



**Feldtest mit hocheffizienten
Vakuurröhren-Luftkollektoren zur solaren
Heizungsunterstützung
- HoVaLuko -**

Abschlussbericht

AZ 26956/01-24/2

AZ 26956/02-24/2

Laufzeit: Juli 2008 – Oktober 2011

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

von

Christoph Thoma und Stefanie Bäder

March, August 2012

-Vertraulich-

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Einführung	5
1 Projektkoordination/Planung	9
1.1 Kurzbeschreibung der realisierten Anlagen.....	9
1.1.1 Graben0001.....	9
1.1.2 Graben0002.....	10
1.1.3 Graben0003.....	10
1.1.4 Mengen0001.....	10
1.1.5 Nußloch0001.....	11
1.1.6 Spoeck0001.....	12
1.1.7 Weißenhorn0001.....	12
2 "low-cost"-Messtechnikkonzept	13
2.1 Messwertaufnahme mittels Solarregler.....	13
2.2 Datensicherung und Datenübertragung	14
2.3 Sensorik.....	15
2.3.1 Einstrahlungssensoren.....	15
2.3.2 Temperaturmessung.....	15
2.3.3 Volumenstromsensoren.....	15
2.4 "low-cost"-Messtechnik im Feldtest.....	16
2.4.1 Datenlücken.....	16
2.4.2 Defekte Sensoren	17
2.4.3 Dynamisches Betriebsverhalten	17
3 Messtechnikkonzept mit M-Bus Sensoren	19
3.1 Messtechnikkonzept.....	19
3.1.1 Wärmemengenzähler.....	20
3.1.2 Stromzähler.....	20
4 Bau der Kollektoren und Komponenten	21
4.1 Kollektoren.....	21
4.2 Liquid-Air-Box.....	21
4.3 Ventilator und Wärmeübertrager in Luft-Wassersystemen.....	23
5 Installation der Anlagen und der Messtechnik	24
6 Projektverlängerung und Anlagenumbau	25
6.1 Umbau der Anlage Mengen0001.....	25
6.2 Umbau der Anlage Graben0001.....	26
6.3 Umbau der Anlage Graben0003.....	27
6.4 Umbau der Anlage Graben0002.....	27
7 Auswertung der Messdaten	28
7.1 Auswertung der Messdaten der "low-cost"-Messtechnik.....	28
7.2 Auswertung der Messdaten der M-Bus Sensoren.....	28
7.2.1 Auswertung Graben0001.....	29
7.2.2 Auswertung Mengen0001.....	32
8 Verwertung der Messdaten	38
8.1 Schlussfolgerungen zur „low-cost“-Messtechnik.....	38
8.2 Aus dem Anlagenbetrieb abgeleitete Ergebnisse.....	38
9 Standardkomponenten	39
9.1 Kollektor.....	39
9.2 L.A.-Box.....	39
9.3 Solarkreisbauteile.....	40
9.4 System.....	40
9.5 Solarregler.....	41
Fazit	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Interner Aufbau des Vakuumröhren-Solarluftkollektors.....	6
Abbildung 2: Kollektorfeld der Anlage Graben0001.....	9
Abbildung 3: Kollektorfeld der Anlage Mengen0001.....	11
Abbildung 4: Kollektorfeld der Anlage Spoeck0001.....	12
Abbildung 5: Messstellen zweier Wirbelstromdurchflusssensoren.....	17
Abbildung 6: Messtechnikkonzept mit Wärmemengenzählern.....	19
Abbildung 7: Aktuelle Ausführung der L.A.-Box.....	21
Abbildung 8: Geschrumpfte Wärmedämmung.....	22
Abbildung 9: Einbaufertige Ventilatoreinheit.....	22
Abbildung 10: Rückansicht der L.A.-Box.....	22
Abbildung 11: Ventilator-Wärmeübertrager-Einheit in Weißenhorn.....	23
Abbildung 12: Vormontierte Komponenten.....	25
Abbildung 13: Vereinfachtes Schema der umgebauten Anlage Graben0001.....	26
Abbildung 14: Gemessene Wärmemengen und Strombedarf der Anlage Graben0001 in kWh....	29
Abbildung 15: Errechneter Solarer Deckungsgrad der Anlage Graben0001.....	30
Abbildung 16: Darstellung der monatlich berechneten COP-Werte der Anlage Graben0001.....	31
Abbildung 17: Vereinfachtes Schema der Anlage Mengen0001.....	32
Abbildung 18: Gemessene Wärmemengen und Strombedarf der Anlage Mengen0001 in kWh...	33
Abbildung 19: Solarer Deckungsgrad der Anlage Mengen0001.....	34
Abbildung 20: Darstellung der monatlich berechneten COP-Werte der Anlage Mengen0001.....	36
Abbildung 21: Kollektoren der aktuellen Serie mit L.A.-Box.....	39
Abbildung 22: Einfach aufgebautes System.....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Vakuumröhrenluftkollektoren (Nicht gewichtet).....	5
Tabelle 2: Entfallende Solarkreis-Komponenten im Solarluftkollektorkreis (mit Wasserkreis- bindung) im Vergleich mit einer wassergeführten Solaranlage (Standard-Wasser-Glykolkreis).....	8
Tabelle 3: Auswahl-tabelle Solarregler.....	14
Tabelle 4: Ergebnisse aus Versuchsreihen mit Volumenstromsensoren.....	15
Tabelle 5: Signifikante Änderungen an der L.A.-Box.....	22
Tabelle 6: Installations- und Umbauzeiträume der Anlagen.....	24
Tabelle 7: Messwerte der Wärmemengenzähler und des Stromzählers, berechneter COP sowie solarer Deckungsgrad.....	29
Tabelle 8: Messwerte der Wärmemengenzähler und des Stromzählers, die berechneten Verhält- nisse Strom/Wärmemenge sowie Solarer Deckungsgrad.....	33

Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht zeigt Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Projekt HoVaLuKo (Förderzeichen AZ 26956-24/2). In diesem Projekt wurde der Betrieb von Feldtestanlagen mit neu entwickelten Vakuumröhren-Solarluftkollektoren zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung mit wissenschaftlicher Begleitung untersucht.

Dabei wurde in einem ersten Arbeitspaket die Verwendung von „low-cost“-Messtechnik zur Bilanzierung dieser Anlagen überprüft. Die verwendeten Sensoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie ohne großen finanziellen Mehraufwand die Betriebsüberwachung und Ertragskontrolle kleiner Anlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern ermöglichen.

Vor dem Einbau der Messtechnik in den Feldtestanlagen hat das Fraunhofer ISE die verwendeten Sensoren und Solarregler in einer geeigneten Testumgebung untersucht und mit Referenzsensoren verglichen, wobei sich die Sensoren als geeignet erwiesen haben. Im Betrieb zeigte sich später jedoch eine mangelnde Zuverlässigkeit der Sensoren, weshalb in einer Projektverlängerung in zwei Feldtestanlagen die Messtechnik durch hochwertigere Komponenten ersetzt wurde.

Weitere Untersuchungen wurden am Luft-Wasser-Wärmeübertrager hinsichtlich seiner Übertragungsleistung durchgeführt. Auf den Laborflächen im Außenbereich des Fraunhofer ISE konnte zudem eine Solaranlage inklusive Speicher und Regelung aufgebaut werden, um in dieser leicht zugänglichen Laborumgebung Regelstrategien und das Anlagenverhalten zu untersuchen.

Die Auswahl der Gebäude, die Planung der Feldtestanlagen und ihre Errichtung wurden durch die Kollektorfabrik übernommen. Im Projektzeitraum sind alle Feldtestanlagen installiert und in Betrieb genommen worden.

Die Kollektorfabrik hat die vorhandenen Daten genutzt um die Regelstrategien der Anlagen an den realen Anlagenbetrieb anzupassen und die Systeme zu bewerten. Hinzu kommen die stetige Weiterentwicklung der L.A.-Box (Ventilator-Wärmeübertrager-Einheit) und die Erprobung verschiedener Verfahren zur Kollektormontage auf Dächern.

Für eine hinreichend genaue und zuverlässige Bilanzierung der Wärmeströme innerhalb der Anlagen hat sich die „low-cost“-Messtechnik im Feldeinsatz als ungeeignet erwiesen, was dazu führt, dass das Ziel der geplanten Bilanzierung der Anlagen bis zum ursprünglichen Projektende ohne Verlängerung nicht erfüllt werden konnte.

Eine Projektverlängerung hat den Einbau geeigneter Wärmemengenzähler in zwei der sieben Feldtestanlagen ermöglicht.

Durch die Erfahrungen im Feldtest sind Regelstrategien weiter an das Betriebsverhalten der Anlagen angepasst und verbessert worden. Verschiedene Solarkreis-komponenten wurden zu einem Standardsystemen für den Verkauf an Installateure zusammengestellt und aufeinander optimal abgestimmt. Diese Standardsysteme von der Kollektorfabrik werden seit 2011 direkt oder über Installateure an den Endkunden vertrieben.

Einführung

Aufgrund der stetig steigenden Energiepreise werden immer häufiger große thermische Solaranlagen mit einem hohen solaren Deckungsanteil für den privaten sowie industriellen Bereich eingesetzt. Je größer Solaranlagen werden, desto häufiger ist mit der sogenannten „Stillstandsphase“ (keine Energieentnahme → Heißdampfbildung im Solarkreis oder Fluiddegradation) zu rechnen. Diese Problematik ist oft ein Hemmnis bei Installateuren, Planern und Kaufinteressenten von größeren Kollektorfeldern.

Große Solarluftkollektorfelder dagegen benötigen auch für Stillstandsphasen keine entsprechenden Sicherheitseinrichtungen. Luft kann sich im Gegensatz zu Wasser-Glykol-Gemischen nicht zersetzen, verdampfen oder gefrieren.

Die Verwendung von Luft als Wärmeträger erfordert jedoch höhere Massenströme um dieselben Wärmemengen wie bei Flüssigkeitskollektoren zu transportieren. Dies führt zu einem höheren Druckverlust und zu einem erhöhten Primärenergieaufwand für den Antrieb des Ventilators. In nachfolgender Tabelle 1 sind Vor- und Nachteile von Vakuumröhren-Solarluftkollektoren aufgeführt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Vakuumröhrenluftkollektoren (Nicht gewichtet)

Vorteile	Nachteile
Bereitstellung ohne Übertragungsverluste, wenn die erwärmte Luft direkt genutzt werden kann	Übertragungsverluste durch Luft-Wasser-Wärmeübertrager in Wasser führenden Systemen
Wärmeerzeugung ohne Verdampfung von Wasser oder Zersetzungen des Wärmeträgers	Luft hat eine geringere Wärmekapazität als Wasser
Große Kollektorfelder sind einfach realisierbar, da keine Stagnationsprobleme vorhanden	Fehlende Informationen über Solarluftkollektoren und ihre Einsatzmöglichkeiten bei Kunden
Vorteil der höheren Temperaturfestigkeit der Luft werden mit üblichen Luftflachkollektoren nicht voll ausgeschöpft	Fehlende Standardlösungen in der Systemtechnik
Guter Wirkungsgrad von Vakuumröhren auch bei erhöhter Temperatur (Signifikanter Unterschied zum Flachkollektor ab ca. 120°C)	Bei Solarluftkollektoren erst seit ca. 3 Jahren neue Weiterentwicklungen am Markt sichtbar. Flüssigkeits-Kollektoren wurden davor bevorzugt entwickelt.
Durch die Reduzierung des technischen Aufwandes auf notwendige Anforderungen (einfacher Innenaufbau bei Luftkollektoren), ergibt sich ein Preisvorteil in den Fertigungskosten.	Momentan normativ schlecht bis nicht repräsentiert, wettbewerbsverzerrende Konsequenzen z.B. in Förderprogrammen
Preisvorteil pro m ² Kollektorfläche und Betriebssicherheit können Kunden animieren den eigenen Nutzen durch hohe Deckungsgrade und CO ² -Einsparungen zu steigern	Bei Wasser/Luft Kombianlagen, mindestens zwei Kreise mit parasitärer Energie umzuwälzen
Luft als Fluid ist bei Leckagen weit weniger schädigend als Flüssigkeit	
Kein Schaden durch Gefrieren	

Zu Projektbeginn 2008 traten Solarluftkollektoren nur als „Randerscheinung der Solarthermiebranche“ auf und sind durch vernachlässigtes oder fehlendes Marketing in der Öffentlichkeit nahezu unbekannt. Eine Förderpolitik für Solarluftkollektoren gab es nicht. Gründe dafür waren und sind die geringe Stückzahl, der geringe Bekannt-

heitsgrad von Luftkollektoren und fehlende Normen, wie sie z.B. für flüssigkeitsführende Kollektoren bestehen. Dadurch ist die Möglichkeit Solarluftkollektoren in bestehende wasserbasierende Heizungsanlagen für eine sichere und umweltfreundliche Energieerzeugung einzusetzen bisher nicht weiter verfolgt worden. Neue Anwendungsgebiete im privaten und industriellen Bereich werden nur langsam erschlossen.

Der Kollektor befand sich zu Projektbeginn in einem Entwicklungsstand, der für die ersten Serien verwendet wurde. Er ist mit einem mittleren Sammlergehäuse (Abbildung 1) ausgestattet. An diesem Gehäuse sind die Vakuumröhren mit einem Bajonett-Anschluss befestigt. Dafür ist eine Aluminiumhülse konstruiert worden, die mit der Vakuumröhre verklebt wird. Dadurch wird die Montage der Vakuumröhre erheblich beschleunigt und gleichzeitig eine Abdichtung zwischen Hülse, Vakuumröhre und Sammlergehäuse realisiert.

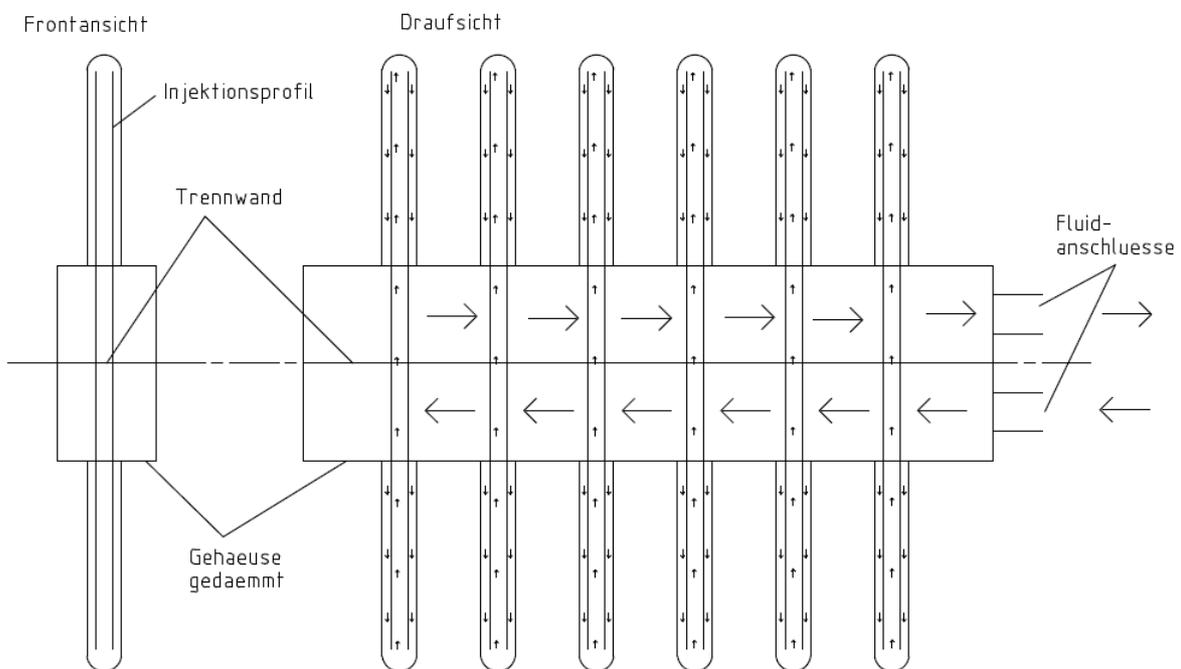


Abbildung 1: Interner Aufbau des Vakuumröhren-Solarluftkollektors

Flach-/Vakuumröhren-Luftkollektoren

Flachkollektoren verlieren durch ihre gute Rückwand- und Seitendämmung, den maßgeblichen Teil der Wärmeverluste über die Frontabdeckung. Durch die Verwendung von Vakuumröhren ist die Wärmedämmung des Kollektors besser. Die wichtigen Effekte wie die thermische Anbindung der Absorberfläche an das Wärmeträger-Fluid und der optische Wirkungsgrad beschreiben den Kollektor in seinem temperatur- und strahlungabhängigen Verhalten. Bei luftbasierten Kollektoren kommt noch eine weitere Charakteristik hinzu; die Massenstromabhängigkeit der Wärmeübertragungsleistung. Je nach Ausführung der Technologien und der Lastprofile der Verbraucher spielt auch die Kapazität eines Kollektors eine entscheidende Rolle. Das winkelabhängige Verhalten des Kollektors, (IAM=Incidence Angle Modifier) ist für die Simulation von Erträgen, abhängig von Tagesverlauf und Jahrgang notwendig.

