

Evaluation Solarer Prozesswärmesysteme in der Schweiz (EvaSP)

M. H. Rittmann-Frank*, M. Caflisch, J. Möllenkamp, S. Minder, M. Rommel
SPF Institut für Solartechnik,
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
Tel.: +41 (0)55 222 48 23
E-Mail: mh.rittmann-frank@spf.ch
Internet: www.spf.ch

Einleitung

Die Industrie verbraucht etwa 20% der gesamten Energie in der Schweiz, davon wird die Hälfte für die Bereitstellung von Prozesswärme bis zu 250°C gebraucht und hauptsächlich durch fossile Brennstoffe erzeugt [1]. Eine aktuelle Anforderung an die Industrie ist es unter Wahrung ihrer Wettbewerbsfähigkeit den CO₂ Ausstoß zu reduzieren. Dabei spielt die Energieeffizienzsteigerung von industriellen Prozessen durch Analyse der Energieverbrauchsströme und ihre Optimierung sowie durch die Integration von erneuerbaren Energiequellen eine wichtige Rolle. Der Einsatz von solarer Prozesswärme durch Anlagen mit solarthermischen Kollektoren zeigt daher grosses Potential, welches in der Schweiz schon durch mehrere Anlagen in unterschiedlichen industriellen Bereichen genutzt wird. Dennoch müssen einige Barrieren überwunden werden, um diese Technologie von ihrem üblichen Anwendungsgebiet zur Bereitstellung von Wärme im häuslichen Gebrauch zur Bereitstellung von solarer Prozesswärme einzuführen. Für die zukünftige Realisierung und Weiterentwicklung von solarthermischen Anlagen ist eine Zwischenbilanz des jetzigen Standes notwendig, die im Rahmen dieser Evaluationsstudie erstellt wird.

Das Projekt EvaSP

Im Rahmen des vom Bundesamt für Energie finanzierten Projektes¹ werden sechs in der Schweiz betriebene Anlagen evaluiert. Dabei ist es wichtig, die bisherigen Erfahrungen in der Planungs- und Integrationsphase sowie im laufenden Betrieb zusammenzutragen um daraus Empfehlungen abzuleiten. Wie in Abbildung 1 zu erkennen, befinden sich die Anlagen an verschiedenen Standorten und Klimazonen in der Schweiz und verwenden unterschiedliche Kollektortechnologien. In der energetischen und ökonomischen Evaluierung werden die einzelnen Anlagen ausgewertet und miteinander verglichen. Des Weiteren, ist der Vergleich zwischen

¹ Projektbeginn April 2015, Laufzeit 2,5 Jahre

Vorhersagen und den tatsächlichen Energieerträge besonders interessant. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden eine Übersicht über den aktuellen Status der solaren Prozesswärme in der Schweizer Industrie und ihre voraussichtliche weitere Entwicklung ermöglichen. Darüber hinaus werden Entscheidungshilfen für interessierte Unternehmer und Förderer/Investoren künftiger Projekte in der Schweiz gegeben sowie Verbesserungsvorschläge für Anbieter und Planer erarbeitet.

