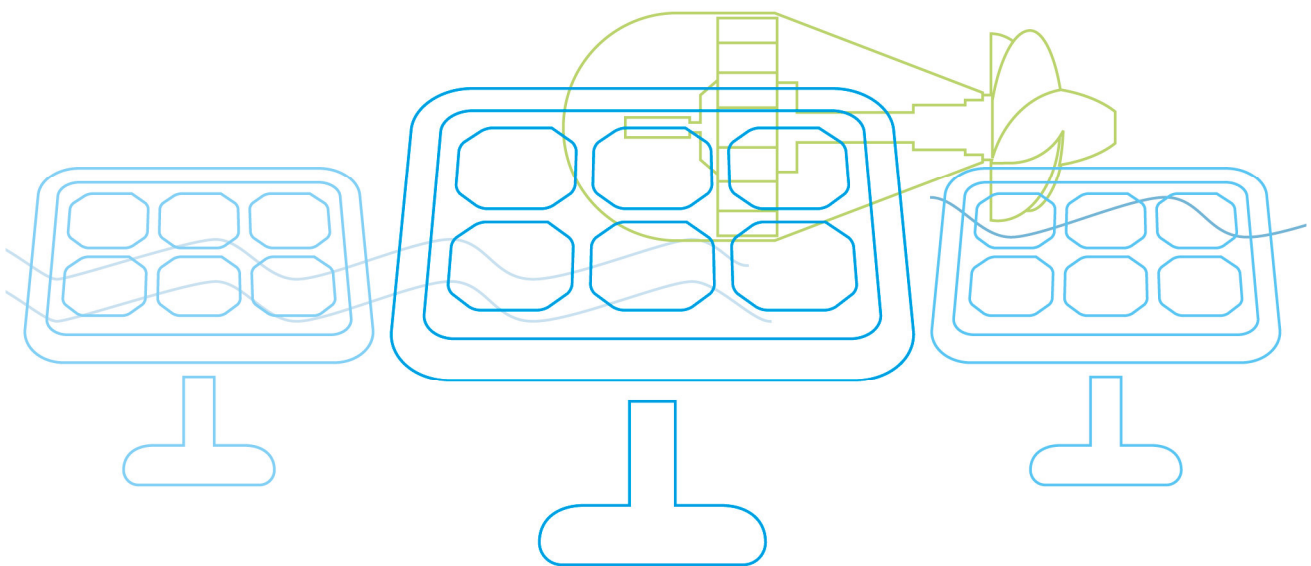




Monolith

Kombisystem von Hybridkollektor
und Luftwärmepumpe mit effizienter
Anlagentechnik und innovativen
Regelstrategien



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	1
2	Einleitung	2
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Systemdimensionierung:	6
3.2	Komponentendimensionierung:	9
3.3	Modellbildung und Simulation:	11
3.4	Prototypenbau	14
3.5	Rapid Prototyping	15
3.6	Langzeitvermessung	19
3.7	Optimierung	19
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	21
5	Ausblick und Empfehlungen	23
6	Literaturverzeichnis	24

2 Einleitung

Im vorgestellten Projekt Monolith wurde eine Kombination eines sowohl luft- als auch wassergeführten solarthermischen Kollektors mit einer Luft-Wärmepumpe behandelt, welche konstruktiv in einer gebäudeexternen Heat Unit untergebracht ist. Um einen energieoptimalen Betrieb des Systems zu gewährleisten, wurde mit Hilfe von simulationsunterstütztem Rapid-Prototyping und Optimierungsverfahren ein bestmögliches ganzheitliches Regelungskonzept gefunden.

Aufgabenstellung:

Die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe für Heizung und Warmwasseraufbereitung im Ein/Mehrfamilienhaus ist vorwiegend aus Kostengründen noch kaum am Markt vertreten. Wenn solche Kombisysteme angeboten werden, dann arbeiten diese meist parallel, d.h. ohne der Ausnutzung von Synergieeffekten nur nebeneinander.

Im Rahmen dieses Projektes wird die Kombination eines Hybridkollektors (sowohl wasser- als auch luftgeführt) mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe vorgestellt, das sich durch eine ganzheitliche Regelungstechnik auszeichnet. Dabei werden die in Vorprojekten bereits entwickelten Komponenten auf den gegebenen Anwendungsfall adaptiert und zu einem Gesamtsystem kombiniert.

Die Reglerentwicklung dieses Kombisystems geschah mit in den meisten industriellen Branchen bereits üblichen Methoden des simulationsbasierten Rapid-Prototyping. Dazu kam im Projekt eine mathematische Modellbildung der Systemkomponenten zum Einsatz, die mit Messungen validiert wurde. Auf Basis des Simulationsmodells konnte ein energieoptimaler Regler gefunden werden. Die Ergebnisse sollten dann bei einer Systemvermessung überprüft werden.

Das Projekt beinhaltet folgende grundlegenden Aufgabenstellungen:

1. Dimensionierung und Aufbau eines Systemkonzeptes, bestehend aus der Verbindung Hybridkollektor, Luftwärmepumpe und Speicher, untergebracht in einer Heat Unit „Monolith“ (Aufbau der Hardware)
2. Mathematische Modellbildung und Simulation des Systemkonzeptes, daraus abgeleitet die Entwicklung eines Reglers (Entwicklung der Software)
3. Vermessung des Gesamtsystems inklusive optimalem Regler und Ableiten von Optimierungspotenzialen (Betrieb des Gesamtsystems)

Als Ergebnis wurde ein vermessenes und optimiertes Funktionsmuster als Ausgangspunkt für eine Kleinserie angestrebt.

Schwerpunkte des Projektes:

Das globale Projektziel war die Entwicklung eines Funktionsmusters des beschriebenen Systems inkl. Regler, das eine Heizperiode lang vermessen wird und als Ausgangspunkt für eine Kleinserie dienen kann.

Endabsicht des Projektes war es, ein Systemkonzept und Regelungsstrategien für den Einsatz eines Hybridkollektors in Verbindung mit einer Luftwärmepumpe (LWP) zu entwickeln. Der Schwerpunkt lag dabei im optimalen Zusammenspiel von Kollektor, LWP und Abnahme, um eine hohe Effizienz der Anlage zu erzielen. Dazu wurden in einem ersten Schritt die einzelnen Komponenten, wie z.B. Kollektor, LWP oder Speicher entwickelt und vermessen. Basierend auf den Messergebnissen wurden in einem weiteren Schritt Komponentenmodelle für Hybridkollektor, LWP, Speicherbeladung, Heizung und Warmwasserabnahme entwickelt, mit deren Hilfe detaillierte Systemsimulationen und Regelungskonzepte erstellt werden konnten. Des Weiteren wurden aufgrund der Simulationen Jahresarbeitszahlen und Leistungszahlen der LWP bei unterschiedlichen Betriebspunkten ermittelt und Energieerträge der gesamten Anlage prognostiziert.

Die mit Hilfe der Simulationen gewonnenen Erfahrungswerte sollten in einem nächsten Schritt praktisch umgesetzt werden. Dazu wurde ein Funktionsmuster gebaut, welches über die Dauer einer Heizperiode vermessen werden sollte. Basierend auf den Auswertungen der Messergebnisse sollten Maßnahmen zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung ergriffen werden.

Zielgruppe für den MONOLITH sind Einfamilienhäuser. Es ist aber auch durchaus denkbar, mehrere dieser Heat Units miteinander zu verschalten und somit Kunden mit größeren Wärmeabnahmen zu erreichen.

