

Pilotanlage mit RefleC-Kollektoren: Anlagenkonzept und Monitoring-Ergebnisse

S. Heß¹, M. Klemke¹, A. Oliva¹, P. Di Lauro¹, M. Hermann¹, G. Stryi-Hipp¹
G. Kramp², Okke v. Bodungen², W. Eisenmann² und V. Hanby³

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
E-Mail: stefan.hess@ise.fraunhofer.de, Tel.: +49 761 4588 5739

² Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Zimmermannstraße 12, 35091 Cölbe

³ Institute of Energy and Sustainable Development, DMU Leicester, LE1 9BH UK

Abstract

Die Firma Wagner & Co. Solartechnik hat in den vergangenen dreieinhalb Jahren unter wissenschaftlicher Begleitung des Fraunhofer ISE einen zweifach abgedeckten Flachkollektor mit externem Reflektor zur Gewinnung von Prozesswärme bis 150 °C entwickelt. Im Juni 2010 wurde eine Pilotanlage mit dem neu entwickelten Kollektor installiert. Er



Abb. 1: Kollektorfeld der Pilotanlage auf dem Dach der Wäscherei Laguna in Marburg (Lahn).

wird hier direkt im Betrieb mit seinem Basiskollektor ohne Reflektoren verglichen. Das Prozesswärme-Solarsystem unterstützt das Dampfnetz einer Wäscherei durch die Erwärmung von Kesselspeisewasser (von 90 °C auf max. 120 °C) und Kesselzusatzwasser (20 °C bis 90 °C). Auch Warmwasser für die Waschmaschinen wird vorgewärmt (20 °C bis 60 °C). Seit 2. Juli 2010 führt das Fraunhofer ISE ein detailliertes Monitoring des gesamten Systems durch.

Eine Analyse der Daten aus den ersten vier Betriebsmonaten zeigt, dass der RefleC-Kollektor bei Eintrittstemperaturen über 80 °C im Mittel einen 92 % höheren Ertrag erzielt als sein doppelt abgedeckter Basiskollektor. Gemittelt über die Erträge bei allen im betrachteten Zeitraum herrschenden Feldtemperaturen erzielte er einen Mehrertrag von 37 %. Die theoretisch erwarteten Mehrerträge des Kollektors konnten für verschiedene Betriebspunkte bestätigt werden. Bezogen auf die Lastprofile der drei unterstützten Verbraucher erreichte das relativ klein dimensionierte System einen solaren Deckungsgrad von 15 % bei einem Systemnutzungsgrad von 34 %.

1. Hintergrund zum Projekt „RefleC“

Solaranlagen besitzen auch in Mitteleuropa enormes Potential zur Bereitstellung industrieller Prozesswärme. Neben dem hohen industriellen Wärmebedarf sind dafür vor allem die in vielen Prozessen günstigen Lastprofile und niedrigen Temperaturniveaus ausschlaggebend. In Deutschland wird beispielsweise 23 % der industriell genutzten Wärme bei Temperaturen unter 100 °C benötigt; weitere 10 % können bei Temperaturen zwischen 100 °C und 150 °C bereitgestellt werden [1]. Obwohl die Solarerträge im industriellen Bereich unter günstigen Bedingungen bis zu doppelt so hoch sein können wie im Wohnungssektor, waren im Jahr 2010 weltweit erst ca. 200 Anlagen zur Erzeugung solarer Prozesswärme erfasst [2]. Auf nationaler und internationaler Ebene wird deshalb daran gearbeitet, die zahlreichen nicht technologisch bedingten Hemmnisse der Entwicklung dieses Marktes zu überwinden (vgl. z.B. IEE-Projekt SO-PRO [3]).

Diese Bemühungen werden durch Projekte ergänzt, die sich auf die Entwicklung mittelfristig notwendiger neuer, effizienter Technologien für den wachsenden Markt konzentrieren. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt „RefleC“. Von August 2007 bis Dezember 2010 hat die Firma Wagner & Co. Solartechnik unter wissenschaftlicher Begleitung des Fraunhofer ISE einen mit AR-Glas und transparenter Folie zweifach abgedeckten Prozesswärme-Flachkollektor mit externem Reflektor zur effizienten Erzeugung von Prozesswärme zwischen 80 °C und 150 °C entwickelt. Die Grundlagen des Konzepts und Entwicklungserfahrungen finden sich in [4] und [5].