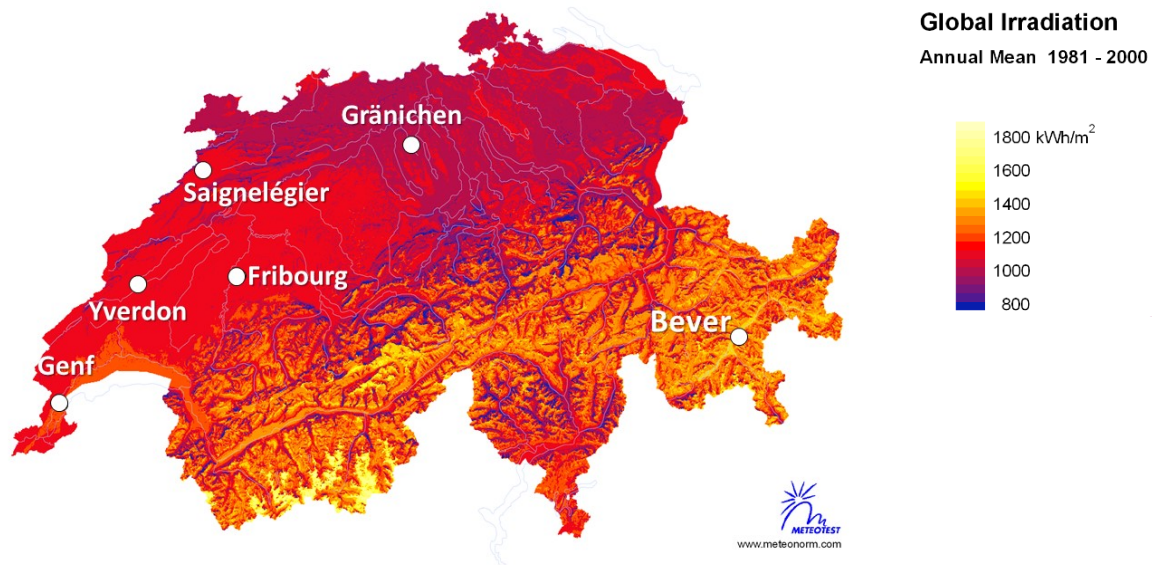


Abbildung 1: Landkarte der Schweiz mit den Standorten der Anlagen mit solarthermischen Kollektoren in der Industrie zur Bereitstellung von Prozesswärme. Die Farbkodierung beschreibt die örtliche Globalstrahlung. (Quelle: www.meteonorm.com)

Durchführung

Die in diesem Projekt untersuchten Anlagen werden energetisch sowie ökonomisch untersucht. Die energetische Untersuchung befasst sich mit der Auswertung der Messdaten, die an jeder Anlage über die Zeitdauer von mindestens einem Jahr erfasst werden. Dabei werden Anlagen in Solarkreis, Primär- und Sekundärkreislauf unterteilt. Im Solarkreis befinden sich ausschließlich das Kollektorfeld und seine Verrohrung. Der Primärkreislauf beinhaltet neben dem Solarkreis auch alle zusätzlichen Komponenten, wie weitere Rohrleitungen, Pumpe, Speicher usw., bis hin zur Schnittstelle mit dem Sekundärkreislauf. Der Sekundärkreislauf führt die thermische Energie dem Verbraucher zu. Folgende Messgrößen werden bei allen Anlagen in Minutenauflösung für die Auswertung erfasst:

- Temperaturen: Austrittstemperatur im Solarkreis, Vor- und Rücklauf-Temperatur des Primärkreislaufes, Temperatur des Wärmetauschers oder im Speicher, ggf. von den einzelnen Kollektoren
- Druck im Primärkreislauf
- Volumenstrom im Primärkreislauf
- Einfallende Strahlung auf die Kollektorfläche

Bei manchen Anlagen werden zusätzlich die Durchflussregelungseinstellung, die Kollektornachführposition (bei nachgeführten Systemen), sowie Temperaturen im Sekundärkreislauf auf der Verbraucherseite erfasst.

Aus den Messdaten werden die Wärmeerträge auf Monatsbasis ausgewertet und anschließend wird eine Jahresbilanz gezogen. Für die detailliertere Untersuchung werden auf Tagesbasis der Ertrag und die verfügbare Strahlung untersucht (Abb. 2-5). Dabei werden insbesondere Tage, die trotz hoher Strahlung niedrigere Erträge erzielten auf die Ursache des Minderertrages analysiert. Probleme oder Fehler und ihre Lösungswege werden in Listen festgehalten, aus denen im Anschluss des Projektes „*lessons-learn*t“ für weitere Projekte formulieren werden soll.

Aus der energetischen Auswertung kann der Kollektorfeldwirkungsgrad für die einzelnen Anlagen berechnet werden. Der empirisch ermittelte Wirkungsgrad eines Kollektorfeldes weicht von dem eines einzelnen Kollektors aufgrund zusätzlicher Verluste ab, die durch mehrere Faktoren verursacht werden:

- Reihenabstände → Reihenverschattung
- Kollektorreihenlänge → Endverluste
- Ausrichtung → Auswirkung auf den IAM (Incident Angle Modifier) und Endverluste
- Verschattung durch Gebäude
- Thermische Verluste des Rohrsystems
- Systemintegration und Steuerung → durch Kollektorfeldstillstand, wenn auf Verbraucherseite keine Wärme genutzt werden kann (ungenutzte Überproduktion)

Bei der Auswertung werden diese Punkte betrachtet und durch zusätzliche Untersuchungen, beispielsweise die Betrachtung der thermischen Kapazität des Feldes und die damit verbundene Aufheiz- und Abkühlphasen, ergänzt um ein möglichst detailliertes Verständnis der Anlagen zu erhalten. Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse aller Anlagen sinnvoll verglichen. Dabei ist es wichtig das dynamische Verhalten der Anlagen, z.B. Aufheizphasen, in Abhängigkeit der Austrittstemperatur und geometrischen Randbedingungen, wie die Aperturfläche, Ausrichtung, usw., zu betrachten. Diese Untersuchungen sind wichtig um für weitere Anlagen Erfahrungen zusammen zu tragen und wichtige Einflussgrößen zu kennen, die bei der Auslegung besonders zu beachten sind.

