

Im Vergleich: Flach- und Röhrenkollektoren

Nachweis der Erträge der Solarthermieranlagen der Stadtwerke Erfurt Energie

ARTEM KARANDASHEV*, KAY EBERHARDT**, PAUL GASPAR***, ROLF MEISSNER****

Die Stadtwerke Erfurt bauten bis Frühjahr 2019 zwei große Solarthermieranlagen, um Solarthermie und deren Einkopplung in Fernwärmesysteme kennenzulernen und dabei verschiedene Technologien zu vergleichen. So entstanden am selben Standort eine Flachkollektoranlage mit 534,5 m² und eine CPC-Vakuumröhrenanlage mit 1.156 m².

Die Flachkollektoranlage arbeitet mit einem Glykol-Wasser-Gemisch als Wärmeträger, die Vakuumröhrenanlage mit Wasser aus dem Fernwärmenetz. Beide Anlagen liefern die Solarwärme über Wärmetauscher nahezu ausschließlich in den Vorlauf des Wärmenetzes. Die Grundlagen des Vergleichs sind die Aufzeichnungen der geeichten Wärmemengenzähler bei der Anlagen sowie der Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst. Wegen der Temperatur- und Einstrahlungsabhängigkeit der Solarleistung sind dabei die mit der Wärmemengenzählung aufgezeichneten Solarrücklauf- und -vorlauftemperaturen und Volumenströme sowie die jeweils zeitlich

dazugehörigen Wetterdaten wichtige Zusatzinformationen für eine qualifizierte Auswertung, ebenso die Berücksichtigung von Solarwärme, die vom Wärmenetz nicht abgenommen wurde. Die verwendeten Daten wurden in einem Vortrag auf dem 32. Solarthermischen OTTI-Symposium in Staffelstein vorgestellt /1/.

Das Verfahren

Das Verfahren zur Jahresertragsauswertung beruht auf folgenden Grundlagen und Daten:

- a) Die Jahreskollektorerträge sind immer annähernd proportional zur hemisphärischen Einstrahlung auf die Kollektorebene.

Bild 1 • 535 m² Flachkollektoren (vorn) mit 30° Neigung und Glykol-Wassergemisch und 1.156 m² CPC-Vakuumröhrenkollektoren (dahinter) mit 20° Neigung und Wasser aus dem Fernwärmenetz in Erfurt-Marbach.

Bild: SWE Erfurt Energie GmbH

*M. sc. Artem Karandashev: Fachhochschule Erfurt

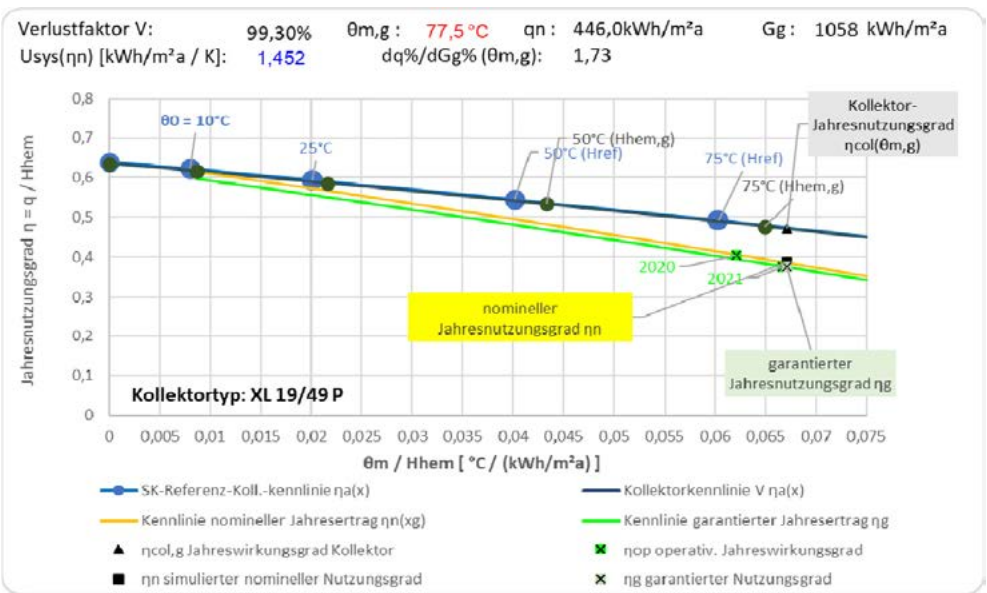
**Dipl.-Ing. (FH) Kay Eberhardt: Abteilungsleiter Wärmenetz bei SWE Energie GmbH