Aufgrund dieser sich teilweise auch gegenseitig beeinflussender Effekte ist eine Betrachtung der Systemerträge sinnvoll, um eine Aussage über die Güte von Kollektortechnologien machen zu können.

Vergleicht man die Energiesammelfläche mit der Fläche des ebenfalls gedämmten Verteilergehäuses, wo der Großteil der Wärmeverluste bei diesem Kollektor auftritt, fällt dieses Verhältnis mit 6,7 zu 1 sehr klein aus.

Aufgrund der kleinen Querschnitte durch die Vakuumröhren besitzt der Vakuumröhren-Luftkollektor einen erhöhten Druckverlust bei erhöhten Volumenströmen. Um ihn gering zu halten werden Kollektoren im Feld sowie auch die Vakuumröhren zueinander parallel verschaltet. Der Druckverlust kann mit einem geringeren Massenstrom und einer größeren Temperaturspreizung über den Kollektor weiter reduziert werden.

Das Zusammenspiel kleiner Volumenströme und eines guten Wirkungsgrads bei erhöhter Temperatur und evtl. hohem Diffusstrahlungsanteil sind Vorteile von Vakuumröhren-Luftkollektoren (im Folgenden; VRLK). Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad von Systemen mit diesem neuen Kollektor sind zum Zeitpunkt der Antragsstellung noch nicht bekannt und auch im Entwicklungsbereich gibt es keine genaueren Untersuchungen dazu.

Thermische Wirkungsgradmessungen einzelner Kollektoren und an einem Kollektorfeld (Prototyp) haben gezeigt, dass ähnliche Wirkungsgrade wie von wassergeführten Flachkollektoren je nach Betriebssituation eingestellt werden können. Wird in Verbindung mit Luftkollektoren jedoch Wasser als Heizungsmedium verwendet, muss für die Systembetrachtung der Wirkungsgrad der notwendigen Luft-Wasser-Wärmeübertrager berücksichtigt werden.

Kosten

Vergleicht man das System mit durchweg flüssigkeitsführenden Systemen können für Systemkomponenten wie z.B. Pufferspeicher, Heizungsanbindung, Montagesysteme der Kollektoren auf dem Dach, Brauchwassererwärmung mit externen oder internen Wärmetauschern und die Elektroinstallation die gleichen Kosten angesetzt werden. Ein Unterschied mit ca. 250€ liegt im benötigten Wärmeübertrager im Solarkreis. Die Luft im Kollektorfeld wird mit einem Ventilator ca. 500 € (Preis bei geringen Stückzahlen) umgewälzt. Die Kollektorfabrik ist bestrebt, darauf zu achten, dass Stromsparmotoren verbaut werden, die der Feldgröße entsprechend ausgelegt sind.

Das für den Einsatz des VRLK günstigste System ist eine Luftheizung. Diese „einfachen“ Systeme ohne Lüftungsanlage sind nur im Altbau realisierbar, wo das Gebäude nicht „luftdicht“ gebaut ist. Von Nachteil ist, dass im Gebäudebestand oft kein Luftverteilsystem vorhanden ist, was bautechnisch nur sehr aufwendig in einer ästhetisch ansprechenden Form nachgerüstet werden kann und erhebliche Kosten verursacht. Die Einsatzmöglichkeit schränkt sich somit auf Anwendungsfälle ein, bei denen entweder ein solches System vorhanden ist oder nicht benötigt wird (Ferienhaus, evtl. Produktionshallen). Für solch eine Art von Anlagen werden neben dem Kollektor ein Ventilator und ein Thermostat im Gebäudeinneren benötigt. Die erwärmte Luft kann unter Berücksichtigung der geltenden Normen und Richtlinien in das Gebäude geleitet werden. Bei neueren Gebäuden kann der Kollektor mit einem Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung eingebunden werden. Dies ist technisch anspruchsvoll und im Handwerk liegen überwiegend keinerlei Erfahrungen zur Umsetzung vor. Zu diesem Thema sollten dringend weitere Forschungsvorhaben durchgeführt werden. Das Fraunhofer ISE prüft hierzu derzeit ein weiterführendes Projekt.

Tabelle 2: Entfallende Solarkreiscomponenten im Solarluftkollektorkreis (mit Wasserkreisbindung) im Vergleich mit einer wassergeführten Solaranlage (Standard-Wasser-Glykolkreis)

Solarkreiscomponenten	Kosten €*
Sicherheitsventil	30
Solar-Mikroblasenabscheider	80
Ausdehnungsgefäß Solar 35 Liter	75
Solarkreisfluid 60 Liter	180
Verbindungsmaterial Ausdehnungsgefäß z.B. Flexschlauch, Halterung, Installationsaufwand	175
Befüllung und Spülen der Anlage (Arbeitszeit mind. 2 Stunden)	110
Summe	650

*Preise aus Großhandelskatalog netto – Stand 2008 zur Antragsstellung.

Folgende Ziele in verschiedenen Arbeitspaketen wurden im Projekt untersucht:

Sieben thermische Solarluftkollektoranlagen zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung sowie eine komplette Systemtestanlage am Fraunhofer ISE wurden geplant, aufgebaut und energetisch bilanziert. Sofern die nutzbare Dachfläche ausreichend groß war, wurden jeweils mindestens 3 Solarluftkollektoren zu je 9,16 m² (Bruttofläche) installiert. Mit diesen Systemen sollten möglichst hohe solare Deckungsgrade in den Gebäuden realisiert werden. Die ausgewerteten Messdaten ermöglichten die Optimierung der Programmierung der Solar- und Heizungsregler. Die Laufzeiten der Ventilatoren und Heizungspumpen wurden auf die Systeme abgestimmt. Als Messtechnik wurden in diesem Projekt keine kostspielige Industriemesstechnik eingesetzt. Für die Datenerfassung wurden die internen Datenerfassungssysteme der Solarregler verwendet. Für die Temperaturmessungen wurden die für den Anlagenbetrieb benötigten Temperatursensoren verwendet. Aufgrund der „low-cost“-Volumenstromsensoren für ca. 85 € konnten mit dem Projektbudget mehrere Hydraulikkreise messtechnisch erfasst werden. Die Genauigkeit der verfügbaren Messtechnik wurde in den Arbeitspaketen vom Fraunhofer ISE ermittelt. Durch die ausgewerteten Messdaten wurde geklärt inwiefern es „Sinn macht“, mit heißer Luft warmes Wasser bereitzustellen. Die Systemwirkungsgrade der installierten Systeme waren dabei von Interesse. Für eine technisch und wirtschaftlich korrekte Aussage mussten die Laufzeiten der einzelnen Pumpen und Ventilatoren und die verschiedenen Wärmeströme im Heizungssystem bestimmt werden. Um differenzieren zu können, wie groß der Unterschied bei Primärenergieaufwand und Energiegewinnen zwischen wasser- und luftgeführten Systemen ist, wurde versucht die Wärmeströme (Staudruckgitter für Luftvolumenstrommessung) im Luftkreis zu messen. Da dies ohne kostspielige Messtechnik, die zusätzlich den Druckverlust erhöht, nicht möglich ist, wurde auf sehr genaue Messungen im Feld verzichtet. Das Staudruckgitter zeigte im Feldtest in Graben0003 zu ungenauen Werten an, da der Ventilator über einen zu großen Messbereich den Volumenstrom für die Temperaturregelung variierte.

Durch den Vergleich der Anlagen wurden Konzepte zur Einbindung von Vakuumröhren-Solarluftkollektoren in ein Wärmenetz erarbeitet. Die Systeme mussten einfach aufgebaut und sowohl für den Betreiber als auch für Installateure verständlich sein. Ein System musste auch durch die Optimierung der Solarkreiscomponenten kostengünstig und konkurrenzfähig werden. Das Projekt und Zwischenergebnisse wurden z.B. auf dem Symposium Thermische Solarenergie und Solarhaus präsentiert.

1 Projektkoordination/Planung

1.1 Kurzbeschreibung der realisierten Anlagen

Alle installierten Anlagen dienen der Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung in Ein- bis Zweifamilienhäusern. Da im Kollektorfeld Luft als Wärmeträger verwendet wird und die Übertragung der Wärme auf Wasser oder ein Wasser-Glykol-Gemisch für den Anlagenzweck notwendig ist, wird ein Luft-Wasser-Wärmeübertrager eingesetzt. Die Umwälzung der Luft im Kollektorfeld erfolgt durch einen Ventilator.

1.1.1 Graben0001

Das Kollektorfeld – dargestellt in Abbildung 2 – besteht aus 3 Kollektoren. Am Kollektorfeld befindet sich eine L.A.-Box, die sowohl den Ventilator als auch den Luft-Wasser-Wärmeübertrager beinhaltet.

Der Pufferspeicher wird in dieser Anlage von oben beladen. Als Nachheizung wird der bereits im Vorfeld vorhandene Gaskessel genutzt.



Abbildung 2: Kollektorfeld der Anlage Graben0001

Ein externer Plattenwärmetauscher wird zur hygienischen Trinkwassererwärmung verwendet. Mit einem vorgeschalteten Mischventil wird die Trinkwassertemperatur begrenzt. Die Entladung des Pufferspeichers zur Trinkwassererwärmung erfolgt durch eine Freigabe der systemseitigen Ladepumpe, wenn der Plattenwärmetauscher trinkwasserseitig durchströmt wird.

Die Wärme für den Heizkreis wird dem Pufferspeicher direkt entnommen. Die Heizungsregelung erfolgt witterungsgeführt.

1.1.2 Graben0002

Das Kollektorfeld montiert auf einer Scheune besteht aus 3 Kollektoren mit einer L.A.-Box. Ein Kombipufferspeicher befindet sich in der Heizzentrale des Wohngebäudes. Die Entfernung zwischen den beiden Gebäuden erfordert eine lange Solarleitung von ca. 35 Metern zwischen Wärmeüberträger und Kombipufferspeicher. Als Wärmeträger im Solarkreis wird aufgrund der Frostgefahr ein Wasser-Glykol-Gemisch eingesetzt.

Parallel zum Kombispeicher befindet sich ein Bypass, damit der Speicher erst dann beladen wird, wenn die Temperatur im Vorlauf ausreichend hoch ist.

Der bereits vorhandene Gasbrenner heizt den Bereitschaftsteil des Pufferspeichers nach.

Das Trinkwasser wird in einem Edelstahl-Wärmetauscher im Speicher im Durchlaufprinzip erwärmt. Ein thermostatisches Mischventil begrenzt die Trinkwasser-Temperatur auf max. 60 °C.

Die Wärme für den witterungsgeführten Heizkreis wird dem Speicher direkt entnommen.

Eine Besonderheit dieser Anlage ist die Möglichkeit einen Aufenthaltsraum in der Scheune mit einem Radiator im Rücklauf des Solarkreises zu beheizen.

1.1.3 Graben0003

Das Kollektorfeld besteht auch in diesem Fall aus 3 Kollektoren. Wärmeübertrager und Ventilator befinden sich im Dachboden. Die Luftleitungen, die sie mit dem Kollektorfeld verbinden, führen neben dem Kollektorfeld durch das Dach.

Im Dachboden befindet sich außerdem die Heizzentrale mit Trinkwasserspeicher (200 l) und Gastherme, weshalb die Leitungslängen dieser Anlage kurz ausfallen.

Die Heizungsunterstützung erfolgt durch eine Rücklaufanhebung.

Aufgrund der Gefahr von Bauschäden durch austretendes Wasser bei Leckagen wurde auf einen größeren Pufferspeicher verzichtet. Diese Anlage wurde später um einen Steinspeicher für die Lastglättung erweitert.

1.1.4 Mengen0001

Das Kollektorfeld besteht aus 3 Kollektoren auf dem Dach einer Scheune (Abbildung 3). Da mit der erwärmten Luft außerdem die Werkstatt darin erwärmt und vor zu hohen Feuchtigkeiten und Frost geschützt werden sollte, wurde auf eine L.A.-Box verzichtet. Es wurden ein Ventilator und ein Wärmeübertrager mit Lüftungsklappen und einem Filter für die Luftheizung im Gebäudeinneren montiert.

In der Werkstatt steht außerdem der als reiner Solarspeicher, ohne konventionelle Nachheizung, betriebene Pufferspeicher (825 Liter), aus dem der Trinkwasserspeicher sowie der Heizkreis im Wohngebäude beladen wird. Er kann sowohl von oben als auch unten beladen werden. Im Solarkreis wurde eine drehzahlgeregelte Hocheffizienz-Pumpe eingesetzt. Mit dieser geregelten Pumpe können die Wärmeströme vom Luft- und Wasserkreis optimal aufeinander abgestimmt werden.

Eine isolierte Doppelrohr-Erdleitung verbindet den Pufferspeicher in der Werkstatt mit

dem Heizungskeller des Wohnhauses. Die Heizungsunterstützung erfolgt durch die Rücklaufanhebung des Heizkreises.



Abbildung 3: Kollektorfeld der Anlage Mengen0001

1.1.5 Nußloch0001

Zwei Kollektoren bilden das kleinste im Rahmen des Projektes installierte Kollektorfeld. Es ist der Fassade des Hauses um 70° geneigt vorgehängt. Eine L.A.-Box befindet sich an der Rückseite des Kollektorfeldes. Luftein- und -auslass des Anschlusskollektors wurden deshalb ebenfalls auf der Rückseite des Headers ausgeführt.

Der Pufferspeicher (825 l) wird von unten solar beladen. Die Nachheizung – in diesem Fall ein Ölbrenner – belädt bei Bedarf den oberen Speicherbereich.

Die Trinkwassererwärmung erfolgt mit einem externen Plattenwärmetauscher und einer thermischen Begrenzung durch ein Mischventil auf maximal 60 °C. Ein Strömungsschalter im Frischwasser gibt die Ladepumpe frei, wenn gezapft wird.

Der Heizkreis der Fußbodenheizung wird über einen – bereits bestehenden – externen Wärmetauscher mit Wärme aus dem Pufferspeicher versorgt.

Der Rücklauf der Verbraucher Heizkreis und Trinkwarmwasser wird gesteuert entweder in den mittleren oder unteren Bereich des Pufferspeichers eingeleitet.

1.1.6 Spoeck0001

Das Kollektorfeld dieser Anlage besteht ebenfalls aus 3 Kollektoren mit L.A.-Box.

Das Puffervolumen ist aufgrund der geringen Raumhöhe im Aufstellraum auf zwei Speicher (je 300 l) verteilt. Die Nachheizung kann einen der beiden Speicher beladen. Die solare Beladung beider Speicher durch den wasserführenden Solar-kreis erfolgt gesteuert.

Für die Trinkwassererwärmung in einem separaten Trinkwasserspeicher wird der jeweils wärmere Speicher entladen. Für den Heizkreis hat die Entladung des zweiten Speichers Priorität, sofern dieser ein ausreichend hohes Temperaturniveau aufweist.



Abbildung 4: Kollektorfeld der Anlage Spoeck0001

1.1.7 Weißenhorn0001

Das Kollektorfeld der Anlage besteht aus 3 Kollektoren. Wärmeübertrager und Ventilator wurden als kompakte Einheit im Dachboden installiert. Die Luftleitungen sind rückseitig am Kollektor angeschlossen.