In der ökonomischen Auswertung werden als erstes die Kosten während der Planungsphase, die Investitionskosten und die laufenden Kosten im Betrieb der

einzelnen Anlagen zusammengetragen. Dabei sind die Abweichungen von den abgeschätzten Kosten und den tatsächlichen Kosten, sowie ihre Ursachen besonders von Interesse. Ziel ist es hier, zum einen eine Übersicht der tatsächlichen Kosten zu erhalten und finanzielle Modelle und Berechnungen zu validieren und gegebenenfalls zu verbessern.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird eine Zusammenfassung über die Ergebnisse aus der energetischen Auswertung der unterschiedlichen Anlagen präsentiert. Hierfür werden im Folgenden die Kollektorfelderträge in einem Jahr auf Tagesbasis für jede Anlage dargestellt (Abb. 2-5). Dabei zeigen die Graphen die Abhängigkeit des Ertrags über der Einstrahlung, wobei ein Datenpunkt einem Tag entspricht. In der Tabelle 1 im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Anlagen zusammengefasst. Einzelne Details zu den Anlagen in Bever und Saignelégier wurden in [4] und [5] publiziert.

Crema (Fribourg)

Die Crema S.A. mit Sitz in Fribourg ist das zweitgrößte Schweizer Milchverarbeitungsunternehmen. Die Anlage bei Crema hat eine Aperturfläche von 581 m^2 , besteht aus 9 Parabolrinnenkollektoren (Polytrough 1800 NEP) und ist $14,3^\circ$ von der Achse Ost-West ausgerichtet. Die Anlage ist auf einer Stahl-Tribüne mit einem Neigungswinkel von 18° aufgestellt um eine möglichst hohe Ausnutzung der Dachfläche zu erzielen. Das Wärmeträgermedium ist teilentmineralisiertes Wasser das im Winter mit Abwärme aus der Produktion über 0°C gehalten wird und somit nicht entleert werden muss. Das Kollektorfeld kann zwei Verbraucherwärmenetze auf zwei verschiedenen Temperaturniveaus bedienen, 105°C oder 150°C . Die Kollektoraustrittstemperatur liegt entsprechend auf 120°C oder 160°C . Im bisherigen Betrieb wurde wegen Arbeiten auf der Verbraucherseite nur auf der tieferen Temperatur gefahren. Dabei wird die bereitgestellte Wärme direkt von einem Prozess abgenommen (105°C) und die ungenutzte Wärme wird im Firmen-Nahwärmenetz (80°C , 4bar, Gesamter Energiebezug 8700 MWh/a) eingespeist. Dadurch ist ein zusätzlicher Speicher nicht notwendig und Stillstand durch Überproduktion wird vermieden.

Im Jahr 2014 betrug die verfügbare Direktstrahlung auf die nachgeführte Fläche 928 kWh/m^2 und der Kollektorfeldertrag lag bei 340 kWh/m^2 . In der Abbildung 2 sind die Felderträge im Jahr 2014 dargestellt und durch die farbliche Kodierung den Jahreszeiten zugeordnet. Wie erwartet sind die Strahlungswerte und die erzielten Felderträge im Frühling und Sommer am höchsten.

