

Dipl.-Ing. Stefan Abrecht, Dr. Christiane Kettner und Dr. Rolf Meißner*)

Kollektorvergleiche – Wo sich Spreu und Weizen trennen

Bei höheren Betriebstemperaturen heben sich die Ergebnisse von Sonnenkollektoren mit Vakuumisolationen von solchen mit konventioneller Wärmedämmung bzw. Röhrenkollektoren von Flachkollektoren deutlich ab. Unter durchschnittlichen Strahlungsverhältnissen (z. B. $450 \text{ W/m}^2\text{a}$ in Würzburg) werden selbst die besten Flachkollektoren bei Temperaturunterschieden zur Umgebung ab ca. 25 K aufwärts von Röhrenkollektoren in den Schatten gestellt. Bei Temperaturunterschieden ab ca. 40 K lassen selbst die einfachsten Röhrenkollektoren jeden Flachkollektor im direkten Leistungsvergleich hinter sich. Seit 2006 baut Paradigma solarthermische Großanlagen mit CPC-Vakuumröhrenkollektoren, die wie konventionelle Kessel mit Wasser funktionieren und wie solche auch einfach verschaltet werden. Bis heute entstanden so bereits viele Anlagen, darunter mit 1330 m^2 Bruttokollektorfläche bei der FESTO AG & Co. KG in Esslingen-Berkheim bei Stuttgart auch die größte VRK-Solaranlage der Welt (im Bild), welche im Sommer die ebenfalls weltgrößte Adsorptionskältemaschine zur Kühlung von über 27.000 m^2 Bürofläche unterstützt und im Winter zur Heizung beiträgt. Es wird gezeigt, dass für Prozesswärmeanwendungen wie diese nur Hochleistungs-Vakuumröhrenkollektoren geeignet sind.

Rückblick

Gegen Ende der 90er Jahre kam die konventionelle Technik für thermische Solaranlagen in eine Sackgasse. Man hatte gelernt, dass sich gewöhnliche Kollektoren für viele Heizsysteme

und Prozesswärmeanwendungen nicht eignen und brauchte Kollektoren mit geringeren Wärmeverlusten. Es wurde aber auch damals bereits immer klarer, dass höhere Betriebstemperaturen und konventionelle Frostschutzmittel miteinander unver-



einbar sind, wenn man nicht mit allen Mitteln die thermische Stagnation verhindert. Seitdem wurden verschiedene Entwicklungen zu stabileren Wärmeträgern gestartet, die Speicherung der Solarwärme in gigantischen, siedericheren Aquifer- oder Saisonspeichern erhielt große Förderung und die Kombispeichertechnik führte zu einer unüberschaubaren Vielfalt, wobei Speicherauslegungen zunehmend immer größer ausfielen. Auch Flachkollektoren versuchte man im Labor immer weiter zu verbessern, obwohl diese als Serienprodukte infolge des Preiskampfes heute im Durchschnitt eher schlechter sind als damals. Alle diese Wege wurden gut mit Forschungs- und Fördermitteln unterstützt und fanden als Stand der Technik ihren Niederschlag im Marktanzreizprogramm.

Paradigma beschritt seit 1997 einen ganz anderen Weg und wandte sich der Dewar-Vakuumröhrentechnik zu, besser bekannt als „Thermoskannenröhre“. Die Röhren wurden wesentlich verbessert, in Kollektoren aus eigener Produktion eingebaut und mit hochpräzisen, selbst hergestellten CPC-Spiegeln ergänzt. Mit diesem Vakuumröhrensystem wurde ein Minimum an Wärmeverlusten erreicht, aber auch ein Höchstmaß an komfortablem Umgang mit der Technik auf der Baustelle. Seit 2003 setzt Paradigma im sog. AquaSystem konsequent nur noch Wasser als Wärmeträger ein und schützt die Anlagen vor Frost mit Niedertemperaturwärme aus den Speichern oder aus dem Wärmenetz. Aufgrund der geringen Wärmeverluste des Kollektorsystems ist hierfür in Deutschland nur ein kleiner



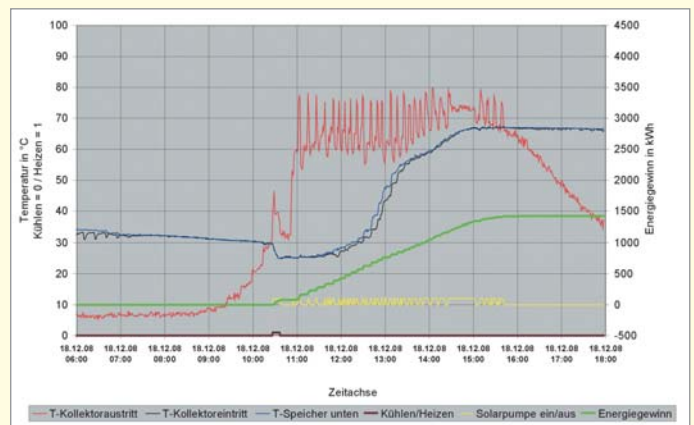
*) Stefan Abrecht ist Maschinenbauer und entwickelte im Verlauf von 20 Jahren sämtliche Flach- und CPC-Vakuumröhrenkollektoren von Paradigma sowie die zugehörigen Systemlösungen.



*) Christiane Kettner befasste sich als theoretische Physikerin in der Quantenfeldtheorie eingehend mit der mathematischen Simulation komplexer Systeme. Seit 8 Jahren nutzt sie diese Spezialkenntnisse, um bei Paradigma die Solar- und Heizungssysteme zu optimieren und Regelungen zu entwickeln, die den Wirkungsgrad des Gesamtsystems optimieren.



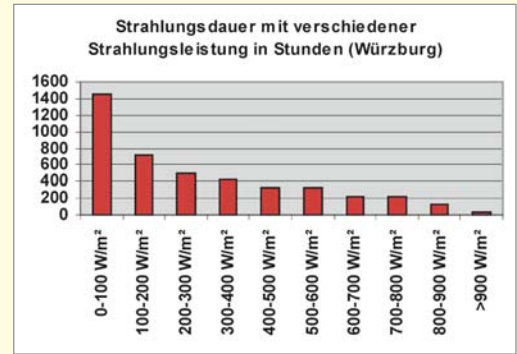
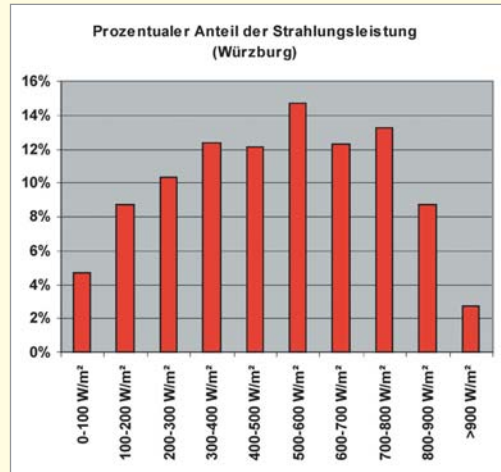
*) Rolf Meißner ist Experimentalphysiker und befasst sich seit über 20 Jahren mit Energiespeicherung. Seit 1990 ist er bei Paradigma u. a. Produktmanager und Entwickler von Solarkomponenten wie Regelungen und Speicher. Gegen Ende 2006 gründete er den Bereich „Solarthermische Großanlagen und Prozesswärme“.



Erste Betriebsergebnisse der Solaranlage FESTO:
Zunächst folgt eine Aufzeichnung vom 18. Dez. 2007. Obwohl es den ganzen Tag über frostig unter -5 °C war, wurde mühelos ständig ein Sollwert von 70 °C erreicht und eine Wärmeenergie von knapp $1,5 \text{ MWh}$ in den Speicher gebracht. Für den nahezu kürzesten und kältesten Tag des Jahres ist das ein sehr gutes Ergebnis, zumal im Winter eine beachtliche Verschattung herrscht, wie auf dem ersten Bild zu sehen ist.

Energiebetrag von 2 bis 4% des solaren Jahresenergieertrages notwendig, der durch die Vorteile des Wassers und durch den exergetischen Mehrwert hoher Arbeitstemperaturen mehr als nur kompensiert wird. Dieses Prinzip hat sich inzwischen an etwa 30.000 Anlagen bewährt. Gegenüber herkömmlichen Solaranlagen bietet es einige Vorteile:

- Die Solaranlage arbeitet wie ein Zusatzkessel mit beliebig wählbarer Temperatur.
- Solarwärmetauscher und Frostschutzmittel werden überflüssig. Das senkt enorm die Kosten.
- Es gibt kein Überhitzungsproblem mehr und Prozesswärmegewinnung bis 130°C wird damit möglich. Die Anlage darf bedenkenlos ohne Wärmeabnahme im Stillstand stehen. Damit ist der Einsatz kleiner effizienter Speicher möglich.
- Eine hervorragende thermische Schichtung im Speicher sowie ein minimaler Speicherbedarf sorgen für eine extrem schnelle Verfügbarkeit der Solarwärme.
- Übers Jahr wird gegenüber einer konventionellen Betriebsweise ca. 50 % an elektrischer Pumpenlaufzeit- und Pumpenergie gespart.
- Die umfangreiche Funktionskontrolle des Reglers



entdeckt und meldet Fehler sofort und sichert dadurch einen optimalen Betrieb.

Kollektorkennlinien

Zunächst muss ein in den Medien, vor allem im Internet und auf Herstellerprospekten oft verbreiteter Irrtum über die Ertragsverhältnisse in Deutschland klargelegt werden. Das Problem liegt in der beliebten Präsentation von Kollektorkennlinien bei exotischen Strahlungsbedingungen, z. B. bei 800 W/m². Das gilt am Referenzstandort Würzburg bei einem Süddach mit 45 Grad Neigung aber nur für 11 % der energetischen Strahlungsbilanz bzw. nur 159 Stunden im Jahr. Davon verbringt eine gut dimensionierte Anlage aber viele in der thermischen Stagnation. Dagegen kommen mehr als 13 % der Sonnenstrahlung

mit weniger als 200 W/m² vom Himmel. Das Jahresmittel der Strahlungsleistung liegt in Würzburg bei 397 W/m². Der Anteil unter 100 W/m² wurde hier weggelassen, weil dieser für Flachkollektoren völlig bedeutungslos ist und auch bei Röhrenkollektoren nur noch mit maximal 5 % in der Jahresbilanz zu Buche schlagen kann. Ohne diese Vernachlässigung läge das Mittel noch tiefer.