***Dipl.-Ing. Paul Gaspar: Projektleiter, Ritter XL Solar

****Dr. Rolf Meißner: Leiter F&E, Ritter XL Solar



- b) Da dies in gewissen Grenzen unabhängig von Kollektorneigung, Kollektorausrichtung und Standort gilt, kann mit guter Genauigkeit aus der im Solar-Keymark-Zertifikat mit 3 Punkten eindeutig definierten Kollektor-Jahresertragskennlinie unter Standardbedingungen eine Kollektor-Jahresertragskennlinie unter konkreten Realbedingungen abgeleitet werden.
- c) Abweichungen davon, z. B. aufgrund von Verschattungsverlusten oder sehr starker Abweichung der Kollektorausrichtung von den Idealbedingungen des Solar-Keymark-Tests, werden mit einem Verlustfaktor berücksichtigt.
- d) Aus der Differenz zwischen dem so erwarteten Kollektor-Jahresertrag und dem erwarteten bzw. garantierten System-Jahresertrag werden die für jede Anwendung individuellen Systemverluste abgeleitet und betriebstemperaturabhängig berücksichtigt.
- e) Ergänzend wird der entgangene Ertrag aufgrund nicht abgenommener Solarwärme (Stagnationsverlust) berücksichtigt, wobei un-



- terschieden wird zwischen den erwarteten Stagnationsverlusten, den tatsächlich gemessenen Stagnationsverlusten und den vom Betreiber verursachten Stagnationsverlusten (z. B. aufgrund einer Netzabschaltung im Sommer).
- f) Eine Normierung auf die der Garantie zugrunde liegenden Vorgabebedingungen (d. h. mittlere Netztemperatur, ΔT des Solarwärmetauschers, Standardwetterda-

tensatz, erwartete Stagnationsverluste und natürlich garantierter Ertrag) ermöglicht den korrekten direkten Vergleich aller gemessenen Betriebsjahreserträge und eine komfortablere Bewertung der Ertragsgarantieerfüllung.

Entwickelt wurde das Verfahren von Stefan Abrecht, Solar-Experience GmbH, der es 2020 erstmals vorstellte /2/. Es gibt Bestrebungen, es in die europäische Norm ISO/FDIS 24194 (Solar energy - Collector fields - Check of performance) ergänzend aufzunehmen. Für die nun folgende Auswertung der beiden Anlagen in Erfurt wurde das Verfahren mit den o. g. Punkten c) und e) präzisiert. Zwischen der hemisphärischen Jahreseinstrahlung auf die Kollektorebene H_{hem} und der (horizontalen) Jahres-Globalstrahlung G_g liegt jeweils ein Faktor, der mit der Kollektorneigung, der Kollektorausrichtung und dem Standort feststeht. Unter Standardbedingungen in Würzburg beträgt dieser Faktor 1,136, weil die horizontale Globalstrahlung des Standardwetterdatensatzes 1.095 kWh/m²a ausweist ($1.244/1.095 = 1,136$). Kennt man also diese Faktoren entweder mithilfe meteorologischer Auslegungsprogramme wie Meteonorm oder z. B. aus dem Jahreskollektor-ertrags-Simulationsprogrammen ScenoCalc /3/ oder SCFW /4/, denen auch die Angaben der Solar-Keymark-Zertifikate zugrunde liegen, dann benötigt man zur guten Abschätzung des Jahreskollektor-ertrages nur noch die individuelle Kollektorneigung, -ausrichtung und

Bild 2 • Kennlinien und Messpunkte zweier Betriebsjahre für die Röhrenkollektoranlage.
 $\theta_{m,g}$: mittlere Kollektortemperatur für Ertragsgarantie
 U_{sys} : Systemwärmeverluste
 $dq\%/dG_g\%(\theta_{m,g})$: theoretische Jahresnetzertragsänderung/Globalstrahlungsänderung



Tabelle 1 • Zwei Betriebsjahre der Röhrenkollektoranlage in Zahlen.