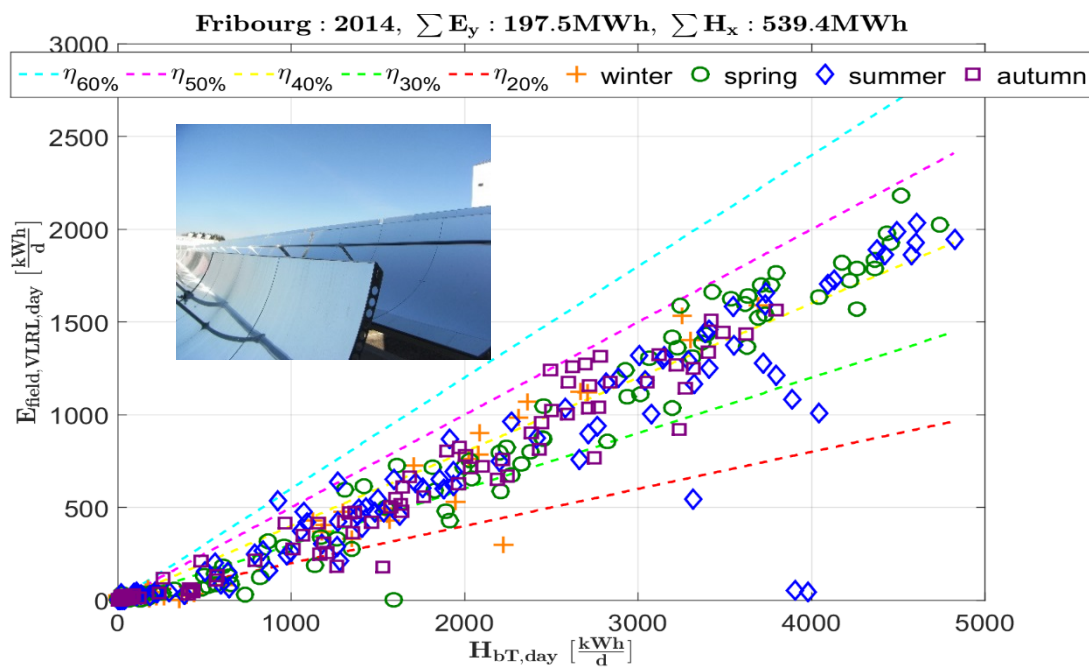


Abbildung 2: Die täglichen Kollektorfelderträge $E_{\text{field,VRL,day}}$ (pro Tag ein Datenpunkt, gemessen zwischen Vor- und Rücklauf des Kollektorfeldes) in Fribourg des gesamten Jahr 2014 wird über die Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigt nachgeführten Fläche $H_{\text{bt,day}}$ dargestellt. Zur Orientierung sind die Kollektorwirkungsgrade mit gestrichelten Linien eingezeichnet. Für das Jahr 2014 wird der Jahresfeldertrag $\sum E_y$ und die gesamte Strahlung $\sum H_x$ auf die nachgeführte Fläche angegeben.

Lesla (Bever)

Im Rahmen dieser Evaluationsstudie ist das Kollektorfeld bei dem Milchverarbeitungsunternehmen Lesla in Bever die kleinste Anlage, die aber bei der höchsten Betriebstemperatur arbeitet. Sie hat eine Aperturfläche von 115 m^2 und besteht aus 4 Parabolrinnekollektoren (PolyTrough 1200, NEP), die um 18° von der Achse Nord-Süd ausgerichtet sind. Um bei der hohen Austrittstemperatur von 190°C betrieben werden zu können wird als Wärmeträgermedium Thermoöl eingesetzt. Die hohen Temperaturen werden zur Dampferzeugung für die Reinigung der milchverarbeitenden Anlage benötigt. Das Kollektorfeld konnte im Jahr 2013 einen Feldertrag von 383 kWh/m^2 bei einer Direkteinstrahlung auf die nachgeführte Fläche von 1162 kWh/m^2 erreichen. Dabei ist zu beachten, dass im Winter die Anlage aufgrund von Schnee nicht betrieben wird. Aufgrund von weiteren technischen Problemen (z.B. Riss der flexiblen Kollektoranschlusschläuche) wurde der Anlagenbetrieb im Jahr 2014 monatsweise und den überwiegenden Teil des Jahrs 2015 angehalten. Die Probleme wurden im Frühjahr 2016 behoben (Austausch der Schläuche durch Drehgelenke) und die Anlage ist nun wieder im Betrieb.