Einordnung in das Programm:

Themengebiet: Solarthermie

Themenpunkte: Komponenten, Systeme

Einerseits wird, ausgehend von bereits bestehenden Einzelkomponenten, ein solares Kombinationssystem für Warmwasserbereitung und Raumheizung entwickelt. Dabei wird das solarthermische System (sowohl luft- als auch wassergeführt) mit einem konventionellen Heizsystem (Luft/Wasser-Wärmepumpe) kombiniert. Diese Anlagenkombination wird in einem externen Gehäuse untergebracht (Heat Unit – Monolith), wobei sich die Möglichkeit bietet, diese Heat Unit entweder in das Gebäude zu integrieren oder als Stand-Alone-Lösung nur mit 2 hydraulischen Anschlusskreisen (Warmwasser, Heizung) gebäudeextern aufzustellen. Diese Heat-Unit (Monolith) beinhaltet alle notwendigen Komponenten (Hybridkollektor, Wärmepumpe, Speicher, Speicherprogrammierbare Steuerung SPS, Hydraulik, Pumpen, Ventile, usw. ...) und kann ähnlich einem Fernwärmeanschluss vom Benutzer Wärmeleistung beziehen.

Andererseits reicht das simple Zusammenführen unterschiedlicher (auch optimaler) Einzelkomponenten bei weitem nicht aus, um ein optimales Gesamtsystem zu erhalten. Dazu ist es noch notwendig, sowohl die Komponenten richtig auszulegen und zu dimensionieren, als auch den koordinierten Betrieb des

Gesamtsystems zu gewährleisten. Der Entwurf einer energieoptimalen Regelungsstrategie wird gefordert, um sicherzustellen, dass nicht nur Teilsysteme bestmöglich funktionieren, sondern das Gesamtsystem energieoptimal die Abläufe koordiniert.

Aufbau der Arbeit, Verwendete Methoden:

Das Projekt ist in 8 Arbeitspakete gegliedert, die mit den angeführten Methoden abgearbeitet wurden:

Arbeitspaket 1, Projektleitung & Kommunikation

Arbeitspaket 2, Systemdimensionierung

Ein Systemvergleich mit einem ähnlich strukturierten System wurde erstellt. Es erfolgte die Dimensionierung der einzelnen Komponenten der Heat Unit, wie Hybridkollektor, Luftwärmepumpe und Wärmespeicher, für ein typisches Einfamilienhaus mit einer Heizlast von 5-10 kW und einem Zuschlag für den Warmwasserbedarf. Basierend darauf wurden die Rohrleitungen, Luftführungen, Umwälzpumpen, Ventilatoren und Ventile dimensioniert.

Arbeitspaket 3.1 bis 3.3, Komponentendimensionierung

Dimensionierung der Einzelkomponenten in den Sub-Arbeitspaketen 3.1 bis 3.3

3.1, Hybridkollektor

Modifikation eines Hybridkollektors basierend auf einer bestehenden Energiefassade, Vermessung des Kollektors am Prüfstand, Ermittlung von Absorptions- und Emissionsgrad des Absorbers und Transmissionsgrad der Abdeckung, Bereitstellen der Messdaten zur Modellbildung in AP4

3.2, Luftwärmepumpe

Bestellung und Aufbau von Einzelkomponenten zur Luftwärmepumpe
Bereitstellen der Messdaten zur Modellbildung in AP4

3.3, Wärmespeicher

Bestellung und Aufbau des Speichers
Bereitstellen der Messdaten zur Modellbildung in AP4

Arbeitspaket 4, Modellbildung und Simulation

Erstellen mathematischer Modelle für die Hauptelemente (Hybridkollektor, Luftwärmepumpe und Speicher)

Erstellung von kennlinienbasierten und dynamischen Simulationsmodellen der Komponenten mittels Parameterschätzverfahren und Integration in Simulationsumgebung, Validieren der Modelle mit Messdaten

Erstellung eines Gesamtmodells

Arbeitspaket 5, Prototypenbau

Zusammenbau der Komponenten in das Gehäuse, Verrohrung, Verkabelung
Inbetriebnahme

Arbeitspaket 6, Rapid Prototyping

Der energieoptimale Betrieb des Gesamtsystems wurde in ein mathematisches Optimierungsproblem übersetzt. Nach Lösung der Optimierungsaufgabe wurde daraus ein optimales Regelgesetz abgeleitet, das zuerst in der Simulation und dann an der realen Hardware getestet wird.

Arbeitspaket 7, Langzeitvermessung einer Heizperiode

Der Prototyp sollte über eine Mindestdauer einer Heizperiode vermessen werden.

Anschluss des Prototyps an einen Verbraucher

Geplante Vermessung und Datenaufzeichnung (Mindestdauer: eine Heizperiode)

Arbeitspaket 8, Dissemination

3 Inhaltliche Darstellung

Die inhaltliche Darstellung erfolgt anhand der definierten Arbeitspakete:

3.1 Systemdimensionierung:

Markt- und Konkurrenzanalyse:

Die nachfolgende Marktanalyse ist an die Arbeiten im IEA Task 44, Solar + Heat Pump Systems angelehnt¹. Die Analyse wurde im Oktober 2011 begonnen und von am Task beteiligten 10 Forschungseinrichtungen durchgeführt. Die Marktanalyse erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit!

In Summe sind am europäischen Markt mehr als 130 Heizsysteme als Kombination von Wärmepumpe und solarthermischer Solaranlage (SWP) verfügbar. Die Firmenstandorte der entsprechenden Hersteller befinden sich zu 48% in Deutschland und zu 19% in Österreich. Die Mehrheit der Firmen vertreibt ihre Produkte in 3 oder mehreren Ländern, ein europäischer oder weltweiter Vertrieb wurde kaum genannt. Abbildung 1 zeigt, dass genau zu Beginn des gegenständlichen Projektes viele Firmen mit der Markteinführung von SWP Systemen begannen.

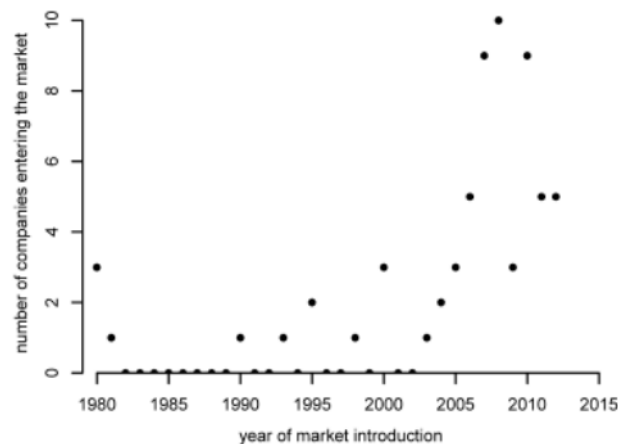


Abbildung 1: Anzahl der Markteintritte von Firmen mit SWP Systemen

Als Hauptmerkmal können die untersuchten Systemkonzepte nach der Interaktion zwischen thermischer Solaranlage und Wärmepumpe unterschieden werden in:

- Kollektor und Wärmepumpe liefern unabhängig voneinander Energie (Parallelsystem, P)
- Der Kollektor arbeitet als einzige oder zusätzliche Quelle für die Wärmepumpe (Seriellsystem, S)
- Eine Unterkategorie der seriellen Systeme ist die solare Regeneration einer vorhanden Quelle (R)

Abbildung 2 zeigt die Anzahl der am Markt vertretenen Anlagen je nach Systemkonzept (P, S, R und deren Kombinationen). Das einfache Parallelkonzept dominiert dabei mit 62% der verfügbaren Anlagen, rein serielle Konzepte sind mit 8% vertreten, rein regenerative Systeme mit nur 1%.

Beachtenswert ist, dass Systeme, welche unterschiedliche Betriebsarten erlauben mit 33% vertreten sind. Auch das System Monolith ist unter der Kategorie P/S einzureihen. Ein unmittelbar mit dem System Monolith vergleichbares Konzept findet sich nicht.