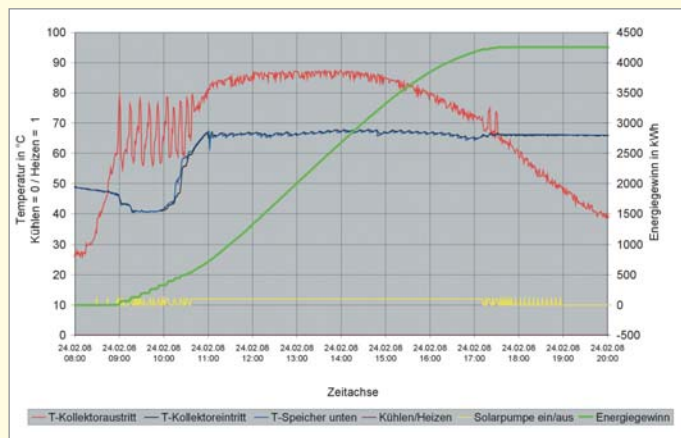
Um sicherzustellen, dass die Kollektorparameter auf derselben Messgrundlage beruhen und somit vergleichbar sind, wurden nur Testergebnisse aus dem Solar Keymark verwendet. Es wurden folgende Kollektoren verglichen (siehe Tabelle 1).

Die Solar-Keymark-Daten beziehen sich auf die Aperturfläche. Die Kennlinien im folgenden Diagramm sind jedoch auf die Bruttokollektorfläche umgerechnet, denn nur diese wird bezahlt, gefördert und verglichen und nach dieser allein ist die Dachfläche zu planen.

Die Kennlinien wurden bei einer Einstrahlung von 450 W/m² gerechnet und zeigen, dass unter anspruchsvolleren Betriebs-

bedingungen jeder der drei Röhrenkollektoren die Flachkollektoren bei spätestens 40K Temperaturdifferenz zwischen Kollektor- und Umgebungstemperatur noch in den Schatten stellt. Gegen den CPC-Vakuumröhrenkollektor verlieren durchschnittliche Flachkollektoren bereits bei Temperaturdifferenzen von 15 K und die besten ab 25K. Dabei zählen diese Flachkollektoren durchaus zu repräsentativen Vertretern ihrer „Gattung“. Der Kollektor mit Nr. 5 ist zweifellos einer von den allerbesten und soll die momentane Leistungsgrenze der Flachkollektortechnik repräsentieren. Man hätte an dieser Stelle Solarteuren gern weitere gut vertraute Kollektoren präsentiert, musste aber feststellen, dass sehr viele Hersteller wegen der Förderung zwar Solar-Keymark-Tests durchführen lassen, ihre Testergebnisse aber oft nicht öffentlich machen.

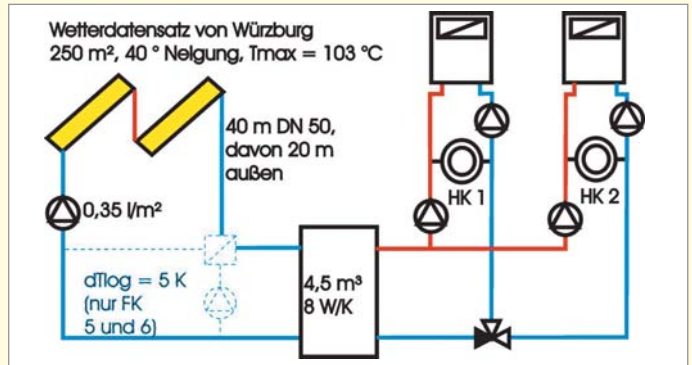
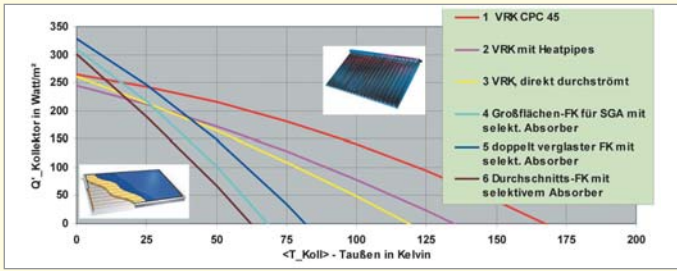
Es muss auch kritisch bedacht werden, dass die Leistungsermittlung nach DIN EN 12975 zwar bei allen Kollektoren mit Wasser durchgeführt und die mit Wasser erzielten Ergebnisse sozusagen „amtlich“ ohne Abschlagn anerkannt werden, dass aber derzeit nahezu alle Hersteller die Kollektoren in der Realität mit einem Wärme-



Am 24. Februar lagen bereits einfachere Bedingungen vor. Mit Temperaturen von weit über 80°C wurden insgesamt knapp 4,3 MWh in den Speicher eingespeist. Das sind immerhin 3,2 kWh pro Quadratmeter Bruttokollektorfläche – für einen Februartag auch ein ausgezeichnetes Ergebnis. Es ist fraglich, ob es einen Flachkollektor gibt, der wenigstens an einem schönen Augusttag das gleiche Ergebnis erbringen würde.

Nr.	Kollektor	η_0	a1 W/m²K	a2 W/m²K²	Apertur-/Bruttofl.
1	CPC-VRK, indirekt durchströmt, Edelstahlregister	0,644	0,749	0,0050	0,9165
2	VRK mit Heatpipes	0,730	1,260	0,0041	0,7477
3	VRK, direkt durchströmt	0,775	1,740	0,0038	0,7477
4	Großflächen-FK für SGA mit selekt. Absorber	0,745	3,260	0,0185	0,9271
5	doppelt verglaste FK mit selekt. Absorber	0,793	2,920	0,131	0,9183
5	Durchschnitts-FK mit selektivem Absorber	0,722	4,170	0,0107	0,9283

Tabelle 1



träger füllen, der z. B. bei 40°C eine 12 % geringere Wärmekapazität, die 3,8-fache Zähigkeit (Viskosität), eine 38 % geringere Wärmeleitfähigkeit, nur ein Viertel der Reynoldszahl (weshalb diese Kollektoren überwiegend bei ungünstigerer, laminarer Strömung arbeiten müssen), einen 25 % geringeren Wärmeübertragungskoeffizienten und einen um 42 % (bei turbulenter Strömung) bis 385 % (bei laminarer Strömung) höheren Druckverlust als Wasser besitzt. Zu tieferen Temperaturen hin werden die Verhältnisse immer ungünstiger. Solange nur wenige Hersteller mit Wasser arbeiten, müssen diese die Schlechterstellung einfach schlucken. Werden das aber einmal mehr, wird man sich fragen müssen, was die Zahlen der Leistungstests ohne Frostschutzmittelkorrektur eigentlich wert sind. Dann wird selbst Stiftung Warentest nicht länger abwiegeln schreiben wollen: „Wir... sind zu der Überzeugung gekommen, dass die Unterschiede unwesentlich sind...“. Jeder kann sich selbst ganz schnell davon überzeugen, wie wesentlich die Unterschiede jedoch tatsächlich sind. Wenn man einmal einen beliebigen Plattenwärmetauscher mit den Auslegungsprogrammen der Hersteller (z. B. SWEPE, Alfa Lavall, Gea WTT usw.) ehrlich ausrechnet, wobei einmal Wasser gegen Wasser und zum Vergleich Wasser gegen Frostschutzmittel zu tauschen ist, stellt man fest, dass im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung mit Frostschutzmittel etwa die 3-fache Plattenanzahl notwendig ist, um das gleiche Wärmetauschergebnis zu erzielen. Genau diese Strömungsverhältnisse herrschen aber auch in den Kollektoren. Mit Frostschutzmittel werden Kollektoren überwiegend laminar durchströmt, mit Wasser ist die Strömung überwiegend turbulent. Nahezu alle

Solarertrags-Simulationsprogramme ignorieren die physikalische Abbildung dieser Zusammenhänge durch Anwendung einfacherer Modelle vollständig. Das geradezu regelmäßige Verfehlen der vorhergesagten Jahreserträge bei Solaranlagen mit Frostschutzmitteln, was man in der Literatur über Großanlagen am besten verfolgen kann, hat vermutlich hier eine systematische Ursache. Das Rechenergebnis ganz ohne Plattenwärmetauscher, wie bei Wassersystemen, sollte nicht mehr zu übertreffen sein. Tatsächlich kann man in den bekanntesten Simulationsprogrammen die Wärmetauscher überhaupt nicht entfernen.

Dynamischer Jahresvergleich

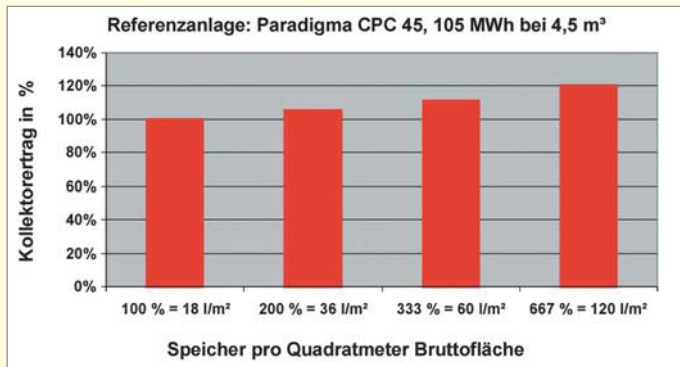
Im Folgenden soll gezeigt werden, dass die Zukunft der solaren Prozesswärmetechnik in der Röhrentechnologie liegt. Dazu wurde untersucht, wie sich die 3 eben kurz vorgestellten Röhrenkollektoren und die 3 Flachkollektoren in einer ähnlichen Anwendung wie beim Projekt FESTO verhalten würden. Es gibt zwei Lastkreise, davon eine Prozesswärmeanwendung mit einem Sollwert von 90°C, sowie