Zwei Pufferspeicher (je 825 l) im Keller des Hauses werden parallel gesteuert jeweils im unteren Speicherbereich durch die Solaranlage beladen. In einem der Speicher, der dabei Priorität hat, befindet sich ein Edelstahlwärmetauscher zur Trinkwassererwärmung im Durchlaufprinzip. Die Trinkwassertemperatur wird durch ein thermostatisches Mischventil auf 60°C begrenzt.

Beide Speicher werden durch den Heizkreis, der seit Herbst 2010 die bisherigen Nachtspeicheröfen ersetzt, entladen.

Als Nachheizung dient ein Holzvergaser, der durch den Betreiber manuell befeuert wird. Er belädt die beiden Pufferspeicher in Reihe.

2 "low-cost"-Messtechnikkonzept

Jede Feldtestanlage wurde mit Messtechnik ausgerüstet und vermessen. Durch die Messdaten wurden zum einen die Anlagen überwacht und optimiert, zum anderen wurden die Kennzahlen der Solaranlage (Solarer Deckungsgrad und Nutzungsgrad) bestimmt.

Die Kennzahlen der Anlagen lassen sich erst bestimmen, wenn die gesamten in der Anlage verbrauchten und erzeugten Wärmemengen bekannt sind. Hierzu muss jeder hydraulische Kreis der Anlage mit Sensoren und Messtechnik ausgerüstet werden. Im einfachsten Fall besteht die Anlage aus einem offenem Kreis für das Trinkwasser, einem Heizkreis für die Gebäudeheizung, einem Nachheizkreis und dem Solarkreis. Somit müssen mindestens vier hydraulische Kreise mit Durchfluss- und Temperatursensoren bestückt werden. Die Kosten für eine präzise Messtechnik belaufen sich für eine Anlage auf etwa 15.000 € – 20.000 €. Um diese Messtechnikkosten möglichst gering zu halten, wird in dem Projekt auf eine präzise Messtechnik verzichtet und stattdessen eine „low-cost“ Messtechnik eingesetzt. Gerade im „low-cost“ Messtechnikbereich sind seit 2008 neue Durchflusssensoren auf dem Markt. Diese Durchflusssensoren arbeiten nach dem Prinzip der Kármánschen Wirbelstrasse. Der Preis von gerade einmal 85 € und die dabei akzeptable Messgenauigkeit stehen in einem guten Preis-Leistungs-Verhältnis. Beim Einsatz solcher Sensoren - beispielsweise an einem Solarregler zur Messwerterfassung - belaufen sich die Messtechnikkosten pro Anlage auf weniger als 1.000 €.

Ein weiterer Punkt, der in dem Projekt geklärt werden sollte ist, wie sich dieses Messtechnikkonzept generell eignet, um solarthermische Anlagen zu vermessen. Bisher sind solarthermische Anlagen nur selten mit einer entsprechenden Sensorik zur Überwachung der Solarerträge und Funktion der Solaranlagen ausgerüstet, weshalb Fehler häufig nicht erkannt und diese zu einer verminderten Leistung, bis hin zum Stillstand der Anlage führen können. Durch ein solches kostengünstige Messtechnikkonzept kann in Zukunft ein großer Schritt in Richtung höherer Anlagensicherheit mit minimalem Kapitaleinsatz gemacht werden.

2.1 Messwerterfassung mittels Solarregler

Die Aufgabe des Solarreglers ist primär das Steuern und Regeln der Solaranlage. In diesem Projekt muss der Solarregler zusätzlich auch die Funktion der Datenerfassung übernehmen. Da die angedachten Anlagenschemen aus mehreren hydraulischen Kreisen und der Steuerung des Luftkreises besteht, musste zu Projektbeginn ein Solarregler gefunden werden, mit dem sich die Anlagenschemen und die Messwerterfassung realisieren lassen. Ein Standardsolarregler ist für diese Zwecke nicht geeignet.

Folgende Anforderungen wurden an den Regler gestellt:

- Der Solarregler muss frei programmierbar sein oder zumindest ein Anlagenschema abbilden können, welches den angedachten Anlagen, mit Regelung eines Luft- und Wasserkreis, entspricht.
- Der Solarregler muss eine Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren, wie etwa Temperatur-, Durchfluss- und Einstrahlungssensoren, sowie Aktoren, wie z.B. Ventilator, Lüftungsklappen und Pumpen erfassen und ansteuern können.

- Der Solarregler muss mit einer Datenerfassungsfunktion ausgerüstet sein. Die Datenspeicherung kann hierbei auf einem internen oder austauschbaren Speicher, wie z.B. einer SD-Karte, oder über einen Netzwerkzugang erfolgen. Dieser ist nach Möglichkeit zu bevorzugen.

Eine Produkt- und Marktrecherche ergab, dass für diese Anforderungen nur 4 Solarregler zum Zeitpunkt der Recherche geeignet sind. Diese sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Auswahltabelle Solarregler

Typ, Firma	frei programmierbar	SD-Karte	Fernübertragung der Daten	Datenerfassung	Erweiterungsmodule	Anzahl der Ein/Ausgänge
System-Controller, Solarnext	nein	ja	ja	ja	ja	81/9
TR0704, Steca	ja	nein	ja	ja	ja	7/4
DeltaSol-M, Resol	nein	ja	ja	ja	nein	15/9
UVR1611 K, Technische Alternative	ja	nein	ja	ja	ja	16/12

Als geeignet erweisen sich der Solarregler TR0704 von Steca und der Solarregler UVR1611K vom Hersteller Technische Alternative, da diese zwei Solarregler frei programmierbar sind. Mit den Solarreglern von Resol und Solarnext konnte das Anlagenschema der Solaranlage nicht abgebildet werden.

Die Auswahl fiel hierbei auf den Solarregler UVR1611K vom Hersteller Technische Alternative, da dieser Solarregler die meisten Ein- und Ausgänge besitzt.

2.2 Datensicherung und Datenübertragung

Die Kommunikation zwischen dem Solarregler und dem Laptop wird über einen vom Hersteller angebotenen „Bootloader“ realisiert. Der „Bootloader“ kann zum einen den Speicher des Solarreglers mit Hilfe der herstellereigenen Software „Win-Sol“ auslesen, zum anderen kann über den „Bootloader“ der Regler auch über eine Programmierungssoftware modifiziert und parametrisiert werden.

Über eine Virtual-Network-Client-Software (VNC) und einer TCP-IP Verbindung ist es möglich, sich auf dem Messrechner einzuloggen und den Rechner komplett aus der Ferne zu steuern. Hierdurch ist es nicht notwendig vor Ort zu sein, wenn z.B. eine Änderung in der Regelung umgesetzt wird. So konnten die Reisekosten für die Wartung im Projekt minimiert werden. Der Internetzugang wurde jeweils durch den Anlagenbesitzer zur Verfügung gestellt.

Zur Datensicherung wurden zweimal täglich die Daten vom Solarregler auf den Messrechner übertragen und gesichert. Entsprechende Routinen wurden hierfür auf dem Messrechner programmiert.

2.3 Sensorik

2.3.1 Einstrahlungssensoren

Zur Erfassung der Einstrahlung auf das Kollektorfeld kommen Sensoren mit einem Siliziumchip zum Einsatz. Diese Sensoren wurden zu Beginn des Projektes über mehrere Tage gegen hausinterne Referenzpyranometer vom Fraunhofer ISE getestet.

Es zeigte sich bei der Auswertung der Messdaten von 3 Einstrahlungssensoren, dass die relativen Abweichungen der Messwerte zur Referenz unter der Herstellerangabe von $\pm 5\% \pm 50 \text{ W/m}^2$ liegen. In den Tagessummen sind Abweichungen von maximal $\pm 3\%$ festgestellt worden, was ein sehr gutes Ergebnis für die Sensoren ist.

2.3.2 Temperaturmessung

Die im Projekt zum Einsatz kommenden Temperatursensoren sind zum Einen Standard Pt1000 Anlegesensoren, zum Anderen die Temperaturmessstelle des Wirbelstrom-Durchflusssensors selbst. Zu Projektbeginn wurden die Sensoren unter stationären und dynamischen Bedingungen getestet.

Im Laborversuch wurde im stationären Betrieb die Messgenauigkeit der Sensoren überprüft. Aus diesen Tests geht hervor, dass der verwendete Sensor mit der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit die Temperatur im Rohrinnebereich hinreichend genau bestimmen kann. Die Abweichung der Temperaturwerte lag im Messbereich zwischen 20 und 90 °C unter den gegebenen Testbedingungen im Mittel um $\pm 1,2\%$ von der Referenz.

2.3.3 Volumenstromsensoren

Der in dem Projekt zum Einsatz kommende Volumenstromsensor ist ein Wirbelstrom-Durchflusssensor. Dieser Sensortyp zeichnet sich als eine äußerst kostengünstige Variante zur Erfassung der Durchfluss- und Temperaturwerte, bei gleichzeitig akzeptabler Messgenauigkeit, aus. Dieser Sensor wurde vor dem Einsatz im Feld im Labor getestet.

Hier sollen zwei Ergebnisse aus den Versuchsreihen genannt werden. In der ersten Versuchsreihe wurde der Wirbelstromsensor an einer Präzisionsspannungsquelle betrieben und die Messwerte über ein hochwertiges Labormesswerterfassungssystem erfasst. Bei dieser Versuchsreihe wurden zwei Wirbelstrom-Durchflusssensoren mit unterschiedlichen Durchflussbereichen getestet. Die Durchflussbereiche der beiden Sensoren sind wie folgt:

Tabelle 4: Ergebnisse aus Versuchsreihen mit Volumenstromsensoren

Sensor	Durchflussbereich	Messgenauigkeit
Sensortyp 1	1-20 l/h	5% vom M.EW (60 l/h)
Sensortyp 2	2-40 l/h	1,5% vom M.EW (36 l/h)

In den Laborversuchen wurde beim Sensortyp 1 eine größere Messgenauigkeit festgestellt, als sie vom Hersteller angegeben wird. Der Sensortyp 2 wurde als ein für den Einsatz im Feldtest geeigneter Sensor eingestuft.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde der Durchflusssensor am Solarregler UVR1611 K betrieben und gegen einen Referenzdurchflusssensor geprüft. Bei der Verwendung des Durchflusssensors mit dem Solarregler zeigte sich jedoch, dass das Zusammenspiel zwischen Solarregler und Sensor nicht so unproblematisch ist, wie das des Sensors mit der Labormesstechnik.

Laut Solarreglerhersteller soll die Versorgungsspannung der Durchflusssensoren je nach Anzahl der angeschlossen Sensoren angepasst werden. Hierbei empfiehlt der Hersteller ab zwei Sensoren die Versorgungsspannung um je 0,1 V zu erhöhen. Bei vier angeschlossen Sensoren soll der eingestellte Wert der Versorgungsspannung demnach 5,3 V betragen. Erst durch diese Anpassung bekommen die Sensoren die benötigten 5 V geliefert.

Es wurden Versuchsreihen zum Einfluss der Versorgungsspannung auf die beiden Sensorsignale (Temperatur und Durchfluss) durchgeführt. Bei dem Sensor zeigt sich bei einer Änderung der Versorgungsspannung, dass sich auch die Ausgangssignale verändern.

Durch die Versuche zeigte sich, dass bedingt durch die Anpassung der Versorgungsspannung im Regler, die Werte der Volumenströme vom Solarregler richtig ausgegeben werden, die Temperaturwerte jedoch um 1,7 K verschoben sind. Da der Temperaturwert zur Bestimmung der Kollektorleistung verwendet wird, muss dieses Offset in der Auswertung durch eine Korrektur berücksichtigt werden.

Um auch quantitativ eine Aussage zum Einfluss der Temperaturfehler und der damit verbundenen Korrektur in der Auswertung machen zu können, wurde eine weitere Feldtestanlage am Fraunhofer ISE aufgebaut. Bei dieser Anlage wurde neben der „low-cost“-Messtechnik auch eine kalibrierte Messtechnik installiert. Die Ergebnisse aus diesen Messungen wurden auf dem 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010 in Bad Staffelstein als wissenschaftlicher Beitrag eingereicht und veröffentlicht.

2.4 "low-cost"-Messtechnik im Feldtest

2.4.1 Datenlücken

Während der Projektlaufzeit hat sich gezeigt, dass das verwendete System für eine lückenlose Datenerfassung ungeeignet ist.

Durch die Peripherie des Reglers sind Daten hin und wieder aus nicht bekannten Gründen nicht erfasst worden oder die Datenerfassung ist aufgrund diverser Kommunikationsstörungen nicht möglich gewesen. Folgende Probleme sind häufig aufgetreten:

- Daten werden auch bei ausreichender Speicherkapazität nicht geloggt.
- Kommunikationsstörungen zwischen Speichergerät und Regler, die nur durch Trennen der Verbindungsleitung behoben werden können
- Kommunikationsstörungen, die keinen Datenabruf erlauben. Ein Neustart des Sicherungsgeräts durch eine Kommunikationssoftware oder ein Webinterface kann helfen.
- Betriebsstörungen der Messrechner
- Fehlende Verbindung des Rechners mit dem Kundennetzwerk.

2.4.2 Defekte Sensoren

Durchflusssensoren

Insgesamt wurden in dem Projekt 27 Wirbelstromsensoren in den 7 Anlagen verbaut. Hiervon mussten in der gesamten Projektlaufzeit 20 Sensoren wegen eines Sensordefekts oder einem Verdacht auf einen Sensordefekt ausgetauscht werden. Bei den Wirbelstromsensoren zeigte sich häufig, dass die Druckmessstelle, welche die Ablösewirbel und somit den Durchfluss misst, sich im Laufe der Zeit mit Sedimenten zusetzt. Hierdurch kann der Sensor den Durchfluss nicht mehr richtig erfassen. Ein weiterer Ausfallgrund waren Defekte an der Sensorelektronik.

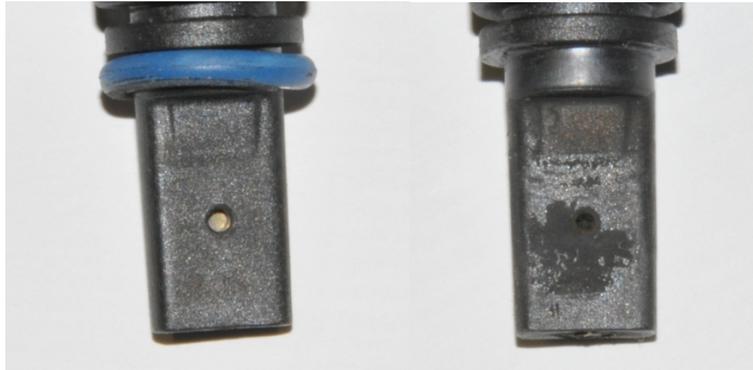


Abbildung 5: Messstellen zweier Wirbelstromdurchflusssensoren

In Abbildung 5 sind die Messstellen zweier Wirbelstromdurchflusssensoren abgebildet. Im linken Bild ist die Druckmembran deutlich zu erkennen. Im rechten Bild sind die Sedimente, welche sich auf dem Sensorkörper und der Druckmembran abgesetzt haben, gut ersichtlich. Mit diesem Sensor können keine Volumenströme mehr bestimmt werden.

Bei Anlagen, in denen die Daten über einen CAN-Bus geloggt werden und die Durchflusssensoren durch die sogenannte Datenleitung mit dem Regler verbunden sind, sind mehrfach Störungen bei der Erfassung des Volumenstroms und zugehöriger Temperaturen aufgetreten, während die Messwertübersicht des Reglers diese Größen richtig wiedergibt. Die Ursache hierfür ist derzeit nicht bekannt. Spielt man das Programm erneut auf den Regler auf, sind die Störungen vorübergehend behoben.

Einstrahlungssensoren

Bei den Einstrahlungssensoren wurde festgestellt, dass die Sensoren teilweise fehlerhafte Werte ausgegeben haben oder komplett ausgefallen sind. So zeigten einzelne Sensoren z.B. auch nachts Einstrahlungswerte von bis zu 100 W/m^2 an. Hierdurch konnten die Messwerte dieser Sensoren zur Kennzahlberechnung der Anlagen nicht verwendet werden.