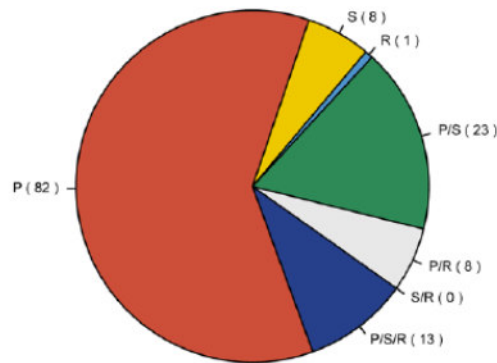


Abbildung 2: Anzahl Systemkonzepte

Viele der Firmen haben weniger als SWP 10 Anlagen in Betrieb, oder haben im Berichtszeitraum dieses Geschäftsfeld wieder eingestellt. Die Beschaffung von Betriebserfahrungen realisierter Anlagen stellte sich als schwierig bis unmöglich heraus.

Dimensionierung der Einzelkomponenten:

Gehäuse:

Zielsetzung war, alle Komponenten des Heizungs- und Warmwasserbereitungssystems in einem Gehäuse zur Außenaufstellung unterzubringen. Die Abmessungen des Gehäuses ergeben sich daher aus der Höhe und dem Durchmesser des Wasserspeichers, und den Abmessungen der beiden Verdampfer. Schon zu diesem Zeitpunkt wurde definiert, das Gehäuse drehbar auf einem Sockel zu montieren. Somit kann die gesamte Heat Unit dem Azimut der Sonne nachgeführt werden. Die Notwendigkeit der Nachführung liegt in der begrenzten Kollektorfläche und der vertikalen Ausrichtung des Kollektors begründet, und konnte durch die später erfolgte Modellbildung und Simulation theoretisch bestätigt werden.

Hybridkollektor:

Aufgrund der Gehäusegeometrie ist die verbaubare Kollektorfläche begrenzt. Es ergibt sich eine Aperturfläche von 7,5 m².

Luftwärmepumpe:

Die Auslegung erfolgt auf 10 kW Heizleistung. Herzstück jeder Wärmepumpe ist der Verdichter: Der Verdichter im Prototyp des Monolith soll drehzahl geregelt (mit Frequenzumrichter) zu betreiben sein, um unterschiedliche Verdichter-Bauarten zu testen. Im Seriengerät soll allerdings kein Frequenzumrichter mehr zum Einsatz kommen. Entschieden wurde auch die Verwendung externer Kondensatoren, und die Dimensionierung der beiden Verdampfer für jeweils 5 kW Heizleistung. Die Kondensatoren wurden etwas überdimensioniert, um einen Teil der Überhitzung des Kältemittels zu nutzen.

Warmwasserspeicher:

Schon in dieser frühen Phase des Projekts kam es zu der Entscheidung, keinen Heizungs-Pufferspeicher einzubauen. Die Kriterien zur Entscheidungsfindung lauteten:

- + geringere Abmessungen, weniger Masse, Kostenersparnis
- + keine Minderleistung durch innenliegende Kondensatoren (Reinigungs- und Kalk-Problematik)
- Heizenergie kann nur im Estrich des Hauses gespeichert werden, Regelungsaufwand

Peripheriegeräte:

Die SPS auf einer Schalttafel, der Kältemittelsammler, die Expansionsventile und Gebläse konnten ohne Platzprobleme im Gehäuse untergebracht werden.

3.2 Komponentendimensionierung:

Hybridkollektor:



Abbildung 3

Die Fa. UNIMET Metallbau hat auf ihrer Betriebs Halle, wie in Abbildung 3 ersichtlich, bereits eine Fassade bestehend aus Hybridkollektorelementen und beheizt damit den Betrieb in Kombination mit einer Erdreich-Wärmepumpe. Die Langzeiterfahrungen mit diesem Kollektor sind hinsichtlich Leistungsminderung und Betriebssicherheit äußerst zufriedenstellend. Basierend auf der Bauart dieser Fassadenelemente wurde ein einzelnes Hybridkollektor-Modul für den Monolith abgewandelt.

Es erfolgte keine Änderung der Kollektorbauart, Horizontalschnitt wie in Abbildung 4. Keine Änderung bzgl. Absorber, es kommt der bestehende Rohrfinnenabsorber nach Abbildung 5 zum Einsatz. Absorberblech Aluminium 1,5 mm mit gepressten Absorber Rohren, Øi 12 mm. 14 Absorberrohre mit jew. 2.200 mm Länge, hintereinander durchströmt.

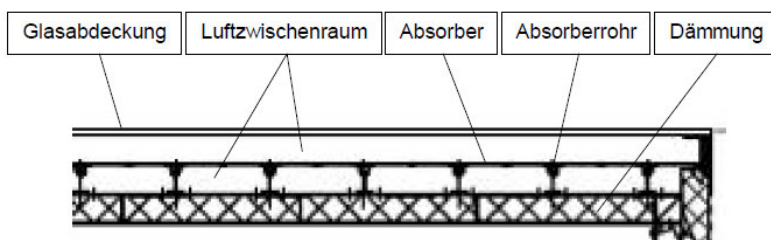


Abbildung 4: Kollektor Horizontalschnitt

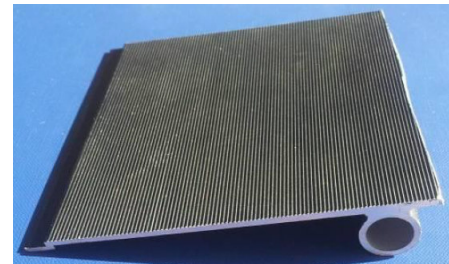


Abbildung 5: Absorber

Optische Vermessung:

Vermessung eines Absorber Teiles im Optik-Labor des ASiC.

Thermische Vermessung, wasserseitig:

Wirkungsgrad: Der Absorber wurde in ein Standard-Kollektorgehäuse eingebaut, eine Entwicklungsmessung in der akkreditierte Prüfstelle des ASiC durchgeführt und mit einem Standard-Absorber verglichen. Zusätzlich wurde durchgeführt: Bestimmung der genauen Absorberabmessungen, Berechnung des optimalen Volumenstroms, Bestimmung der Druckverluste.

Thermische Vermessung, luftseitig:

Angelehnt an die wassergeführten Kollektoren wird der experimentell bestimmte Wirkungsgrad als Funktion der Differenz aus Luftaustrittstemperatur und Umgebungstemperatur dargestellt. Da es sich um ein offenes System handelt, wird immer Luft mit Umgebungstemperatur angesaugt, wodurch die mathematische Darstellung unzutreffend ist.

Der Wirkungsgrad wird als Funktion des Luft-Massenstroms dargestellt. Für die Beurteilung der Einsatzmöglichkeit des Luftkollektors ist das Temperaturniveau am Luftaustritt aussagekräftiger als die Wirkungsgradkennlinie. Da die akkreditierte Prüfstelle des ASiC keine Messtechnik zur Prüfung von Luftkollektoren zur Verfügung hat (vor allem Luftkanäle zur Massenstrommessung), wurden die Messungen am Prototyp vor Ort vorgenommen.

Luftwärmepumpe:

Auf Basis der Dimensionierungsrichtlinien wurde die Luftwärmepumpe gleich in das bestehende Gehäuse der Heat Unit integriert. Es wurden unterschiedliche Konfigurationen von Verdichtern, Verdampfern und Kondensatoren untersucht und vermessen. Die geeignete Konfiguration der Wärmepumpe wird nachfolgend beschrieben:

Verdampfer:

Zum Einsatz kommen 2 Lamellenrohrverdampfer, als Sonderfertigung des Herstellers ECO, mit einer Leistung von jeweils 5,6 kW. Jeder Verdampfer weist eine wirksame Wärmeübertragungsfläche von 44 m² auf. Zusätzlich, als Solarverdampfer (Solar Boost), kommt ein Plattenwärmetauscher des Herstellers SWEP, Type SSP G7 mit 10 kW Nennleistung zum Einsatz.

Expansionsventile:

Luftverdampfer: Verwendung von elektronischen Expansionsventilen, Ansteuerung über einen Überhitzungsregler mit externer Bedieneinheit. Solarverdampfer: Verwendung eines Thermostatischen Expansionsventils. Hersteller jeweils Emerson.