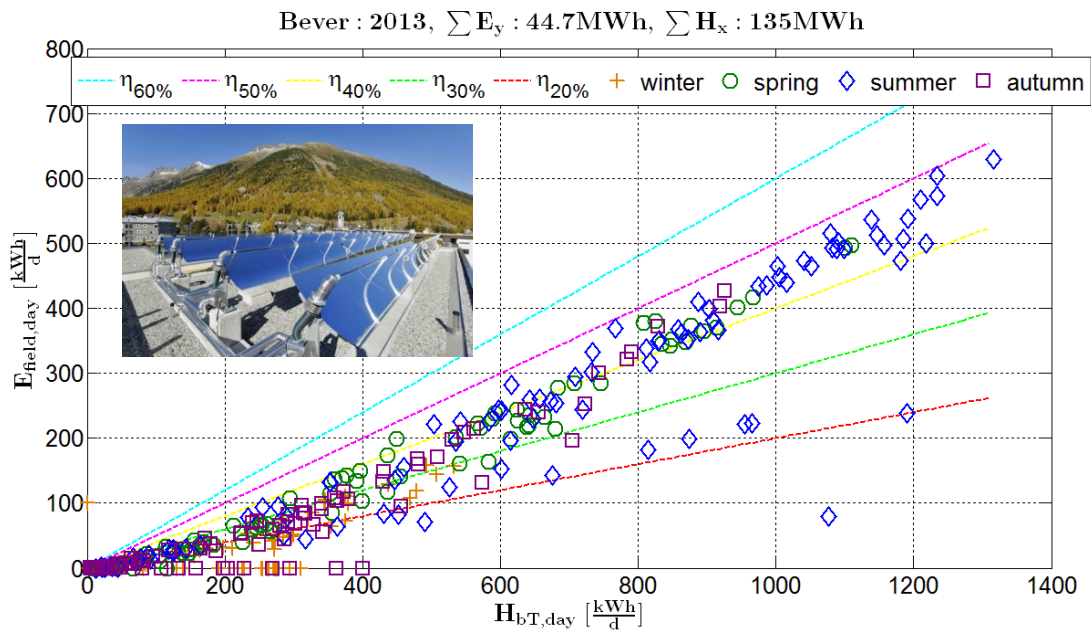


Abbildung 3: Es werden die täglichen Kollektorfelderträge $E_{\text{field,day}}$ (pro Tag ein Datenpunkt) des Kollektorfeldes des gesamten Jahr 2013 in Bever über die Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigen nachgeführten Fläche $H_{\text{bt,day}}$ aufgetragen

Emmi (Saignelegier)

Die Molkerei Emmi in Saignelégier betreibt die größte Anlage der Schweiz mit 630 m^2 und die drittgrößte Anlage weltweit, die in der SHIP Datenbank zu finden ist [3] und solare Prozesswärme bereitstellt. Die Anlage besteht aus 17 Parabolrinnenkollektoren (PolyTrough 1800, NEP), welche 18.9° von der Nord-Süd Achse ausgerichtet ist. Die Austrittstemperatur beträgt 112°C und das Wärmeträgermedium ist eine Wasser-Glykol Mischung. Die Solarwärme kann entweder direkt in das Verbrauchernetz, zur Erhöhung der Vorlauftemperatur des Ölkessels oder in einen Warmwasserspeicher eingespeist werden. Im Jahr 2014 betrug die Direktstrahlung auf die nachgeführte Fläche 880 kWh/m^2 und der Jahreskollektorfeldertrag war 325.5 kWh/m^2 . In der Abbildung 4 sind die Felderträge im Jahr 2014 über die Direktstrahlung auf die nachgeführte Fläche dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass bei besonders hoher Einstrahlung ($> 6000 \text{ kWh/Tag}$ auf das Kollektorfeld) die Felderträge unter den restlichen Werten, zwischen 40% und 50% Wirkungsgrad, liegen. Die Ursache für die Minderung des Ertrags ist die Überproduktion von Solarwärme, die nicht mehr vom Verbraucher oder dem Speicher aufgenommen werden kann und zu einer Abschaltung des Felds (Defokussierung) führt.