Röhrenkollektor XL 19/49 P	gemessene mittlere Netztemperatur	Einstrahlung auf Kollektor (laut DWD) H_{hem}	gemessene Netzeinspeisung q_{op}	Tage mit Stagnation	erwarteter nomineller Netzertrag q_{exp}	Performancefaktor $f_p = q_{\text{op}}/q_{\text{exp}}$	normierter Jahresertrag $q_{\text{ns}}(\text{standard})$ $q_{\text{ns}} = f_p \times q_g$	normierter Jahreswirkungsgrad η_{expS} $\eta_{\text{expS}} = q_{\text{ns}}/H_{\text{hemg}}$
	°C	kWh/m²a	kWh/m²a		kWh/m²a		kWh/m²a	%
Garantiegrundlage Ausschreibung	74,5	1155 = H_{hemg}	433 = q_g	0	433	1	433	0,37
6/2019 - 5/2020	78,9	1319	534	0	505	1,06	458	0,40
6/2020 - 5/2021	76,6	1194	448	9	403	1,11	482	0,42

Tabelle 2 • Zwei Betriebsjahre der Flachkollektoranlage in Zahlen.

Flachkollektor KBB K5 Giga+	gemessene mittlere Netztemperatur	Einstrahlung auf Kollektor (laut DWD) H_{hem}	gemessene Netzeinspeisung q_{op}	Tage mit Stagnation	erwarteter nomineller Netzertrag q_{exp}	Performancefaktor $f_p = q_{\text{op}}/q_{\text{exp}}$	normierter Jahresertrag $q_{\text{ns}}(\text{standard})$ $q_{\text{ns}} = f_p \times q_g$	normierter Jahreswirkungsgrad η_{expS} $\eta_{\text{expS}} = q_{\text{ns}}/H_{\text{hemg}}$
	°C	kWh/m²a	kWh/m²a		kWh/m²a		kWh/m²a	%
Garantiegrundlage Ausschreibung	74,5	1161 = H_{hemg}	375 = q_g	0	375	1	375	0,32
6/2019 - 5/2020	77,5	1325	378	0	475	0,80	299	0,26
6/2020 - 5/2021	75,1	1199	290	9	337	0,86	323	0,28

-verschattung sowie die Jahres-Globalstrahlung vom Standort, die man am besten vom Deutschen Wetterdienst bekommt. Die Solaranlagen besitzen zwar Strahlungssensoren, aber auf deren Genauigkeit kann man sich für die Garantiertragskontrolle nicht allein verlassen.

Die Jahreserträge bei mittleren Kollektortemperaturen von 25 °C, 50 °C und 75 °C am Referenzstandort Würzburg bei Referenzbedingungen, d. h. bei 35° Neigung und Südausrichtung bei einer hemisphärischen Einstrahlung H_{hem} von 1.244 kWh/m²a auf den Kollektor, bilden die Referenz-Jahresertragskennlinie gemäß dem Solar-Keymark-Zertifikat (blaue Punkte in den Diagrammen von Bild 2 und 3). In den Bildern 2 und 3 sind sowohl die Jahreserträge (y-Achse) als auch

die mittleren Kollektortemperaturen (x-Achse) auf die hemisphärische Einstrahlung bezogen. Damit zeigen die Diagramme auf der y-Achse statt der Solar-Keymark-Jahreserträge den Solar-Keymark-Jahresnutzungsgrad über der sog. reduzierten Temperatur. Bei dem verwendeten Flachkollektor K5 Giga+ ist diese Linie offenbar konvex, d. h., mit wachsender mittlerer Kollektortemperatur θ_m nehmen der Jahresnutzungsgrad bzw. der Kollektor-Jahresertrag immer langsamer ab. Physikalisch ist das nicht erklärbar, denn extrapoliert man dies weiter, dann wird der Jahresertrag auch bei noch so hohen Temperaturen nie Null, was natürlich unmöglich ist. Vermutlich wurde der Wert bei 75 °C (physikalisch falsch) extrapoliert, ohne dass tatsächlich in diesem