Verdichter:

Die Verdichterwahl erfolgte anhand gängiger Auslegesoftware der jeweiligen Hersteller unter Berücksichtigung des Kältemittels R134a. Der jeweilige Verdichter wurde größer dimensioniert als laut Dimensionierung in AP 2 nötig. Versuche mit anderen Verdichterherstellern (Tecumseh/ Lunité Hermetique bzw. Danfoss/ Maneurop) ergaben, dass diese Verdichter, wegen Ölmangels bei niedriger Leistung, nicht mit Frequenzumrichter zu betreiben sind. Gewählt wurde deshalb ein einstufiger hermetischer sauggasgekühlter Verdichter des Herstellers GEA/ Bock, siehe Abbildung 6.



Abbildung 6: GEA/Bock Verdichter

Kondensatoren:

Es kommt zur Warmwasserbereitung bzw. zur Versorgung des Heizkreises jeweils ein Plattenwärmetauscher des Herstellers SWEP, Type SSP G7 mit 10 kW Nennleistung zum Einsatz. Die beiden Kondensatoren sind parallel geschaltet.

Wärmespeicher:

Wie bereits ausgeführt, wurde auf den Einbau eines Heizungsspeichers verzichtet, zum Einsatz kommt lediglich ein Standard 300 L Warmwasserboiler.

Weitere Komponenten, welche nicht eindeutig Hybridkollektor, Luftwärmepumpe und Wärmespeicher zuordenbar sind: 2 Jalousieklappen, 2 Klappenantriebe, 2 Axiallüfter, 1 Linearantrieb

Die Bestellung und der Aufbau der Einzelkomponenten erfolgte in der Werkshalle der Fa. UNIMET. Der Aufbau eines eigenen Messstandes zur Gewinnung statischer Kenndaten der Wärmepumpe wurde wesentlich vereinfacht. Die Vermessung der Wärmepumpe erfolgte erst am fertigen Prototyp. Die Komponenten des Aggregates wurden dafür manuell angesteuert. Als Messtechnik wurden eine mobile, digitale Monteurhilfe und zusätzliche Temperatursensoren verwendet.

3.3 Modellbildung und Simulation:

Zum Erstellen der mathematischen Modelle wurden physikalische Modellgleichungen für die Hauptelemente (Hybridkollektor, Luftwärmepumpe und Speicher) auf Basis von thermodynamisch motivierten Bilanzgleichungen gewonnen.

Hybridkollektor:

Im Rahmen der Validierung wurde eine Jahressimulation durchgeführt und anhand folgender Fragestellung analysiert: Reduziert die Wahl eines Hybridkollektors und die Vertikalausrichtung mit Azimut-Tracking den reinen solaren Deckungsanteil, sodass auch in den Sommermonaten vermehrt mit der Wärmepumpe als Backup nachgeheizt werden muss? Abbildung 7 zeigt den simulierten monatlich erreichbaren solaren Deckungsanteil im Vergleich zu einem Referenzsystem. Das Referenzsystem unterscheidet sich in diesem Fall vom System „Monolith“ durch die Wahl eines durchschnittlichen Standard Flachkollektors, fix montiert mit Südausrichtung und 45° Neigung.

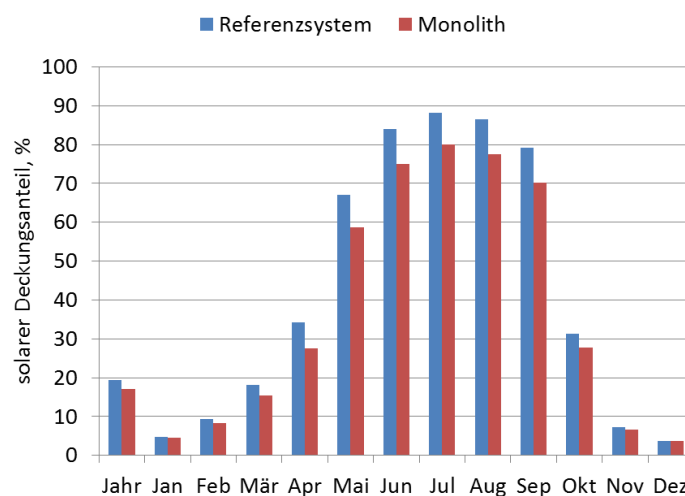


Abbildung 7: Monatliche solare Deckungsanteile

Als Simulationsergebnis zeigt sich, dass der erreichbare solare Deckungsanteil pro Jahr 17% beträgt (Referenz 19,5%), die größte Reduktion muss in den Sommermonaten hingenommen werden, z.B. im Juni auf 75% gegenüber der Referenz mit 84%.

Wärmepumpe:

Das Simulationsmodell wurde in EES² umgesetzt und basiert auf Massen-, Stoff- und Energiebilanzen. Diese modellierte Komponente wurde als Bündel von statischen Kennlinienfeldern in das Programmpaket Matlab/Simulink³ konvertiert, wo anschließend das dynamische Verhalten des Gesamtsystems untersucht wurde. Die Verwendung von statischen Kennfeldern bei dynamischen Betrachtungen ist in diesem Fall zulässig, weil der Schwerpunkt der dynamischen Simulation auf der Analyse von Jahresenergieerträgen liegt. Es ist aber zu beachten, dass dieses dynamische Modell nur bedingt geeignet ist, transiente Vorgänge in einzelnen Komponenten abzubilden, um Verbesserungen im dynamischen Regelungsverhalten zu erzielen – der Schwerpunkt lag in der hinreichend genauen Wiedergabe von statischen Energieflüssen im Gesamtsystem.

Das Modell verlangt als Vorgabe quellenseitig die Eintrittstemperatur der Luft bzw. der Sole in die Verdampfer bzw. senkenseitig die Eintrittstemperatur des Wassers und die zugehörigen Volumenströme. Kältemittelseitig sind das Hubvolumen des Verdichters und die prozentuelle Aufteilung des Kältemittelmassenstroms auf die Luftverdampfer bzw. den Solarverdampfer vorzugeben (Solar Boost). Die daraus resultierenden Zustandspunkte des Kältemittels, die Leistungen an den Wärmeüberträgern, die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters und die Leistungszahl können somit berechnet werden. Um dies zu erreichen, waren einige Vereinfachungen und Annahmen zu treffen (Unterkühlung des Kältemittels im Verdampfer, Wirkungsgrade des Verdichters, Wärmeübertragungskoeffizienten).

Abbildung 8 bis Abbildung 10 zeigen die Kennfelder, die bei der Modellbildung erzeugt wurden beispielhaft für eine Senktemperatur von 40°C. Die Kennfelder geben nur die Charakteristik der Wärmepumpe an, wobei der Luftkollektor noch keine Rolle spielt. In der kombinierten Simulation der beiden Komponenten stellen sich sowohl die Temperatur am Solar Boost Eingang als auch die Quelltemperatur in Abhängigkeit von Einstrahlung, Umgebungstemperatur und Senktemperatur ein.