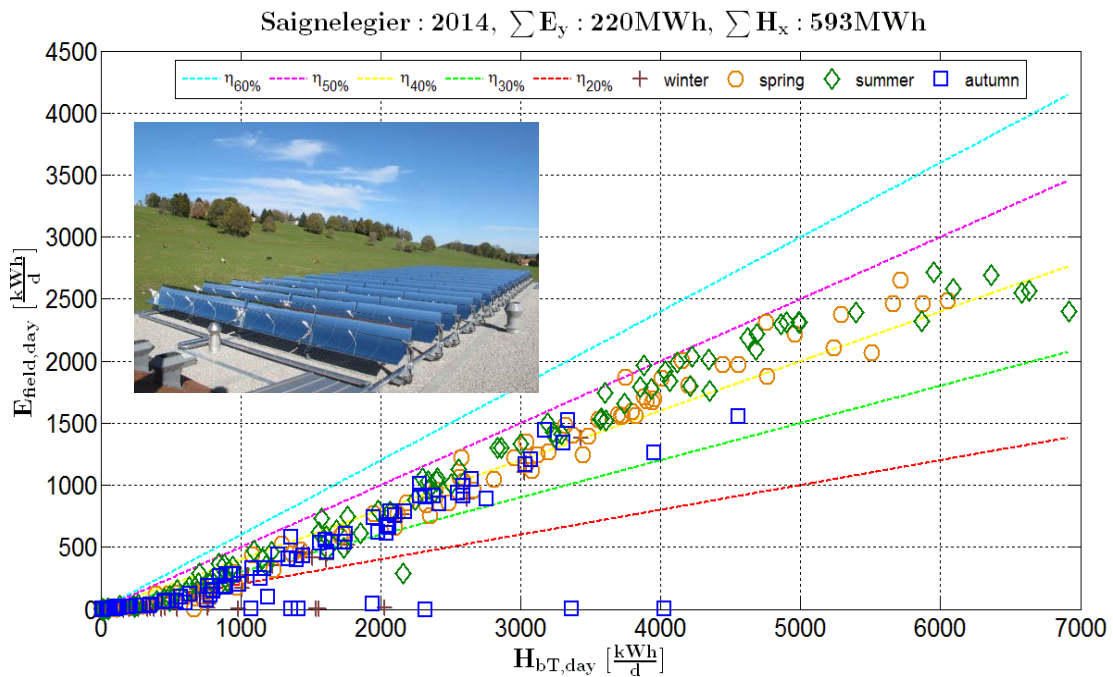


Abbildung 4: Die täglichen Kollektorfelderträge $E_{field,day}$ (pro Tag ein Datenpunkt) des Kollektorfeldes in Saignelegier des gesamten Jahr 2014 wird über die Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigen nachgeführten Fläche $H_{bt,day}$ dargestellt.

Zehnder (Gränichen)

Bei dem Heizungshersteller Zehnder in Gränichen befindet sich eine Prozesswärme Anlage mit einer Aperturfläche von 360m^2 . Das Kollektorfeld besteht aus 80 Vakuumröhrenkollektoren (CPC 45 Star azurro, Ritter XL, nach Süden ausgerichtet, Kollektoraufstellungswinkel von 45°) mit Kollektoraustrittstemperaturen von 60°C bis 90°C . Die Einspeisung der Solarwärme erfolgt auf Versorgungsebene und unterstützt den Wärmebedarf des Lackierbetriebes oder kann dem Speicher zugeführt werden. Die Auswertung der Messdaten für 2015 ergaben Global Strahlungswerte in der Kollektorebene von 916kWh/m^2 und einen Jahreskollektorfeldertrag von 249kWh/m^2 .

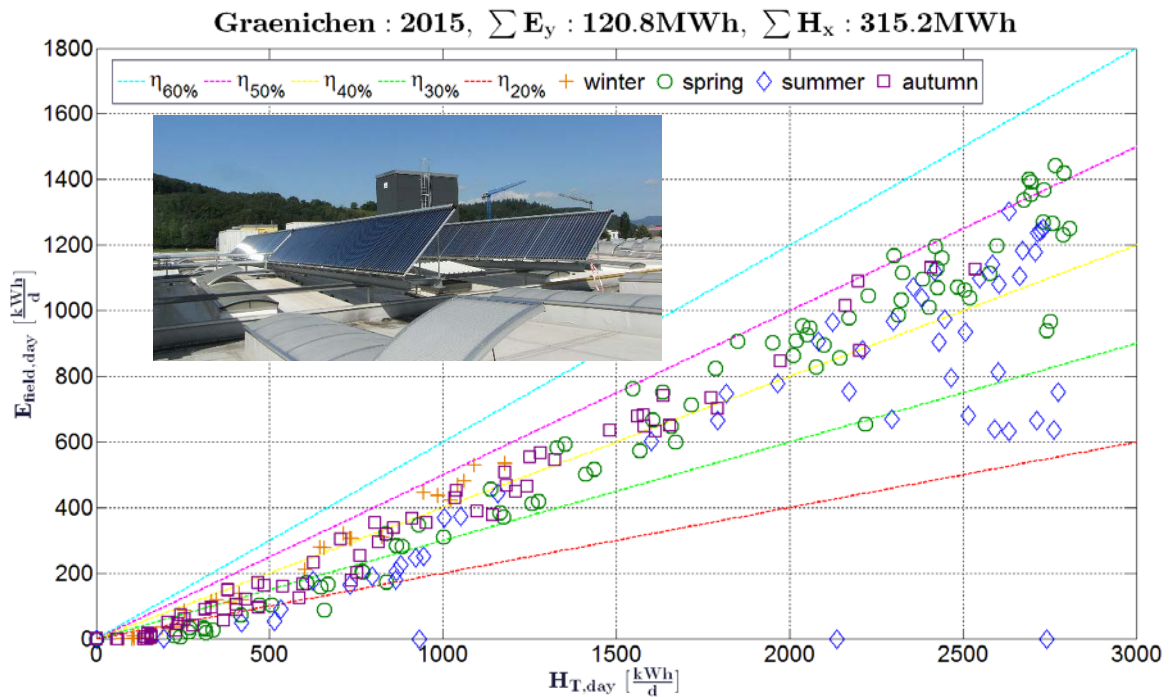


Abbildung 5: Die täglichen Kollektorfelderträge $E_{field,day}$ (pro Tag ein Datenpunkt) des Kollektorfeldes in Gränichen des gesamten Jahr 2014 wird über die einfallende Strahlung auf die geneigte Fläche $H_{bt,day}$ dargestellt.