2. Die Pilotanlage der Wäscherei Laguna

Die Wäscherei Laguna ist ein mittelgroßer Betrieb, in dem zwischen 07:30 Uhr und 15:30 Uhr gearbeitet wird. Am Wochenende herrscht kein Betrieb; Betriebsferien gibt es nicht. Die Wärmeabnehmer werden über ein Dampfnetz versorgt, das über zwei gasbetriebene Dampfkessel (je 300 kW) gespeist wird. Der Kondensatrücklauf beträgt nur ca. 50 %, weil ein Teil des Dampfes direkt verwendet wird.

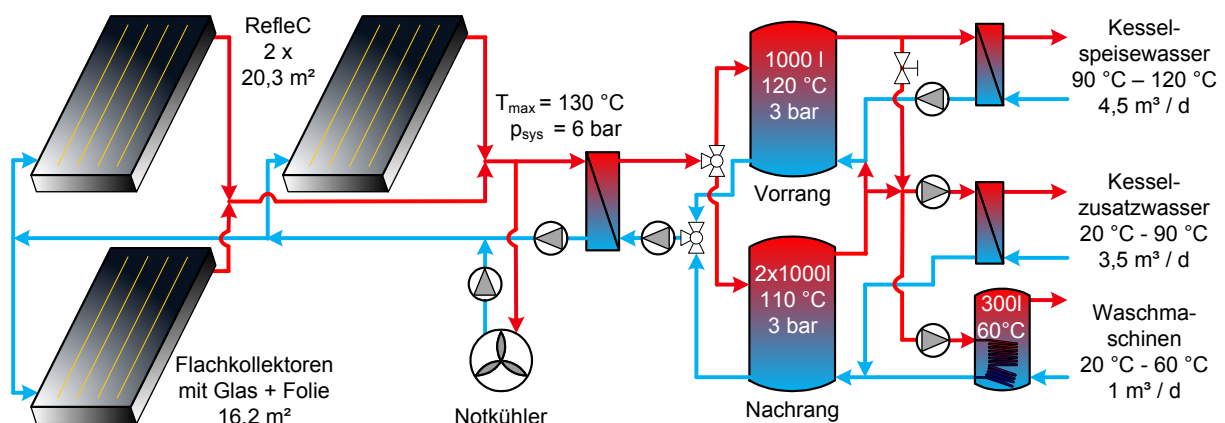


Abb. 2: Systemkonzept der Pilotanlage und thermische Lasten pro Arbeitstag (vereinfacht)

Im Rahmen einer groben Prozessanalyse wurden geeignete Schnittstellen zur Integration der Solarwärme identifiziert. Ziel war es, einerseits die Leistungsfähigkeit des RefleC-Kollektors zur Bereitstellung hoher Temperaturen zu demonstrieren und andererseits die Wirtschaftlichkeit der Solaranlage sicherzustellen. Dies führte zur Entscheidung, neben dem Kesselspeisewasser auch Kesselzusatzwasser und Waschmaschinenweichwasser solar vorzuwärmen. Zur Auslegung wurden über repräsentative Zeiträume die Lastprofile an den drei Integrationsstellen gemessen. Die Wärmebedarfe und Last-Charakteristika der drei Prozesse finden sich in [6]. Das Solarsystem ist im Vergleich zum Wärmebedarf der unterstützten Prozesse relativ klein dimensioniert, um die Investitionskosten niedrig zu halten und hohe Solarerträge sicherzustellen.