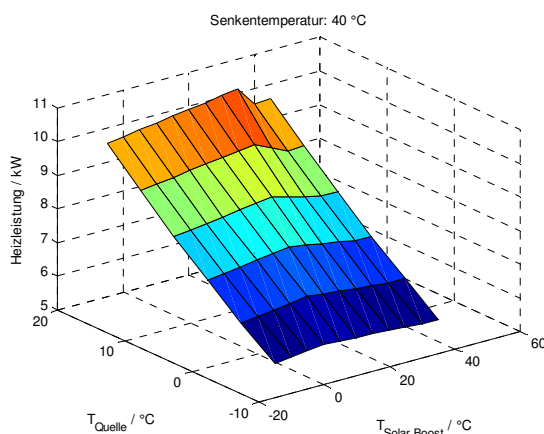


Abbildung 8: Kennfeld Heizleistung

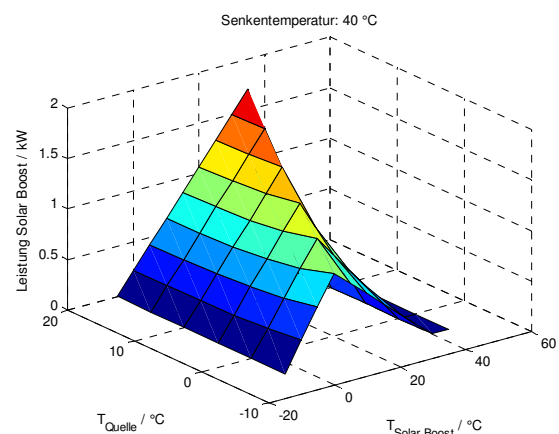


Abbildung 9: Solar-Boost Kennfeld

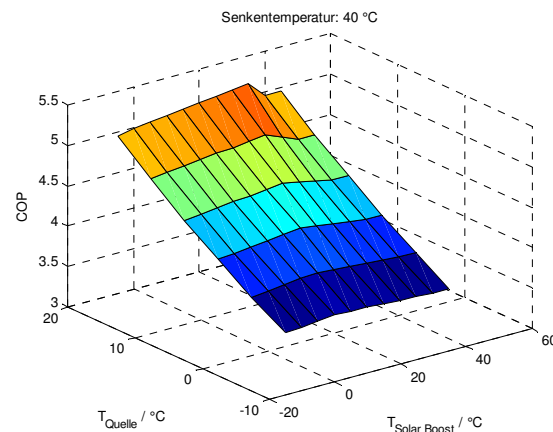


Abbildung 10: Kennfeld COP

Die entwickelten Modelle wurden im Carnot Blockset⁴ umgesetzt und als Gesamtsystem verschaltet. Ziel war die Erstellung einer Entscheidungsmatrix, unter welchen Bedingungen der Solar Boost Betrieb Vorteile gegenüber dem klassischen Hybrid-Betrieb hat. Dazu wurden zunächst die variablen Parameter definiert. Anders als beim isolierten Wärmepumpenmodell, sind hier Umgebungstemperatur, Senktemperatur und Einstrahlung die freien Einflussgrößen. Die Quelltemperatur und die Temperatur im Solar Boost Wärmetauscher sind im Gesamtsystem keine unabhängiger Parameter mehr.

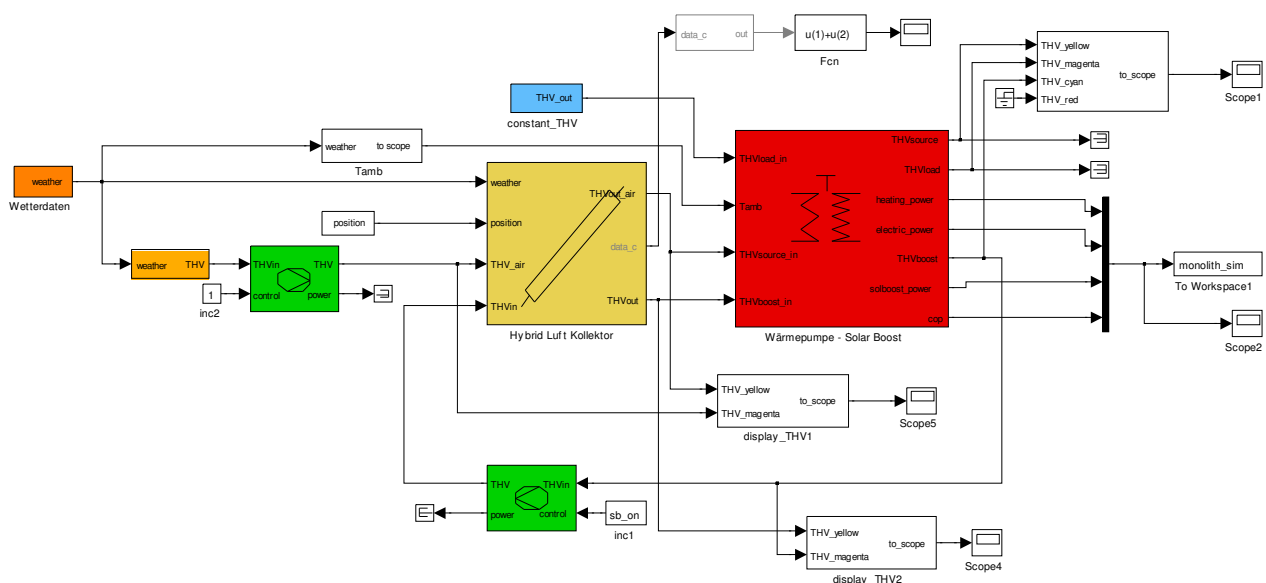


Abbildung 11: Simulationsmodell des Gesamtsystems in Carnot-Blockset⁴

Eine Übersicht der Simulationsumgebung ist in Abbildung 11 zu sehen. Durch die durchgeführte Parametervariation konnte ein Kennfeld des COP des Gesamtsystems in Abhängigkeit der unabhängigen Parameter erstellt werden (zu sehen in Abbildung 12).

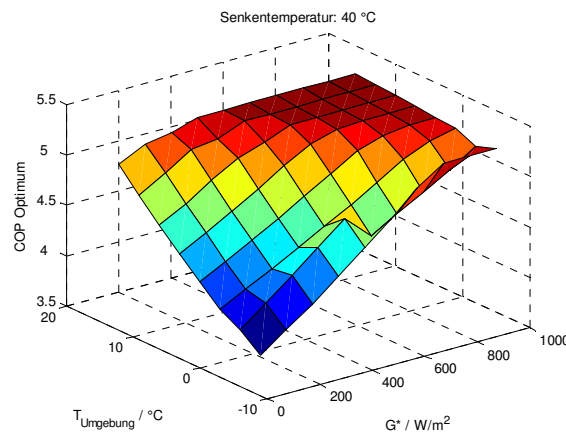


Abbildung 12: Kennfeld COP Gesamtsystem Monolith

3.4 Prototypenbau

Das Gehäuse besteht aus einem Stahl-Grundgerüst. Die Rahmenkonstruktion wurde mit Aluminiumprofilen hergestellt, die Wände bestehen ebenfalls aus Aluminiumprofilen mit innenliegender Wärmedämmung. Das modifizierte Hybridkollektor-Element bildet die Frontseite der Heat Unit. Der Wärmepumpen-Kreisprozess samt Verdampfern, Verdichter, Kondensatoren und sämtlichen Zusatzbauteilen wie Kältemittelsammler und Schalttafel wurde im inneren der Unit aufgebaut. Die Rückseite ist durch eine Aluminiumprofil- Türe zugänglich. Auch die Messtechnik wurde so geplant, dass sie gleich für das folgende Rapid Prototyping und die Langzeitvermessung am Aggregat verbleiben konnte.

Abbildung 13 zeigt eine Frontansicht des fertigen Prototyps an seinem Aufstellort vor der Halle der Fa. UNIMET.



Abbildung 13: Frontansicht des Prototyps

Die Inbetriebnahme des Prototyps konnte in der Projektlaufzeit allerdings nicht abgeschlossen werden.

3.5 Rapid Prototyping

Durch den Prozess des Rapid-Prototyping, siehe Abbildung 14, der auch als „Hardware-in-the-loop HIL“ in der Literatur bekannt ist, wurde das zu regelnde System als mathematisches Modell in einer Simulationsumgebung Matlab/Simulink³ und mit Unterstützung der Toolbox „Carnot-Blockset“⁴ abgebildet.