Temperaturbereich getestet wurde. Die Ausschreibung forderte eine Ertragsgarantie für die ins Netz eingespeiste Wärme und gab dazu Folgendes vor: Netzzvorlauf: 85 °C, Netzzrücklauf: 64 °C, logarithmisches ΔT des Wärmetauschers: 3 K. Das ergibt eine mittlere Netztemperatur von 74,5 °C und eine mittlere Kollektortemperatur von 77,5 °C. Bei der Auswertung wird als mittlere Kollektortemperatur mit den mittleren, gewichteten und um 3 K erhöhten Netztemperaturen gerechnet. Denn falls die Kollektortemperaturen tatsächlich mehr als diese 3 K höher gewesen sein sollten, darf dieser Verstoß gegen die Ausschreibungsvorgabe die Ergebnisdaten nicht verbessern.

Die Röhrenkollektoranlage

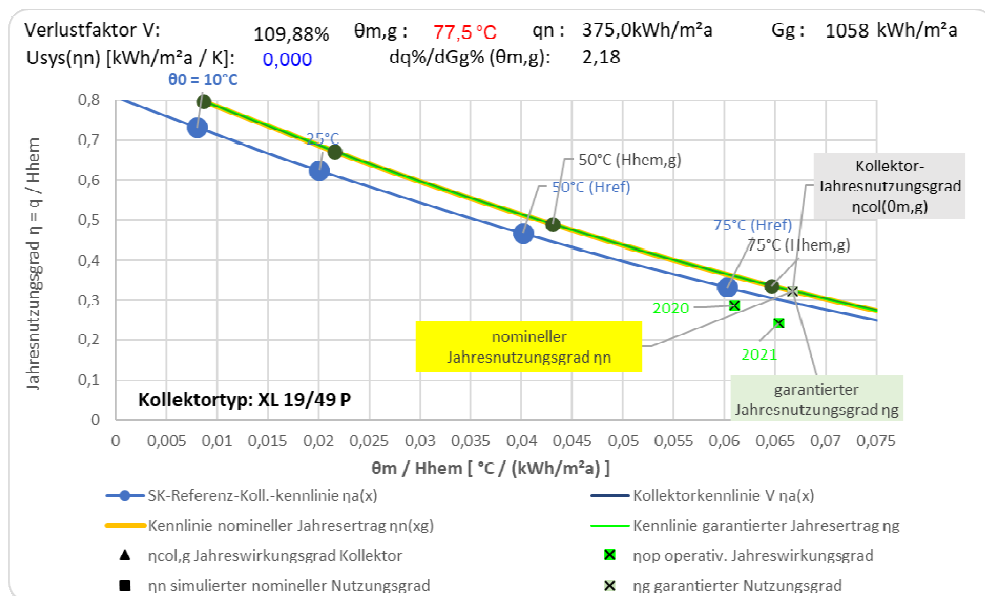
Die Röhrenkollektoren wurden um 20° geneigt und mit 24,5° nach Süd-West ausgerichtet. Das ergibt mit dem in den Ausschreibungsunterlagen vorgegebenen Wetterdatensatz für den Standort Erfurt mit einer Globalstrahlung von 1.058 kWh/m²a einen Faktor von 1,092, um den die

Bild 3 • Kennlinien und Messpunkte zweier Betriebsjahre für die Flachkollektoranlage.

$\theta_{m,g}$: mittlere Kollektortemperatur für Ertragsgarantie

U_{sys} : Systemwärmeverluste

$dq\%/dG_{g\%}(\theta_{m,g})$: theoretische Jahresnetzertragsänderung/Globalstrahlungsänderung