Das Kollektorfeld ist so angeordnet, dass die Vergleichbarkeit des RefleC-Kollektors mit seinem Basiskollektor direkt im Betrieb gewährleistet ist (gleiche Neigung von 55°). Die insgesamt drei Teilfelder bestehen aus jeweils zwei doppelt abgedeckten (AR-Glas und Folie) Großkollektoren basierend auf dem LBM 8 der Firma Wagner & Co. Die hinteren beiden dieser Teilfelder bilden mit den an der Unterseite anschließenden segmentierten Reflektoren die RefleC-Kollektorrinne (vgl. Abb. 1 u. Abb. 6). Die Anordnung als durchgehende Rinne verringert die Reihenendverluste. Rinnenabschlussbleche verhindern Blendung und Strahlungskonzentration in der Umgebung. Das Kollektorfeld ist um 21° aus der Südrichtung nach Osten gedreht, die Einzelkollektoren der drei parallelen Teilfelder sind ebenfalls parallel verschaltet. Ein Notkühler schützt das Feld bei Stagnationsgefahr vor zu hohen Temperaturen.

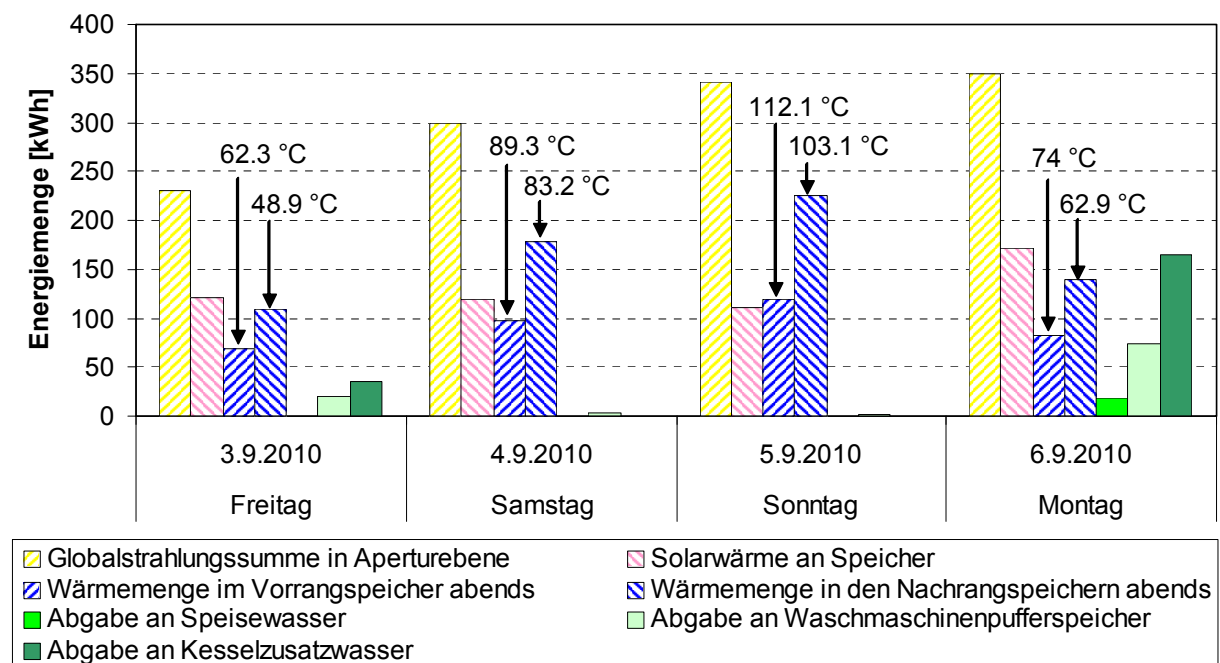


Abb. 3: Tagesbilanzen für Einstrahlung, Speicherladung, Energie und Temperatur (oben) in den Speichern (19 Uhr) und abgegebene Wärmemengen an die drei Verbraucher

Das Speichervolumen ist in einen Vorrangspeicher und zwei hydraulisch parallel geschaltete Nachrangspeicher unterteilt. So wird es möglich, je nach solaren Erträgen die unterschiedlichen Temperaturniveaus zu bedienen. Dazu wird auf der Entladeseite zwischen einer Sommer- und einer Winterschaltung unterschieden. Bei der Sommerschaltung wird der Vorrangspeicher vom Kreis der NT-Verbraucher getrennt, sodass Wärme auf hohem Niveau nur an das Kesselspeisewasser übertragen und dieses von 90 °C auf bis zu 120 °C erwärmt werden kann. In Winterschaltung hingegen werden nur die NT-Verbraucher vom Primärspeicher versorgt. Der Rücklauf dieser Verbraucher führt stets durch die Nachrangspeicher.