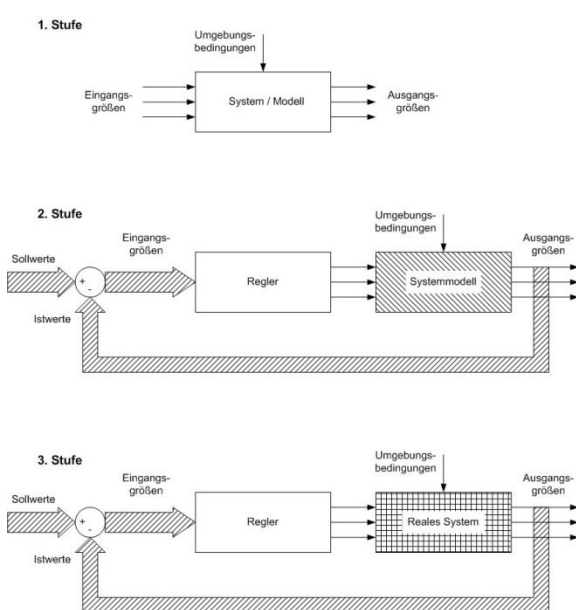


Abbildung 14: Drei Stufen des Rapid Prototyping

1. Stufe: Erstellung Simulationsmodell

In einem ersten Schritt wird das erstellte mathematische Modell des zu regelnden Gesamtsystems in der Simulationsumgebung abgebildet. Dies war gleichbedeutend mit der 1. Stufe im Hardware-in-the-loop Prozess, Details dazu finden sich in der Beschreibung von unter 3.3 Modellbildung und Simulation.

2. Stufe: Reglerentwicklung

Auf Basis des Simulationsmodells konnte in einer 2. Stufe ein energieoptimaler Regler erstellt werden und die Funktionsfähigkeit des Reglers auf Simulationsbasis überprüft werden. Dies betrifft das Erreichen von (Jahres-) Energieerträgen sowie das Einhalten von physikalischen Grenzwerten.

Es darf hier nochmals betont werden, dass der Schwerpunkt der Reglerentwicklung nicht auf der

Optimierung transienter Vorgänge lag, sondern das Erzielen von bestmöglichen statischen Energieerträgen auf Jahresbasis verfolgte.

Für die Reglerentwicklung wurde eine Vorgangsweise gewählt, wo durch die Regelung nur gewünschte Sollwerte vorgegeben wurden (=Vorgabe der Betriebsart), die unterlagerte Regelung von Einzelkomponenten (beispielsweise Kältemittelspeisung beim Verdampfer) wurde meist durch die vorhandene Regeleinheit der Komponenten selbst bewerkstelligt. Somit kann eigentlich nur von der Entwicklung einer Steuerung zur Vorgabe von Sollwerten für die unterlagerte Regelung gesprochen werden. Ausschlaggebend bei der Reglerentwicklung war vor allem hier die Möglichkeit, Solarwärme auch im Solarverdampfer der Wärmepumpe zu nutzen, diese Option wurde bereits in der hydraulischen Anordnung und bei der Komponentendimensionierung vorgesehen. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten der Steuerung der Komponenten sind vielfältig, und wurden in ein mathematisches Optimierungsproblem übersetzt.

Von folgenden Randbedingungen wird dabei ausgegangen:

- Hydraulisch sind 2 Betriebsarten möglich: Kollektor liefert Wärme direkt in den Warmwasserspeicher (Parallelbetrieb), oder Kollektorstärke wird im Solar- Verdampfer der Wärmepumpe genutzt (Seriellbetrieb).
- Die Wärmepumpe nutzt gleichzeitig immer die Luft am Austritt des Hybridkollektors als Wärmequelle.

Es wird eine Leistungszahl als Quotient von gelieferter thermischer Leistung des Gesamtsystems zu dafür benötigter elektrischer Leistung definiert. Diese Leistung ist im seriellen Betrieb definiert als Summe von Heizleistung der Wärmepumpe und Heizleistung des Kollektors, im Parallelbetrieb nur als Heizleistung der Wärmepumpe. Für die Effizienz des Gesamtsystems erscheint der serielle Betrieb nur dann sinnvoll, wenn dadurch eine höhere Leistungszahl als im Parallelbetrieb erreicht werden kann⁵.

Das Ergebnis ist folgende mathematische Bedingung, die in Abhängigkeit der Einstrahlung, der Außentemperatur und des Temperaturniveaus der Wärmebereitstellung für eine indirekte Nutzung der Solarenergie über die der Wärmepumpe (Parallelbetrieb) erfüllt sein muss:

$$\frac{\Delta COP_{HP}}{(COP_{HP,dir} - 1) \eta_{KOLL,dir}} \frac{\Delta \eta_{KOLL}}{\eta_{KOLL,dir}} > 1$$

Die COP Werte können aus dem Kennfeld der Wärmepumpe incl. Luftkollektor ermittelt werden.

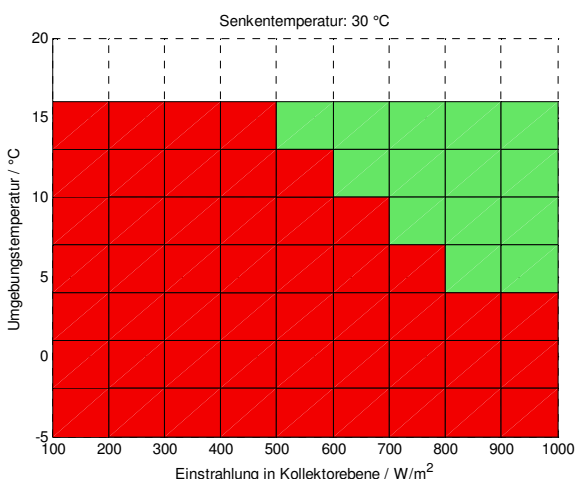


Abbildung 15: Regelung Solar Boost Control, Entscheidungsmatrix

Die Kollektorstärkegrade ergeben sich aus der wasserseitig gemessenen Wirkungsgradkennlinie des Hybridkollektors. Der innerhalb des Simulationsprogrammes entwickelte energieoptimale Regler ergibt sich dann als 3-dimensionales Kennfeld in Abhängigkeit von Einstrahlung, Außentemperatur und Temperaturniveau der Wärmesenke, wie in Abbildung 15 dargestellt. Diese Kennfelder stellen die Basis für die Regler-Software dar, welche über die SPS zum Einsatz gelangte.

3. Stufe: „Hardware in the loop“-Betrieb

Funktioniert die Regelung in der Simulation, wird die Regelung dann erstmals mit der Hardware verbunden und die Funktion am realen System bewertet (3. und letzte Stufe). Die sich ergebenden Abweichungen zwischen Simulation und Messung, die dann in einem iterativen Prozess

Überarbeitungen des Simulationsmodells und/oder des Reglers notwendig machen, bilden den Schlusspunkt.

Beim anschließenden Hardware-in-the-loop Prozess wurden dann Teile des Simulationsmodells (Wärmepumpe, thermischer Hybridkollektor, Umgebungsbedingungen durch real existierende Komponenten ersetzt. Die gewählte Vorgehensweise wird auch in Abbildung 16 verdeutlicht. Dazu war die Integration einer Speicherprogrammierbaren Steuerung SPS in das Gesamtsystem notwendig. Die verwendete Steuerung der Fa. Bernecker&Rainer bot die komfortable Möglichkeit, in Matlab/Simulink³ erstellten Reglercode direkt in für die SPS portierten C-Code zu übersetzen, ohne langwierige Software-Portierung durchzuführen. Dadurch konnten veränderte Parametrierungen und sogar Änderungen am Regler, die in Simulink durchgeführt wurden, automatisiert in einen SPS-Code übertragen werden = Rapid Prototyping. Einen Screenshot der SPS-Grafikoberfläche zeigt Abbildung 17.