Colas (Yverdon)

Die Anlage in Yverdon wird von Colas betrieben und für die laufende Auswertung kooperiert das SPF Institut für Solartechnik mit der Fachhochschule vor Ort, Heig-VD. Die Anlage hat eine Aperturfläche von 184 m^2 , die 50° von der Ost West Achse ausgerichtet ist. Sie besteht aus 35 Vakuumflachkollektoren (SRB C2, SRB energy). Die Kolektorausstrittstemperaturen können zwischen 90°C bis zu 160°C betragen. Die Sonnenwärme bis zu 90°C wird einem Wasserspeicher zugeführt, aus der die thermische Energie für die Erwärmung des Behälters mit Wasser-Bitumen Emulsion oder für die Raumheizung genutzt wird. Beträgt die Kolektorausstrittstemperatur über 160°C wird sie dem Bitumenspeicher zugeführt. Im Zeitraum April – Oktober 2015 betrug die einfallende Strahlung auf das Kollektorfeld 1070 kWh/m^2 und die Felderträge 100 kWh/m^2 . Die Ursachen für die geringen Kollektorerträge und die systemtechnischen Verbesserungsmöglichkeiten werden im weiteren Verlauf des Projektes untersucht.

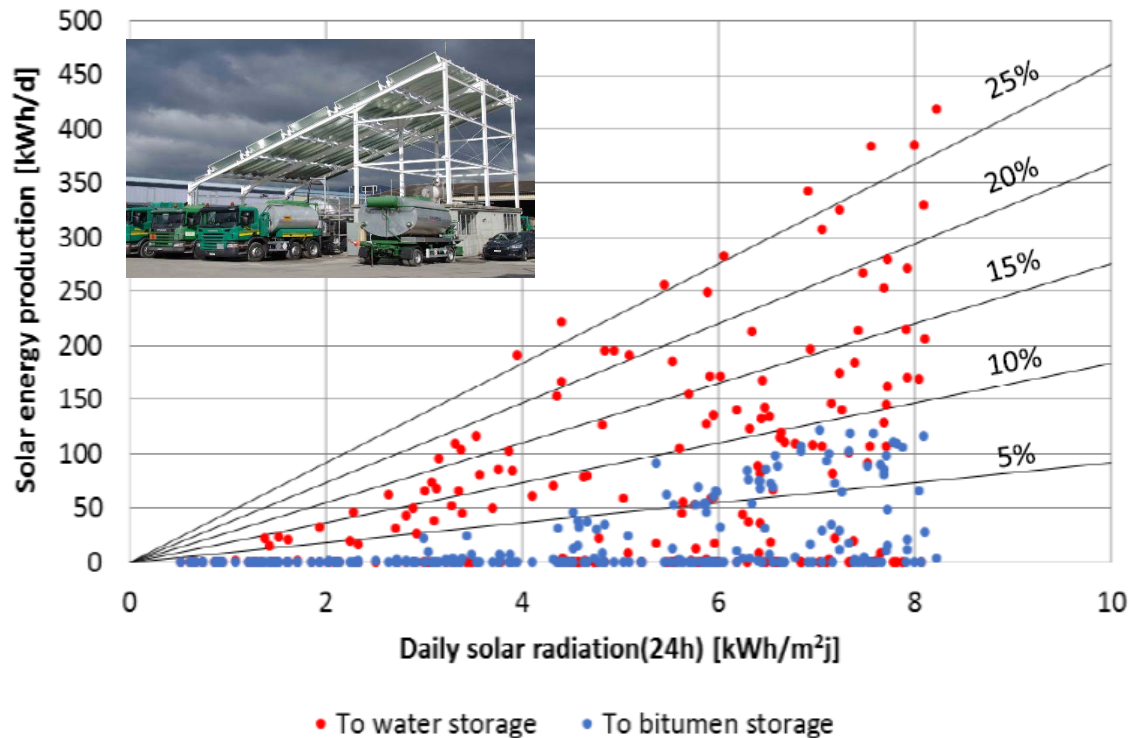


Abbildung 5: Die täglichen Kollektorfelderträge des Kollektorfeldes in Yverdon des gesamten Jahr 2015 wird über die einfallende Strahlung auf die geneigte Fläche. Ein Tag entspricht ein Datenpunkt.