hemisphärische (Kollektor-)Einstrahlung mit $1.155 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ höher ist als die Globalstrahlung auf die Horizontale. Die Vorgabe der mittleren Kollektortemperatur für die geforderte Ertragsgarantie ist $77,5^\circ\text{C}$. Da unter Standardbedingungen in Würzburg bei 75°C laut Solar-Keymark-Zertifikat ein Kollektorsertrag von $613 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ erwartet wird (rechter blauer Punkt im Diagramm), würde man unter den Bedingungen in Erfurt bei $77,5^\circ\text{C}$ entsprechend $548 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ erwarten. Unter Berücksichtigung von gegenseitiger Verschattung benachbarter Kollektorreihen, denn sogar die südlichste Reihe der Röhrenkollektoren wird teilweise etwas von den Flachkollektoren verschattet, wurde ein um etwa 1 % geringerer Kollektorsertrag erwartet. Deshalb liegt die Kollektorkennlinie $V \cdot \eta_a$ (mit $V = 99,3\%$) im Diagramm (schwarz) nur ganz knapp unter der Referenzkennlinie η_a (blau). Unter Berücksichtigung von kapazitiven und konvektiven Wärmeverlusten, die mit ca. 1 % auch den Wärmebedarf für Frostschutz enthalten, der notwendig ist, weil die Anlage mit Wasser gefüllt ist, wurde ein nomineller Systemertrag (= solarer Wärmenetertrag) von $446 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ simuliert. Da mit einem harten Bieterwettbewerb zu rechnen war, wurde eine ambitionierte Ertragsgarantie über $433 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ erteilt, so dass der Sicherheitsfaktor f_{saf} nur 97 % beträgt (Bild 2).

Aus dem nominell für $77,5^\circ\text{C}$ simulierten Jahresnetzertrag $q_n = 446 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ leitet sich die gesamte Kennlinie des nominellen Jahreswirkungsgrades (gelbe Linie) für beliebige Temperaturen ab. Bei der grünen Linie, die im Diagramm um Faktor $f_{\text{saf}} = 0,97$ darunter zu sehen ist, handelt es sich um die Kennlinie des garantierten Jahreswirkungsgrades. Bei Multiplikation der Jahreswirkungsgrade (gelb nominell und grün garantiert) mit der hemisphärischen Einstrahlung bei dem der Ausschreibung zugrunde liegenden Wetterdatensatz erhält man die nominellen und die garantierten Jahreserträge (Tabelle 1).

Die Röhrenkollektoranlage wurde bereits im März 2019, gut zwei Monate früher als die benachbarte Flachkollektoranlage, in Betrieb genommen. Im ersten Betriebsjahr, das von Juni

2019 bis Mai 2020 zählt, wurde eine mittlere Netztemperatur von $78,9^\circ\text{C}$ gemessen, $4,4 \text{ K}$ höher als erwartet. Die hemisphärische Einstrahlung auf den Kollektor betrug aber 14 % mehr als erwartet. Mit einem gemessenen solaren Netzertrag von $534 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ wurde die Ertragsgarantie von $433 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ deutlich überschritten. Für eine genauere Betrachtung wird der gemessene Jahresertrag normiert, d. h. auf die mittlere Netztemperatur, die hemisphärische Einstrahlung und die vorgesehenen Stagnationsverluste, welche mit der Garantieerklärung angenommen wurden, umgerechnet bzw. „standardisiert“. Der so normierte Jahresertrag liegt mit $458 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ um gut 6 % über dem mindestens erwarteten bzw. garantierten von $433 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, was sich auch im Performance-Faktor von 1,06 widerspiegelt. Der Performance-Faktor muss mindestens 1 betragen, damit die Garantie erfüllt ist. Im zweiten Betriebsjahr von Juni 2020 bis Mai 2021 lag die mittlere Netztemperatur mit $76,6^\circ\text{C}$ etwas niedriger, die Einstrahlung entsprach aber ungefähr dem Vorgabewetter. Die Anlage wurde wegen Netzarbeiten im September 2020 für 9 Tage stillgelegt, wofür dem Netz (geschätzte) $33 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ entgingen und der Anlage gutgeschrieben werden, weil das die Ausschreibung nicht vorsah. Unter diesen Bedingungen speiste die Anlage $448 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ein, während $433 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ garantiert wurden und $403 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ nominell erwartet worden wären. Damit wurde die Garantie um ca. 3,5 % überschritten. Die „nominell erwartete“ Garantie wurde um 11 % überschritten, da der anhand der Garantiebedingungen normierte Jahresertrag $482 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ergibt. Der Performance-Faktor beträgt entsprechend 1,11 fürs zweite Jahr.