2.4.3 Dynamisches Betriebsverhalten

Durch die Auswertung der Messwerte zeigte sich, dass die Anlagen teilweise sehr große Schwankungen im Betrieb aufwiesen. Gründe hierfür sind, dass z.B. die Regelungsstrategie des Solarreglers nicht optimal angepasst waren oder die Solaranlagenregelung gegen die Regelung der Heizungsanlage gearbeitet hat. In einer

der Anlagen ergab sich so zeitweise ein Regelverhalten, bei dem die Nachheizung in drei Minuten Intervallen ein- und wieder ausgeschaltet wurde. Unter solchen Bedingungen ist das Messen mittels Anlegetemperatursensor problematisch und liefert große Messfehler.

3 Messtechnikkonzept mit M-Bus Sensoren

Nachdem sich im Projekt herausstellte, dass die Messwerte und Messdaten der „low-cost“-Messtechnik für die Anlagenauswertung nicht verwendet werden können, wurde für zwei der sieben Anlagen ein neues Messtechnikkonzept ausgearbeitet, um so den gestellten Anforderungen an das Projekt gerecht zu werden. Dieses Messtechnikkonzept beinhaltet Kompaktwärmemengenzähler, die über einen M-Bus ausgelesen werden.

In den beiden nachgerüsteten Feldtestanlagen wurde jeder hydraulische Kreis mit einem Wärmemengenzähler versehen. Durch die Wärmemengenzähler lassen sich die verbrauchten und erzeugten Wärmemengen und folglich auch der solare Deckungsanteil der Solaranlage bestimmen.

3.1 Messtechnikkonzept

Die Messwerte der Sensoren werden durch den Messrechner über einen M-Bus-Datenbus ausgelesen und auf der lokalen Festplatte zwischengespeichert. Ein Pegelwandler bildet die Schnittstelle zwischen dem USB-Anschluss des Messrechners und dem M-Bus. Der bestehende Messrechner mit Netzwerkzugang und Fernwartungsmöglichkeit kann weiterhin verwendet werden. Insgesamt kommen 4 Wärmemengenzähler pro Anlage zum Einsatz. Zusätzlich wird ein Stromzähler in der Anlage installiert, mit dem der Stromverbrauch der Solaranlagenkomponenten (Pumpen, Ventilator und Solarregler) erfasst werden kann. Das kontinuierliche Auslesen der Sensoren übernimmt eine Software. Die Messdaten werden einmal täglich abgerufen und gespeichert. Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau des Messtechnikkonzepts.

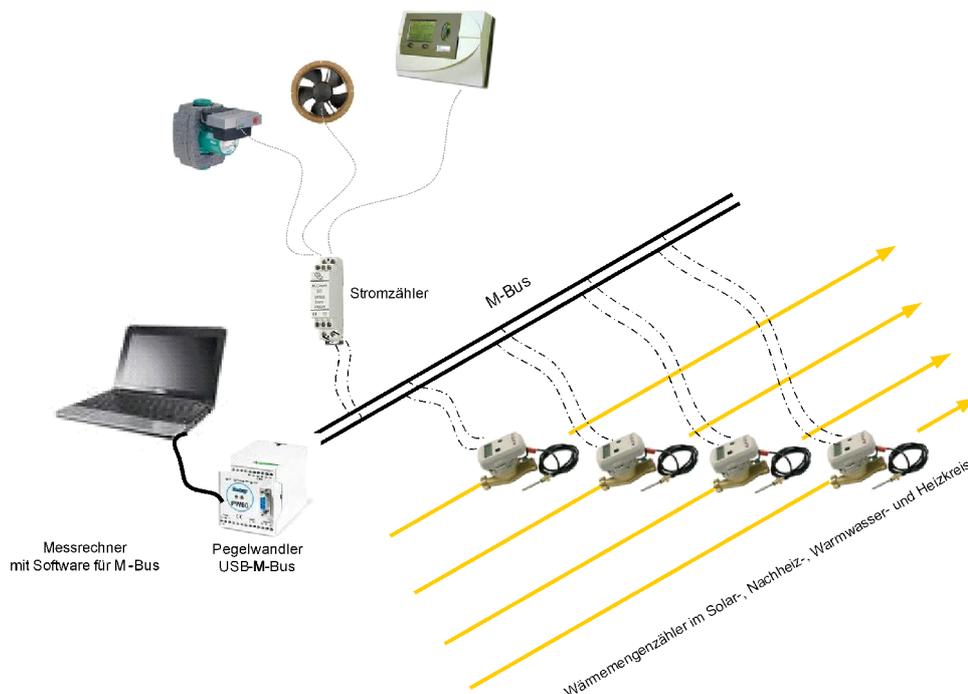


Abbildung 6: Messtechnikkonzept mit Wärmemengenzählern

3.1.1 Wärmemengenzähler

Der Kompaktwärmemengenzähler besteht aus einem Rechenwerk, einem Volumenstrommessteil und einem Temperaturfühlerpaar. Der im Projekt verwendete Sensor hat einen Nenndurchfluss von 1,5 m³/h und kann bis zu einer Temperatur von 90 °C betrieben werden. Das Messprinzip beruht darauf, dass ein Flügelrad eine Drehzahl proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, in das es eingetaucht wird, annimmt. Die Drehzahl ist nahezu unabhängig von Dichte, Druck und Temperatur des Messmediums. Durch die geringen Abmessungen ist eine Einbindung in die bestehende Hydraulik leicht zu realisieren. Die Stromversorgung wird durch eine interne Lithiumbatterie gewährleistet, die eine Betriebsdauer von 6 Jahren hat. Das Temperaturfühlerpaar besteht aus Pt500-Sensoren. Am Wärmemengenzähler ist der Temperaturfühler für den Rücklauf direkt angebracht. Der Temperaturfühler für den Vorlauf wird in einen dazugehörigen Kugelhahn eingebaut. Um die Verbindung der einzelnen Wärmemengenzähler und deren Messwerterfassung zu realisieren, wird ein Kompaktwärmezähler mit M-Bus eingesetzt. Unabhängig von der Möglichkeit des Auslesens der Messwerte über die Datenschnittstelle hat der Wärmemengenzähler einen integrierten Speicher. Hierdurch ist es möglich, auch im Fall eines temporären Messwerterfassungsausfalls, die Messdaten zu erfassen. Eine Bilanzierung der Anlage ist somit sichergestellt.

Für den Durchflusswert sind Eichfehlergrenzen von maximal $\pm 5\%$ laut der EN 1434 zulässig. Laut Herstellerangaben wird dieser Grenzwert jedoch deutlich unterschritten und liegt im Bereich von $< 1\%$. Der typische Arbeitsbereich der Durchflusssensoren liegt im Bereich 0,2 – 0,5 m³, also 200 – 750 l/h.

Nach Rücksprache mit dem Sensorhersteller können die Sensoren auch in einem Wasser-Glykol-Gemisch eingesetzt werden. Bei einem solchen Einsatz müssen die ermittelten Wärmemengen mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren korrigiert und angepasst werden.

3.1.2 Stromzähler

Zur Erfassung des Stromverbrauchs der Solaranlage wurde ein geeichter Stromzähler installiert. Der Stromzähler ist mit einer M-Bus-Schnittstelle ausgerüstet. Die Genauigkeitsklasse entspricht der Klasse 1 für Stromzähler nach IEC 1036. Hierbei gelten die Eichfehlergrenzen von $\pm 1\%$ vom Messwert. Nach Herstellerangaben werden bei dem Sensor Messgenauigkeiten von $\pm 0,5\%$ erreicht. Durch diesen Sensor lassen sich die benötigten parasitären Energien für die Solarpumpe, den Ventilator und den Solarregler mit der gesamten Peripherie bestimmen.

4 Bau der Kollektoren und Komponenten

4.1 Kollektoren

In allen Feldtestanlagen wurden Vakuumröhren-Solarluftkollektoren des Typs „Sun-Storm 2000-2100“ mit je 9,18 m² Bruttofläche eingesetzt. Endkollektoren, Mittelkollektoren und speziell gefertigte Anschlusskollektoren wurden für die Anlagen produziert.

Bei den Anlagen Graben0001, Graben0002 und Spöck0001 wurde kein Anschlusskollektor benötigt, da die L.A.-Box üblicherweise direkt an den Kollektor montiert wird und das Feld abschließt. Sie wurde so konstruiert, dass am Kollektor dafür keine Veränderung vorgenommen werden muss.

Für die Anlagen Graben0003 und Mengen0001 wurden an einen Mittelkollektor Bundkragen angebracht um daran Lüftungsrohre und -schläuche anzuschließen, die letztlich die Dachhaut durchdringen und ins Gebäudeinnere führen. Da vor allem Schläuche, aber auch Rohre, zu einem unschönen Gesamtbild führen, wurde für diese Anlagen jeweils ein Gehäuse zur Kaschierung dieser Elemente unter Verwendung von aluminiumgepressten Kollektorseitenprofile, die auch für die L.A.-Box verwendet werden, hergestellt.

Die Anlage Nussloch0001 ist die erste Anlage, die mit rückseitigen Kollektoran-schlüssen ausgeführt wurde. Hierfür hat man einen Endkollektor verwendet, der letztlich um zwei Kreisausschnitte auf der Rückseite des Headers, an dem zentrisch dazu Bundkragen angebracht sind, ergänzt wird. Auch in der Anlage Weißenhorn0001 wurde dieser Anschlusskollektor eingesetzt.

4.2 Liquid-Air-Box

Die Liquid-Air-Box (kurz: L.A.-Box) beinhaltet im Wesentlichen einen zur Durchströmung des Kollektorfeldes und damit auch zum Wärmetransport im Kollektor benötigten Ventilator und einen Luft-Wasser-Wärmeübertrager.

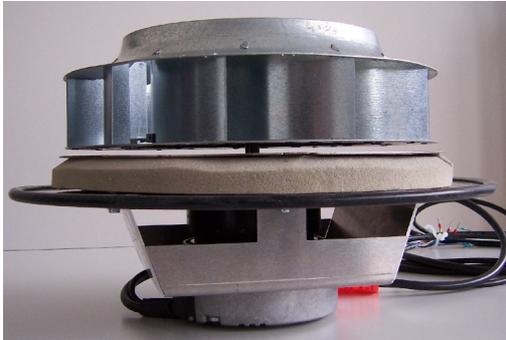
Die Gehäusehöhe stimmt mit der Höhe des Kollektorheaders überein. Aufgrund des jeweiligen Platzbedarfs von Wärmeübertrager und Ventilator ist die L.A.-Box jedoch breiter als der Header selbst. Um die Elektronik im Elektromotor des Ventilators vor zu hohen Umgebungstemperaturen zu schützen, darf der Motor nicht im Innenraum sein. Abbildung 7 zeigt die seit Winter 2010/2011 produzierte Ausführung der L.A.-Box.



Abbildung 7: Aktuelle Ausführung der L.A.-Box

Seit 2008 wurde die L.A.-Box stetig weiterentwickelt und konstruktiv verändert. Tabelle 5 zeigt die verschiedenen Änderungsmaßnahmen auf.

Tabelle 5: Signifikante Änderungen an der L.A.-Box

<p>2008</p>	<p>Prototyp</p> <ul style="list-style-type: none"> • 48 V-Motor, nachgeahmte Spiralkontur im Gehäuseinnern • Motorfixierung am Deckelblech • Dröhnen bei verschiedenen Drehzahlen des Ventilators und Vibrationen durch unzureichende Wuchtgüte • Luftein- und -austritt seitlich versetzt • Graben0001 und Graben0002
<p>Mitte 2009</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 230 V- Motor, vorgefertigtes Spiralgehäuse • Motorfixierung am Deckelblech, starr ausgeführt • Luftein- und -austritt zentriert • Unzureichende Wuchtgüte • Vorgefertigte Spiralkontur • Wetterschutz verhindert ausreichende Motorkühlung
<p>Ende 2009</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Spiralkontur im Gehäuseinnern • Ersatz der im Dauerbetrieb geschrumpften Wärmedämmung durch ein formstabile Produkt • Ventilatorfixierung am Bodenblech • Aerodynamische Kanalführung • Bessere Motorkühlung durch teilweise offenen Wetterschutz • Neue Lage des Wärmeübertragers zugunsten des Ventilators <div data-bbox="847 958 1378 1149" data-label="Image">  </div> <p data-bbox="868 1160 1358 1189"><i>Abbildung 8: Geschrumpfte Wärmedämmung</i></p>
<p>Winter 2010/2011</p>	<p>Endprodukt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Neuer Wärmeübertrager, Auslegung anhand der Betriebsdaten aus den Feldtestanlagen • Keine optisch störenden Ein- und Aufbauten am Gehäuse • Anschlussleitungen des Wärmeübertragers am Gehäuseboden • Feingewuchteter Ventilator • Neukonstruktion der Ventilatoreinheit zum Einbau am Gehäuseboden <div data-bbox="368 1514 874 1854" data-label="Image">  </div> <p data-bbox="389 1865 855 1895"><i>Abbildung 9: Einbaufertige Ventilatoreinheit</i></p> <div data-bbox="911 1514 1374 1854" data-label="Image">  </div> <p data-bbox="932 1865 1358 1895"><i>Abbildung 10: Rückansicht der L.A.-Box</i></p>

4.3 Ventilator und Wärmeübertrager in Luft-Wassersystemen

In den Anlagen Graben0003 und Mengen0001 wurde zunächst aufgrund der Anlagennutzung, die über eine Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung im Wasser führenden System hinausgeht, keine L.A.-Box verbaut. Ein weiteres Hemmnis waren die aufgetretenen Probleme bei den ersten L.A.-Boxen.

Für diese Anlagen wurde der zu diesem Zeitpunkt verwendete Ventilator mit Gleichstrommotor in ein vom Hersteller geliefertes Gehäuse eingebaut und auf einem Grundgestell montiert. Den Wärmeübertrager hat man luftseitig mit passenden Formteilen versehen. In beiden Anlagen saugt der Ventilator die Luft wie in der L.A.-Box durch den Wärmeübertrager. Geschlossen und ergänzt wurde der Luftkreis mit standardisierten Komponenten der Lüftungstechnik.

Im Rahmen von Umbauarbeiten im Jahr 2011 wurde in beiden Anlagen eine L.A.-Box eingesetzt.

Aufgrund der Unterbringung im Dachboden bei der Anlage Weißenhorn0001 fiel die Entscheidung für eine geänderte - in der Produktion mit geringerem Aufwand umsetzbare – Kombination aus Standventilator und Wärmeübertrager, da die deutlich höheren Anforderungen im Außenbereich, wie ein stimmiges Gesamtbild der Systemkomponenten auf dem Dach und das Gehäuse als Schutz von Ventilator, Motor und Wärmeübertrager vor Witterungseinflüssen, nicht erfüllt werden müssen.

Der in der L.A.-Box verwendete Ventilator wurde hierfür in ein Spiralgehäuse eingesetzt. Der Wärmeübertrager ist auf möglichst kurzem Weg durch Standard-Lüftungskomponenten mit dem Ventilator verbunden. Durch die Fixierung der beiden Komponenten auf einer Grundplatte war vor Ort eine schnelle Montage am Dachstuhl möglich.

Abbildung 11 zeigt diese Sonderlösung. Zu sehen sind der Motor des Ventilators sowie die rechteckige Seitenwand des Spiralgehäuses und die Luft führende Rücklaufleitung. Hinter dieser Luftleitung befindet sich der Wärmeübertrager.



Abbildung 11: Ventilator-Wärmeübertrager-Einheit in Weißenhorn

5 Installation der Anlagen und der Messtechnik

Im Rahmen des Projekts hat die Kollektorfabrik sieben Feldtestanlagen in Baden-Württemberg (6) und Bayern (1) errichtet. In jeder Anlage sind neben den zur Anlagensteuerung notwendigen Sensoren auch Wirbelstromsensoren und Strahlungssensoren für die Bestimmung der Anlagen-Kennzahlen eingesetzt worden.

Im Rahmen der verlängerten Projektlaufzeit sind in zwei dieser Anlagen höherwertige Wärmemengenzähler verbaut. Bei den weiteren beiden umgebauten Anlagen, hat sich während der ersten Betriebsjahre ein Optimierungspotential abgezeichnet.