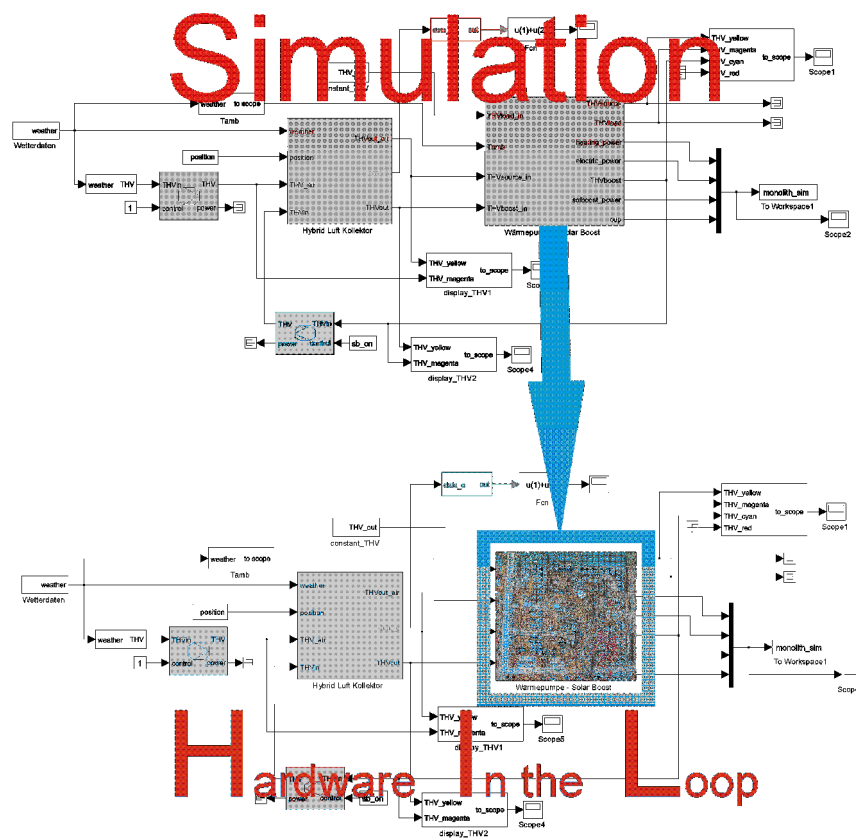


Abbildung 16: Einbindung von realen Komponenten durch "Hardware in the Loop"

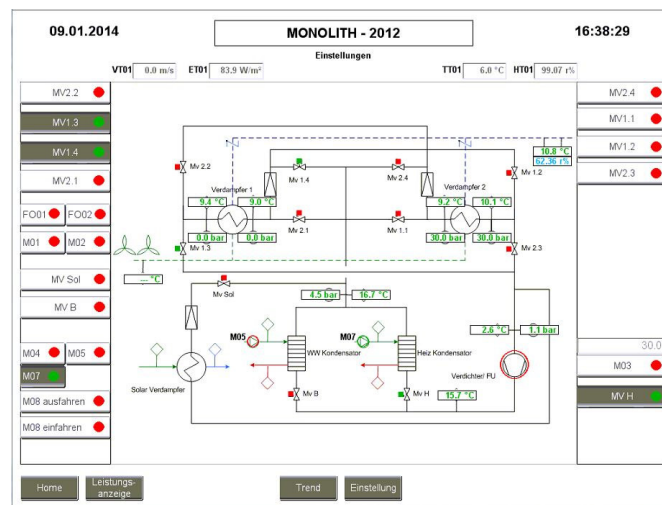


Abbildung 17: Erstellte grafische Oberfläche der Speicherprogrammierbaren Steuerung SPS

3.6 Langzeitvermessung

Im Subtask C des IEA Solar Heating and Cooling Programm Task 44 und Heat Pump Programme Annex 38 (T44A38), wurden zum Vergleich der Jahressimulationsergebnisse von unterschiedlichen Solar und Wärmepumpensystemen gemeinsame Rahmenbedingungen geschaffen. Das ist wichtig, damit die Simulationsergebnisse unterschiedlicher Systeme unabhängig von der Simulationsplattform verglichen werden können.

Für das Warmwasserzapfprofil und für die Gebäudeheizlast stehen sog. Loadfiles aus dem Task 44 zur Verfügung. Als Wärmeabgabesystem für die Langzeitvermessung des Prototyps wurden mehrere Absorber des Fassaden-Hybridkollektors in der Halle montiert und mit dem Prototypen verrohrt.

Das Montoringsystem wurde in die SPS Oberfläche implementiert. Weil die Inbetriebnahme des Prototyps in der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden konnte, war es nicht möglich die Langzeitvermessung zu starten. Der Anlagenteil für die rein solarthermische Warmwasserbereitung konnte jedoch tageweise im Rahmen der Inbetriebnahme-Versuche vermessen werden.

Tabelle 1 zeigt dazu exemplarisch die Energiebilanz eines sonnigen Tages am Beginn der Heizperiode (16. Oktober 2012). Aufgrund der hohen Außentemperatur wurde nur Energie zur Warmwasserbereitung angefordert. Der Betrieb erforderte kein Backup (Wärmepumpe), die Anlage erreichte 100% solare Deckung. Die Auswertung mehrerer solcher Tage bestätigt die Dimensionierung der Heat Unit.

Mittlere Außentemperatur	13,5 °C
Einstrahlung auf die Kollektorebene	51 kWh
Energie Kollektor – Speicher (direkt)	14 kWh
Energie Wärmepumpe - Speicher	0 kWh
Warmwasserbedarf	11,4 kWh
Heizenergiebedarf	0 kWh

Tabelle 1: Energiebilanz Herbsttag

3.7 Optimierung

Obwohl die Langzeitvermessung über die Dauer einer Heizperiode nicht abgeschlossen werden konnte, ließen sich Verbesserungsmaßnahmen sammeln und dokumentieren:

Hybridkollektor:

Bedenken hinsichtlich mangelnder solarer Deckung in den Sommermonaten bei reiner Warmwasserbereitung konnten zerstreut werden. Tabelle 2 zeigt exemplarisch die Energiebilanz eines Sommertages rund um die Sommersonnenwende (Sonnenhöchststand) mit wechselhaftem Wetter, an dem nur Warmwasser aufbereitet wurde.

Es ist ersichtlich, dass kein Backup (Wärmepumpe) zur Bedarfsdeckung nötig war. Trotz der vertikalen Kollektorposition ist eine Deckung des Warmwasserbedarfs möglich.

Mittlere Außentemperatur	21 °C
Einstrahlung auf die Kollektorebene	44 kWh
Energie Kollektor – Speicher (direkt)	11 kWh
Energie Wärmepumpe - Speicher	0 kWh
Warmwasserbedarf	10,6 kWh
Heizenergiebedarf	0 kWh

Tabelle 2: Energiebilanz Sommersonnenwende

Das Azimut-Tracking der Heat Unit ist allerdings Voraussetzung. Der Aufstellungsort der Unit muss ganztägig möglichst verschattungsfrei sein! Die Messungen müssen, um endgültige Aussagen treffen zu können natürlich auf eine gesamte Saison ausgedehnt werden. Wegen der zu erwartenden Abkühlung der Luft bei der Durchströmung des Hybridkollektors in Zeiten ohne solare Einstrahlung sind Bypassklappen zur Umgehung des Hybridkollektors vorzusehen.

Wärmepumpe:

Das Simulationsmodell für die Wärmepumpe zeigte anhand unterschiedlicher Betriebspunkte, dass eine temperaturgeführte Drehzahlregelung der Solarkreispumpe in der Betriebsart „solar boost“ den Einsatzbereich des Solarverdampfers erweitern kann. Die Anlage kann damit auch bei niedriger Einstrahlung mit einem höheren COP betrieben werden.