In Abb. 3 ist anhand von Tages-Energiebilanzen das Systemverhalten über ein Wochenende nachzuvollziehen. Am Freitag wurde an die NT-Verbraucher entladen; der Energiegehalt der Speicher abends ist relativ gering. Tagsüber konnte aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus auch viel Energie vom Solarkreis über den Ladekreis an die Speicher übergeben werden; der Nutzungsgrad war hoch. Am arbeitsfreien Wochenende wird lediglich eine geringe Wärmemenge an den Vorwärmpeicher der Waschmaschinen übertragen. Wegen der steigenden Speichertemperaturen und der besseren Durchladung steigt dann das Temperaturniveau im Solarkreis; der Anteil eingestrahelter Energie, der an die Speicher übergeben werden kann, sinkt. Die Speicher sind am Sonntagabend beinahe maximal geladen. Am Montag kann deshalb neben den NT-Prozessen auch das Kesselspeisewasser unterstützt werden. Trotz hoher Ladung reicht die Last aus, um die Speicher wieder relativ weit zu entladen.

3. Vergleich des RefleC-Kollektors mit seinem Basiskollektor

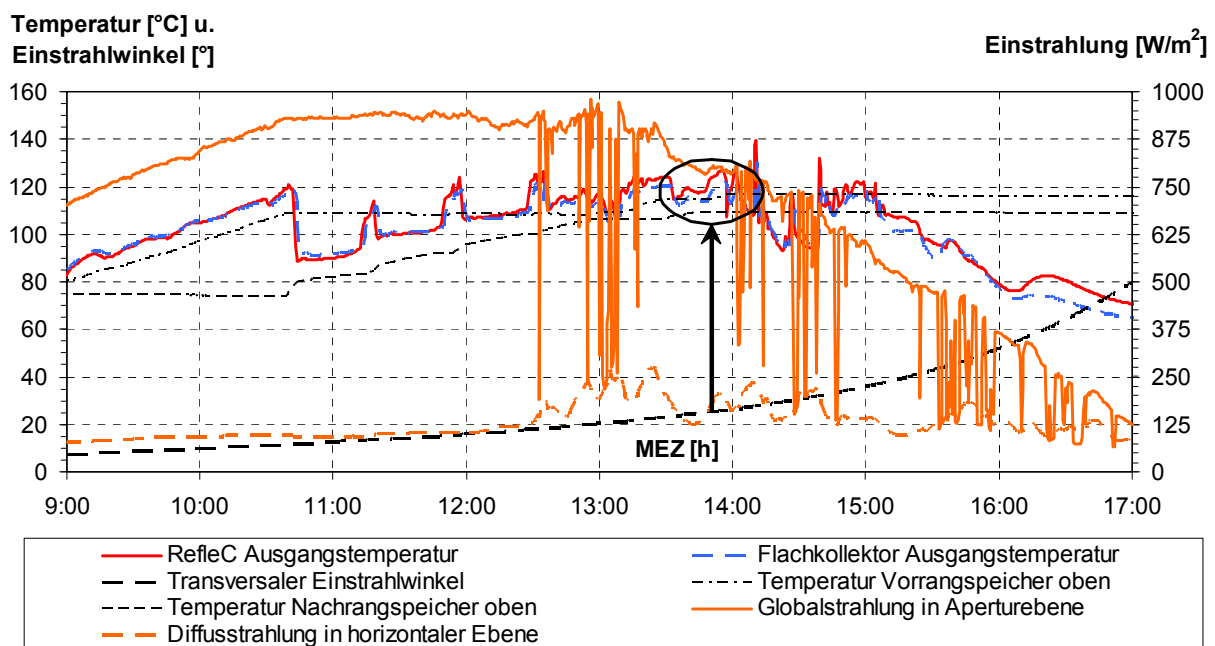


Abb. 4: Vergleich der Austrittstemperaturen von RefleC mit seinem Basiskollektor in Abhängigkeit des transversalen Einstrahlwinkels für Samstag, 21.08.2010