In Tabelle 6 ist aufgeführt, wann die einzelnen Anlagen errichtet und 2011 umgebaut worden sind.

Tabelle 6: Installations- und Umbauzeiträume der Anlagen

Anlage	Installationszeitraum
Graben0001	09/2008 Aufbau der Anlage 07/2011 Umbau der Anlage + neue Messtechnik <ul style="list-style-type: none"> • neue L.A.-Box • neuer optimierter Systemaufbau • Standardisierte Pumpengruppen
Graben0002	12/2008 Aufbau der Anlage 06/2011 Umbau der Anlage <ul style="list-style-type: none"> • neue L.A.-Box • Umbau Solarkreis
Graben0003	04/2009 Aufbau der Anlage 04/2011 Umbau der Anlage <ul style="list-style-type: none"> • L.A.-Box ersetzt Sonderlösung • neuer Systemaufbau • zusätzlicher Feststoff-Wärmespeicher • Luftheizung im Treppenhaus
Mengen0001	08/2009 Aufbau der Anlage 03/2011 Umbau der Anlage + neue Messtechnik <ul style="list-style-type: none"> • L.A.-Box ersetzt Sonderlösung • Umfangreicher Umbau im Keller durch neue Messtechnik
Weissenhorn0001	04/2010 Aufbau der Anlage
Nussloch0001	03/2010 Aufbau der Anlage
Spöck0001	03/2010 Aufbau der Anlage

6 Projektverlängerung und Anlagenumbau

Durch die verwendete „low-cost“-Messtechnik war eine hinreichende Bilanzierung der Energiemengen nicht möglich, was eine Projektverlängerung für eine sinnvolle Anlagenbetrachtung notwendig gemacht hat. Im Rahmen dieser Verlängerung wurden zwei Feldtestanlagen – Graben0001 und Mengen0001 - mit höherwertigen Wärmemengenzählern ausgestattet.

Die Daten der verbleibenden Anlagen werden weiterhin – sofern möglich – ausgewertet. Defekte Wirbelstromdurchflusssensoren werden jedoch nicht mehr ersetzt.

Die Feldtestanlage Graben0003 wurde um einen Feststoffspeicher erweitert und mit einer Luftheizung ausgestattet. Außerdem wurde der Solarkreis der Anlage Graben0002 in Verbindung mit dem Austausch der L.A.-Box abgeändert.

6.1 Umbau der Anlage Mengen0001

Die Anlage Mengen0001 wurde vom Fraunhofer ISE mit Wärmemengenzählern in Solarkreis, Pufferentladung, Trinkwasserspeicherbeladung und Heizkreis ausgestattet. Da die Wärmemengenzähler in die bestehende Hydraulik im Heizungskeller aus Platzgründen nicht eingebaut werden konnten, wurde ein Teil der Anlage im Heizungskeller neu errichtet. Wärmemengenzähler und Ventile wurden bei der Kollektorfabrik auf einer Grundplatte vormontiert um die Installationszeit vor Ort zu verkürzen (Abbildung 12).

Der zur Rücklaufanhebung im Heizkreis verwendete Mischer, der vorher im Heizungskeller in Betrieb war, befindet sich nun am Pufferspeicher in der Scheune. Durch einen Bypass - parallel zum Speicher - kann die Temperatur bei der Entladung begrenzt werden.



Abbildung 12: Vormontierte Komponenten

Das Kollektorfeld war bislang flexibel mit den innen liegenden Komponenten verbunden. Im Dachstuhl waren lange Fall- bzw. Steigleitungen im Luftkreis, was z.B. zur erschwerten Frostfreihaltung der Anlage im zurückliegenden Winter geführt hat.

Ventilator und Wärmeübertrager, die vorher einzeln installiert waren, sind in einer L.A.-Box im Dachstuhl zusammengefasst. Die Raumheizung in der Scheune bleibt weiterhin Bestandteil der gesamten Anlage. Rohrleitungen ersetzen die vorher verbauten Schläuche im Kollektorkreis. In der Falleitung befindet sich eine weitere Klappe, damit das Kollektorfeld zur Unterbindung von Konvektionen während des Frostschutzbetriebes abgesperrt werden kann, wenn die Solaranlage ausgeschaltet ist.

6.2 Umbau der Anlage Graben0001

Auch in dieser Anlage wurden durch das Fraunhofer ISE Wärmemengenzähler in Solarkreis, Heizkreis, Nachheizung und Sekundärkreis einer neuen Frischwasserstation eingesetzt.

Den Einbau der Wärmemengenzähler hat man außerdem für einen umfangreichen Systemumbau genutzt. Der Solarkreis ist nun mit einem Wasser-Glykol-Gemisch anstelle von Wasser befüllt. Der vorhandene Pufferspeicher wurde wieder in die neue Hydraulik eingebunden. Somit ist eine größere Speichernutzung in der Übergangszeit mit Heizbetrieb möglich. Die bestehende als Prototyp noch negativ durch Störgeräusche in Erscheinung getretene L.A.-Box wurde durch ein neues Gerät ersetzt.

Die Nachheizung ist so in das System integriert, dass der zugehörige Speicher nur dann durchströmt wird, wenn die Wärme im derzeit ausschließlich solar beladenen Pufferspeicher nicht ausreicht, um den Energiebedarf zu decken. Kompakte Pumpengruppen haben Einzelkomponenten die vormals in sämtlichen hydraulischen Kreisen verbaut waren, ersetzt. Durch die neue Hocheffizienz-Pumpe und einen Kollektorsensor können die im Projektzeitraum erarbeiteten Regelstrategien für den Solarkreis auch in dieser Anlage eingesetzt werden.

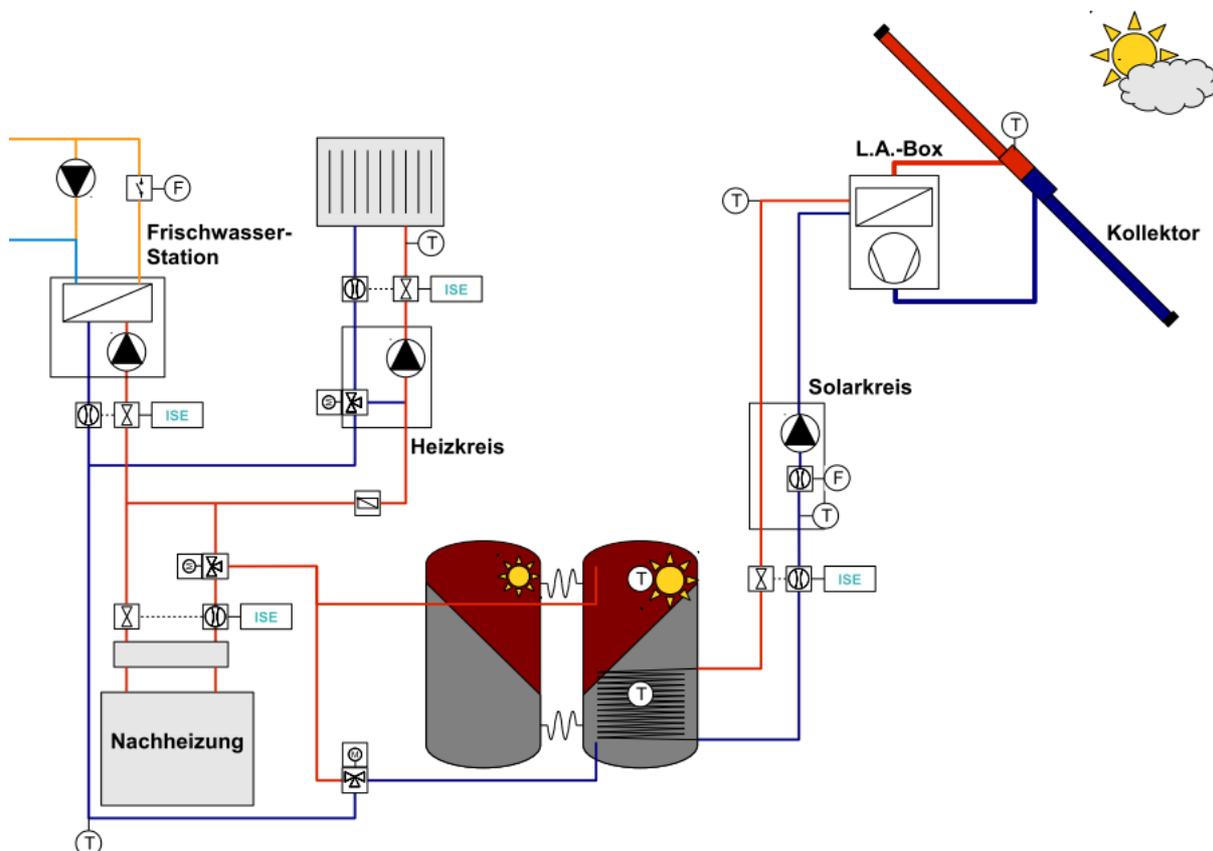


Abbildung 13: Vereinfachtes Schema der umgebauten Anlage Graben0001

6.3 Umbau der Anlage Graben0003

In der Anlage ist eine Rücklaufanhebung mit dem bestehenden System aufgrund der Regelmechanismen der Gastherme nicht möglich, was dazu führte, dass die Anlage aufgrund der Auslegung auf hohe Deckungsgrade für Heizung und Trinkwassererwärmung einen sehr geringen solaren Systemnutzungsgrad aufwies. Das Vorhaben, die Anlage mit einem Feststoffspeicher nachzurüsten um den Ertrag zu erhöhen und damit die solar bereit gestellte Energie besser zu nutzen, wurde umgesetzt.

Der solare Anteil an der Gebäudeheizung wird durch eine Umluftheizung erhöht, indem Luft im Wohnbereich angesaugt, in einem Kreuzstromwärmeübertrager erwärmt und durch einen textilen Luftauslass im bislang elektrisch beheizten Eingangsbereich wieder zugeführt wird. Durch den Kreuzstromwärmeübertrager sind Kollektor- und Speicherkreis vom Luftheizungskreis getrennt. Als Wärmequellen dienen das Kollektorfeld und der Steinspeicher.

Die Beladung des Trinkwasserspeichers erfolgt weiterhin solar oder durch die Nachheizung. Der Steinspeicher kann bei einem ausreichend hohen Temperaturniveau auch genutzt werden um den Trinkwasserspeicher zu beladen.

Der Umbau erforderte vor allem auch bei dieser Anlage eine Neuauflage, bzw. deutliche Erweiterung der Regelstrategien und aufgrund der zusätzlichen Sensoren, Ventilatoren und Klappen eine umfassende Erweiterung der Reglerperipherie.

6.4 Umbau der Anlage Graben0002

Als eine der ersten beiden Feldtestanlagen war Graben0002 mit einer – im Betrieb auffälligen – L.A.-Box ausgestattet, deren Zustand sich in 2 Betriebsjahren deutlich verschlechtert hat. Die alte L.A.-Box wurde durch das neue – nun deutlich leisere – Gerät ersetzt. Auch in dieser Anlage wurde ein Kollektorsensor eingebaut, durch den auf die vorher verwendete strahlungsabhängige Startfunktion verzichtet werden kann. Alle defekten Wirbelstromdurchflusssensoren dieser Anlage wurden ausgebaut.

Im Solarkreis wurden Ventile eingebaut, durch die der Hobbyraum bei Bedarf direkt durch die Solaranlage beheizt werden kann und der lange Solarkreis zwischen diesem Raum und dem Wohngebäude nicht zusätzlich durchströmt werden muss. Dadurch werden die bisherigen Wärmeverluste beim Heizbetrieb im Hobbyraum erheblich reduziert.

7 Auswertung der Messdaten

7.1 Auswertung der Messdaten der "low-cost"-Messtechnik

Die Messdaten liegen als Momentanwerte vor, welche im 15-Sekunden-Takt erfasst wurden. Die Messdaten werden mit Hilfe eines Auswerteskript ausgewertet. Das erstellte Auswerteskript liest Zeile für Zeile aus den Messdaten ein, analysiert die Daten auf vorgegebene Grenzwerte, bestimmt Zeiträume, in denen Messdatenausfälle vorkommen, korrigiert die Temperaturwerte der Durchflusssensoren und führt anschließend die Leistungsberechnung durch. Die hydraulischen Kreise einer Anlage werden durch die Auswertung tageweise berechnet. In einer Übersichtsdatei werden die Tageswerte weiterverarbeitet. Ziele der Auswertung sind:

- Bestimmung der erbrachten Energiemengen für den jeweiligen hydraulischen Kreis. Hierzu gehören der Solarkreis, Nachheizkreis, Heizkreis und der Warmwasserkreis.
- Bestimmung des solaren Deckungsgrades der Anlage, welcher sich aus dem Verhältnis, der von der Solaranlage erbrachten Wärmemenge zum Gesamtwärmebedarf (Nachheizung + Solarwärme) errechnet.
- Bestimmung des solaren Nutzungsgrades. Der Nutzungsgrad bestimmt wie viel von der zur Verfügung stehenden Energie der Sonne von der Solaranlage umgewandelt werden kann.
- Bestimmung der parasitären Energien, also der elektrischen Energie, die zum Betreiben der Solaranlage eingesetzt werden muss.
- Optimierung der Solaranlage durch die grafische Darstellung der Vorgänge in den Anlagen und Auswertung der erstellten Daten.

7.2 Auswertung der Messdaten der M-Bus Sensoren

Die Messdaten der M-Bus-Sensoren werden täglich aus dem Speicher jedes Wärmemengenzählers gelesen und kontinuierlich in ein Datenfile geschrieben. Hierbei wird von dem Wärmemengenzähler nur die Gesamtsumme der Wärmemengen ausgegeben. Für die Auswertung werden die Daten in ein Excel-Datenfile übertragen in dem die täglich bereitgestellte Wärmemenge berechnet und ausgewertet wird. Da die Einstrahlung nicht erfasst wird, können nur der solare Deckungsanteil und der Strombedarf bestimmt werden. Der Solare Nutzungsgrad kann aufgrund der fehlenden Einstrahlungsmesswerte nur theoretisch bestimmt werden. Das Verhältnis zwischen der von der Solaranlage erbrachten Wärmemenge und dem Strombedarf der Solaranlage wird durch die Leistungszahl, dem sogenannten Coefficient of Performance (COP) beschrieben. Zu beachten ist hierbei, dass der gemessene Strombedarf ggf. auch weitere am Solarregler angeschlossene Komponenten wie Zirkulations-, Heizungspumpe und Ventile erfasst.

7.2.1 Auswertung Graben0001

In Abbildung 14 sind die seit Juli 2011 erfassten Wärmemengen dargestellt. Tabelle 7 zeigt die dazu gehörigen Daten.