eine Raumheizung mit variablem Sollwert zwischen ca. 45°C und 70°C während der Heizperiode. Es werden 250 m² Bruttofläche mit Südausrichtung und 40° Neigung sowie ein Jahreswärmebedarf von 310 MWh angenommen. Der Speicher hat nur 4,5 m³ und spezifische Verluste von 8 W/K. Die Solarfläche besteht aus zwölf Strängen mit je 20,8 m² in Serie. Die Stränge zweigen alle nach links und rechts von einem mittleren Hauptstrang ab. Die Hauptzuleitung DN 50 liegt 20 m im Freien und 20 m im Innenbereich. Das Kollektorfeld wurde für alle Kollektoren als gleich angenommen, obwohl es für die Vergleichskollektoren meist deutlich komplizierter und mit mehr Rohraufwand im Außenbereich aufgebaut sein müsste, da z. B. keine Rückführrohre vorhanden sind und bei manchen gar nicht so viel Fläche in Serie angeordnet werden kann. Der Heatpipe-Kollektor lässt z. B. nur 6 m² Bruttofläche in Serie zu. Betriebsdruck und statische Höhe gestatten eine Beladung des Speichers bis 103°C. Aus Vergleichsgründen

werden alle Kollektoren mit dem Paradigma-Anschlussset mit integriertem Fühler ausgestattet. Alle Vakuum-Röhrenkollektoren werden mit Wasser und der Regelung SystaSolar Aqua betrieben, die Flachkollektoren dagegen mit Glykol und der Regelung SystaSolar (mit Drehzahlregelung). Bei den Flachkollektoren befindet sich ein externer Wärmetauscher zwischen Solaranlage und Speicher, wobei sich ein Delta T von 5 K einstellt. Der Kollektordurchsatz beträgt einheitlich 0,35 l/m² bezogen auf die Aperturfläche. Obwohl die meisten Systeme einen deutlich größeren Druckabfall haben und daher stärkere Pumpen bräuchten, wird der Einfachheit halber nicht der Pumpenstromverbrauch, sondern nur die reine Pumpenlaufzeit verglichen.

Lastkreis 1:
Die Vorlauftemperatur beträgt mindestens 90°C, d.h., der Solarspeicher wird erst entladen, wenn am oberen Speicherfühler T1 mindestens 90°C herrschen. Die Rücklauftemperatur beträgt 70°C. Gezapft wird nur montags bis freitags von 8:00 Uhr bis

		Vakuumröhrenkollektoren (VRK)			Flachkollektoren (FK)		
		1	2	3	4	5	6
		CPC-Vakuumröhrenkollektor direkt durchströmt mit Edelstahlregister	VRK mit Heatpipes	VRK, direkt durchströmt	Großflächen FK für SGA mit selekt. Absorber	doppelt verglaster FK mit selekt. Absorber	Durchschnitts FK mit selekt. Absorber
1	Kollektor-ertrag	104,6 MWh bzw. 100 %	85 %	81 %	53 %	55 %	37 %
4	Speicher-eintrag	98,9 MWh bzw. 100 %	84 %	81 %	39 %	52 %	33 %
7	Speicherent-nahme 90/70	58,3 MWh bzw. 100 %	78 %	75 %	28 %	45 %	22 %
8	Speicherent-nahme gesamt	89,7 MWh bzw. 100 %	80 %	76 %	40 %	46 %	34 %
9	Stillstands-tage	39 bzw. 100 %	92 %	87 %	36 %	49 %	28 %
10	Pumpen-laufzeit	768 h bzw. 100 %	184 %	178 %	209 %	266 %	248 %



17:00 Uhr mit einem maximalen Massenstrom von 10.000 kg pro Stunde. Der Jahresenergiebedarf beträgt 145 MWh.

Lastkreis 2:

Bei der 70/50-Raumheizung wird die Solaranlage zur Vorwärmung des Rücklaufs verwendet, d. h., der Solarspeicher wird entladen, sobald am oberen Speicherfühler mindestens Heizkreis-Rücklauftemperatur + 5 K herrschen. Es gibt keine Speichernachheizung, der Jahresenergiebedarf beträgt 165 MWh. Beim AquaSystem schaltet die Pumpe des Lastkreises 2 kurz ein, wenn unten im Speicher 10°C unterschritten werden und aus, wenn 15°C überschritten werden. Nur beim Referenzkollektor wird die Einspeisezeit nach dem „Eimerprinzip“ zur Begrenzung der Pumpenlaufzeit zeitlich beschränkt. **Die Wetterdaten sind von Würzburg mit einer Einstrahlung in die Kollektorebene von 1214 kWh pro Jahr.**

Das seit langem bewährte Rechenmodell wurde im Programm COLSIM aufgestellt. Gerechnet wurde im Messabstand von 5 Sekunden. Da aus DIN CERTCO Solar Keymark von den Wettbewerbs-Kollektortypen nur die Parameter für das 1xn-Knoten-Modell bekannt sind, wurden alle Berech-

nungen in diesem Modell durchgeführt. In der Jahressumme sind die Unterschiede zum 2xn-Knoten-Modell, auf denen Ertragsprognosen von Paradigma AquaSystem-SGAs sonst basieren, eher gering. Der CPC-Vakuümrohrkollektor CPC 45 Azuro wird als Referenz verwendet, die mit ihm zu erwartenden Werte werden als 100% definiert.

Es zeigt sich, dass Flachkollektoren bei einer solchen Anwendung besser nicht zum Einsatz gebracht werden sollten, weil selbst die besten unter ihnen trotz der ergänzenden Niedertemperaturanwendung im Winter kaum 50% des Kollektorertrages des CPC-Vakuümrohrkollektors schaffen könnten. Durchschnittliche Flachkollektoren kämen nur auf ein Drittel des Referenzertrages trotz der 2,5-fachen Laufzeit der Solarpumpen.

Mehr Speicher oder mehr Kollektor – was ist effektiver?

Zur Speicherung der Solarwärme dient bei der FESTO-Anlage neben einem sehr kleinen Speicher mit 17 m³ (dies entspricht wenig mehr als 10 Liter Speicher pro Quadratmeter Kollektorfläche) vor allem das Hausnetz.

Bei der Referenzanlage 1 wurde die Speichergröße von 4,5 m³ bis auf 30 m³ bzw. von 18 l/m² bis auf 120 l/m² vari-

iert. Das Ergebnis dieser Simulation steht stellvertretend annähernd auch für die FESTO-Anlage, wenn dort der Speicher von 17 m³ auf 34 m³, 57 m³ bzw. auf 114 m³ vergrößert würde. Bei Prozesswärmeanlagen bringt eine Vergrößerung des Speichers nicht viel. Da der Speicher durch die hohen Rücklaufemperaturen (hier 70°C) im Sommer nicht richtig entleert wird, bräuhete man absurd große Speicher, um Tage ohne Last (hier das Wochenende) komplett zu überbrücken. Viel wichtiger ist es, den Bedarf schnell decken zu können, wenn er da ist.

Diese Ergebnisse sind nicht ganz neu. Bereits 2004 wurde vom ITW Stuttgart zum 14. solarthermischen Symposium in Staffelstein anhand von simulierten Betriebsergebnissen für verschiedene Speichergrößen und Kollektorflächen gezeigt, dass auch bei der klassischen Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung Vakuümrohrkollektoranlagen sowohl mit deutlich kleineren Speichern als auch mit deutlich kleineren Kollektorflächen zum selben Solargewinn f_{sav} kommen wie Flachkollektoranlagen. Die Simulationsstudie basiert auf folgenden Annahmen: EFH nach EnEV in Würzburg mit 128 m² Wohnfläche, Südausrichtung, Dachneigung 45°, Heizwärmebedarf 71 kWh/(m²a) bzw. 9090 kWh/a, witterungsgeführte Heizungsregelung mit 50/30°C, WW täglich 200 Liter bei 45°C, Kesselnutzungsgrad 85% sowie Jahresenergiebedarf von ca. 14.900 kWh. Der Parameter f_{sav} gibt an, wieviel Energie durch die Solaranlage im Vergleich zu einer konventionellen, nichtsolaren Wärmeversorgungsanlage eingespart werden kann. So leisten im Zusammenhang mit 1 m³ Speicher 35 m² Vakuümrohrkollektorfläche das Gleiche wie 100 m² Flachkollektoren. Oder 30 m³ Speicher mit 100 m² Vakuümrohrkollektorfläche leisten mehr als 100 m³ Speicher mit derselben Fläche Flachkollektoren.

Abschließende Anmerkungen zum MAP

Weil es sich bei dem oben angeführten Prozesswärmebeispiel um eine Heizungsunterstützung han-

delt, müsste der Speicher einen Inhalt von 100 l/m² Kollektorfläche bzw. von 25 m³ Inhalt haben, damit die ganze Anlage als „innovativ“ gelten könnte und nach der jüngsten Fassung des Marktanreizprogrammes (MAP) eine Förderung bekäme. Der Kollektoretrag würde um ca. 15% steigen, die Systemkosten dagegen schätzungsweise mindestens um ein Drittel, ganz abgesehen davon, dass für solche überdimensionalen Speicher in der Regel gar kein Platz vorhanden ist. Das ist ein sehr schlechtes, aber typisches Beispiel, wie der Gesetzgeber in guter Absicht überreguliert und dabei energiesparendere und volkswirtschaftlich sinnvollere Lösungen verhindert.