HUG (Genf)

Im Universitäts Krankenhaus in Genf (HUG) wird zum jetzigen Zeitpunkt eine Anlage zur Bereitstellung von Wärme für die Sterilisation von Instrumenten gebaut. Die Anlage wird aus 198 Vakuumröhrenkollektoren (Sunstar DF 120-6) und einer Aperturfläche von 426 m² bestehen. Das Wärmeträgermedium ist Thermoöl und Austrittstemperaturen von 110°C bis 180°C werden angestrebt. Die Anlage wird voraussichtlich im Juni 2016 in Betrieb gehen.

Zusammenfassung und Ausblick

	Emmi Saignelégier	Crema Fribourg	Les Bever	Colas Yverdon	Zehnder Gränichen	HUG Genf
Industrie- Branche	Milchverarbeitung			Strassenbau	Heizkörper- hersteller	Krankenhaus
Prozesswärme- Nutzung	Reinigung, Produktion			Gebäude Bitumen	Lackieranlage	Sterilisation
Temperaturen	112°C	120°C/160°C	190°C	90°C/160°C	60°C/90°C	110°C/180°C
Kollektorart	Parabolrinnenkollektor			Vakuum - flachkollektor	Vakuumröhrenkollektor	
Anlagengrösse	627 m ²	581 m ²	115 m ²	360 m ²	184 m ²	462 m ²
Auswertung						
Strahlungs- summe über ein Jahr	880 kWh/m ²	928 kWh/m ²	1162 kWh/m ²	1070 kWh/m ²	916 kWh/m ²	-
Jahresfeld- Ertrag	325 kWh/m ²	340 kWh/m ²	383 kWh/m ²	100 kWh/m ²	249 kWh/m ²	-

Tabelle 1: Übersicht über die Anlagen mit solarthermischen Kollektoren in der Industrie zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Schweiz.

In diesem Beitrag wurden die Jahresfelderträge von 6 Anlagen zur Bereitstellung von solarer Prozesswärme für unterschiedliche Industrielle Branchen vorgestellt. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse für die einzelnen Anlagen zusammengefasst. Für die Anlagen mit Parabolrinnenkollektoren beziehen sich die Strahlungssummen auf die einfallende Direktstrahlung auf die nachgeführte Fläche (grüne Felder) und für die Anlagen mit nicht nachgeführten Kollektoren (blaue Felder) auf die einfallende Globalstrahlung auf die geneigte Fläche. Der Wärmedeckungsgrad beschreibt wieviel Prozent des gesamten Wärmemengenbedarfs des Unternehmens mit Solarwärme gedeckt wird.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden Simulationsmodelle der Anlagen mit den Messergebnissen validiert. Das Modell wird anschließend genutzt um den Einfluss verschiedener Parameter (Feldgeometrie, Ausrichtung) zu untersuchen.

Weiterhin werden die Ergebnisse der Anlagen miteinander verglichen. Dabei sind die unterschiedlichen thermischen Kapazitäten der einzelnen Anlagen, Integrationspunkte, Austrittstemperaturen sowie Feldgeometrien zu berücksichtigen. Im Abschluss dieses Projektes wird die gesamte techno-ökonomische Betrachtung der Anlagen zusammengefasst um aus den Erfahrungen für künftige Projekte zu lernen.

Referenzen

[1] Bundesamt für Energie BFE „*Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2014 nach Verwendungszweck*“, 2015

[2] M. Rommel and M. Larcher, “*Experimental Investigation on the Accuracy of Alternative Devices to Measure DNI in Comparison to Tracking Pyrheliometers, SolarPACES2015 Conference*”, 13-16 Oct 2015, Cape Town, South Africa.

[3] Database for applications of solar heat integration in industrial processes, 2013-2016, www.ship-plants.info

[4] E. Frank, M. Feuerstein, S. Minder „*Parabolrinnenkollektoren für Prozesswärme in Schweizer Molkereien*“. Proceedings des 23. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein/Germany, 2013

[5] E. Frank, H. Marty, L. Hangartner, S. Minder „*Evaluation of Measurements on Parabolic Trough Collector Fields for Process Heat Integration in Swiss Dairies*“ Solar World Congress, Mexico, 2013)