Die Flachkollektoranlage

Die Flachkollektoren wurden um 30° geneigt und mit 30° nach Süd-West ausgerichtet. Das ergibt mit dem in den Ausschreibungsunterlagen vorgegebenen Wetterdatensatz für den Standort Erfurt mit einer Globalstrahlung von $1.058 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ einen Faktor von 1,097, um den die hemisphärische (Kollektor-)Einstrahlung mit $1.161 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ höher ist als die (horizontale) Globalstrahlung (Bild 3).

Da unter Standardbedingungen in Würzburg bei 75°C laut Solar-Keymark-Zertifikat ein Kollektorsertrag von $413 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ erwartet wird (rechter blauer Punkt im Diagramm von Bild 3), würde man unter den Bedingungen in Erfurt bei $77,5^\circ\text{C}$ entsprechend $341 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ erwarten. Garantiert wurden $375 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Da sollte also mehr ins Wärmenetz geliefert werden, als vom Kollektor laut Zertifikat erwartet werden kann. Deshalb liegt die erwartete Kollektorkennlinie $V \cdot \eta_a$ (schwarze Linie) im Diagramm um Faktor 1,1 höher als die der Referenzkennlinie η_a (blaue Linie), denn der „Verlustfaktor“ V (üblicherweise < 1) wird hier zu einem „Gewinnfaktor“ ($1,1 > 1$). Der Anbieter erwartete offenbar auch keine Systemwärmeverluste ($U_{\text{sys}}=0$). Deshalb fällt die Kennlinie des nominellen Jahresertrags (gelbe Linie) ebenfalls mit der Kollektorkennlinie zusammen. Der garantierte Netzertrag lässt auch keinen Sicherheitsfaktor f_{saf} mehr zu, wenn sein Wert bereits über der blauen Referenzkennlinie liegt, so dass dessen grüne Kennlinie ebenfalls mit der des Kollektor- und der des nominellen Jahresertrags zusammenfällt.

Im ersten vollständigen Betriebsjahr von Juni 2019 bis Mai 2020 wurde die Netztemperatur mit $77,5^\circ\text{C}$ um 3 K überschritten, die hemisphärische Einstrahlung auf den Kollektor betrug wie beim Röhrenkollektor 14 % mehr als bei dem Wetterdatensatz, dem die Garantie zugrunde liegt. Deshalb wurde die Ertragsgarantie mit $378 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ sogar erreicht. Bei dieser Einstrahlung wäre nominell aber ein Netzertrag von $475 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ fällig gewesen. Damit fällt der Netzertrag um 20 % hinter den nominell garantierten, was der Performancefaktor (= 80 %) ausweist. Multipliziert man den Garantievertrag unter den der Ausschreibung zugrunde liegenden Garantiebedingungen mit diesem Faktor, dann erhält man einen normierten oder „Standard-“ Jahresertrag von $299 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, den man dank der Normierung nun übersichtlich direkt mit dem erteilten Ertragsgarantiewert von $375 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ vergleichen kann. Bei Bezug auf die hemisphärische Einstrahlung der Vorgabe ergibt sich ein normierter Standard-Jahreswirkungs- bzw. -Nutzwirkungsgrad von 26 % (Tabelle 2).

Tabelle 3 • Auswirkung von Einstrahlungsschwankungen auf den Solarertrag.

	Einstrahlung auf Kollektor	Um Stagnationsverlust korrigierte solare Netzeinspeisung		Normierte um Stagnationsverlust korrigierte solare Netzeinspeisung	
		Röhrenkollektor	Flachkollektor	Röhrenkollektor	Flachkollektor
6/2019 - 5/2020	1.319 kWh/m ²	534 kWh/m ²	378 kWh/m ²	505 kWh/m ²	475 kWh/m ²
6/2020 - 5/2021	1.194 kWh/m ²	(448 + 33) kWh/m ²	(290 + 33) kWh/m ²	(403 + 33) kWh/m ²	(337 + 33) kWh/m ²
Differenz in %	10,5%	11,0%	17,0%	15,8%	28,4%

Tabelle 4 • Vergleich beider Solarthermieranlagen über die zwei Betriebsjahre.