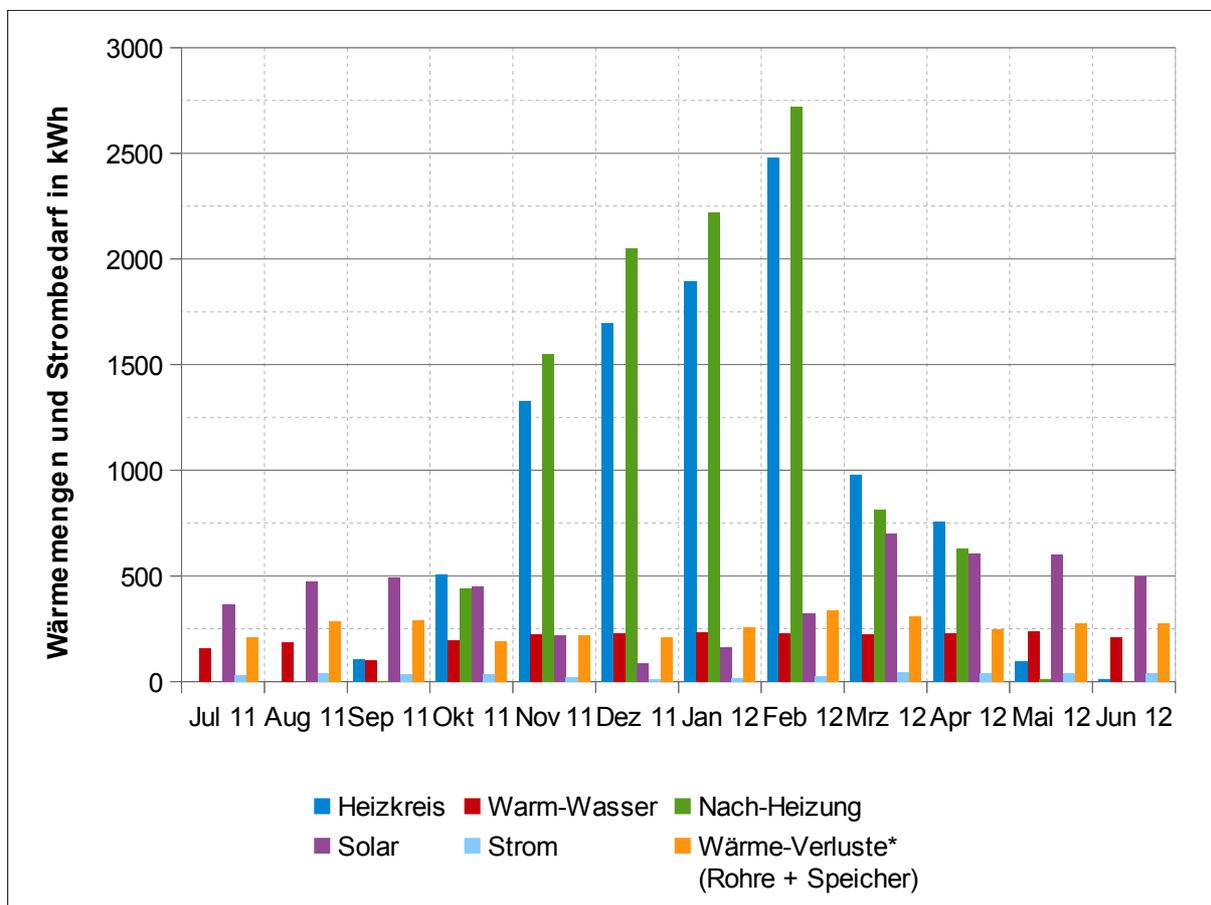


Abbildung 14: Gemessene Wärmemengen und Strombedarf der Anlage Graben0001 in kWh

Tabelle 7: Messwerte der Wärmemengenzähler und des Stromzählers, berechneter COP sowie solarer Deckungsgrad

Monat	Heizkreis	Warm-Wasser	Nach-Heizung	Solar	Wärme-Verluste* (Rohre + Speicher)	Strom	COP	Deckungsgrad
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	%
Jul 11	0	159	0	366	207	32	11,6	100,0%
Aug 11	0	186	0	473	287	39	12,2	100,0%
Sep 11	107	101	4	493	289	35	13,9	99,2%
Okt 11	508	195	441	452	190	34	13,3	50,6%
Nov 11	1330	222	1551	219	218	20	10,7	12,4%
Dez 11	1694	230	2049	86	211	10	9,1	4,1%
Jan 12	1895	233	2222	161	255	15	10,7	6,8%
Feb 12	2481	227	2720	324	336	26	12,4	10,6%
Mrz 12	979	225	816	699	311	43	16,1	46,2%
Apr 12	759	230	629	606	246	42	14,5	49,1%
Mai 12	97	239	11	602	277	41	14,7	98,2%
Jun 12	10	209	0	497	278	40	12,3	100,0%
Summe	9860	2456	10443	4978	3105	377	13,2	32,3%

Abbildung 15 zeigt die in jedem Monat berechneten solaren Deckungsgrade der Anlage. Der Solare Deckungsgrad f_{SOL} errechnet sich zu 32,3 %

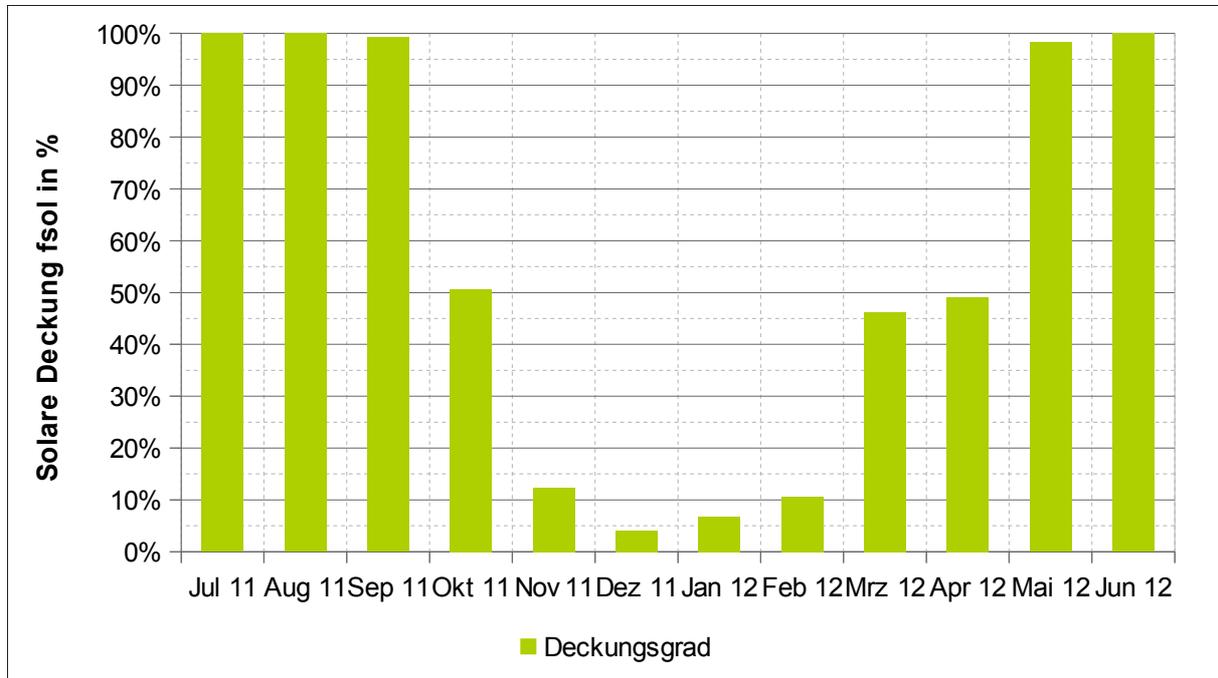


Abbildung 15: Errechneter Solarer Deckungsgrad der Anlage Graben0001

Solarer Deckungsgrad f_{SOL}

Der solare Deckungsgrad f_{SOL} errechnet sich aus

$$f_{\text{SOL}} = \frac{\text{Solar}}{\text{Nachheizung} + \text{Solar}} = \frac{4978 \text{ kWh}}{10443 \text{ kWh} + 4978 \text{ kWh}} = 32,3 \%$$

Theoretischer solarer Nutzungsgrad

Zur Berechnung des solaren Nutzungsgrades werden die durch das Simulationsprogramm T-Sol Expert 4.5 ermittelten Einstrahlungswerte auf das Kollektorfeld verwendet, da die Einstrahlung nicht gemessen werden konnte. Für den Standort Karlsruhe errechnet sich das Strahlungsangebot der Sonne für eine Dachneigung von 30° und eine Ausrichtung vom Azimutwinkel von -21° Süd eine Einstrahlungssumme von $1217,8 \text{ kWh/m}^2$ für das Jahr. Bedingt durch die Bruttofläche des Kollektors von $9,1 \text{ m}^2/\text{Kollektor}$ (Aperturfläche = $5,52 \text{ m}^2/\text{Kollektor}$) ergibt sich für das Messjahr eine Einstrahlungssumme von 33246 kWh .

Der Nutzungsgrad der Solaranlage berechnet sich zu

$$\eta_{\text{Solar}} = \frac{\text{Wärmemenge Solar}}{\text{Einstrahlungssumme auf die Kollektoren}} = \frac{4978 \text{ kWh}}{33246 \text{ kWh}} = 15,0 \%$$

Theoretischer Kollektorjahresertrag

Der Kollektorjahresertrag q_{SOL} errechnet sich zu

$$q_{\text{Solar}} = \frac{\text{Wärmemenge Solar}}{\text{Kollektorbruttofläche}} = \frac{4978 \text{ kWh}}{27,3 \text{ m}^2} = 182 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Leistungszahl COP

Der COP berechnet sich, analog zu der Berechnung für Wärmepumpen, für den bisherigen, gemessenen Zeitraum zu

$$COP = \frac{\text{Solar}}{\text{Strom}} = \frac{4978 \text{ kWh}}{377 \text{ kWh}} = 13,2$$

Die COP-Werte der einzelnen Messmonate sind in Abbildung 16 aufgetragen.

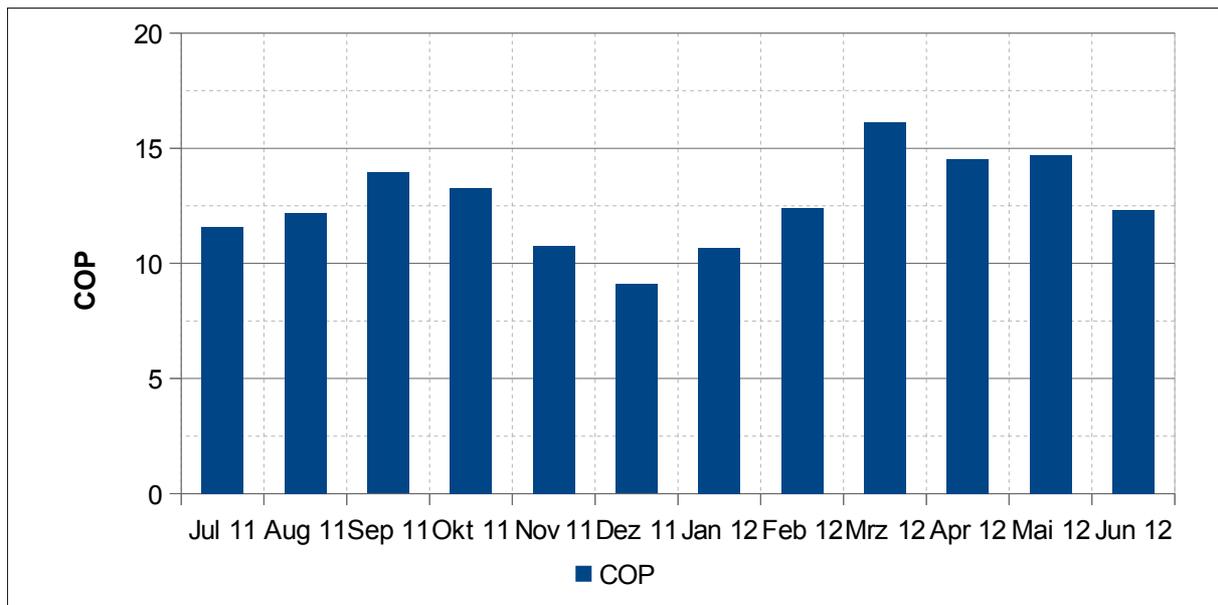


Abbildung 16: Darstellung der monatlich berechneten COP-Werte der Anlage Graben0001

7.2.2 Auswertung Mengen0001

Besonderes Merkmal dieser Solaranlage ist eine Doppelrohr-Erdleitung (nachfolgend auch Fernwärmeleitung), durch die Solarwärme, die auf dem Scheunendach gewonnen wird, in den Heizungskeller im Wohngebäude gelangt. Eine weitere Besonderheit ist die zusätzliche Raumheizung der Scheune durch die direkte Nutzung der solar erwärmten Luft. Abbildung 17 zeigt zur Veranschaulichung das vereinfachte Hydraulikschema.

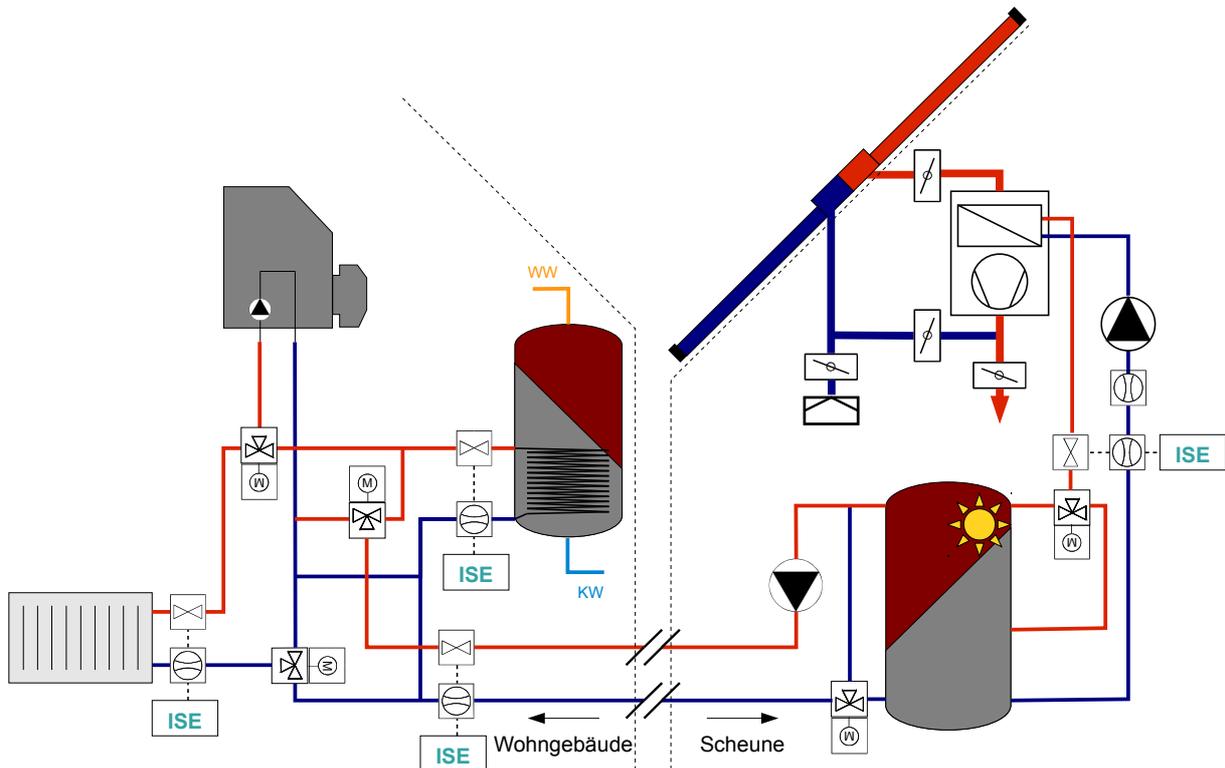


Abbildung 17: Vereinfachtes Schema der Anlage Mengen0001

Die Solaranlage speichert die von den Kollektoren kommende Wärme zuerst im Pufferspeicher in der Scheune. Aus diesem Pufferspeicher wird die zur Beladung des Trinkwasserspeichers oder Rücklaufanhebung benötigte Wärmemenge entnommen und durch die Fernwärmeleitung in das Wohngebäude eingebracht. Aus diesen Gründen kann die Bilanz der solaren Deckungsgrade und des Strombedarfs jeweils auf die von der Solaranlage erbrachten Wärmemengen und auf die übertragenen Wärmemengen bezogen werden.

Der Umbau der Solaranlage ist seit Ende März 2011 abgeschlossen. Von April 2011 bis März 2012 wurden kontinuierlich die Messdaten erfasst und ausgewertet.

In Abbildung 18 sind die gemessenen Wärmemengen und der Strombedarf der Anlage dargestellt. Dieser Darstellung liegen die Messwerte aus Tabelle 8 zugrunde.

