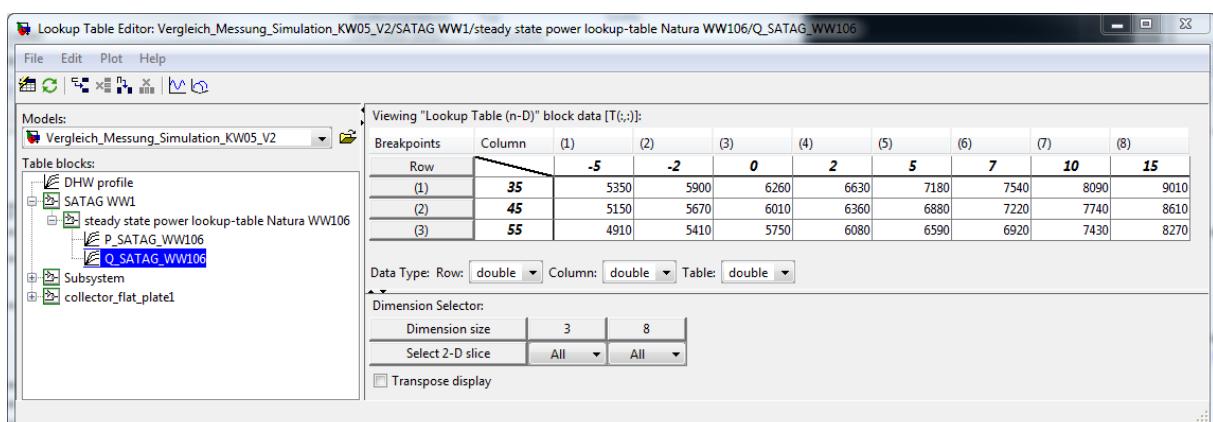


Abb. 46: Eingabe der Leistungskurven der WP in Simulink

Die Leistungskurven werden jeweils nach DIN EN 14511 getestet, dabei sind Hilfsaggregate wie Pumpen für EWS bzw. auf der Senkenseite der WP für Hochtemperatur bzw. Tieftemperaturanschluss nicht inbegriffen. Die Pumpen (grün) können daher in Matlab-Simulink (Abb. 47) an den WP Block (rot) angeschlossen werden. Im der Abbildung sieht man ebenfalls die Steuerung für den Einschaltalgorithmus (grau) mit Hochtemperatur Anschluss (DHW) und

Tieftemperaturanschluss (SH), sowie die Schaltung für das Mischventil der WP Quelle (gelb), und die Ausgabe der Leistungsinformationen für die Energie- und Kostenbilanz (orange).

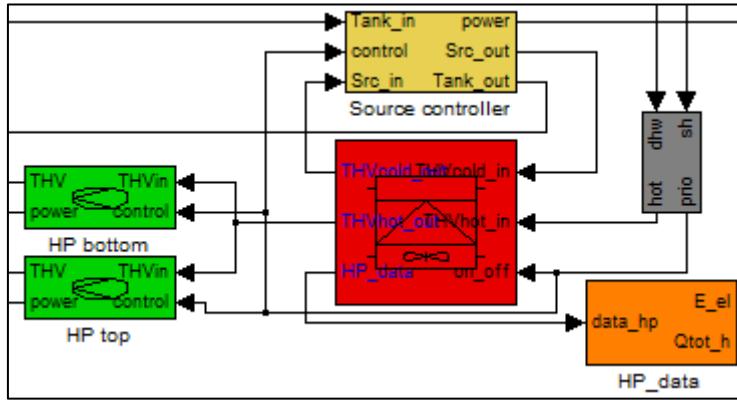


Abb. 47: Integration der WP in Matlab-Simulink

Der WP Block vom Carnot Blockset [2] ist nicht nur eine Datenmatrix, sondern integriert Start- und Stopp Verluste, sowie Kondensator Wirkungsgrad in die Berechnung der Ausgabeleistung und Temperaturen.