Eine wichtige Fragestellung bei der Vermessung der Pilotanlage ist es, die stark vom transversalen Einfallswinkel (Ebene senkrecht zur Ausdehnung der Rinne, vgl. [5]) abhängige Leistungscharakteristik des RefleC-Kollektors im System zu analysieren und die Regelung entsprechend anzupassen. Raytracing-Untersuchungen und Messungen haben gezeigt, dass der RefleC-Prototyp sein Leistungsmaximum bei einem positiven transversalen Einstrahlwinkel von 27° erreicht. Bei gleichem Massestrom pro Aperturfläche (mit Reflektoren absoluter Massestrom also ca. um Konzentrationsfaktor 1,25 höher) ist bei Einstrahlwinkeln in diesem Bereich die Austrittstemperatur von RefleC höher als die des Basiskollektors (vgl. Abb. 4).

Abb. 5 zeigt die Validierung der am Fraunhofer ISE ermittelten Kollektorparameter für RefleC und seinen Basiskollektor mit Hilfe der Monitoringdaten. Auf Basis der gemessenen Kollektor-Eintrittstemperaturen, Massenströme, Umgebungstemperatur und Einstrahlung wurde über die am ISE im Vorfeld bestimmten WKL- und IAM-Parameter die theoretische Austrittstemperatur und daraus die erwartete Kollektorleistung berechnet. Diese wurde dann mit der mit Hilfe der gemessenen Austrittstemperatur berechneten Kollektorleistung verglichen. Bei einem transversalen Einstrahlwinkel von $12,5^\circ$ (11 Uhr) und der in Abb. 4 gezeigten Temperatur besitzt der RefleC-Kollektor ca. die 1,5-fache Leistung seines Basiskollektors. Seine Mehrleistung steigt beim Leistungsoptimum von 27° (14 Uhr) und den hohen Austrittstemperaturen von knapp 130°C auf beinahe das Dreifache. Es wird auch deutlich, dass bei quasi-stationären Zuständen der Ertrag des Flachkollektors mit sehr hoher Genauigkeit berechnet werden kann. Bei RefleC gibt es geringfügige Abweichungen, weil der Reflexionsgrad der Reflektoren durch leichte Verschmutzungen etwas geringer ist als bei der Bestimmung des IAM am Testzentrum und für die gezeigte Leistungsbestimmung vereinfachend die Globalstrahlung mit dem Direktstrahlungs-IAM gewichtet wurde.