Zwei-Jahresvergleich	mittlere Netztemperatur	Einstrahlung auf Kollektor H _{hem}	spezifische Netzeinspeisung	garantierter Netzertrag	Garantieerfüllung	Jahresnutzungsgrad	normierte spezifische Netzeinspeisung	normierte Garantieerfüllung	normierter Jahresnutzungsgrad
	°C	kWh/m ² a	kWh/m ² a	kWh/m ² a	%	%	kWh/m ² a	%	%
XL 19/49 P	77,9	2513	982	866	113,4%	39,1%	940	108,5%	0,41
KBB K5 Giga+	76,5	2524	668	750	89,1%	26,5%	621	82,8%	0,27
Performance-Mehrwert des XL 19/49 P			47,0%	15,5%		47,6%	51,3%		52,0%

Im zweiten Betriebsjahr von Juni 2020 bis Mai 2021 lag die mittlere Netztemperatur mit 75,1 °C etwas niedriger, die Einstrahlung entsprach aber ungefähr dem Vorgabewetter. Für die 9 nicht vorgesehenen Stagnationstage im September wegen Netzarbeiten wurden der Anlage 33 kWh/m²a entgangener Gewinn gutgeschrieben, das ist großzügig dieselbe Gutschrift wie beim Röhrenkollektor. Unter diesen Bedingungen speiste die Anlage 290 kWh/m²a ein, während 337 kWh/m²a erwartet worden wären. Dies bedeutet ein Zurückbleiben hinter der Garantie um 14 % und einen normierten Jahreswirkungs- bzw. Standard-Nutzungsgrad von 28 %. Die Ursachen für diese schlechten Werte scheinen klar zu sein:

- Verschattungs- oder andere Kollektorverluste wurden nicht angenommen.
- Bereits der Kollektorertrag wurde höher angenommen, als es das Solar-Keymark-Zertifikat bei der in der Ausschreibung vorgegebenen hemisphärischen Strahlung erwarten lässt.
- Es wurden offenbar keine Wärmeverluste des Systems angenommen.
- Zwischen dem nominellen simulierten Netzertrag und der erteilten Garantie wurde offenbar keine Sicherheit vorgesehen.
- Der Zertifikat-Wert für Würzburg für 75 °C ist mit 413 kWh/m²a evtl. für die Praxis zu hoch, wofür der konvexe Verlauf der Referenz-Kollektorkennlinie ein Indiz wäre.

Ergänzendes

Beide Solaranlagen durften unter großen Einschränkungen ausnahms-

weise auch in den Rücklauf einspeisen, z. B., wenn die Vorlauf einspeisung sonst zu einer Stagnation geführt hätte. Da beide Anlagen unterschiedliche Größen, Rohrinhalte, Steuerungen, Sensoren und Sicherheitseinrichtungen haben und die Netztemperaturen zur Auswertung über eine Gewichtung mit den Volumenströmen gewonnen wurden, erklärt sich, warum die gemessenen mittleren Netztemperaturen nicht ganz gleich waren. Die Werte zeigen aber, dass bei beiden Anlagen die Rücklaufanhebung eine vernachlässigbare Rolle gespielt haben muss. Die bei der Flachkollektoranlage etwas kleineren mittleren Netztemperaturen lassen einen etwas höheren Anteil von Rücklaufanhebung nur vermuten.

Wichtig ist noch folgende Beobachtung: Im ersten Betriebsjahr lag die Einstrahlung um 10,5 % höher als im zweiten Betriebsjahr. Dieser Unterschied widerspiegelt sich bei der Röhrenkollektoranlage mit 11 % annähernd in gleichem Maße, jedoch mit 42,6 % um Faktor 4 verstärkt bei der Flachkollektoranlage (Tabelle 3). Es sind zu wenige Daten, um daraus präzise Schlüsse zu ziehen, aber es ist grundsätzlich ein Irrtum zu glauben, dass sich Schwankungen bei der Einstrahlung auch 1:1 im Solarertrag niederschlagen. Vielmehr wirkt sich die Einstrahlung immer um einen Faktor größer als 1 auf den Solarertrag aus, was schon seit Jahren beobachtet wird, z. B. bei der für einige Zeit größten Solaranlage Deutschlands in Senftenberg /5/. Das liegt v. a. daran, dass die Systemverluste wenig von der Einstrahlung abhängen. Sie entstehen sowieso, sobald