10.1.2. Speicher A

Der Nutzspeicher ist kein reiner Kombispeicher (siehe Abb. 49). So ist zwar eine Trennschicht vorhanden, um die zwei Temperaturniveaus für WW-Zubereitung (45-55°C) und Bodenheizung (20-43°C) voneinander zu trennen, aber eine Zirkulation vom Wasser durch Konduktion ist damit nicht vollständig unterbunden. Das zu erwärmende Trinkwasser wird durch ein abgeschlossenes, vertikales Durchlaufsystem erzeugt (Hygienespeicher) und erlaubt somit tiefere Temperaturen zu fahren, da kein stagnierendes Warmwasser, und dadurch keine Gefahr der Legionellenbildung vorhanden ist.

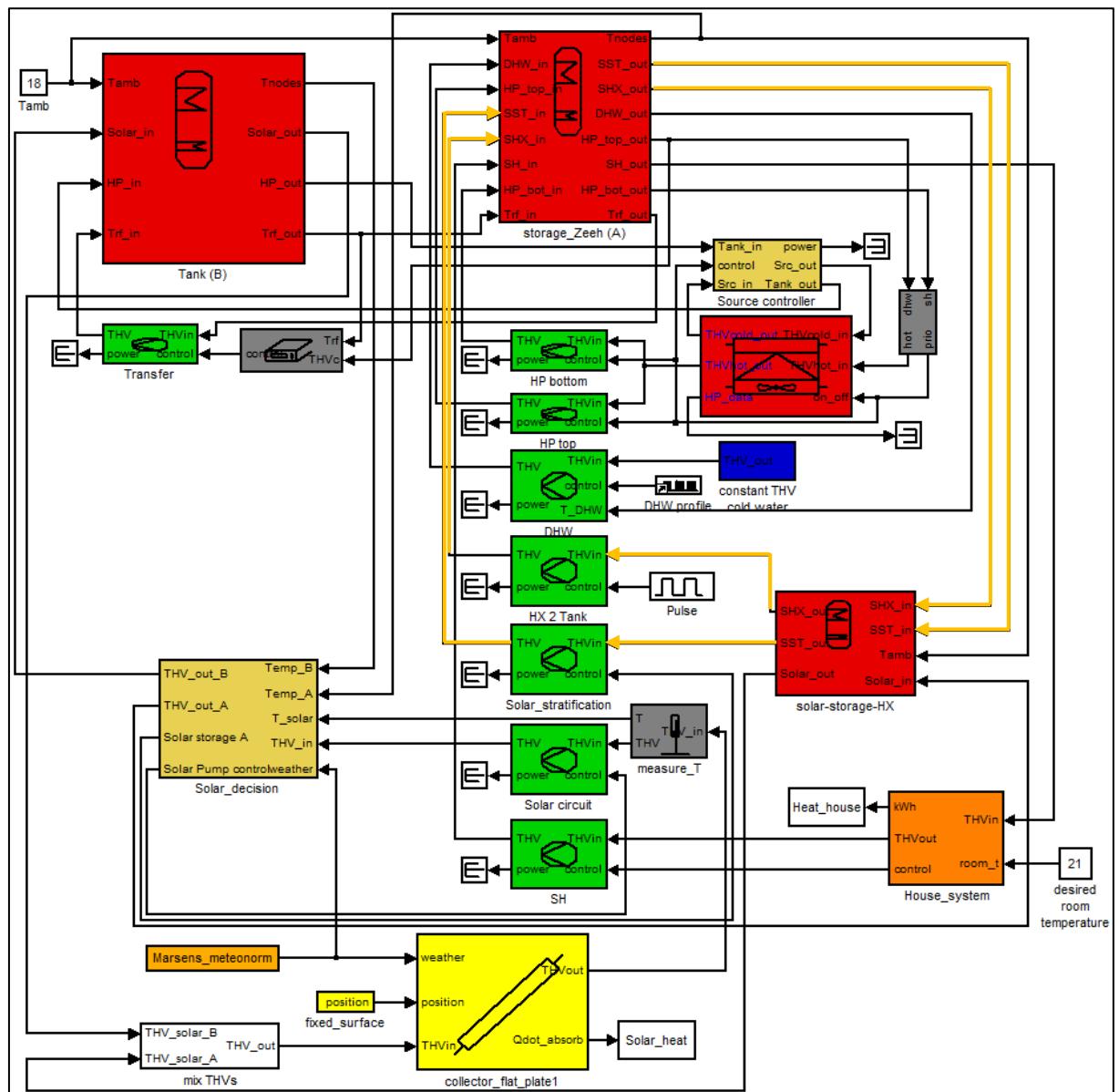
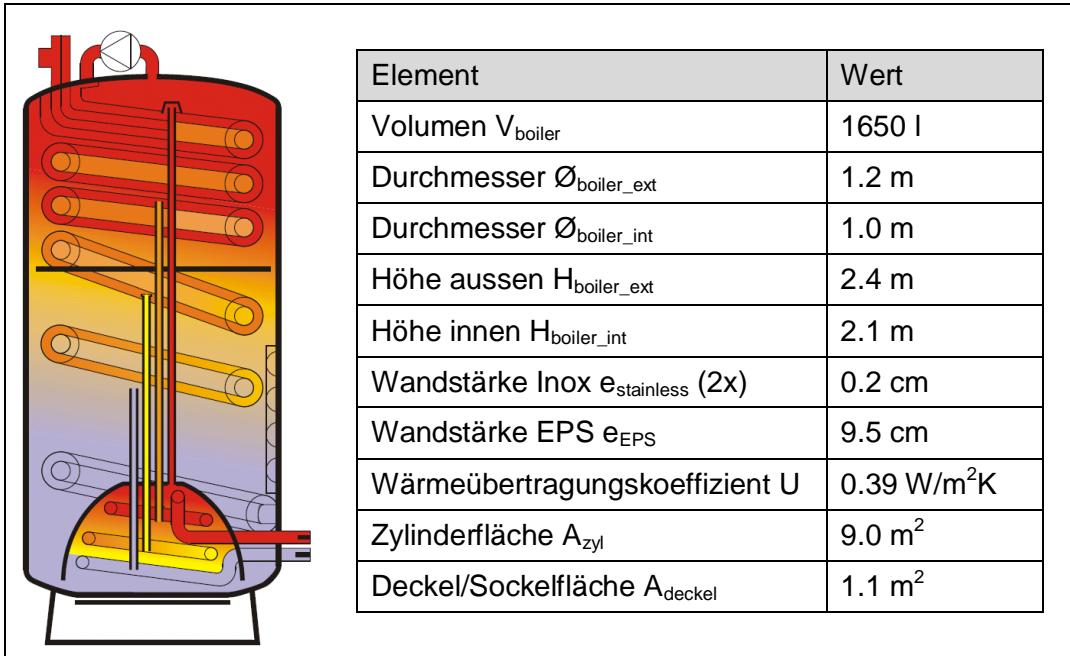