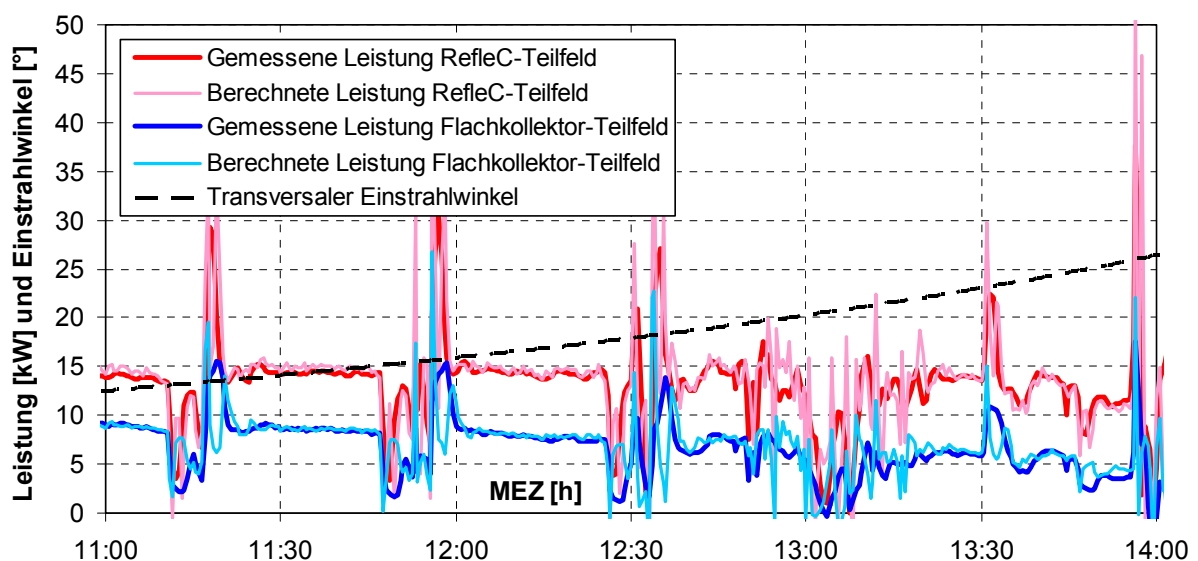


Abb. 5: Vergleich gemessener und berechneter Leistungen von RefleC und Flachkollektor (Basiskollektor) bei gleicher Anzahl Flachkollektoren pro Teilfeld am 21.08.10

4. Zwischenbilanz und weiteres Vorgehen

Aus den bisher ermittelten Daten wird deutlich, dass RefleC-Kollektor und Gesamtsystem die Erwartungen erfüllen. Der wöchentliche Gasverbrauch der Wäscherei hat sich im Zeitraum von Anfang Juli bis Ende Oktober dank der Solarerträge um ca. 10 % reduziert. Durch Optimierung der Prozessführung konnte der zweite Dampfkessel des Betriebs komplett stillgelegt werden, was voraussichtlich zu einer weiteren



Abb. 6: Blick in die RefleC-Kollektorrinne aus östlicher Richtung.

Reduktion des Gasverbrauchs um ca. 10 % führen wird. Optimierungspotential besteht beispielsweise in der Realisierung von „matched flow“ im Kollektorkreis, um den Massenstrom besser auf die Momentanleistung des RefleC-Kollektors abzustimmen und zu hohe Austrittstemperaturen zu verhindern. Der Vergleich zwischen RefleC- und Basiskollektor ist mit Unsicherheiten behaftet. Einerseits wird die vorgelagerte Flachkollektorreihe nie verschattet und empfängt Albedo-Strahlung, andererseits ist sie mit 55° auch nicht ertragsoptimiert angestellt. Das Monitoring wird vom Fraunhofer ISE noch bis Ende Sept. 2011 weiter betrieben. Schwerpunkte der zukünftigen Untersuchungen werden die priorisierte Versorgung des Kessel-speisewassers durch optimierte Lade- und Entladekonzepte und die Analyse der Abhängigkeit der RefleC-Leistung von Anteil und Verteilung der Diffusstrahlung sein.

Unsere Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Programms „Solarthermie 200plus“ gefördert (FK 0329280C). Besonderer Dank gilt auch der Reiner Lemoine Stiftung für ein Promotionsstipendium im Umfeld des Projekts.

Literatur:

- [1] Lauterbach C., Schmitt B., Vajen K., Jordan U., 2011: Das Potential Solarer Prozesswärme in Deutschland. Universität Kassel. URL: <http://solar-publikationen.umwelt-uni-kassel.de/>
- [2] Weiß W., 2010: Vortrag bei der Intersolar Conference Solar Process Heat. Ergebnisse des IEA Task 33/IV und Informationen des AEE INTEC
- [3] Heß S., Oliva A., 2010: Guide to Solar Thermal System Design for Selected Industrial Processes. IEE-Projekt SO-PRO. O.Ö. Energiesparverband, Linz. URL: http://www.solar-process-heat.eu/file_admin/redakteure/So-Pro/Work_Packages/WP3/Planning_Guideline/Techn_Bro_SoPro_en-fin.pdf
- [4] Heß S. et al., 2009: RefleC – Ein verbesserter Flachkollektor mit externen Reflektoren zur Erzeugung von Prozesswärme bis 150 °C. 19. OTTI Symposium Thermische Solarenergie. pp. 116 - 121, Bad Staffelstein.
- [5] Heß S. et al., 2010: Flachkollektor mit externen Reflektoren (RefleC): Entwicklungserfahrungen. 20. OTTI Symposium Thermische Solarenergie. pp. 150 – 156. Bad Staffelstein.
- [6] Heß S. et al., 2010: Solar Heat for Industrial Processes: RefleC-Collector Development and System Design. EuroSun 2010. Digitaler Tagungsband. Graz.