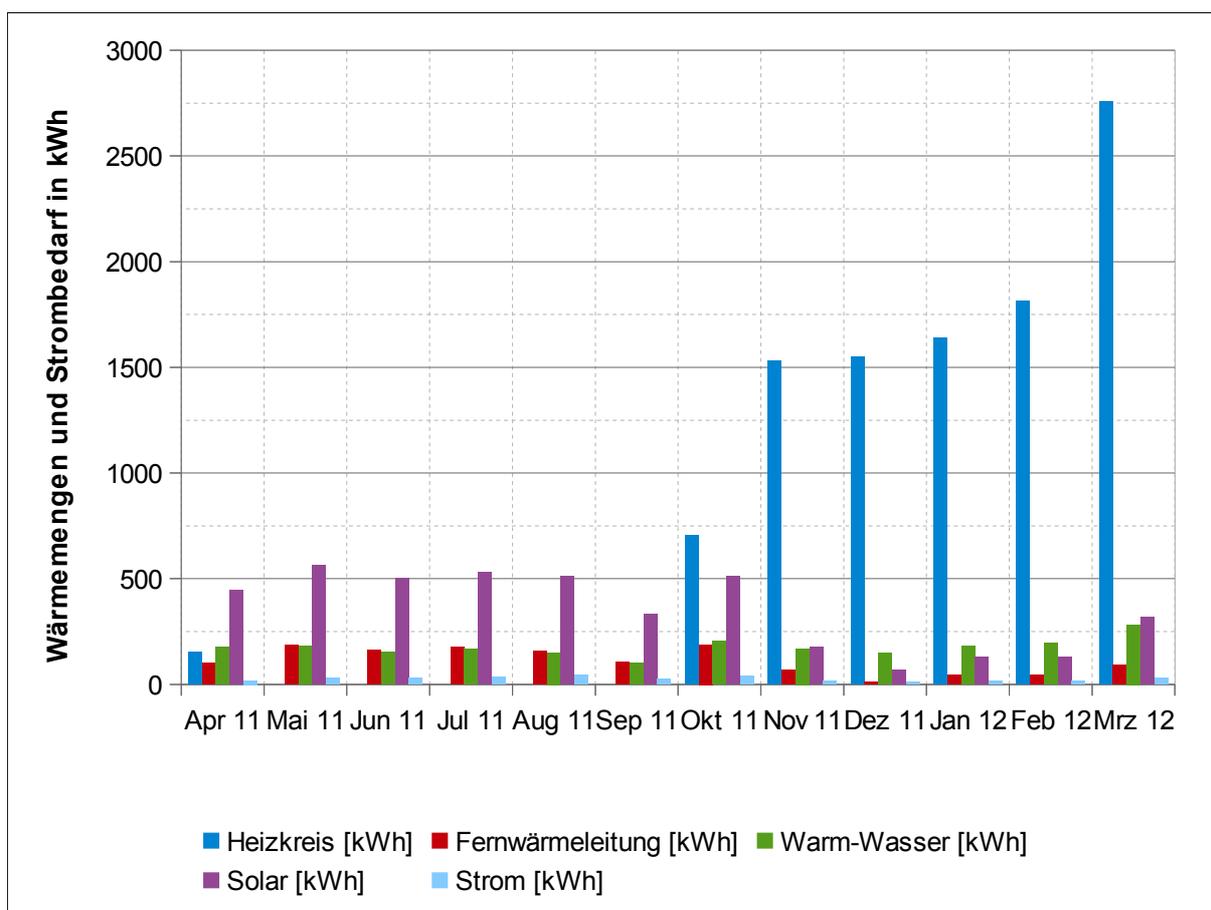


Abbildung 18: Gemessene Wärmemengen und Strombedarf der Anlage Mengen0001 in kWh

Tabelle 8: Messwerte der Wärmemengenzähler und des Stromzählers, die berechneten Verhältnisse Strom/Wärmemenge sowie Solarer Deckungsgrad

Monat	Heizkreis	Fernwärme-Leitung	Speicher-Beladung (Trinkwasser)	Solar	Strom	COP _{FW}	COP _{Solar}	f _{SOL(FW)} ^(*)	f _{SOL(Solar)}
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	-	-		
Apr 11	154	100	176	446	18	5,6	24,9	30,3%	135,2%
Mai 11	0	186	182	564	30	6,3	19,0	102,2%	309,9%
Jun 11	0	161	154	500	30	5,4	16,6	104,5%	324,7%
Jul 11	0	174	166	531	35	5,0	15,3	104,8%	319,9%
Aug 11	0	155	150	510	42	3,7	12,2	103,3%	340,0%
Sep 11	0	104	99	332	26	4,0	12,7	105,1%	335,4%
Okt 11	704	188	205	510	42	4,5	12,3	20,7%	56,1%
Nov 11	1531	70	170	176	18	3,9	9,9	4,1%	10,3%
Dez 11	1547	13	147	68	10	1,3	6,6	0,8%	4,0%
Jan 12	1641	44	182	129	14	3,1	9,0	11,1%	7,1%
Feb 12	1816	44	197	129	15	3,0	8,7	2,2%	6,4%
Mrz 12	2760	90	283	317	28	3,2	11,1	3%	10,4%
Gesamt	10153	1329	2111	4212	307	4,3	13,7	10,8%	34,3%

^(*) In den Sommermonaten ergibt sich eine Überdeckung an Solarenergie, die hier rechnerisch zu einem Deckungsgrad > 100% führt (Siehe Berechnung f_{SOL}).

In Abbildung 19 sind die aus den Messwerten bestimmten monatlichen Deckungsgrade auf die tatsächlich in das Wohngebäude übertragene Wärmemenge aus dem Pufferspeicher bezogen dargestellt.

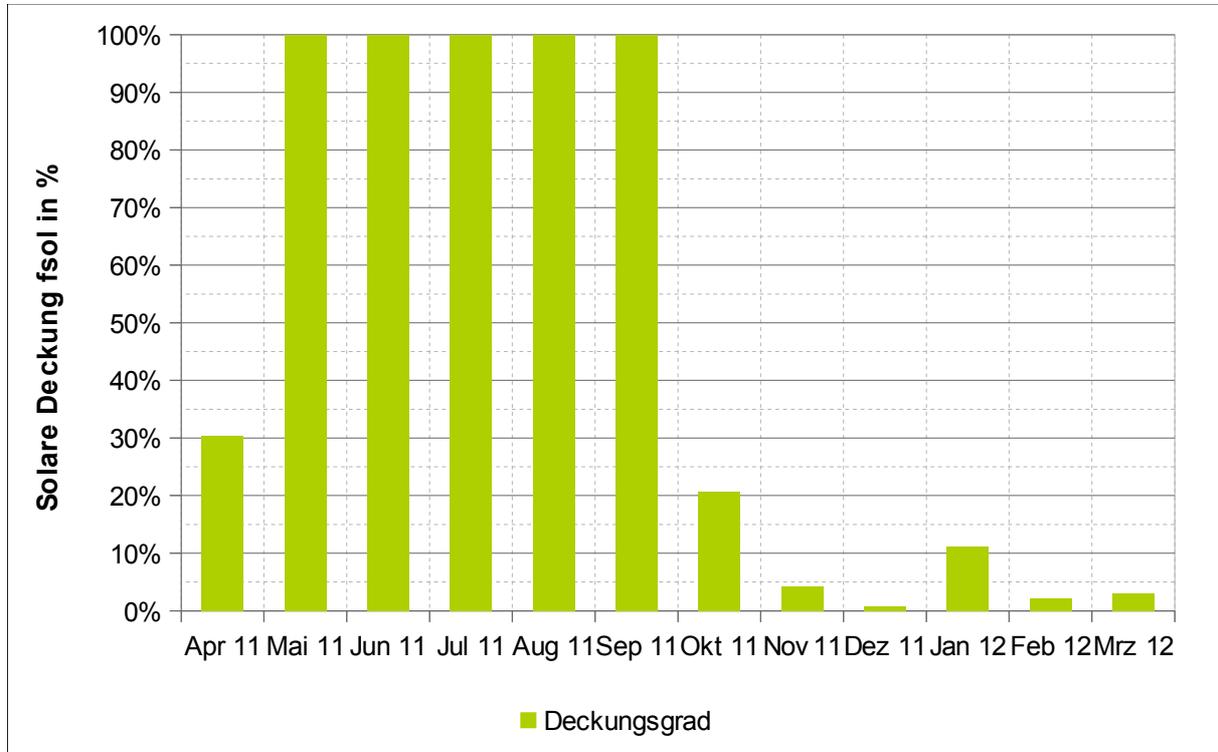


Abbildung 19: Solarer Deckungsgrad der Anlage Mengen0001

Der auf die Fernwärmeleitung bezogene solare Deckungsgrad errechnet sich zu 10,8 %. Aus Abbildung 19 geht hervor, dass die Solaranlage in den Sommermonaten den gesamten Wärmebedarf decken kann. In den Wintermonaten sind die erfassten Solarerträge geringer. Das liegt zum einen daran, dass das Temperaturniveau im Speicher nicht ausreicht um Wärme über die Fernwärmeleitung in die Heizungsanlage oder den Trinkwasserspeicher einzubringen, zum anderen aber auch an der in die Anlage integrierten Luftheizung. Bei geringen Einstrahlungen und niedrigen Temperaturniveaus im Luftkreis führt die Anlage die erwärmte Luft direkt in die Scheune um sie trocken und frostfrei zu halten. Bei diesem Betriebsmodus können die Solarerträge nicht bestimmt werden. Laut Anlagenbetreiber gibt es seit der Installation der Anlage und der Funktion der Direktluftnutzung keine Probleme mehr mit Feuchtigkeit. Die Luftheizung ersetzt eine vorher genutzte elektrische Heizung. Dies erklärt auch das etwas höhere Verhältnis des Stromverbrauchs zur erbrachten Wärme.

Berechnung des Solaren Deckungsgrades f_{sol}

Bei dieser Anlage war es aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht möglich, einen Wärmemengenzähler direkt nach der Nachheizung zu installieren. Die aufgezeichnete, von der Nachheizung erbrachte Wärmemenge entspricht – aufgrund der Anordnung der Wärmemengenzähler – der Summe aus der für die Speicherbeladung und den Heizkreis benötigten Energie, wenn keine Solarunterstützung vorliegt.

$$\text{Nachheizung} = \text{Heizkreis} + \text{Speicherbeladung}$$

Im Fall der Solarunterstützung errechnet sich die von der Nachheizung erbrachte

Wärmemenge aus Heizkreis und Speicherbeladung, abzüglich der durch die Fernwärmeleitung übertragenen Wärmemenge.

$$\text{Nachheizung} = \text{Heizkreis} + \text{Speicherbeladung} - \text{Fernwärme}$$

Der Solare Deckungsgrad, bezogen auf die über die Fernwärmeleitung übertragene Wärmemenge, errechnet sich somit zu

$$f_{\text{SOL(FW)}} = \frac{\text{Fernwärme}}{\text{Nachheizung} + \text{Fernwärme}} = \frac{\text{Fernwärme}}{\text{Heizkreis} + \text{Speicherbeladung}}$$

und bezogen auf die von der Solaranlage erbrachte Wärmemenge in den Zwischenspeicher zu

$$f_{\text{SOL(Solar)}} = \frac{\text{Solar}}{\text{Heizkreis} + \text{Speicherbeladung}}$$

Der Solare Deckungsgrad $f_{\text{SOL(FW)}}$ weist in den Sommermonaten Werte über 100 % auf. Durch die Rohrleitungen zwischen den beiden Wärmemengenzählern der Fernwärmeleitung und der Speicherbeladung treten Wärmeverluste auf, wodurch Unterschiede in den ermittelten Wärmemengen resultieren. Vergleicht man in den Sommermonaten in Abbildung 19 oder Tabelle 8 die Werte, werden diese Unterschiede deutlich. Die über die Fernwärmeleitung übertragene Wärmemenge ist immer etwas höher als die in den Trinkwasserspeicher eingebrachte Wärmemenge. Aufgrund der Berechnung von $f_{\text{SOL(FW)}}$ mit Heizkreiswärmebedarf = 0 kWh ergeben sich größere Werte als 100 %. Die Differenz zu 100 % entspricht den Wärmeverlusten der Rohrleitung und den unbilanzierten Gewinnen in der Scheune.

Theoretischer Solarer Nutzungsgrad

Da die Einstrahlung zur Berechnung des Solaren Nutzungsgrades nicht gemessen werden konnte, werden zur Berechnung dieser Kennzahl, die durch das Simulationsprogramm T-Sol Expert 4.5 errechneten Einstrahlungswerte auf das Kollektorfeld verwendet. Für den Standort Freiburg im Breisgau errechnet sich das Strahlungsangebot der Sonne für eine Dachneigung von 48° und eine Ausrichtung vom Azimutwinkel von -64° Süd eine Einstrahlungssumme von 1097,4 kWh/m² für das Jahr. Bedingt durch die Bruttofläche des Kollektors von 9,1 m²/Kollektor ergibt sich für das Messjahr eine Einstrahlungssumme von 29959 kWh.

Der theoretische Nutzungsgrad errechnet sich zu

$$\eta_{\text{Solar}} = \frac{\text{Wärmemenge Solar}}{\text{Einstrahlungssumme auf die Kollektoren}} = \frac{4212 \text{ kWh}}{29959 \text{ kWh}} = 14,1 \%$$

Bezieht man den Solaren Nutzungsgrad η_{Solar} auf die über die Fernwärmeleitung übertragene Wärmemenge, so ergibt sich ein Solarer Nutzungsgrad von 4,4 %.

Theoretischer Kollektorjahresertrag

Der Kollektorjahresertrag q_{SOL} errechnet sich zu

$$q_{\text{Solar}} = \frac{\text{Wärmemenge Solar}}{\text{Kollektorbruttofläche}} = \frac{4212 \text{ kWh}}{27,3 \text{ m}^2} = 154,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Leistungszahl COP

Der COP berechnet sich, analog zu der Berechnung für Wärmepumpen, für den gemessenen Zeitraum bezogen auf die über die Fernwärmeleitung übertragene Wärmemenge zu

$$COP = \frac{\text{Fernwärmeleitung}}{\text{Strom}} = \frac{1329 \text{ kWh}}{307 \text{ kWh}} = 4,3$$

und auf die, von der Solaranlage in den Pufferspeicher gebrachten Wärmemenge zu

$$COP = \frac{\text{Solar}}{\text{Strom}} = \frac{4212 \text{ kWh}}{307 \text{ kWh}} = 13,7$$

Die aus den monatlichen Energiemengen berechneten COP-Werte sind zum Einen bezogen auf die Wärmemenge, die durch die Fernwärmeleitung ins System eingebracht wird, und zum Anderen bezogen auf die von der Solaranlage eingetragene Wärmemenge in Abbildung 20 dargestellt.

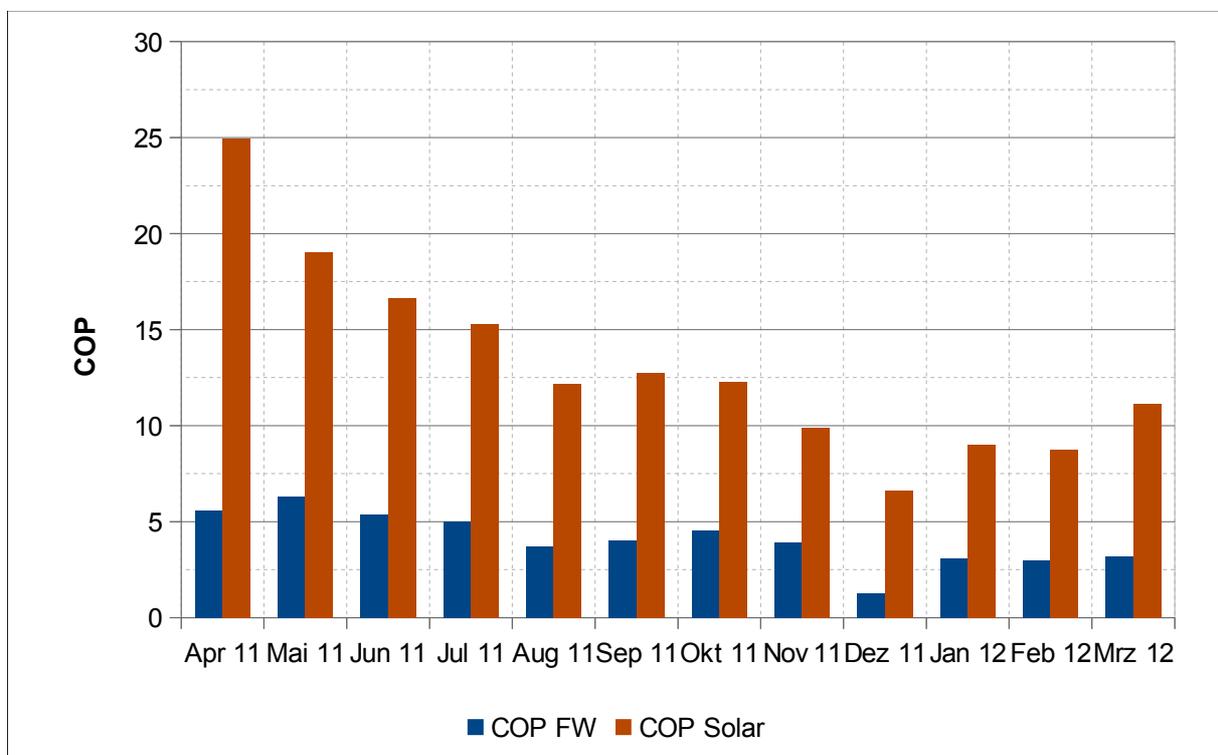


Abbildung 20: Darstellung der monatlich berechneten COP-Werte der Anlage Mengen0001

Frostschutzfunktion und Pumpenkick im Solarkreis

Da der Solarkreis der Anlage nur mit Wasser gefüllt ist, hat der Solarregler eine Frostschutzfunktion in der Regelung implementiert, welche die Solaranlage vor dem Einfrieren schützt, indem durch die Solarpumpe Wärme aus dem Pufferspeicher durch den Solarkreis gefördert wird. Ein zusätzlicher geringer Wärmeaustag aus dem Pufferspeicher ist auf ein wöchentliches kurzzeitiges Anlaufen der Solarpumpe zurückzuführen. Durch diese Funktion, wird ein Festsitzen der Pumpe nach längeren Betriebspausen verhindert.