die Anlage sich erwärmt. Offensichtlich ist dieser Verstärkungsfaktor bei Flachkollektoren jedoch noch deutlich größer als bei Röhrenkollektoren. Dies liegt daran, dass die Flachkollektoren einen deutlich geringeren Anteil der Strahlung in nutzbare Wärme verwandeln. Wenn davon dann noch die Systemverluste verloren gehen, schlägt dies für die verbleibende Wärme zur Netzeinspeisung prozentual noch viel stärker zu Buche als bei Röhrenkollektoren. Diese Beobachtung widerlegt nebenbei die anfängliche Annahme des Anbieters der Flachkollektoranlage, dass diese gar keine Systemwärmeverluste habe.

Wirtschaftlichkeit

Rechnet man die Solarerträge der ersten zwei Jahre hoch auf 25, verteilt die Investitionskosten auf dieselbe Zeit und rechnet mit 0,8 % davon an jährlichen Nebenkosten, dann ergibt das bei 45 % Förderung einen Wärmepreis von 36,5 Euro/MWh für die Röhrenkollektoranlage und von 52,8 Euro/MWh bei der Flachkollektoranlage. Die hier zur Wirtschaftlichkeit genannten Zahlen sind nicht die Vergleichszahlen der Stadtwerke Erfurt, sondern wurden hier nur als Beispiel gewählt.

Zusammenfassung

Die Messungen und Auswertungen nach der geschilderten Methode bestätigen sehr gut, dass Jahresertragsgarantien zuverlässig kontrolliert werden können, auch wenn sich die Wetter- und Betriebsbedingungen jedes Jahr deutlich voneinander unterscheiden. Es bestätigt sich auch, was von den jeweiligen Kollektoren zu erwarten ist. Laut So-

lar-Keymark-Datenblattvergleich werden von der Röhrenkollektoranlage bei 75 °C mittlerer Kollektortemperatur 48 % mehr Jahresertrag erwartet als von der Flachkollektoranlage ($613/413 - 1 = 0,48$). Gemessen wurde bei den gleichen Netztemperatur- und Wetterbedingungen 47 % ($982/668 - 1 = 0,47$). Dabei garantierte der Anbieter der Röhrenkollektoranlage im Ausschreibungsverfahren 13,4 % weniger als er dann lieferte, während der Anbieter der Flachkollektoranlage nur 89,1 % seines Garantiewertes lieferte (Tabelle 4).

Für den hypothetischen Fall, dass im Betriebszeitraum exakt die Aus-

schreibungsbedingungen geherrscht hätten, zeigen die normierten Daten, dass die Röhrenkollektoranlage 51,3 % mehr geliefert hätte als die Flachkollektoranlage und 8,5 % mehr als garantiert. Dabei hätte sie 41 % von der gesamten Strahlung auf den Kollektor in „Fernwärme“ verwandelt. Die Flachkollektoranlage hätte ihre Garantie um 17,2 % verfehlt und dabei nur 27 % der Strahlung als Wärme geliefert.

Literatur

/1/ Stefan Abrecht: Solare Großanlagen – Kontrolle und Normierung von Ertragsdaten, 31. Symposium Solarthermie..., Bad Staffelstein (2021)

/2/ Artem Karandashev, Kay Eberhardt: Vergleich der Flach- und Vakuumkollektor-Solarthermieanlagen der Stadtwerke Erfurt Energie GmbH am Standort Erfurt-Marbach, 31. Symposium Solarthermie ..., Bad Staffelstein (2022)

/3/ <http://www.estif.org/solarkeymarknew/solar-keymark-network/calculation-tool>

/4/ SCFW-Download: <https://www.scfw.de/>

/5/ Rolf Meißner: Solarpioniere als Gewinner in Zeiten des Klimawandels, Sanitär- und Heizungstechnik (SHT) 4/2019, Krammer-Verlag (2019)