Abb. 48: Model von Objekt "Hauteville" in Simulink mit Modellierung der „Solarglocke“ als orangen Kreislauf

Die Solarwärme wird in einer Glocke im unteren Teil des Speichers in diesen übertragen und aufgrund der Dichteunterschiede mit Schichtlanzen in die entsprechenden Temperaturschichten verteilt.



Das Diagramm zeigt einen Querschnitt des Nutzspeichers A. Der Speicher besteht aus einem zentralen Zylinder mit einer lila Basis und einer roten Decke. Innerhalb des Zylinders sind mehrere orangefarbene Rohre angeordnet, die von einem vertikalen Rohr durchzogen werden. Die Außenwand des Zylinders ist in einem hellroten Bereich dargestellt. Die Tabelle rechts enthält technische Daten des Speichers:

Element	Wert
Volumen V_{boiler}	1650 l
Durchmesser \varnothing_{boiler_ext}	1.2 m
Durchmesser \varnothing_{boiler_int}	1.0 m
Höhe aussen H_{boiler_ext}	2.4 m
Höhe innen H_{boiler_int}	2.1 m
Wandstärke Inox $e_{stainless}$ (2x)	0.2 cm
Wandstärke EPS e_{EPS}	9.5 cm
Wärmeübertragungskoeffizient U	0.39 W/m ² K
Zylinderfläche A_{zyl}	9.0 m ²
Deckel/Sockelfläche A_{deckel}	1.1 m ²

Abb. 49: Schema und physikalische Eigenschaften vom Nutzspeicher A

Um den Speicher in Simulink nachzubauen, wurde eine Kombination aus zwei Speichern gemacht (siehe Abb. 48), die "Solarglocke" wurde dabei als separaten Speicher mit zwei Anschlüssen an den übrigen Speicher modelliert. Ein Anschluss simuliert dabei die geschickte Einspeisung der Solarwärme, während ein zweiter Anschluss den Wärmeaustausch durch Konduktion am unteren Rand simuliert.