Noch schwerer nachvollziehbar ist die Förderung von Kollektoren nach ihrer Brutto-Kollektorfläche. Wie die Kennlinien und die Simulation zeigen, wären für Prozesswärmeanwendungen wie bei der Kollektoranlage FESTO mit leistungsschwächeren Röhrenkollektoren als CPC-Vakuümrohren für den gleichen Ertrag bis zur doppelten Bruttofläche erforderlich, bei Flachkollektoren wäre es sogar ein Vielfaches dieser Fläche. Mit dem MAP würde der Mehrbedarf an Kollektorfläche infolge geringerer Kollektorleistung durch die staatliche Zuwendung großzügig kompensiert. Kurz gesagt: Je schlechter ein Sonnenkollektor ist, umso mehr Förderung erhält er bezogen auf seine Leistung. Das ist eine sehr kurzsichtige und innovationsfeindliche Politik, zumal sie das Effizienzkriterium vermissen lässt, das nach EU-Vorgaben für eine Förderung eigentlich notwendig ist. Dass aufgrund dieses Gesetzes inzwischen bereits Billigstkollektoren zum Preis unterhalb der Förderhöhe auf den Markt drücken, ist daher nur folgerichtig und man muss es in der Marktwirtschaft gelassen sehen. Man kann es aber auch für eine hausgemachte Verschwendung von Steuergeldern halten, mit der zusätzlich das verfügbare Solarenergiepotenzial sträflich vergeudet wird. Wie man heute die Diskussion um Anbauflächen für Biosprit führt, wird man morgen auf unseren Dächern um jeden noch verfügbaren Quadratmeter Kollektorfläche feilschen müssen. ■

Typ	Speichervolumen m³	Kollektorfläche m²	Speicher pro K.-Fläche in l/m²	fsav %	Wärmepreis 2004 /kWh
FK	1	100	10	50	0,69
VRK	1	35	29	50	0,38
FK	10	35	286	50	1,27
VRK	10	22	455	50	1,33
FK	30	28	1071	50	1,12
VRK	30	18	1667	50	1,13
FK	100	100	1000	93	1,32
VRK	30	100	300	94	1,05

Dipl.-Ing. Stefan Abrecht, Dr. Christiane Kettner und Dr. Rolf Meißner*)

Über den Wert von Solarwärme – Wo sich Spreu und Weizen trennen, Teil 2

Der erste Teil zu diesem Text befasste sich mit den bewussten und unbewussten Irrtümern in der Kollektortechnik, wie z. B. der Präsentation thermischer Kennlinien unter irrelevanten Bedingungen, der Ignorierung des Leistungsverlusts durch die Verwendung von Glykol als Wärmeträger, der durch falsche Förderpolitik forcierte Fehler, Speicher gern überzudimensionieren sowie mit dem Marktanreizprogramm, das Kollektoren nicht nach der Leistung fördert, sondern nur nach der Fläche. Es soll nun zunächst erklärt werden, dass und warum hohe Kollektortemperaturen nahezu immer wertvoller sind als niedrige. Es wird eine Leistungswertkennlinie als Produkt aus dem thermischen Kollektorwirkungsgrad und dem Carnot-Wirkungsgrad vorgestellt. Diese charakterisiert für beliebige thermische Kollektoren nicht nur den Temperatureinsatzbereich, sondern zugleich auch den exergetischen Wert der Solarwärme und damit das Potenzial dieser Wärme zur CO₂-Einsparung durch ihre Anwendung beim Ersatz fossiler Wärmeträger. Abschließend folgt der Vorschlag, den Leistungswert von Solarkollektoren zukünftig als einziges objektives Bewertungskriterium gelten zu lassen.

Über die Vorteile höherer Temperaturen

Generell lässt sich Solarwärme auf höherem Temperaturniveau besser nutzen. Denn selbst wenn die Solarwärme ausnahmsweise bereits bei niedrigen Temperaturen genutzt werden kann, wie z. B. zur Schwimmbader-

wärmung, bei der Warmwasserbereitung bzw. bei deren Vorwärmung, bei der Vorwärmung zur Heizungsunterstützung oder bei der Rücklauftemperaturenanhebung, könnten auch diese Prozesse mit höheren Kollektortemperaturen viel effizienter stattfinden. Dies soll im Folgenden erläutert werden.



*) Stefan Abrecht ist Maschinenbauingenieur, entwickelte im Lauf von 20 Jahren sämtliche Flach- und CPC-Vakuumröhrenkollektorsysteme bei Paradigma sowie maßgeblich die OEM Kollektorbaureihen des Paradigma Tochterunternehmens Ritter Solar. Er war auch Initiator und erster Geschäftsführer des deutsch-chinesischen Joint-Venture-Unternehmens Linuo Paradigma.



*) Christiane Kettner befasste sich als theoretische Physikerin in der Quantenfeldtheorie eingehend mit der mathematischen Simulation komplexer Systeme. Seit 8 Jahren nutzt sie diese Spezialkenntnisse, um bei Paradigma die Solar- und Heizungssysteme zu optimieren und Regelungen zu entwickeln, die den Wirkungsgrad des Gesamtsystems optimieren.



*) Rolf Meißner ist Experimentalphysiker und befasst sich seit über 20 Jahren mit Energiespeicherung. Seit 1990 ist er bei Paradigma u. a. Produktmanager und Entwickler von Solarkomponenten wie Regelungen und Speicher. Gegen Ende 2006 gründete er den Bereich „Solarthermische Großanlagen und Prozesswärme“. Er befasste sich als technischer Berater bei Linuo Paradigma auch umfassend mit außereuropäischer, vor allem chinesischer Solartechnik.

Hohe Kollektortemperaturen steigern den Anlagenwirkungsgrad:

- Nur wenn die Solarvorlauf-temperatur permanent wesentlich höher ist als die jeweilige Solltemperatur, kann die konventionelle Nachheizung effizient dauerhaft vermieden werden. Da besonders außerhalb der Heizperiode die Kessel- und Anlagenwirkungsgrade schlecht sind, wird bei jedem durch Solarwärme vermiedenen Einschalten des Kessels ein Vielfaches der Energie eingespart, welche die Solaranlage in den Speicher einbringt. Wenn z. B. ein Ölkessel mit einem feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 90 % und einem internen Wasservolumen von 60 l dieses erst von 20 °C auf 70 °C erwärmen muss, bevor er 150 l Warmwasser im Speicher um 5K erwärmen kann, dann werden nur 16 % der verbrauchten fossilen Energie zur Warmwassererwärmung eingesetzt. Hat die Solaranlage den Warmwasserspeicher aber ausreichend erwärmt, so dass der Kessel nicht anspringen muss, dann spart sie demnach pro solarer Kilowattstunde 6,25 Kilowattstunden an fossiler Energie ein. Neben ihrem solaren Jahresertrag leistet die Solaranlage dann also einen Zusatzbeitrag zur Energiebedarfsvermeidung durch die Einsparung von Kessel- und Anlagenverlusten, der genauso groß oder größer sein kann als der reine Solarertrag. Diesen synergetischen Effekt könnten Niedertemperaturkollektoren nur unter optimalen Bedingungen im Hochsommer leisten, er kommt dann aber aufgrund des solaren Überangebotes gar nicht zum Tragen.

- Permanent hohe Kollektortemperaturen sind mit hohen Temperaturspreizungen und damit einer erhöhten spezifischen Wärmeleistung verbun-

den, was den Volumenstrombedarf senkt. Dadurch werden elektrische Pumpenleistung und Pumpenlaufzeit gespart.

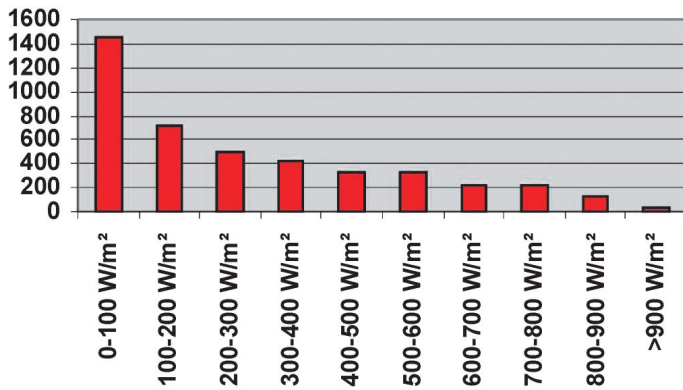
Hohe Kollektortemperaturen erhöhen die Speicherkapazität:

- Erst wenn die Kollektortemperaturen über den Verbrauchs-Solltemperaturen liegen, beginnen Solarspeicher ihre Speicherkapazität zu entfalten. Je höher die Speicher-Übertemperatur ist, umso größer ist die Speicherkapazität. Die Warmwassersolltemperatur sei z. B. auf 60 °C eingestellt. Ein Hochtemperaturkollektor mit niedrigem Volumenstrom belädt einen Speicher (Anfangstemperatur 30 °C) mit starker Spreizung: oben werden 90 °C erreicht, unten 40 °C. Für jeden Liter mit 90 °C können 2,3 l bei 45 °C gezapft werden. Ein Niedertemperaturkollektor hat dieselbe Wärmeenergie in den Speicher eingebracht, aber mit hohem Volumenstrom und geringer Spreizung. Dabei werden oben 70 °C erreicht und unten 60 °C. Für jeden Liter mit 70 °C können 1,7 l bei 45 °C gezapft werden. Die Wärme auf dem jeweils geringeren Temperaturniveau ist zwar nicht verloren, kann aber das Nachheizen durch den Kessel nicht verhindern und ist somit weniger wertvoll.

- Da Speicher von Hochtemperaturkollektoren eine effektiv größere Speicherkapazität besitzen, können diese kleiner ausgelegt werden, was Platz und Investitionskosten spart.

Hohe Kollektortemperaturen erlauben eine ganzjährige Nutzung und geben Planungssicherheit:

- Es muss im Interesse eines jeden Planers und Nutzers liegen, dass Solaranlagen ganzjährig effektiv genutzt werden. Die Leistung von Nieder-



Strahlungsdauer mit verschiedener Strahlungsleistung in Stunden (Würzburg).

temperaturkollektoren fällt mit sinkender Außentemperatur jedoch so stark ab, dass sie im Winter oder bei nicht optimalem Wetter nie viel mehr als eine Vorwärmung leisten können.

- Wenn Wärme gleichzeitig auf unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt wird, z.B. zur Heizung und zur Warmwasserbereitung, ist es am einfachsten, sie von vornherein auf dem höchsten Niveau, also mit der höchsten Exergie, zur Verfügung zu stellen bzw. zu speichern. Mit Niedrigtemperaturkollektoren ist das nicht möglich, was zu einem erhöhten Planungsaufwand und komplizierteren Systemhydrauliken führt.

- Das Verfehlen des vorausgesagten Ertrages der meisten Großanlagenprojekte mit Niedrigtemperaturkollektoren wurde regelmäßig damit begründet, dass die Rücklauftemperaturen höher seien als geplant war. Tatsächlich sind niemals die Rücklauftemperaturen das Problem, sondern immer die Kollektoren selbst, weil sie eben unter realistischen Betriebsbedingungen extrem an Leistung verlieren.

Vorwärm-Schaltungen verringern den Systemwirkungsgrad:

- Jede Art der Vorwärmung wirkt sich negativ auf den Gesamtkesselwirkungsgrad bzw. den Kraftwerkswirkungsgrad aus. Sehr deutlich wird das bei Brennwerttechnik, weil „solar angehobene“ Rücklauftemperaturen die Brennwertnutzung mindern oder verhindern. Aber auch bei jeder anderen Nachheizung wird durch Vorwärmprozesse der Gesamtwirkungsgrad gesenkt. Die Ursachen dafür sind z. B. höhere Stand- und Betriebsverluste sowie ein größerer Pumpenenergie- und Speicherbedarf.

Der thermische Kollektorwirkungsgrad

Der thermische Wirkungsgrad ist auch nur als Kollektorwirkungsgrad bekannt. Er lässt sich anhand standardisierter Parameter, z. B. aus den Solar-Keymark-Tests, für jeden Kollektor an jedem Betriebspunkt einfach berechnen

$$\eta = \left[\eta_0 - a_1 \frac{(\Delta T)}{G_s} - a_2 \frac{(\Delta T)^2}{G_s} \right]$$

mit η_0 , a_1 und a_2 kollektorspezifische Konstanten nach EN 12975-2

ΔT
Differenz: mittlere Kollektor-
temperatur $\langle T_k \rangle$ – mittlere
Umgebungstemperatur $\langle T_u \rangle$

Fortan gilt:
 $\langle T_u \rangle = 10^\circ\text{C}$ (exakt sind $9,4^\circ\text{C}$
am Referenzstandort Würzburg)
 G_s
Solare Gesamtstrahlung (direkte
Einstrahlung + diffuse
(indirekte) Einstrahlung)

Fortan gilt:
 $G_s = 400 \text{ W/m}^2$ (exakt sind
 397 W/m^2 am Referenzstandort
Würzburg)

Die Struktur der Gleichung ist einfach. Wenn keine Temperaturdifferenz ΔT besteht, hat jeder Kollektor seinen individuellen maximalen Wirkungsgrad η_0 . Je größer ΔT jedoch ist, je heißer also der Kollektor wird, umso kleiner wird der Wirkungsgrad. Je größer die Koeffizienten a_1 und a_2 sind, umso eher ist der Wirkungsgrad mit wachsender Kollektortemperatur bei Null angekommen. Allerdings sinkt der Wirkungsgrad bei kleiner Einstrahlung G_s schneller als bei großer. Deshalb versuchen Kollektorkäufer den Wirkungsgrad bei möglichst großer Einstrahlung zu präsentieren, z. B. bei 700 W/m^2 , 800 W/m^2 oder manchmal sogar bei 1000 W/m^2 . Doch das ist in Mitteleuropa unrealistisch. Würzburg bekommt seine Sonneneinstrahlung nur zu 11% mit 800 W/m^2 oder mehr, dafür aber zu über 13% mit weniger als 200 W/m^2 . Beim Jahresmittel der Strahlungsleistung von 397 W/m^2 wurde der Anteil unter 100 W/m^2 bereits weggelassen, weil dieser für Flachkollektoren völlig bedeutungslos ist und auch bei Röhrenkollektoren

nur noch mit maximal 5% in der Jahresbilanz zu Buche schlagen kann. Ohne diese Vernachlässigung läge das Mittel noch tiefer. Fortan wird großzügig mit 400 W/m^2 gerechnet.

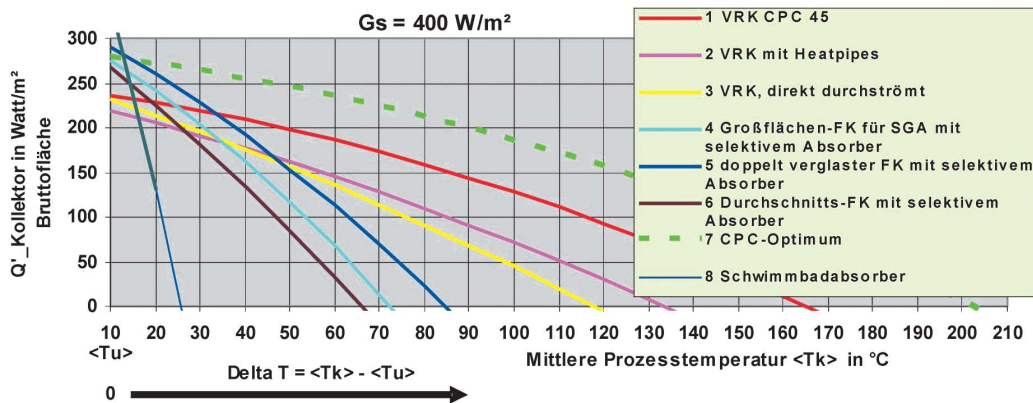
Es wurden folgende Kollektoren verglichen:

Dabei wurden nur Testergebnisse aus dem Solar Keymark verwendet. Diese beziehen sich auf die Aperturfläche. Die Kennlinien im folgenden Diagramm sind jedoch auf die Bruttokollektorfläche umgerechnet, denn nur diese ist wirklich relevant, weil nur nach ihr bezahlt, gefördert, verglichen und geplant wird. Im folgenden Diagramm wurde deshalb der thermische Kollektorwirkungsgrad noch mit dem Faktor Aperturfläche/Bruttofläche und mit der Gesamtstrahlung $G_s = 400 \text{ W/m}^2$ multipliziert, so dass aus dem Wirkungsgraddiagramm ein Leistungsdiagramm wird.

Die Temperaturskala beginnt mit $\langle T_u \rangle = 10^\circ\text{C}$. Damit ist mit der abgebildeten Prozessstemperatur zugleich auch die mittlere Kollektortemperatur und bis auf 10 K Anfangsverschiebung auch ΔT einfach dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass bei Prozesstemperaturen zwischen 35°C und 50°C alle Flachkollektoren unter 150 W/m^2 fallen, während dies für sämtliche Röhrenkollektoren erst zwischen 60°C und 140°C zutrifft. Dabei repräsentiert die grün gestrichelte Kennlinie einen „theoretischen“ CPC-Vakuurröhrenkollektor, der zwar ohne weitere Forschung nach heutigem Stand der Technik kurzfristig herstellbar wäre, aufgrund des bestehenden Marktanreizprogrammes (MAP), nach welchem nicht die Leistung eines Kollektors, sondern dessen Bruttofläche gefördert wird, momentan aber noch keinen Marktwert hat.

Nr.	Kollektor	η_0	a_1 W/m K	a_2 W/m K	Apertur-/ Bruttofl.
1	CPC-VRK, direkt durchströmt, Edelstahlregister	0,644	0,749	0,0050	0,9165
2	VRK mit Heatpipes	0,730	1,260	0,0041	0,7477
3	VRK, direkt durchströmt	0,775	1,740	0,0038	0,7477
4	Großflächen-FK für SGA mit selektivem Absorber	0,745	3,260	0,0185	0,9271
5	doppelt verglaste FK mit selektivem Absorber	0,793	2,920	0,0131	0,9183
6	Durchschnitts-FK mit selektivem Absorber	0,722	4,170	0,0107	0,9283
7	Schwimmbadabsorber (T*SOL Standard)	0,850	20,000	0,1000	1,0000

Kollektortabelle



Kollektorkennlinien

Der thermische Wirkungsgrad trifft nur eine Aussage darüber, wie effizient die Wärme aus der Sonnenenergie gewonnen wird, sagt aber nichts über ihren thermodynamischen Wert.

Der thermodynamische Kollektorwirkungsgrad

Seit der Entdeckung der ersten beiden Hauptsätze der Wärmelehre bzw. seit 1824, als Nicolas Léonard Sadi Carnot die theoretische Beschreibung von energieumwandelnden Maschinen niederschrieb, weiß man bereits ganz genau, welcher Anteil einer Wärmemenge zumindest theoretisch nutzbar ist. Er wird auch exergetischer Anteil genannt. Die Exergie ist der nutzbare Anteil der Energie. Das nicht nutzbare Komplement ist die Anergie, so dass gilt: Exergie + Anergie = Energie. Der Exergieanteil wird durch den Carnot-Faktor η_c ausgedrückt. Für einen Kollektor gilt für η_c :

$$\eta_c = \frac{<T_k> - <T_u>}{<T_k> + 273K} = \frac{<T_k> - 10K}{<T_k> + 273K}$$

wobei genau wie oben gilt:

<T_k> mittlere Kollektor- oder Prozesstemperatur

<T_u> mittlere Umgebungstemperatur mit <T_u> = 10 °C

273 K Abstand der Celsius-Skala vom absoluten thermodynamischen Temperatur-Nullpunkt

η_c drückt aus, wie groß maximal der Anteil einer Wärmemenge ist, der in Kraft oder Strom umgewandelt werden könnte. Er beträgt bei 200 °C Prozesstemperatur ca. 40%. Diese Sichtweise ist insofern interessant, als dass man sich solare Heizungssysteme denken kann, die sämtliche überschüssige Wärme in Strom verwandeln und in das Netz einspeisen. Hier sind Wirkungsgrade in Größenordnungen wie sie aus der Photovoltaik bekannt sind, durchaus realistisch.

Der thermodynamische Wirkungsgrad trifft eine exakte

Aussage über den thermodynamischen Wert der gewonnenen Solarwärme.

Leistungswertkennlinien von Kollektoren

Multipliziert man den thermischen Kollektorwirkungsgrad, den thermodynamischen Wirkungsgrad und die Gesamteinstrahlung G_s , dann erhält man den Leistungswert eines Kollektors in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur <T_k>. Der Leistungswert gewichtet die in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur überhaupt erzielbare Wärmeleistung eines Kollektors mit dem exergetischen Wert dieser Leistung hinsichtlich ihrer universellen thermodynamischen Verwendbarkeit. $P_L = G_s \eta_0 \eta_c$, wobei wieder $G_s = 400 \text{ W/m}^2$.

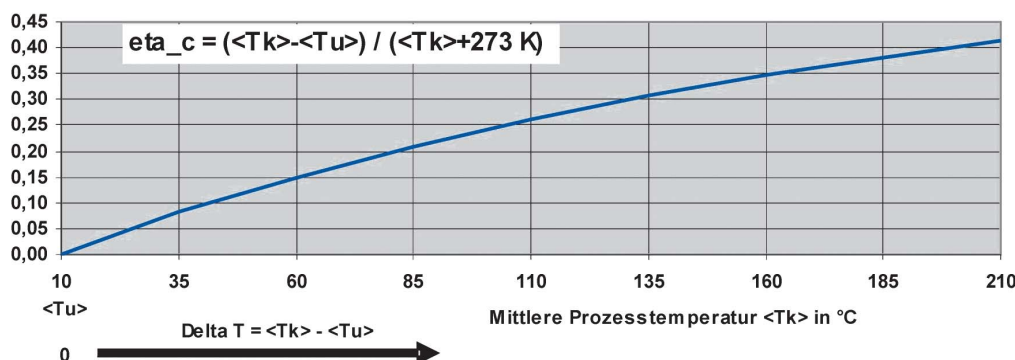
Alle Leistungswertkennlinien beginnen bei Null. Wärme auf dem Niveau der mittleren Umgebungstemperatur ist wertlos. Kollektoren mit großem η_0 haben den steilsten Anstieg. Kollektoren mit den flachsten thermischen Kennlinien haben den

längsten Anstieg. Irgendwann überwiegt bei jedem Kollektor der Abfall des Kollektorwirkungsgrades den Anstieg des thermodynamischen Wirkungsgrades, so dass ein Maximum entsteht. Danach sinkt der Leistungswert und erreicht exakt zusammen mit dem thermischen Wirkungsgrad wieder die Null. Der Wert der gewonnenen Solarwärme sinkt immer weiter, je mehr die thermische Ausbeute mit immer höheren Temperaturen nachlässt.

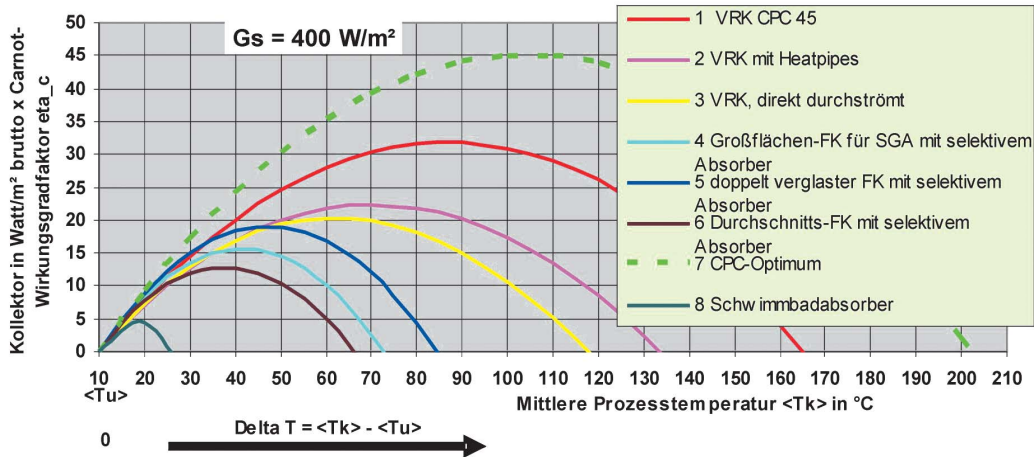
Abschließende Anmerkungen zum MAP

Momentan erhalten Kollektoren bezogen auf den Jahresertrag umso mehr staatliche Förderung, je weniger Leistung sie pro Bruttokollektorfläche erzielen. Es wurde bereits erwähnt, dass auf diesem Boden nur schwer Hochleistungskollektoren wie jener mit der grün gestrichelten Kennlinie entstehen werden. Das MAP ist nicht die Ursache, aber die unmittelbare Folge davon, dass Röhrenkollektoren in Deutschland fast noch ein Nischendasein fristen, obwohl in ihnen das größtmögliche Leistungspotenzial steckt.

Der Leistungswert ist ein direktes Maß für die mögliche Vermeidung des CO₂-Ausstoßes. Einleitend wurde begründet, warum alle Solaranlagen nach hohen Leistungswerten, d.h. nach möglichst hohem Ertrag streben sollten. Deshalb wäre der Leistungswert auch ein einfach verständliches, gerechtes und innovationsfreundliches Förderkriterium. Mit jedem Kollektortest steht die individuelle Leistungswertkennlinie bereits fest. Auf der Prozesstemperaturachse können sowohl feste Standardprozesstemperaturen wie Warmwasserbereitung im Einfamilienhaus (WW EFH: z. B. 40 °C), bei welcher der Legionellenschutz zumindest rechtlich keine Rolle spielt, Heizungsanbindung (HAB: z. B. 55 °C), Warmwasserbereitung im Mehrfamilienhaus (WW MFH: z. B. 70 °C) oder Kühlung (z. B. 85 °C) als auch beliebig viele individuelle Prozesstemperaturen ausgewählt werden. Überall steht der Leistungswert für je-



Carnot-Wirkungsgrad



Leistungswertkennlinien

den Kollektor fest und es müsste nur noch ein einziger, universeller Förderfaktor gefunden werden, um Kollektoren anhand ihrer Leistungswertkennlinie zu fördern. Diese Allgemeingültigkeit wäre gerecht, weil einerseits auch ganz simple Kollektoren wie Schwimmbadabsorber noch Anspruch auf Förderung hätten (schließlich sind die Leistungswertkennlinien vieler Kollektoren von denen von Schwimmbadabsorbern weniger weit entfernt als von Hochleistungsröhrenkollektor-Kennlinien), weil aber andererseits anspruchsvolle Hochtemperaturkollektoren die meiste Förderung bekämen. Es würde auch dem Umstand Rechnung getragen, dass bestimmte Anwendungen kaum noch Förderung bekämen, wenn die Effizienz völlig fehlt. So ist es z.B. sinnlos, solare Kühlung mit Flachkollektoren durch Förderung anzuspornen, weil dabei nur wenig Nutzen herauskommen kann. Zu ähnlich mageren Ergebnis-

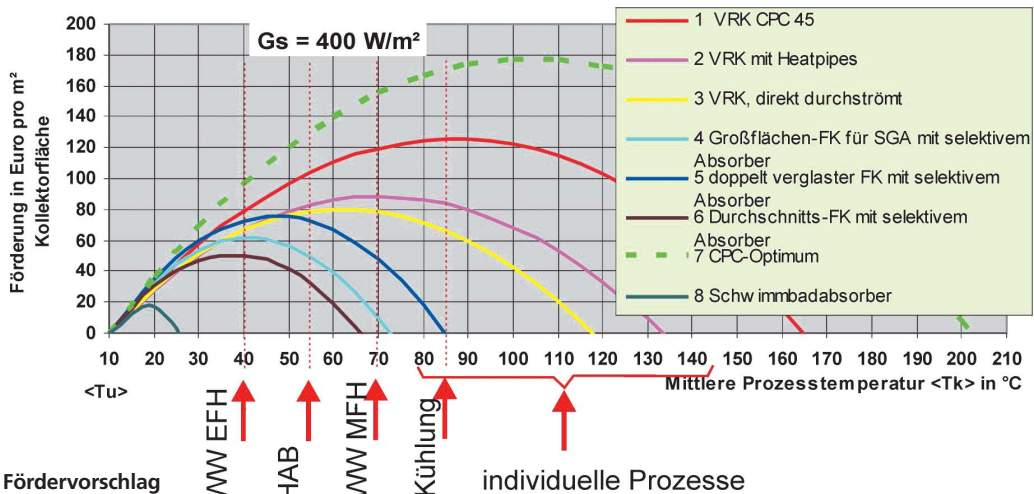
sen wird der Versuch führen, im Mehrfamilienhaus ganzjährig eine solare Warmwasserbereitung zu praktizieren, weil dafür ständig Solartemperaturen von 70°C bis 80°C vonnöten wären. Auch für die Heizungsunterstützung eignen sich viele Kollektoren überhaupt nicht.

Die Förderung von Kollektoren nach ihrem Leistungswert wäre eine Förderung nach ihrer Eignung für jeden individuellen Zweck auf einfacher wissenschaftlicher Grundlage.

Bei einem Förderfaktor auf den Leistungswert von ca. 4 €/ (W/m²) wären die momentanen Grundverhältnisse von 80 € pro Quadratmeter für einfache Warmwasserbereitung hergestellt. Irgendwann könnte man sogar die logische Brücke zur Photovoltaik schlagen. Dort werden bei $G_s = 400 \text{ W/m}^2$ ca. 50 W/m² Strom erzeugt mit dem maximalen Carnot-Wirkungsgrad von 1. Folglich ergä-

be sich ein Förderanspruch von ca. 200 €/m², der dem außerordentlichen exergetischen Wert der Elektroenergie Rechnung trüge.

Ein noch einfacherer Weg, Leistung zu fördern, bestünde darin, einfach die charakteristische Temperatur, wo die Leistungswertkurve ihr Maximum hat, als Kriterium zu nehmen. Doch das führte leicht zu neuen Ungerechtigkeiten. Ein Niedertemperaturkollektor hat zwar z.B. keinen Sinn für eine solare Kühlung, kann aber bestens einfache Warmwasserbereitung unterstützen. Ein Hochleistungskollektor kann zwar beides, unterscheidet sich aber bei der einfachen Warmwasserbereitung kaum vom Niedertemperaturkollektor. Die Förderung nach dem Leistungswert trüge diesem Umstand genau Rechnung, weil sie den Kollektor in Bezug auf seine jeweilige Verwendung bewertet. Der einseitige Blick auf die charakteristi-



sche Temperatur würde den Niedertemperaturkollektor dagegen in seiner optimalen Anwendung unterbewerten.

Fazit

Dieser Text und dessen erster Teil „Kollektorvergleiche“ sollten den Blick dafür schärfen, dass sich die deutsche solarthermische Industrie nicht ausruhen darf, wenn sie technologisch eine Führungsposition behalten möchte. In Europa ist die Flachkollektorindustrie verbreitet, weil sie hier entstand und ihr politisch großzügig der Weg geebnet wurde. In Asien haben sich Flachkollektoren nie durchsetzen können und in Amerika, das mindestens ein Jahrzehnt Solarentwicklung verschief, deutet sich bereits an, dass die „Generation Flachkollektor“ dort übersprungen wird. Die ganze nichteuropäische Welt ist bereits von billigen Röhrenkollektoren dominiert, die zwar noch eine schlechte Qualität haben, hinsichtlich ihrer Leistung aber jeden Flachkollektor schlagen. Um dieser Masse mit Klasse begegnen zu können, um in der Welt in den Ruf zu gelangen, dass auch thermische Kollektoren „Made in Germany“ ein Maß für Innovation sind wie einst das Auto, sollten die Verantwortlichen die Industrie auch wieder zu technischen Innovationen ermutigen, anstatt solche länger zu bestrafen. Dem soll der geschilderte thermodynamische Ansatz zu einer wissenschaftlich (anstelle politisch) begründeten, gerechten, klimaziellorientierten, leistungs-fördernden und -fordernden Förderpraxis gewidmet sein.

Vor allem aber möchten die Autoren eine faire, sachliche, öffentliche und wissenschaftliche Diskussion über dieses Thema anregen. ■

„Der dritte und letzte Teil dieser Reihe wird sich mit der Einfallswinkel-Korrektur und mit zertifizierten Kollektorserträgen auseinandersetzen.“

Dipl.-Ing. Stefan Abrecht, Wilfried Griebhaber, Dr. Christiane Kettner und Dr. Rolf Meißner*)

Kollektorerträge – Wo sich Spreu und Weizen trennen, Teil 3

Der erste Teil befasste sich mit einer Reihe von Irrtümern in der Kollektortechnik, wie z. B. der Präsentation thermischer Kennlinien unter irrelevanten Bedingungen, dem Ignorieren des Leistungsverlusts durch die Verwendung von Glykol als Wärmeträger, dem durch falsche Förderpolitik forcierten Fehler, Speicher überzudimensionieren sowie mit dem Marktanreizprogramm, das Kollektoren nicht nach der Leistung fördert, sondern nach der Fläche.

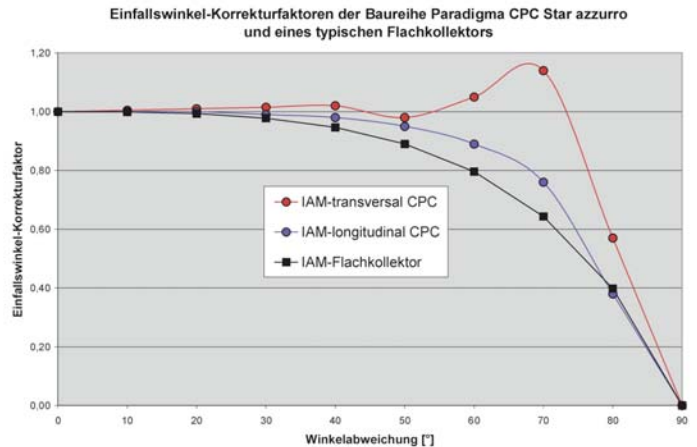
Im zweiten Teil wurde erklärt, warum hohe Kollektortemperaturen nahezu immer wertvoller sind als niedrige und wie der Carnot-Wirkungsgrad für beliebige thermische Kollektoren den praktischen Wert der Solarwärme und das Potenzial dieser Wärme zur CO₂-Einsparung charakterisiert. Es folgte der Vorschlag, diesen Leistungswert anstelle der Bruttokollektorfläche zukünftig als objektiveres Bewertungskriterium von Solarkollektoren zu implementieren.

Im dritten und letzten Teil werden die Autoren zeigen, warum auch der weithin unbekannt Winkelkorrekturfaktor ein für die unterschiedlichen Kollektortypen sehr verschiedener und bis zum Faktor 2 außerordentlich ertragsrelevanter Kollektorparameter ist. Abschließend wird erläutert, dass der einfache Begriff „Kollektorertrag“ in der Test- und Zertifizierungssprache leider ganz unterschiedlich gebraucht wird und zu welchen Missverständnissen dies führen kann.

Über den Einfallswinkel-Korrekturfaktor

Flachkollektoren und Röhrenkollektoren besitzen aufgrund ihrer Geometrie verschiedene Wirkungsgradcharakteristiken bei wechselnden Einfallswinkeln der Solarstrahlung. Eine charakteristische Größe hierfür stellt der sogenannte Einfallswinkel-Korrekturfaktor, kurz auch IAM (Incidence Angle Mo-

difier), dar. Er gibt an, wie sich der Kollektorwirkungsgrad ändert, wenn die direkte Sonnenstrahlung nicht senkrecht in die Kollektorebene einfällt. Dabei werden für die genaue Bewertung von Vakuumröhrenkollektoren Messungen quer (transversal) und längs (longitudinal) zur Röhrenachse vorgenommen. Man spricht hier vom bi-axialen IAM. Beim Flachkollektor gibt es in der Regel wegen der rich-



Typische Verläufe von Einfallswinkel-Korrekturfaktoren.

tungsunabhängigen Geometrie der flachen Scheibe nur einen IAM-Verlauf. Für Flachkollektoren zeigt der Verlauf des IAM mit größer werdenden Einfallswinkeln eine stetig fallende Kurve. Dies gilt auch für die longitudinale Charakteristik von Vakuumröhrenkollektoren. Allerdings bleiben die transversalen Korrekturfaktoren beim Paradigma CPC bis 50° relativ konstant, um dann noch einmal deutlich anzusteigen. Das bedeutet, dass ungünstig einfallende Sonnenstrahlung sogar besser genutzt wird und dadurch der Wirkungsgrad noch ansteigt. So wird insbesondere in den Morgen- und Abend-

stunden oder bei nicht optimaler Kollektorausrichtung die schwache Einstrahlung besser genutzt. Das heißt, CPC-Vakuumröhrenkollektoren können länger und auch mit einer gleichmäßigeren Leistungscharakteristik für Solarwärme sorgen. Bei Röhrenkollektoren ohne CPC-Spiegel gibt es ebenfalls einen Anstieg, der aber weitaus geringer ausfällt.

Meist werden die Ergebnisse dann in Tabellenform als transversale $K_{0b}(\theta_i)$ und longitudinale $K_{0l}(\theta_i)$ Einfallswinkel-Korrekturfaktoren zusammen mit den anderen Kollektorkennwerten angegeben. Die so bestimmten



*) Stefan Abrecht ist Maschinenbauingenieur, entwickelte im Lauf von 20 Jahren sämtliche Flach- und CPC-Vakuumröhrenkollektorsysteme bei Paradigma sowie maßgeblich die OEM Kollektorbauweisen des Paradigma Tochterunternehmens Ritter Solar. Er war auch Initiator und erster Geschäftsführer des deutsch-chinesischen Joint-Venture-Unternehmens Linuo Paradigma.



*) Christiane Kettner befasste sich als theoretische Physikerin in der Quantenfeldtheorie eingehend mit der mathematischen Simulation komplexer Systeme. Seit 8 Jahren nutzt sie diese Spezialkenntnisse, um bei Paradigma die Solar- und Heizungssysteme zu optimieren und Regelungen zu entwickeln, die den Wirkungsgrad des Gesamtsystems optimieren.



*) Wilfried Griebhaber studierte Maschinenbau und verbrachte zunächst 5 Jahre am Fraunhofer-Institut in Freiburg (ISE) mit der Simulation solarthermischer Energiesysteme. Nach nahezu 15-jähriger Tätigkeit als Produktmanager von Solarwärmesystemen ist er heute entscheidend mitverantwortlich für die Installation von bisher über 400.000 m² Vakuum-Röhrenkollektoren auf deutschen Dächern.



*) Rolf Meißner ist Experimentalphysiker und befasst sich seit über 20 Jahren mit Energiespeicherung. Seit 1990 ist er bei Paradigma u. a. Produktmanager und Entwickler von Solarkomponenten wie Regelungen und Speicher. Gegen Ende 2006 gründete er den Bereich „Solarthermische Großanlagen und Prozesswärme“. Er befasste sich als technischer Berater bei Linuo Paradigma auch umfassend mit außereuropäischer, vor allem chinesischer Solartechnik.

Kollektorkennwerte (Bezug: Aperturfläche)

collector characteristics (based on aperture area)

Konversionsfaktor Conversion factor	effektiver Wärmedurchgangskoeffizient heat transfer coefficient	flächenbezogene Wärmekapazität area related heat capacity						
$\eta_0 = 0.644$	$a_1 = 0.749 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $a_2 = 0.005 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$	$c = 9.180 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$						
Einfallswinkel-Korrekturfaktoren Incidence angle modifier								
	θ	0	20	40	50	60	70	90
$K_{ad} = 0.98$	$K_{ab}(\theta_i)$	1.000	1.000	0.980	0.950	0.890	0.760	0.000
	$K_{ab}(\theta_s)$	1.000	1.010	1.020	0.980	1.050	1.140	0.000

Kollektorkennwerte und Einfallswinkel-Korrekturfaktoren für die Baureihe CPC Star azzurro.

Faktoren gelten aber nur für die Direktstrahlung (b =beam), daher wird zusätzlich über verschiedene Methoden (z.B. Integration der Werte über den Halbraum) ein Einfallswinkel-Korrekturfaktor K_{ad} (d =diffus) für die Diffusstrahlung bestimmt. Auch dieser Wert ist für den CPC-Röhrenkollektor deutlich besser als für Flachkollektoren, daher wird auch Diffusstrahlung besser genutzt. Nur mit dem vollständigen Parametersatz der Kennwerte lassen sich dann vergleichende Simulationen durchführen.