Wärmespeicher:

Die Speicherverluste durch die Außenaufstellung der Heat Unit sollten noch genauer untersucht werden. Vorgeschlagen wird den Warmwasserspeicher wesentlich stärker zu dämmen.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Markt- und Konkurrenzanalyse zu Beginn des Projektes zeigte, dass kein unmittelbar mit dem System Monolith vergleichbares Konzept am Markt existiert. Viele der aufgezählten Firmen haben weniger als 10 ähnliche Anlagen in Betrieb, oder haben im Berichtszeitraum dieses Geschäftsfeld wieder eingestellt. Auch die Beschaffung von Betriebserfahrungen realisierter Anlagen stellte sich als schwierig bis unmöglich heraus.

Die Systemdimensionierung und die Dimensionierung der Einzelkomponenten konnte mittels Modifikationen bestehender Komponenten und Vermessung neuer Komponenten problemlos abgeschlossen werden. Auch die Modellbildung und die Simulation der Einzelkomponenten war begleitet vom Aufbau des Prototyps ohne wesentliche Abweichungen zu bewältigen.

Das Simulationsmodell der Wärmepumpe wurde in EES² umgesetzt und basiert auf Massen-, Stoff- und Energiebilanzen. Diese modellierte Komponente wurde als Bündel von statischen Kennlinienfeldern in das Programmpaket Matlab/Simulink³ konvertiert, wo die anschließend das dynamische Verhalten des Gesamtsystems untersucht wurde. Mittels einer durchgeführten Parametervariation konnte ein Kennfeld der Leistungszahl des Gesamtsystems in Abhängigkeit der unabhängigen Parameter Umgebungstemperatur, Senktemperatur und Einstrahlung erstellt werden.

Seit der Inbetriebnahme des Prototyps, vor dem Beginn der Langzeitvermessung, war das Projekt, auch wegen der Krankheit eines Projektpartners, geprägt durch Verzögerungen und Unsicherheiten.

Die Langzeitvermessung über die Dauer einer Heizperiode, konnte nicht durchgeführt werden. Aus den durchgeführten Simulationen konnten trotzdem Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Die mathematische Modellbildung der Systemkomponenten wurde dabei mit Messungen validiert.

Folgende Vorteile der Kombination von thermischen Sonnenkollektoren mit Luft- Wasser Wärmepumpen konnten bestätigt werden:

- Die Vorwärmung der Außenluft mittels Luftkollektor, bzw. die Nutzung des Solekreises im Solarkollektor mittels Wärmepumpe ermöglicht die Nutzung von Solarenergie auch bei geringeren Einstrahlungen. Wegen der niedrigen Temperaturniveaus können höhere Kollektorwirkungsgrade erzielt werden.
- Der spezifische Solarertrag der Heat Unit konnte im Einsatzfall Versorgung eines Einfamilienhauses in Würzburg (IEA Task44/ Annex38 Rahmenbedingungen) mit 500 kWh/m² simuliert werden.
- Die unter denselben Rahmenbedingungen erreichbare Jahresarbeitszahl SPF SHP+ konnte mit 3,5 simuliert werden. Dieser Wert beinhaltet als Energieertrag auch den Hybridkollektor. Beim elektrischen Aufwand sind alle elektrischen Verbraucher incl. Heizkreisverteilterpumpen berücksichtigt. Der SPF HP liegt bei 4,1 (Betrachtung nur des Wärmepumpenaggregates).

- Das aufgebaute Systemkonzept erscheint hinsichtlich zu erwartender Systemkosten und Installationsfreundlichkeit (hoher Vorfertigungsgrad, Vermeidung von Installationsfehlern) vielversprechend.

Folgende Vorteile der Kombination von thermischen Sonnenkollektoren mit Luft- Wasser Wärmepumpen konnten nicht bestätigt werden:

- Die Warmwasserbereitung mit der Wärmepumpe, welche im Allgemeinen wegen des hohen Temperaturniveaus mit geringen COPs erfolgt, konnte nicht im erwarteten Ausmaß reduziert werden. Der Grund dafür liegt in der Bauart und Ausrichtung des integrierten Hybridkollektors.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Entwicklung der Energiepreise und die Notwendigkeit den Verbrauch an elektrischer Energie zu reduzieren bzw. elektrische Energie effizienter zu nutzen, rechtfertigt die Arbeit an solaren Wärmepumpensystemen.

Folgende Faktoren verhindern derzeit die Marktdurchdringung:

- Hohe Gesamtinvestitionskosten
- Hohe Komplexität der Systeme
- Fehlende System Zertifizierung

Existierende solare Wärmepumpensysteme sind momentan durch ein sehr marktspezifisches und klimaspezifisches Systemlayout gekennzeichnet. Viele Einflussgrößen wie Hydraulikschema, Regelungsstrategie und Position der Speicher Ein- und Auslässe beeinflussen die Effizienz der Systeme. An jedem System sind also umfangreiche Optimierungsmaßnahmen erforderlich um hohe Jahresarbeitszahlen und einen niedrigen Primärenergiebedarf bzw. einen hohen Anteil an erneuerbaren Energieträgern zu erreichen.

Aktuelle Überlegungen bezüglich Primärenergieeinsparung und Wirtschaftlichkeit sprechen beispielsweise für die Verwendung von unverglasten Kollektoren in serieller Anordnung mit der Wärmepumpe. Die Anwendung von PVT-Kollektoren in marktreifen Systemen ist ein recht junger Trend. Folglich sind Bewertungsmethoden ähnlich wie bei KWK-Anlagen erforderlich, die sowohl den Energieverbrauch aus dem Netz als auch die in das Netz eingespeiste Energie berücksichtigen. Darüber hinaus sind Änderungen des Systemkonzepts oder die Neuentwicklung von Komponenten bei derzeit auf dem Markt befindlichen Systemen nicht ausgeschlossen. Die Einführung von PVT Kollektoren und die Wahl neuer Kältemittel sind nur Beispiele dafür.

Im gegenständlichen Projekt wurden die Notwendigkeit einer Teillastregelung und die Notwendigkeit neuer Testmethoden sichtbar. Die angewendete serielle (oder noch komplexere) Konfiguration wird nach heutigen Standards ignoriert. Ein in Europa vereinheitlichter Systemtest gekoppelt mit der Definition von Mindestanforderungen und einer Kennzeichnung der Systeme ist für die Markteinführung unbedingt notwendig (Prüflabel Solar & Wärmepumpen- Keymark). Dies sollte in Strategiepapieren, auch außerhalb der Anwendung im Einfamilienhaus berücksichtigt werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen können Performance- sowie Überwachungskonzepte entwickelt werden, um bestehende und zukünftige Systeme selbst zu beurteilen. Zum Beispiel kann festgestellt werden, dass bestimmte Konzepte in der Regel weniger effizient sind oder dass erhöhter technischer Aufwand der für bestimmte Konfigurationen benötigt wird, der nicht zu einer entsprechenden Effizienzsteigerung führt.

6 Literaturverzeichnis

¹Ruschenburg J., Herkel S.: A Review of Market-Available Solar Thermal Heat Pump Systems, Freiburg 2012

²EES, Engineering Equation Solver V8.659, F-Chart Software, Madison, Wisconsin, USA, 2011

³Matlab/Simulink, Matrix Laboratory R2008a, The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA, 2008

⁴Carnot Blockset V5.3, Solar Institute Jülich, Jülich, Nordrhein-Westfalen, BRD, 2013

⁵Haller M., Frank E.: Steigert die Nutzung von Solarkollektoren als Wärmequelle für Wärmepumpen die System-Arbeitszahl? 21. OTTI Symposium thermische Solarenergie, 11.-13. Mai 2011, Bad Staffelstein

IMPRESSUM

Verfasser

ASiC - Austria Solar Innovation Center

Hilbert Focke
Ringstraße 43a, 4600 Wels
Tel: +43 7242 9396 5563
Fax: +43 7242 9396 49 5560
E-Mail: focke.hilbert@asic.at
Web: www.asic.at

AutorInnen und Projektpartner

- Hilbert Focke
Austria Solar Innovation Center
- Adolf Starlinger
UNIMET Metallverarbeitung
- Heinz Größwang
IWS Intelligente Wärmesysteme

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH