

# **Untersuchung und Evaluierung eines Parabolrinnenkollektorfeldes für Prozesswärme in einer Schweizer Molkerei**

J. Möllenkamp, H. Marty, M. Rommel, E. Frank, M. H. Rittmann-Frank, S. Minder  
Oberseestraße 10, CH-8640 Rapperswil  
Tel.: +41 55 222 48 37  
E-Mail: jana.moellenkamp@spf.ch  
Internet: www.solarenergy.ch

## **Einleitung**

Für industrielle Prozesse wird viel Wärme im Niedrig- und Mitteltemperaturbereich unterhalb von 400 °C benötigt (14,7 TWh/a in der Schweiz [1] [2]). Ein Teil dieser Energie könnte mit Hilfe von thermischen Solarkollektoren zur Verfügung gestellt werden. Weltweit existieren jedoch nur wenige Anlagen für die Bereitstellung von Prozesswärme und es mangelt an Erfahrung im Bereich Anlagendynamik und -betrieb, sowie zuverlässigen Ertragsvorhersagen.

In diesem Zusammenhang wurden in der Schweiz in den letzten Jahren solare Prozesswärmeanlagen in verschiedenen Branchen und mit unterschiedlichen Kollektortechnologien, Temperaturniveaus und Integrationskonzepten realisiert und einige davon vom SPF auf ihr Betriebsverhalten untersucht. In [3] wurde bereits über eine Parabolrinnenanlage der Firma NEP Solar AG berichtet, die für die Prozesse einer Molkerei im alpinen Raum (Standort Bever) Wärme liefert. Der Fokus der Arbeit lag darauf, die Interessen und Erfahrungen von Kollektorhersteller und Energiebetreiber zu skizzieren, sowie der Betrieb der Anlage anhand erster Messdaten auszuwerten. Des Weiteren wurde das Betriebsverhalten und der Ertrag dieser und einer weiteren Parabolrinnenanlage (ebenfalls von NEP Solar), die Prozesswärme für eine Molkerei im Nordwesten der Schweiz (Saignelégier) erzeugt, mittels Messdatenauswertung in [4] analysiert. Untersucht wurden jeweils das Betriebsverhalten an zwei Tagen mit unterschiedlichen Strahlungsverhältnissen und der Kollektorfeldertrag eines Monats. Die beiden Prozesswärmeanlagen unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich des Integrationskonzeptes, der Betriebstemperatur, sowie der Grösse und Ausrichtung.

Dieser Beitrag ergänzt die Ergebnisse aus [4], indem die Erträge der Parabolrinnenanlage in Saignelégier eines gesamten Betriebsjahres anhand von Messdaten ausgewertet werden. Zusätzlich werden ausführlich die Strahlungsverlustmechanismen durch Reihenverschattung, Endverluste und den Incident Angle Modifier analysiert.

## Anlagenbeschreibung

Die Molkerei Emmi in Saignelégier befindet sich im Kanton Jura im Südosten der Schweiz und liegt auf 992 m über dem Meeresspiegel. Die erwartete jährliche Direktnormalstrahlung liegt an dem Standort laut Meteonorm bei 1183 kWh/(m<sup>2</sup>a) [5]. Das einachsig nachgeführte Parabolrinnenkollektorfeld des Kollektortyps NEP Solar PolyTrough 1800 (Aperturweite 1845 mm, Brennweite 647 mm, Durchmesser des Receiverglasrohrs 65 mm, Durchmesser des Absorberrohrs 34 mm) besitzt mit 17 parallelen Reihen à 20,9 m Länge eine Aperturfläche von 627,3 m<sup>2</sup> (für weitere technische Details zum Kollektor siehe [5]). Das Kollektorfeld ist auf dem Dach eines neuen Gebäudes der Molkerei installiert und wird weder von Gebäuden, noch von Bäumen abgeschattet. Der Reihenabstand beträgt alternierend 2,98 m und 3,84 m und die Kollektorachsen haben der Dachgeometrie folgend eine Nord-Süd Ausrichtung mit einer Abweichung von 18,9° gegen den Uhrzeigersinn.

Der Solarkreislauf wird mit einer Wasser-Glykol Mischung durchströmt. Die Einspeisung der Solarwärme erfolgt auf Versorgungsebene über einen Wärmetauscher in ein mit Druck beaufschlagtes Wasserverteilungsnetz mit einer Betriebstemperatur von 102 °C. Dabei kann die thermische Energie aus dem Kollektorfeld entweder an einen Warmwasserspeicher mit 15 m<sup>3</sup> Füllvolumen übertragen, direkt in das Verbrauchernetz eingespeist oder zur Erhöhung der Vorlauftemperaturen der Ölkessel eingesetzt werden. Das Kollektorfeld besitzt bei 900 W/m<sup>2</sup> Direktstrahlung und 120 °C Kollektoraustrittstemperatur eine Nennleistung von 360 kW<sub>th</sub>. Der jährliche Wärmebedarf der Molkerei beträgt in etwa 2200 MWh.

Der Solar-, Primär- und Sekundärkreislauf der Anlage sind in Abbildung 1 skizziert.

Das Parabolrinnenkollektorfeld wurde im Oktober 2012 in Betrieb genommen. Aufgrund fehlerhafter Messdaten, unter anderem durch ein defektes Strahlungsmessgerät, werden für die Auswertung der Monatserträge und Strahlungsanalyse Messdaten ab Januar 2014 verwendet.

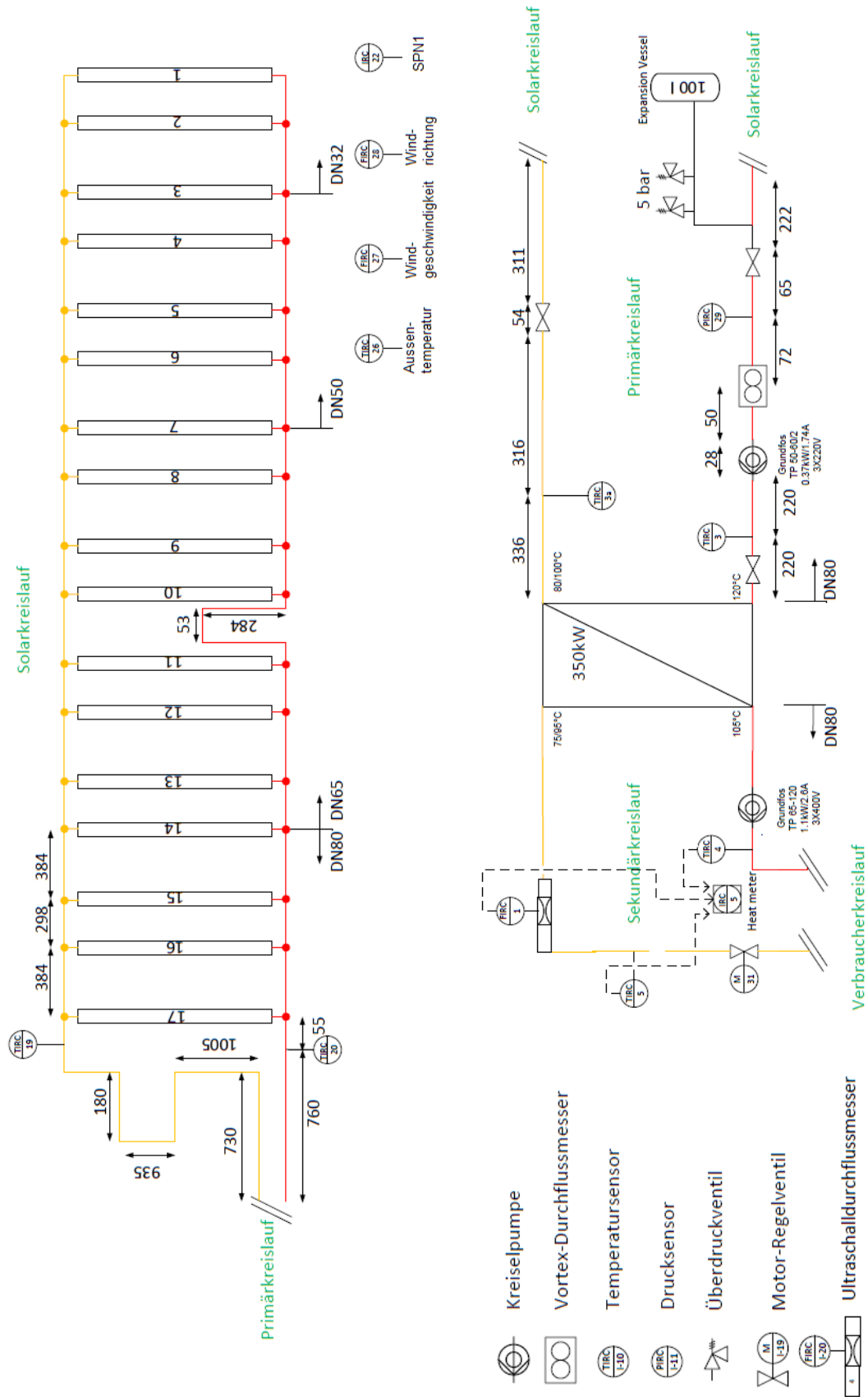


Abbildung 1: Anlagenschema der Prozesswärmanlage in Saignelégier. Dargestellt sind der Solar-, der Primär- und der Sekundärkreislauf.

## Auswertung der Messdaten

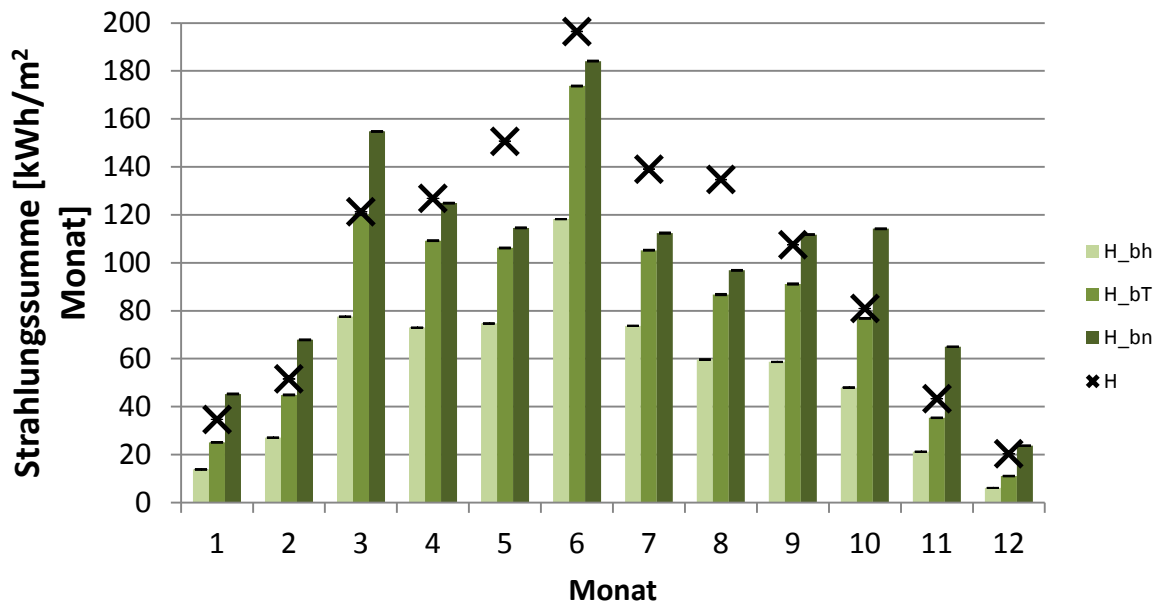
Für das Monitoring und zur Steuerung der Anlage wichtige Messgrößen, wie der Volumenstrom, Druck, Ein- und Austrittstemperaturen und Strahlungsmesswerte werden von den Sensoren im Kollektorfeld erfasst und dem SPF zusammen mit den Daten der Messgrößen aus dem Prozesskreislauf zur Verfügung gestellt. Für die Auswertung wurden minutenweise gemittelte Messwerte verwendet.

## Strahlungsanalyse

Zunächst wird die Strahlung am Standort Saignelégier im Jahr 2014 untersucht. Dafür werden die monatlichen Strahlungssummen der Globalstrahlung  $H$ , der Direktstrahlung auf die horizontale Fläche  $H_{bh}$ , der Direktnormalstrahlung auf eine zweiachsig nachgeführte Fläche  $H_{bn}$  und der Direktstrahlung orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche  $H_{bT}$  verwendet. Die Berechnung der Größen basieren auf der von dem Pyranometer SPN1 (Firma DeltaT, weitere Details siehe [6]) im Kollektorfeld gemessenen Globalstrahlungsleistung  $G$  und horizontalen Diffusstrahlungsleistung  $G_d$ . Aufgrund der hohen Einfallswinkel bei Sonnenauf- und Sonnenuntergang wird mit Strahlungsmesswerten ab einem Sonnenhöhenwinkel von  $5^\circ$  gerechnet.

Für die weiteren Umrechnungen wird der Algorithmus von NREL zur Bestimmung von Sonnenhöhenwinkel und Sonnenazimut [7] verwendet, der in einem für Matlab® kompatiblen Funktionsblock eingebettet ist [8], sowie der NREL Algorithmus zur Berechnung des optimalen Rotationswinkels von einachsig nachgeführten Kollektoren [9].

Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt die monatlichen Strahlungssummen  $H$ ,  $H_{bh}$ ,  $H_{bT}$  und  $H_{bn}$  für das Jahr 2014 am Standort Saignelégier. Im Juni werden maximale Global- und Direktstrahlungssummen auf der Horizontalen erreicht ( $H = 198 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Monat})$ ;  $H_{bh} = 118 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Monat})$ ). Im Vergleich dazu sind die in den Sommermonaten Juli und August gemessenen Globalstrahlungssummen auffallend niedrig ( $H=139$  bzw.  $135 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ Monat})$ ). Aufgrund hoher Diffusstrahlungsanteile liegen die horizontalen Direktstrahlungssummen sogar unterhalb der gemessenen Werte in den sonnenreichen Frühlingsmonaten März bis Mai. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Werte für  $H_{bT}$ , die für den Ertrag eines Parabolrinnenkollektors massgeblich sind, in den Monaten mit einem geringen Anteil an Diffusstrahlung, wie im März, Oktober und November, annähernd die Werte der Globalstrahlungssumme erreichen. Die jährliche Direktnormalstrahlungssumme  $H_{bn}$  beträgt  $1215 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$  und liegt damit 3% oberhalb des statistischen Wertes, der von Meteonorm für Saignelégier angegeben wird ( $1183 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$  [5]). Die Jahressumme von  $H_{bT}$  ergibt sich zu  $986 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ . Somit hätte durch eine zweiachsige Nachführung in Saignelégier im Jahr 2014 23% mehr Direktstrahlungsenergie zur Verfügung gestanden.



**Abbildung 2: Monatliche Solarstrahlungssummen am Standort Saignelégier im Jahr 2014. Dargestellt sind Globalstrahlungssumme (H), horizontale Direktstrahlungssumme (H<sub>bh</sub>), Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche mit einer um 18,9° gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung (H<sub>bT</sub>) und Direktnormalstrahlungssumme (H<sub>bn</sub>).**

### Strahlungsverluste

Die orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche einfallende Direktstrahlungssumme H<sub>bT</sub> kann aufgrund von thermischen und optischen Verlusten nicht gänzlich in thermische Energie umgewandelt werden. Im Folgenden werden drei vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlen abhängige Verluste des Parabolrinnenkollektorfeldes in Saignelégier untersucht und analysiert, wie gross ihr Anteil an der einfallenden Direktstrahlung ist. Durch die gegenseitige Verschattung der Kollektoren, auch Reihenverschattung (RV) genannt, reduziert sich die auf die Aperturfläche einfallende Direktstrahlung. Des Weiteren trifft ein Teil der von den Spiegelenden reflektierten Strahlung nicht auf das Absorberrohr, die sogenannten Endverluste (EV). Der Incident Angle Modifier (IAM) charakterisiert die schlechter werdenden optischen Eigenschaften des Kollektors bei flacheren Einfallswinkel und reduziert damit die in thermische Energie umwandelbare Strahlungsenergie.

In Abbildung 3 ist der prozentuale Anteil dieser Verlustfaktoren an der orthogonal zur Aperturfläche einfallende Direktstrahlung H<sub>bT</sub> für die Parabolrinnenanlage in Saignelégier dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei dieser Anlage die Verluste aufgrund von Reihenverschattung den grössten Anteil der betrachteten Verluste darstellen. Von Mai bis August 2014 können durch die Reihenverschattung durchschnittlich 9 % von H<sub>bT</sub> nicht genutzt werden. Im Dezember und Januar sind es etwa 20 % aufgrund der tiefstehenden Sonne. Die Jahresabhängigkeit ist bei dem Einfluss des IAMs noch deutlicher zu erkennen. Die Verluste durch den IAM liegen zwischen nahezu 0 % im Sommer und bis zu 14 % im Winter, da der Einfallswinkel im Sommer sehr gering ist (im Bereich von 0° - 50°). Die monatlichen Endverluste liegen das gesamte Jahr unterhalb von 6 %. Die Summe der Verluste durch RV und IAM beträgt im Dezember 34 % der orthogonal zur Aperturfläche einfallenden Direktstrahlung.

Wie in [4] angeführt, tragen somit der Kollektorreihenabstand und die Ausrichtung deutlich zum geringen Ertrag im Winter bei.

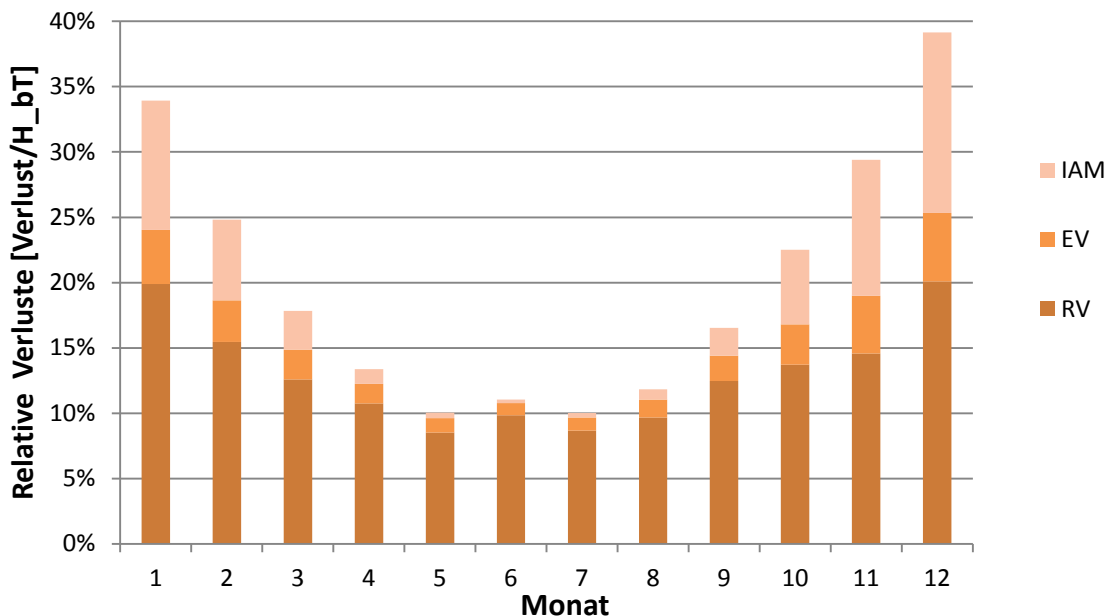


Abbildung 3: Anteil der monatlichen Strahlungsverluste durch Reihenverschattung (RV), Endverluste (EV), und Incident Angle Modifier (IAM) an der Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigen nachgeführten Aperturfläche mit einer um 18,9° gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung ( $H_{bT}$ ) in Saignelégier.

### Kollektorfelderträge

Der Ertrag des Parabolrinnenkollektorfeldes in Saignelégier pro Minute  $Q_{col}$  wird über den Volumenstrom  $\dot{V}$ , die Dichte und Wärmekapazität des Wärmeträgermediums  $\rho$  bzw.  $c_p$ , der Fluidtemperaturen am Ein- und Austritt des Kollektorfeldes  $T_{col,in}$  bzw.  $T_{col,out}$  und der Zeitspanne  $\Delta t = 60s$  berechnet.

$$Q_{col} = \dot{V} \rho c_p (T_{col,out} - T_{col,in}) \Delta t$$

Über die Aufsummierung der Minutenwerte ergeben sich Tages-, Monats- und Jahreserträge.

Abbildung 4 zeigt  $Q_{col}$  und  $H_{bT}$  pro Monat. Der maximale monatliche Ertrag liegt im Juni bei 45,9 MWh. In den übrigen Sommermonaten Juli bis September liegen die durchschnittlichen Erträge mit 20,5 MWh deutlich darunter. Dies ist vor allem auf die niedrigen Strahlungswerte zurückzuführen.

Der Jahresfeldertrag 2014 beträgt 220 MWh, was in etwa 10 % des erwarteten Wärmebedarfs für die verfahrenstechnischen Prozesse in der Molkerei entspricht. An dieser Stelle muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Verluste über den Wärmetauscher und im Wassernetzwerk, sowie ungenutzte thermische Energie im Feld unterhalb der Betriebstemperatur im Wasserverteilungsnetz, nicht berücksichtigt sind.

Um die Effizienz des Kollektorfeldes in Saignelégier zu beurteilen, wird an dieser Stelle ein Kollektorfeldwirkungsgrad  $\eta_{Feld}$  verwendet, der über den Quotienten aus Kollektorfeldertrag und Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigen nachgeführten Aperturfläche bestimmt wird.

$$\eta_{Feld} = \frac{Q_{col}}{H_{bT}}$$

Der maximale monatliche Kollektorfeldwirkungsgrad ergibt sich damit zu  $\eta_{Feld} = 42\%$  im Juni und der geringste zu  $\eta_{Feld} = 11\%$  im Dezember. Der durchschnittliche Jahresfeldwirkungsgrad beträgt  $36\%$ .

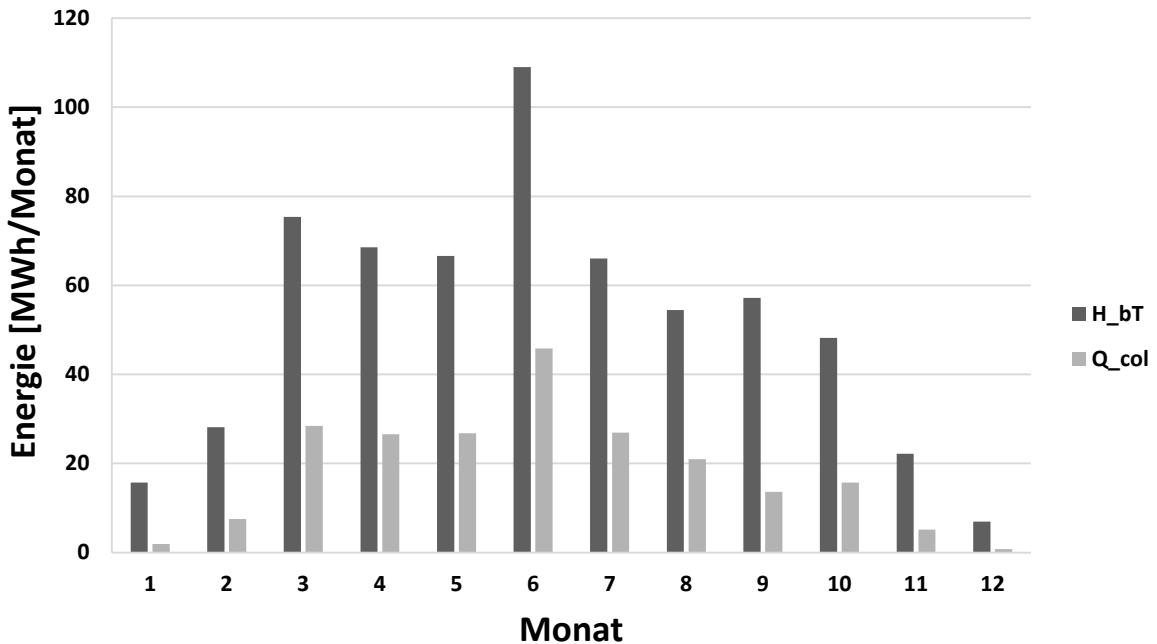


Abbildung 4: Monatliche Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche mit einer um  $18,9^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung ( $H_{bt}$ ) und monatlicher Kollektorfeldertrag ( $Q_{col}$ ) in Saignelégier.

Die im Folgenden analysierten täglichen Kollektorfelderträge lassen weitere Schlüsse zu.

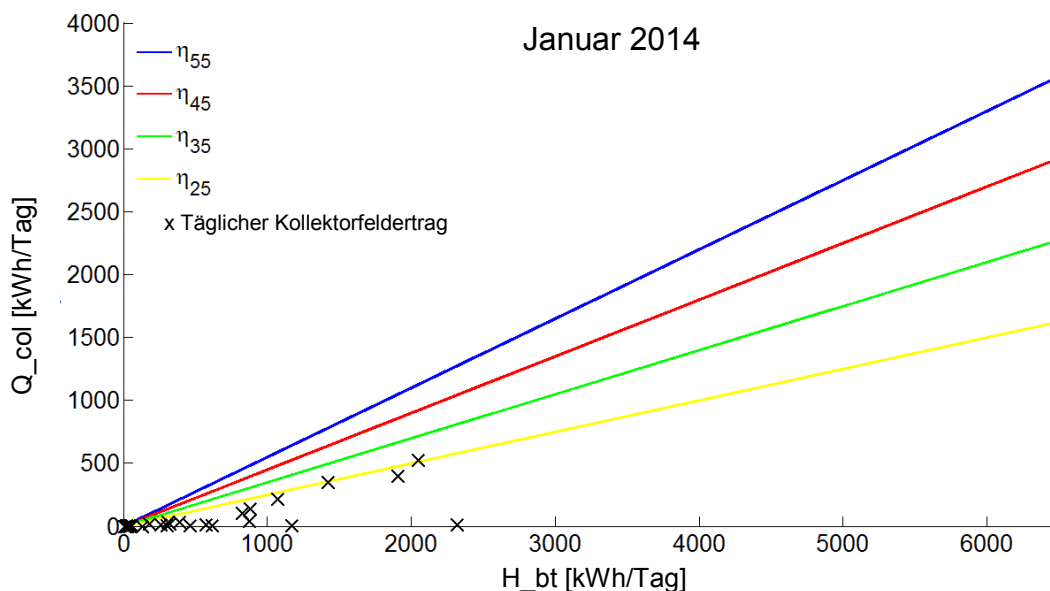
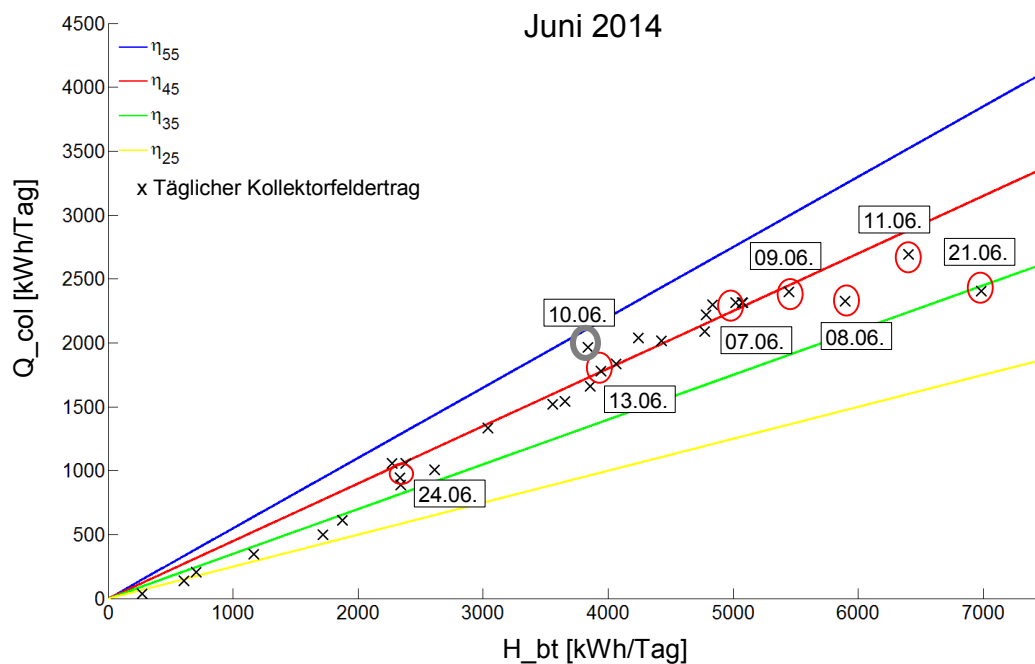


Abbildung 5: Tägliche Kollektorfelderträge des Parabolrinnenkollektorfeldes ( $Q_{col}$ ) als Funktion der Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche mit einer um  $18,9^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung ( $H_{bt}$ ) in Saignelégier Januar 2014

In Abbildung 5 sind die täglichen Kollektorfelderträge für Januar 2014 in Abhängigkeit von der täglichen Direktstrahlungssumme auf die Kollektorfläche abgebildet. Es ist zu erkennen, dass an den meisten Tagen im Januar weniger als 2000 kWh/Tag Direktstrahlung auf die Kollektorfläche auftreffen. Der maximale Wirkungsgrad des Kollektorfeldes liegt im Januar bei 27 % und an 3 Tagen liefert das Feld trotz Direktstrahlungswerten > 900 kWh/Tag keine Wärme. Eine mögliche Ursache könnte Schnee sein, der die Nachführung der Kollektoren blockiert.



**Abbildung 6: Tägliche Kollektorfelderträge des Parabolrinnenkollektorfeldes ( $Q_{col}$ ) als Funktion der Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche mit einer um  $18,9^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung ( $H_{bt}$ ) in Saignelégier Juni 2014**

Im Juni 2014 hingegen erreicht  $H_{bt}$  Werte über 7000 kWh/Tag. Der Wirkungsgrad des Feldes zeigt zunächst mit zunehmenden Werten von  $H_{bt}$  eine steigende Tendenz und beträgt in dem Bereich zwischen 3000 kWh/Tag und 5000 kWh/Tag  $\eta_{Feld} = (45 \pm 5) \%$  (siehe Abbildung 6). Der maximale Feldwirkungsgrad liegt am 10.06.2014 bei  $\eta_{Feld} = 50 \%$ . Allerdings zeigen die Wirkungsgrade bei den strahlungsintensivsten Tagen mit  $H_{bt} > 5000$  kWh/Tag wieder eine abfallende Tendenz. Wie in [4] erwähnt, ist dies oftmals darauf zurückzuführen, dass der Speicher geladen ist und das Feld mehr Wärme erzeugt als abgenommen werden kann. Da die Anlage nicht unter Teillast gefahren werden kann, müssen die Kollektoren defokussiert werden, wie z.B. am 21. Juni. Hier ist das Kollektorfeld, trotz stetiger Einstrahlungsleistung, zwischen 14:22 und 20:52 für insgesamt 4,9 h wegen "Überproduktion" ausser Betrieb (siehe Abbildung 7). In der Stillstandzeit hätten 2089 kWh an Direktstrahlung auf die nachgeführte Fläche zur Verfügung gestanden, sodass bei einem Wirkungsgrad von 45 % am 21. Juni 940 kWh Wärmeenergie



Q\_col\_loss mehr hätten gewonnen werden können. Ähnliche Effekte treten an der Mehrzahl der Tage mit H\_bT oberhalb von 5000 kWh/Tag auf (vgl. Tabelle 1). Auch an zwei Tagen mit geringeren Werten von H\_bT kommt es aufgrund von Überproduktion zu Verlusten. Insgesamt hätte das Feld bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 45 % im Juni 4690 kWh mehr Wärmeenergie (Q\_col\_loss entspricht ca. 10 % des Monatsertrages) zur Verfügung stellen können, wenn die gesamte Wärme hätte abgenommen werden können.

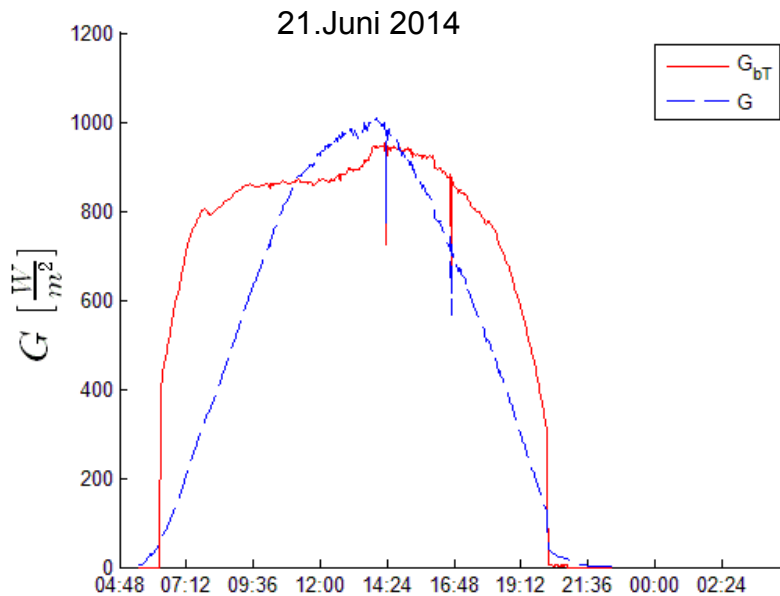
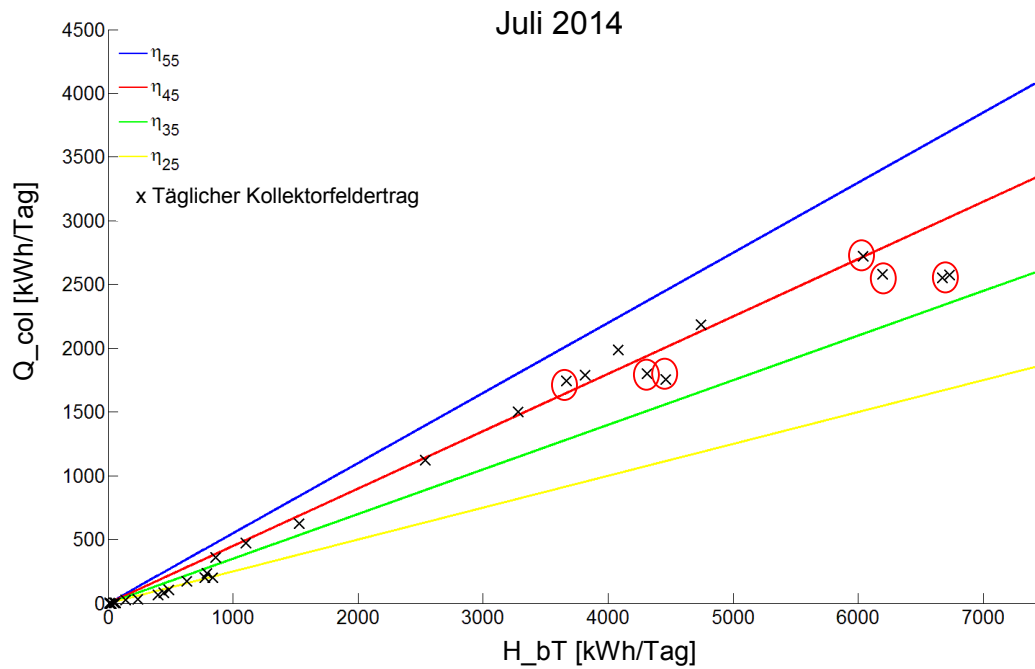


Abbildung 7: Direktstrahlungsleistung orthogonal zur einachsigen nachgeführten Aperturfläche (NS Ausrichtung, 18,9° Abweichung gegen Uhrzeigersinn) G\_bT und Globalstrahlungsleistung G in Saignelégier am 21.06.2014

Datum	Zeit ausser Betrieb [h]	H_bT [kWh]	Q_col_loss [kWh]
07.06.2014	1,3	404	182
08.06.2014	4,5	1463	658
09.06.2014	1,8	1675	754
11.06.2014	2,6	1453	654
13.06.2014	1,2	1263	568
21.06.2014	4,9	2089	940
24.06.2014	1,7	2076	934
<b>Juni</b>	<b>12,2</b>	<b>10422</b>	<b>4690</b>

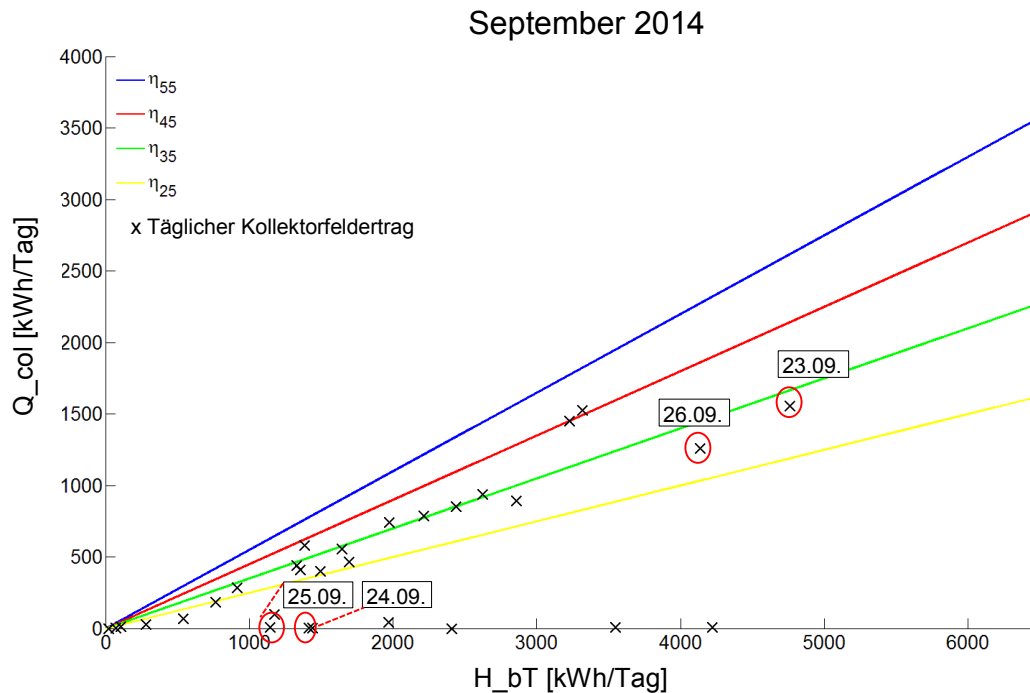
Tabelle 1: Ertragsausfall im Juni aufgrund von Überproduktion. Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigen nachgeführten Aperturfläche (NS Ausrichtung, 18,9° Abweichung gegen Uhrzeigersinn) H\_bT, Verluste durch Überproduktion Q\_col\_loss



**Abbildung 8: Tägliche Kollektorfelderträge des Parabolrinnenkollektorfeldes ( $Q_{col}$ ) als Funktion der Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsigen nachgeführten Aperturfläche mit einer um  $18,9^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung ( $H_{bT}$ ) in Saignelégier Juli 2014**

Auch im Juli wurden Tage mit Überproduktion identifiziert, die in Abbildung 8 markiert sind. Das Kollektorfeld hätte bei Abnahme der Wärme und einem angenommenen Wirkungsgrad von 45 % 5290 kWh mehr Wärmeenergie bereitstellen können (entspricht 20 % des Kollektorfeldertrages im Juli).

Im gesamten Jahr 2014 blieben damit abgeschätzt 13,1 MWh ( $\approx 6\%$  des jährlichen Kollektorfeldertrages) an solarthermisch erzeugter Energie ungenutzt.



**Abbildung 9: Tägliche Kollektorfelderträge des Parabolrinnenkollektorfeldes ( $Q_{col}$ ) als Funktion der Direktstrahlungssumme orthogonal zur einachsig nachgeführten Aperturfläche mit einer um  $18,9^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn abweichenden Nord-Süd Ausrichtung ( $H_{bT}$ ) in Saignelégier September 2014**

Im September liefert das Kollektorfeld an 9 Tagen, trotz  $H_{bT}$  oberhalb von 1000 kWh/Tag, keinen oder einen nur sehr geringfügigen Ertrag (siehe Abbildung 9).

Am 23.09.2014 wird eine Leckage durch den Druckabfall im Solarkreislauf entdeckt und die Anlage defokussiert, sodass der Ertrag an diesem Tag geringer ausfällt und der Wirkungsgrad nur 32 % beträgt. Die beiden darauffolgenden Tagen bleibt die Anlage ausser Betrieb. Am 26.09. wird die Leckage am Anschlussschlauch eines Kollektors lokalisiert, die Kollektorreihe durch Verschluss der Ventile aus dem Kreislauf entkoppelt und die Anlage wieder gestartet. Auch an diesem Tag läuft die Anlage somit nur bedingt und der  $\eta_{Field}$  liegt aufgrunddessen bei 30 %.

### Wirkungsgradvergleich von Kollektor und Kollektorfeld

Der empirisch ermittelte Wirkungsgrad eines Kollektorfeldes unterscheidet sich von dem eines einzelnen Kollektors aufgrund zusätzlicher thermischer und optischer Verluste. Abbildung 10 zeigt den Wirkungsgrad des PT1800 Kollektorfeldes in Saignelégier in Abhängigkeit von  $T^*$  (abhängig von der mittleren Fluidtemperatur  $T_{fluid}$ , der Umgebungstemperatur  $T_{amb}$  und der orthogonal auf die Aperturfläche einfallenden Direktstrahlungsleistung  $G_{bT}$ ;  $T^* = \frac{T_{fluid} - T_{amb}}{G_{bT}}$ ) zweier quasistationärer Betriebspunkte (siehe Tabelle 2) im Vergleich zu den Wirkungsgraden eines einzelnen auf dem SPF Testfeld vermessenen Kollektors. Der Wirkungsgrad des Kollektorfeldes, unter den in Tabelle 2 dargestellten Betriebsbedingungen, stimmt innerhalb der Fehlerbetrachtung gut mit der Fitkurve des getesteten Einzelkollektors überein (markierte Betriebspunkte in Abbildung 10).

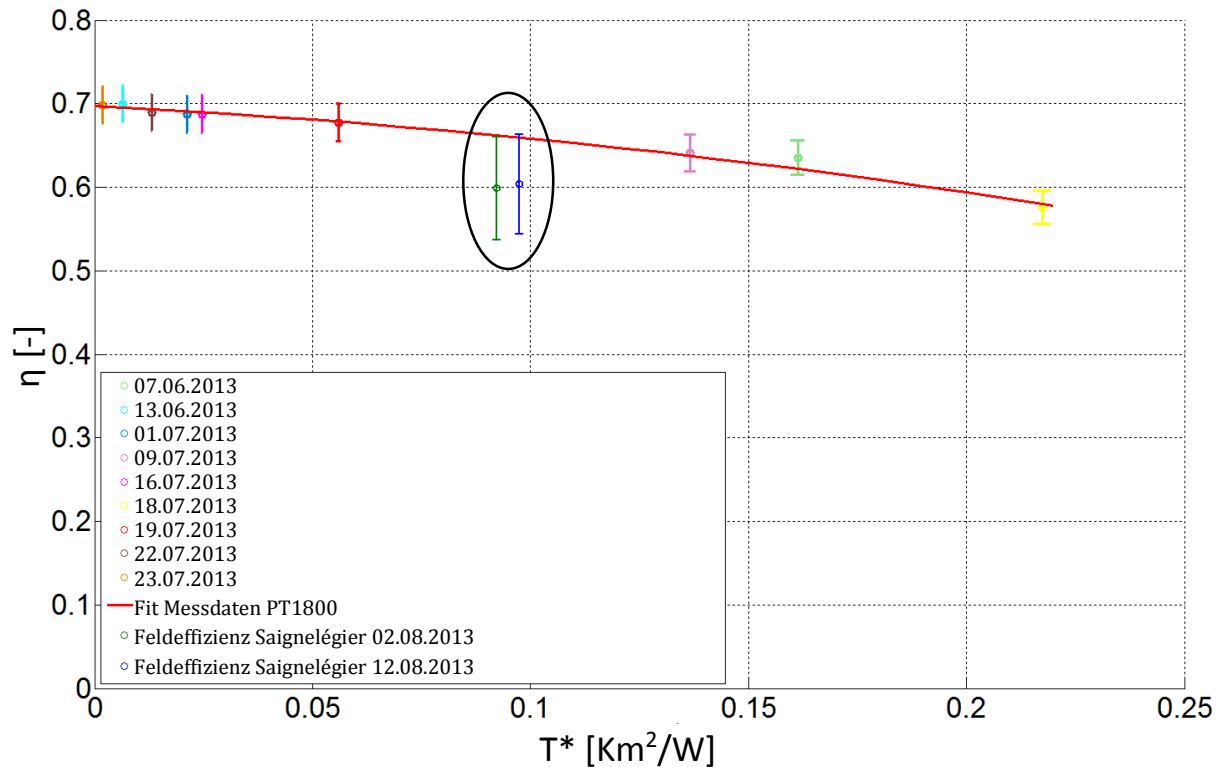


Abbildung 10: Wirkungsgradkennlinie des PT1800 [10] und gemessene Wirkungsgrade unter quasistationären Betriebsbedingungen des PT1800 Kollektorfeldes in Saignelégier.

Messgrößen	SPF PT1800A Test		Saignelégier Kollektorfeld PT1800			
	06.-07.2013		02.08.2013 12:27-13:52		12.08.2013 13:35-14:05	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Umgebungstemperatur $T_{amb}$ [°C]	24.36	31.46	28.99	30.02	23.18	24.48
Mittlere Fluidtemperatur $T_{fluid}$ [°C]	32.89	190.37	106.39	107.77	105.15	110.29
Temperaturunterschied Fluid zur Umgebung $\Delta T_{amb}$ [°C]	1.42	161.90	77.34	78.38	80.67	85.99
Direktstrahlung in Apertur $G_{bT}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	688.12	947.33	797.07	854.22	822.45	898.36
Temperaturhub $\Delta T$ [°C]	6.0	8.8	15.7	19.2	11.3	22.2
Volumenstrom $\dot{V}$ [l/h]	1200	1200	14950	15170	15160	15240

Tabelle 2: Randbedingungen für die Wirkungsgradmessung des PT1800 Kollektors und Kollektorfeldes

## Zusammenfassung

Die Messwertanalyse der solaren Prozesswärmeanlage am Standort Saignelégier zeigt, dass das Parabolrinnenkollektorfeld im Jahr 2014 220 MWh an Wärmeenergie bei einer jährlichen Direktnormalstrahlungssumme von 1215 kWh/m<sup>2</sup>a erzeugen konnte.

Der durchschnittliche Kollektorfeldwirkungsgrad liegt im Jahr 2014 bei 36 %. Im Juni wurde ein maximaler Tageswirkungsgrad von 50 % bestimmt und unter quasistationären Betriebsbedingungen konnte ein Wirkungsgrad von bis zu (60 ± 6) % ermittelt werden.

Weiterhin wurde festgestellt, dass im gesamten Jahr 2014 13,1 MWh (≈ 6 % des jährlichen Kollektorfeldertrages) an solarthermisch erzeugter Energie aufgrund von Überproduktion ungenutzt blieben. Dies könnte gegebenenfalls über eine angepasste Regelungsstrategie, bzw. zusätzliches Speichervolumen vermieden werden.

Ein Vergleich der Verluste des Kollektorfeldes in Saignelégier durch Reihenverschattung, Endverluste und den Incident Angle Modifier, bezogen auf die orthogonal zur Aperturfläche einfallende Direktstrahlungssumme zeigt, dass die Reihenverschattung den grössten Verlust darstellt. Aufgrund der gewählten Kollektorreihenabstände bleiben durch die gegenseitige Verschattung in den Wintermonaten bis zu 20 % und in den Sommermonaten etwa 9 % der einfallenden Direktstrahlungssumme ungenutzt. Die Verluste durch den IAM liegen zwischen nahezu 0 % im Sommer und bis zu 14 % im Winter. Eine Anpassung der Feldgeometrie und Ausrichtung könnte diese beiden Verluste reduzieren. Allerdings ist in diesem Fall die Umsetzbarkeit durch die vorgegebene Dachgeometrie begrenzt. Die Endverluste sind das gesamte Jahr geringer als 6%.

In folgenden Arbeiten soll der Einfluss der in diesem Beitrag beschriebenen Verluste auf den Kollektorfeldertrag mittels Parametervariationsstudien, z.B. hinsichtlich Feldgeometrie, Ausrichtung und Standort, ergänzt werden. Des Weiteren wird der Einfluss des Tagesprofils der Direktstrahlungsleistung auf den Ertrag der Anlage, unter Berücksichtigung der thermischen Kapazität im System, untersucht werden.

## Referenzen

- [1] C. Vannoni, R. Battisti und S. Drigo, «Potential for Solar Heat in Industrial Processes,» CIEMAT, 2008.
- [2] A. Kirchner, A. Kemmler, W. Baumgartner, M. Keller, M. Jakob und G. Catenazzi, «Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2010 nach Verwendungszwecken,» BFE Bundesamt für Energie, Bern, 2011.
- [3] E. Frank, M. Feuerstein und S. Minder, «Parabolrinnenkollektoren für Prozesswärme,» in *23. Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein, 2013.
- [4] E. Frank, H. Marty, L. Hangartner und S. Minder, «Evaluation of Measurements on Parabolic trough Collector Fields for Process Heat Integration in Swiss Dairies,» *Energy Procedia*, Bd. 57, p. 2743–2751, 2014.
- [5] «Meteonorm 7 (7.0.20),» Meteotest, [Online]. Available: [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com).
- [6] M. Larcher und M. Rommel, «Untersuchungen zu kostengünstigeren Alternativen der Direktstrahlungsmessung anstelle eines Pyrheliometers und zweiachsiger Nachführvorrichtung,» in *24. Symposium Thermische Solarenergie*, Bad Staffelstein, 2014.

- [7] I. Reda und A. Andreas, «Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications,» NREL- National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2008.
- [8] V. Roy, «sun\_position.m,» 2009. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com>. [Zugriff am 6 2014].
- [9] W. F. Marion und . A. P. Dobos, «Rotation Angle for the Optimum Tracking of One-Axis Trackers,» National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, 2013.
- [10] M. Larcher, M. Rommel, A. Bohren, E. Frank und S. Minder, «Characterization of a Parabolic Torugh Collector for Process Heat Applications,» in *ISES Solar World Congress*, Cancun, Mexico, 2013.