10.1.3. Speicher B

Der saisonale Speicher besteht aus einem rezyklierten Milchtank. Er wurde liegend im Keller des Pilotobjekts integriert und mit drei Wärmetauscher versehen (siehe Abb. 51). Das Speichermedium ist Leitungswasser.

Die Simulation vom Saisonspeicher ist praktisch identisch mit derjenigen des Nutzspeichers. Bei der Auswertung ist aufgefallen, dass die Temperaturdifferenz, je nach Betriebsmodus, zwischen der oberen und der unteren Schicht des Speichers nur 1-4°C beträgt. Messungen im Speicher haben diese Resultate bestätigt.

Bei der Regelung der Anlagen stellt sich die Frage, was effizienter ist, eine reine Speicherung der Solarwärme, oder eine temperatur-abhängige Einspeisung jeweils in den Nutzspeicher, die Bodenheizung oder quellenseitig an die Wärme pumpe.

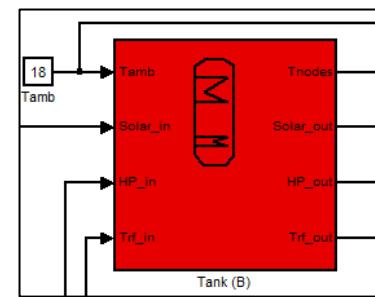
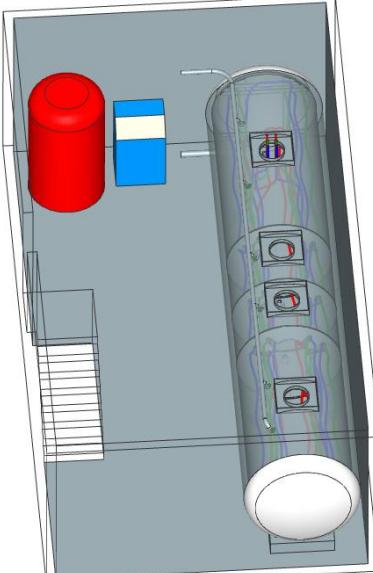


Abb. 50: Saisonspeicher mit Anschlüsse für WP, Solaranlage und Wärmetransfer nach Speicher A



Element	Wert	Einheit
Volumen V_{Tank}	28000	L
Durchmesser $\varnothing_{\text{Tank_ext}}$	2.1	M
Durchmesser $\varnothing_{\text{Tank_int}}$	1.9	m
Länge aussen $H_{\text{Tank_ext}}$	10.5	m
Wandstärke Inox e _{stainless} (2x)	0.5	cm
Wandstärke EPS e _{EPS}	10.0	cm
Wärmeübertragungskoeffizient U	0.37	W/m ² K
Zylinderfläche A _{zyl}	69.0	m ²
Deckelfläche A _{deckel}	3.5	m ²

Abb. 51: Schema und physikalische Eigenschaften von Saisonspeicher

10.1.4. Solarkollektoren, getestet nach SPF Standardtest

Solar Collector Factsheet: SPF-Nr. C398



Modell	VarioSol E
Typ	Flachkollektor
Hersteller	Winkler Solarsysteme Spenglerei GmbH
Adresse	Runastr. 39
	–
Telefon	AT-6800 Feldkirch +43 (05522) 76139
Fax	+43 (05522) 76139-21
E-Mail	solar@winklersolar.com
Internet	www.winklersolar.com
Vertriebsländer	CH,DE,AT,IT

Leistungstest EN 12975



Qualitätstest EN 12975

Dimensionen

Bruttomass Länge	2.017 m
Bruttomass Breite	4.000 m
Leergewicht mit Glas	245 kg
Flüssigkeitsinhalt	5.10 l
Aperturfläche	7.324 m ²
Absorberfläche	7.168 m ²
Bruttofläche	8.068 m ²

Technische Daten

Minimaler Volumenstrom	160 l/h
Empfohlener Volumenstrom	500 l/h
Maximaler Volumenstrom	960 l/h
Maximal zulässiger Druck	6 bar
Maximale Betriebstemperatur	200 °C
Stagnationstemperatur	– °C
	(Ta = 30°C, G = 1000 W/m ²)