Der Wärmemengenzähler im Solarkreis hat zur Bestimmung des Wärmebedarfs für diese beiden Funktionen ein spezielles Speicherregister, in dem die dafür aus dem Speicher ausgetragene Wärmemengen erfasst werden. Seit der Wärmemengen-

zähler in Betrieb ist, mussten insgesamt 160 kWh Wärme aus dem Pufferspeicher für diese Funktionen aufgebracht werden.

Die Funktionen des Frostschatzes und des Pumpenanlaufs gibt es auch als Standardfunktion bei handelsüblichen Solarreglern für Solaranlagen, die nur mit Wasser betrieben werden.

8 Verwertung der Messdaten

8.1 Schlussfolgerungen zur „low-cost“-Messtechnik

Eine hinreichend gute Bilanzierung der aufgebauten Systeme war mit der verwendeten "low-cost"-Messtechnik nicht möglich.

Dennoch wurden die Gelegenheit, den Anlagenbetrieb anhand der aufgezeichneten Daten zu verfolgen und die Zugänglichkeit der Anlagen genutzt um Kenntnisse zu sammeln und zu erweitern, die stetig in die Regelstrategien für die geplanten Standardsysteme, deren Aufbau und in die Konstruktion und Entwicklung der eigenen Produkte einbezogen werden.

8.2 Aus dem Anlagenbetrieb abgeleitete Ergebnisse

Im Rahmen des Feldtests wurden erstmals Anlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung mit Vakuumröhren-Solarluftkollektoren errichtet. Durch den Anlagenbetrieb und aufgetretene Betriebszustände hat sich gezeigt, wie diese im Einzelfall noch kundenspezifisch gefertigte Anlagen auch als Standardsysteme sinnvoll aufgebaut werden können, wie zur Verfügung stehende Sensoren in die Regelstrategien eingehen können und welche Funktionen für die Anlagensicherheit notwendig sind. Die Zahl der Sensoren kann auf ein Minimum begrenzt werden.

Als Wärmeträger im Solarkreis wird in Hinblick auf winterliche Stromausfälle und in Anbetracht der aufwendigen Frostfreihaltung des Solarkreises bei der Verwendung von Wasser künftig ausschließlich ein geeignetes Wasser-Glykol-Gemisch verwendet.

Aus dem Anlagenbetrieb im Solarkreis wurden folgende Funktionen, Regelstrategien und Parameter abgeleitet:

- Abschaltung bei Erreichen max. Grenztemperaturen im Solarkreis und im Kollektor zur Stagnationsvermeidung im Wärmeübertrager
- Kurzzeitiges Anlaufen drehzahl geregelter Pumpen mit maximaler Drehzahl um ein Festsitzen der Pumpe bei Ventilatorbetrieb zu vermeiden
- Start- und Ausschalt differenzen zwischen Kollektortemperatur und Speicherbezugstemperatur
- Jeweils temperaturdifferenzabhängige Drehzahlregelung von Ventilator und Solarpumpe unter Verwendung geeigneter Sensoren und Temperaturdifferenzen
- Beladestrategie zur Speicherbeladung oben und unten
- Beladestrategie zur gesteuert parallelen Beladung zweier Speicher

9 Standardkomponenten

Durch die Erfahrungen im Feldtest werden seit 2011 erfolgreich ein Kollektor, diverse Hydrauliksysteme mit der L.A.-Box und zwei auf diese Systeme abgestimmte Regler als Standardprodukte der Kollektorfabrik vermarktet. Der Vertrieb erfolgt direkt oder über Installateure, die auch durch dieses Projekt gewonnen werden konnten.

9.1 Kollektor

Der Header wird nur noch als Durchgangsheader, der zu beiden Seiten offen ist, gefertigt. Für den Einbau des Kollektorsensors werden Montageöffnungen am Header vorgesehen. Zur Verwendung einer L.A.-Box wird ein Enddeckel, der am äußeren Header des Kollektorfeldes befestigt wird, mitgeliefert. Wird das Kollektorfeld diagonal durchströmt, können entsprechend ausgeführte Enddeckel am Kollektor angebracht werden. Die nachfolgende Abbildung 21 zeigt ein Kollektorfeld aus 2 Kollektoren der aktuellen Serie mit einer auf der rechten Seite in Verlängerung der Header angeschlossenen L.A.-Box.



Abbildung 21: Kollektoren der aktuellen Serie mit L.A.-Box

9.2 L.A.-Box

Die L.A-Box wird auch dann eingesetzt, wenn sie nicht auf dem Dach direkt am Kollektorfeld montiert wird. Einzeln verbaute Ventilatoren und Wärmeübertrager werden in Ein- bis Zweifamilienhäusern zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung mit wasserführenden Heizkreisen nicht mehr eingesetzt.

9.3 Solarkreis Komponenten

Im Solarkreis wird eine vorgefertigte OEM-Pumpengruppe mit den erforderlichen Sicherheitseinrichtungen und hocheffizienter Solarpumpe eingesetzt. Die Solarleitung zwischen Pumpenstation und L.A.-Box wird mit einem Edelstahl-Wellrohr ausgeführt. Im Pufferspeicher werden je nach System 1 oder 2 interne Wärmetauscher vorgesehen. Wärmeträger im Solarkreis ist um auch bei winterlichen Stromausfällen ein Einfrieren der Anlage zu vermeiden ein Wasser-Glykol-Gemisch.

9.4 System

Aufgrund der Varianz in den Funktionen der einzelnen Feldtestanlagen und der bereits bestehenden Komponenten vorheriger Systeme, die um die Solaranlage erweitert wurden, konnte während der Projektphase kein Standardsystem festgelegt werden. Ein weiterer Verzögerungsfaktor war die Vielzahl der defekten Sensoren und die daher fehlerhafte Auswertung, die keine zuverlässigen Systemaussagen zugelassen haben.

Im Sommer 2011 konnten jedoch verschiedene Systeme zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung in Ein- und Zweifamilienhäusern definiert werden. Als Ergebnis liegen verschiedene Solarkreis- und Systemschemen vor, die bedarfsorientiert kombiniert werden können.

Ein Beispiel ist das in Abbildung 22 dargestellte System. Die integrierte Nachheizung berücksichtigt die solar in den Speicher eingetragene Wärme bei der Verteilung auf Heizkreis und Trinkwassererwärmung und heizt nur bei Bedarf nach. Zur Steuerung des einfach aufgebauten Solarkreises genügt ein Kompaktregler, in dessen Software Erfahrungen aus dem Feldtest eingearbeitet werden.

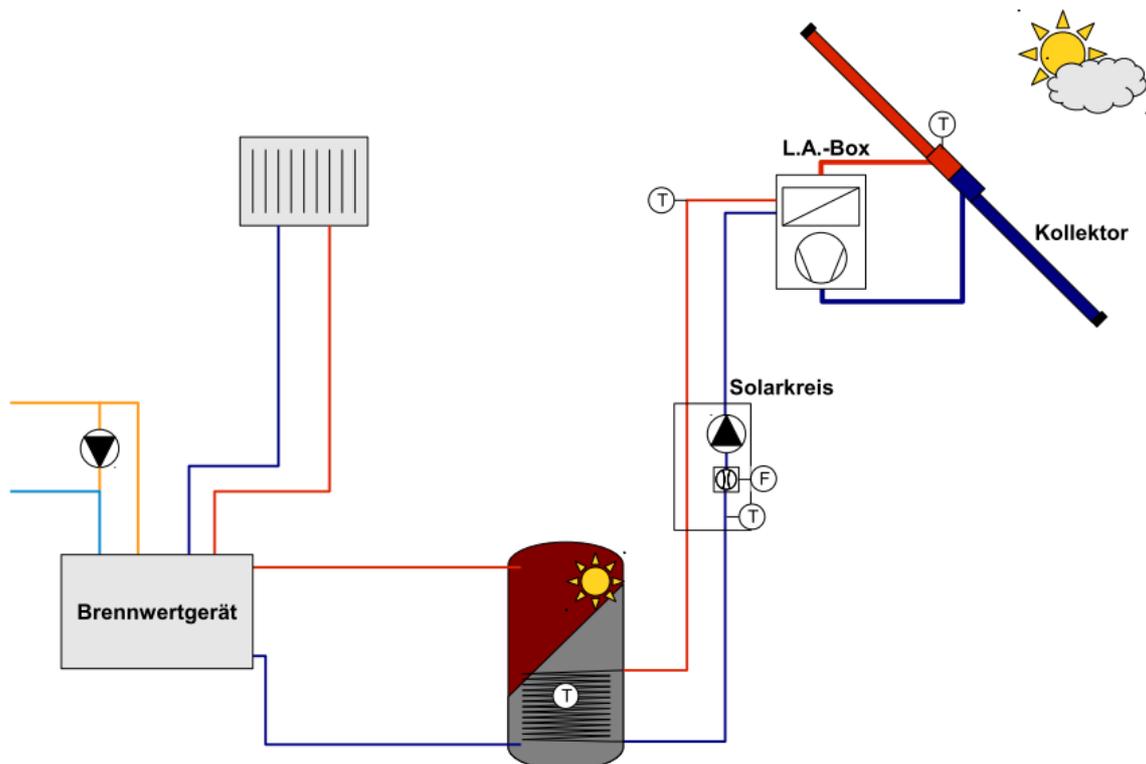


Abbildung 22: Einfach aufgebautes System

9.5 Solarregler

Für einfach aufgebaute Systeme der Kollektorfabrik, in denen nur der Solarkreis gesteuert wird, kann durch eine neu entwickelte Software, in die die Erfahrungen aus dem Feldtest und erarbeitete Regelstrategien einfließen, ein kompakter Solarregler verwendet werden.

Der bisher verwendete frei programmierbare Universalregler UVR 1611 der Technischen Alternative wird in den komplexen Systemvarianten weiterhin eingesetzt, da derzeit kein vergleichbares Produkt auf dem Markt verfügbar ist.

Fazit

Im Projekt „HoVaLuko“ wurden - wie beantragt - alle vorgesehenen Feldtestanlagen geplant und installiert. In jeder Anlage wurde „low-cost“-Messtechnik installiert. Die Messdaten wurden über die gesamte Projektlaufzeit aufgezeichnet und ausgewertet. Da diese Messwerte für die vorlaufende Produktverbesserungen sehr wichtig und hilfreich sind, werden sie auch nach Projektlaufzeit regelmäßig ausgewertet.

Durch die im Projekt getätigten Arbeiten konnte die Kollektorfabrik eigene Standard-systeme mit einer optimierter Wärmeübertrager-Ventilator-Einheit - der sogenannten L.A.-Box - und einem mit angepasster Software ausgestatteten Solarregler bis zur Marktreife entwickeln. Ohne Erfahrung aus dem Projekt hätten diese Optimierungen und Entwicklungen nur sehr schwer durchgeführt werden können. Neben den aus der Analyse der Messdaten gewonnenen Kenntnissen wurden für die Optimierungsarbeiten unter anderem auch Untersuchungen am Wärmeübertrager durch das Fraunhofer ISE verwertet.

Durch die notwendigen Weiterentwicklungsphasen hauptsächlich von der L.A-Box aber auch durch Reparaturen der defekten Messtechnik wurden ca. 260 % mehr Arbeitsstunden als im Projektantrag vorgesehen aufgewendet. Diese Leistungen wurden von der Kollektorfabrik sowie vom Fraunhofer ISE selbst finanziert. Nur durch diese gute Zusammenarbeit mit der DBU und dem Fraunhofer ISE sowie der aufgestockten Eigenfinanzierung wurde diese erfolgreichen Entwicklungen mit allen Beteiligten ermöglicht.

Die ambitionierten Projektziele einer fundierten Anlagenbewertung mit „low-cost“-Messtechnik konnten nur bedingt erreicht werden. Wie sich gezeigt hat, lassen sich die Vorgänge in den Solaranlagen mit der später eingesetzten Messtechnik gut darstellen. Hierdurch wird es erst möglich, das Regelverhalten und Vorgänge in den Anlagen nachvollziehbar zu machen. So konnten zum Beispiel Defekte an Geräten und anderen Hydraulikkomponenten aufgedeckt und behoben werden. Für eine gezielte Bestimmung der Kennzahlen der jeweiligen Solaranlage sind Wirbelstrom-durchflusssensoren nach unseren Erfahrungen nicht geeignet. Im Labor lieferten die Sensoren zufriedenstellende Werte, weshalb diese Sensoren im Feld eingesetzt wurden. Im Feldtest hingegen kam es aufgrund von Sensordefekten zu vielen Sensorausfällen. Weiter zeigte sich, dass die Peripherie des verwendeten Reglers gerade im Bereich der Gerätekommunikation noch Mängel und Schwächen aufweist, durch die auch Messdaten verloren gegangen sind. Aufgrund von Sensorausfällen und fehlenden Messdaten lassen sich die Anlagenkennzahlen nicht berechnen.

Wo bei der „low-cost“-Messtechnik Probleme aufgetreten sind, läuft die Messtechnik mit den Kompaktwärmemengenzählern und M-Bus Sensoren zuverlässig und zufriedenstellend. Dadurch können die Anlagenkennzahlen wissenschaftlich fundiert angegeben und die Projektziele doch noch erreicht werden.

Zusätzlich zu den Feldtestanlagen wurde eine weitere Testanlage am Fraunhofer ISE errichtet, bei der neben der „low-cost“-Messtechnik kalibrierte Messtechnik installiert wurde. An ihr wurden Vergleiche zwischen der „low-cost“-Messtechnik und der Referenzmesstechnik, sowie Untersuchungen hydraulischer Verschaltungsvarianten durchgeführt.

Bei den Tagungen „Symposium Thermische Solarenergie“ 2009 und 2010 wurden zwei wissenschaftliche Beiträge eingereicht und veröffentlicht. 2009 wurde das

Projekt vorgestellt und präsentiert. 2010 wurde gezielt auf die Probleme mit der „low-cost“-Messtechnik eingegangen.

Zum Abschluss des Projekts weisen wir darauf hin, dass sich der Hersteller der Wirbelstromsensoren, die im Projekt eingesetzt worden sind, seit einiger Zeit mit den Sensorschwächen auseinandersetzt und den Sensor aktiv und erfolgreich weiterentwickelt.

In verschiedenen derzeit auf dem Markt verfügbaren Frischwasserstationen wird der Sensor zur Funktionskontrolle und Steuerung eingesetzt. Einige Solarreglerhersteller sehen einen gesonderten Eingang für diesen Sensortypen vor.

Die Kollektorfabrik und das Fraunhofer ISE danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung und Unterstützung des Projektes.