Bewertung von Kollektorerträgen unter Berücksichtigung des IAM durch Simulation

Für den Nutzer einer Solaranlage stellt sich die Frage, wie viel

Kollektor-Bruttofläche er installieren muss, um eine bestimmte anteilige Energieeinsparung zu erzielen. Dies hängt in erster Linie vom eingesetzten Kollektortyp, aber natürlich auch von der Ausrichtung der Kollektoren auf dem Dach ab. Als Beispiel wurde analog der bekannten Referenzbedingungen des ITW eine Solaranlage mit einem 300l Speicher und einer täglichen Zapfung von 200l warmem Wasser mit 45°C bei Würzburger Wetterdaten und einer Dachneigung von 45° simuliert. Dabei wurde der Parameter Orientierung/Azimit von Ost über Süd bis West variiert und die Kollektorfläche jeweils so angepasst, dass die gleiche anteilige Energieeinsparung von ca. 60% erzielt wurde. Verglichen wurden ein Standardflachkollektor, ein Vakuumröh-

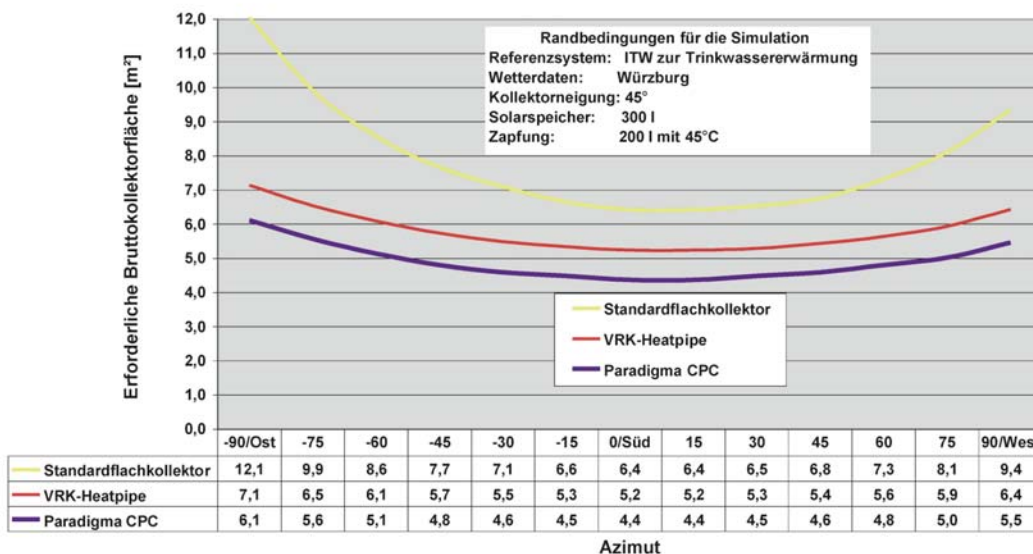
renkollektor mit Heatpipe und der Paradigma CPC Star azzurro. Im Diagramm ist leicht zu sehen, dass der CPC mit Abstand die geringste Bruttofläche benötigt, um die gleiche Einsparung zu erzielen. Viel gravierender ist aber bei ungünstiger Orientierung, dass insbesondere der Flachkollektor nur noch mit deutlich erhöhter Kollektorfläche in der Lage ist, den gleichen Nutzen für den Kunden zu bringen. Im Extremfall muss bei der Orientierung nach Osten 90% mehr Fläche aufgewendet werden. Bei den Vakuumröhrenkollektoren sind in diesem Fall nur knapp 40% mehr Fläche erforderlich. Für diesen Effekt sind aber nicht allein die besseren Einfallswinkel-Korrekturfaktoren verantwortlich, sondern der Mehrnutzen ergibt sich im Zusammenspiel mit den hohen

Wirkungsgraden der Vakuumröhrentechnologie auch bei schwachen Einstrahlungen, wie sie bei ungünstigen Dachausrichtungen sowie morgens und abends regelmäßig vorkommen. Unverständlich bleibt auch in diesem Fall, dass für den Flachkollektor mit der doppelten Bruttofläche gegenüber dem CPC-Kollektor der Kunde bei gleichem Nutzen aufgrund der Bruttofläche als Bemessungsgrundlage den doppelten Förderbetrag vom BAFA erhält.

Zertifikate über Kollektorerträge

Leider gibt es hierzu keine einheitlichen Tests und viele Begriffe. Als Voraussetzung für eine Förderberechtigung nach dem MAP müssen 525 kWh Kollektorertrag (=Jahresenergieertrag) pro Quadratmeter Kollektoraperturfläche erbracht werden. Der Zahlenwert mag auf den ersten Blick beeindruckend, sagt aber über die Ertragsstärke genauso wenig aus wie das derzeitige Solar Keymark Zeichen oder das Label DIN geprüft. Weiterhin ist für die Energieersparnis nicht in erster Linie der Kollektorgewinn maßgebend, sondern der Systemgewinn. Die kleinere Aperturfläche schönt das Ergebnis ebenfalls, klarer wäre der Bezug auf die Bruttofläche, nach welcher bezahlt, gefördert und die Dachfläche eingeteilt wird. Bedenklich sind jedoch die Vergaberichtlinien, wie sie nach RAL-UZ 73, bekannt auch als „Blauer Engel“, für das MAP angewandt werden. Dort wird am Ende nur festgestellt, ob die erforderlichen 525 kWh/m²a erreicht werden oder nicht. Man hat sich dabei zusätzlich auf sehr milde Bedingungen eingelassen. Der Bereitschaftsteil eines Solarspeichers muss nur auf 47°C erwärmt und übers Jahr nur ein solarer Deckungsanteil von 40% erreicht werden. Dazu werden z.B. selbst von einem gerade noch förderfähigen Kollektor lediglich ca. 3,2 m² Aperturfläche für einen 300-Liter-Speicher mit einem täglichen Bedarf von 200 Litern bei 45°C Zapftemperatur gebraucht. Es leuchtet auch dem Laien ein, dass dabei fast nichts mehr verschenkt wird, aber auch, dass dies wenig mit einer realisti-

Vergleich der erforderlichen Bruttokollektorfläche für einen Paradigma CPC-Röhrenkollektor, einen Vakuumröhrenkollektor mit Heatpipe und einen Standardflachkollektor für eine anteilige Energieeinsparung von ca. 60% bei unterschiedlichen Orientierungen



Simulationsergebnisse bei unterschiedlicher Ausrichtung und gleichem Nutzen.



schon Kleinanlage zu tun hat. Der ganze Leistungstest besteht dann in einer Computersimulation, wobei sehr viele weitere Parameter feststehen, die hier aber nicht weiter ablenken sollen.

Der Kollektor besteht dabei im Modell aus charakteristischen Parametern, welche zuvor nach EN12975 ermittelt worden sein müssen. Das sind der Konversionsfaktor η_0 sowie die effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten a_1 und a_2 , die uns aus Teil 1 und Teil 2 bekannt sind, weil sie die Kollektorkennlinie beschreiben, die Wärmekapazität und schließlich die ebenfalls bereits erwähnten Einfallswinkel-Korrekturfaktoren. Der Testbericht nach EN12975 liefert zumindest in der Ausgestaltung des ITW Stuttgart als Ergänzung im Anhang A aber auch einen detaillierten Kollektorsertrag, in Fachkreisen bekannt als ITW-Deck. Warum nimmt man dann nicht gleich diesen als Förderkriterium? Weil die Bedingungen so realistisch sind, dass bei dafür typischen Kollektorfeldgrößen von 5 m² kaum ein Kollektor 525 kWh/m²a schaffen könnte. Bei ansonsten gleichen Systembedingungen beträgt die Nachheiztemperatur hier realistischerweise auch im Hinblick auf die Legionellenhematik 60°C, was den solaren Input von typischen Flachkollektoren erheblich einschränkt.

Es hat sich nun verständlicherweise eingebürgert, in den Produktunterlagen genau dann konkrete Kollektorsertragsdaten gemäß dem ITW-Deck anzugeben, wenn der Kollektor gute

Werte erreicht oder nur die 525 kWh/m²a, sofern der Kollektor gerade so die Förderkriterien erfüllt. Da Produktvergleiche regelmäßig die Details verschweigen, soll einmal klargestellt werden, wie unterschiedlich diese Werte zu interpretieren sind. Als Referenz gilt ein CPC-Vakuümrohrenkollektor, dem mit den Kollektorkennwerten nach EN12975 aus der Solar Keymark Zertifizierung und dem ITW-Deck ein Kollektorsertrag von 602 kWh/m²a mit ca. 67 % solarem Deckungsbeitrag bescheinigt werden.

- Unter den gleichen Bedingungen (5 m² Aperturfläche, 60 °C Bereitschaftstemperatur) würde ein Kollektor, der nach den MAP Förderkriterien gerade 525 kWh/m²a schafft, nur noch 389 kWh/m²a bzw. 45 % solaren Deckungsbeitrag erreichen.
- Vergleicht man beide Kollektoren bei den geltenden Förderbedingungen mit 40 % Deckungsanteil und einer Nachheiztemperatur von 47°C, erreicht der CPC-Vakuümrohrenkollektor mit 735 kWh/m² gegenüber den 525 kWh/m² etwa 40 % mehr Ertrag, bekommt aber pro Quadratmeter den gleichen Förderbetrag. Soll der Deckungsanteil höher sein, was sinnvoll ist und auch in der Praxis umgesetzt wird, so erhöht sich der Ertragsvorteil des CPC-Vakuümrohrenkollektors weiter, in gleichem Maße steigt aber auch die Förderung pro kWh Ertrag für den leistungsschwächeren Kollektor.

Abschlussbemerkungen über die Förderung von Solarkollektoren

In Teil 1 und 2 des Beitrags wurde gezeigt, dass vor allem bei dem Versuch, thermische Prozesswärme solar zu gewinnen, aber

auch bereits bei einfacher solarer Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung unter realistischen Bedingungen ein deutliches Mehr an Flachkollektorfläche gegenüber Röhrenkollektoren gebraucht wird, um zum selben Kollektorsertrag zu gelangen. Die Verteilung von Fördergeldern proportional zur Bruttokollektorfläche muss deshalb als ein teurer, innovationsfeindlicher Irrtum bezeichnet werden. Der letzte Abschnitt machte deutlich, dass sich aber auch bereits unter mildesten Testbedingungen, anders ist die „Blauer-Engel-Norm“ nicht zu bezeichnen, die Spreu vom Weizen trennt. Ein „Blauer-Engel-Kollektor“ darf danach ca. 40 % mehr Förderung pro Kollektorsertrag beanspruchen als ein CPC-Vakuümrohrenkollektor.

Um alle Fördervorteile auszuschöpfen, müsste man einen einfachen Flachkollektor bauen, der als „Blauer-Engel-Kollektor“ gerade noch so durchgeht. Damit hätte man sich erstmal die Flächenförderung für thermische Sonnenenergienutzung gesichert. Dann klebt man etwa die Hälfte der Scheibe mit kristallinen Solarzellen zu, um Strom zu gewinnen. Damit wäre man außerdem Nutznießer des Einspeisegesetzes, könnte den Kollektor von der Mehrwertsteuer befreien und wie ein Unternehmer als Stromerzeuger gewerblich abschreiben. Praktisch hätte man zwar nur einen eher schlechten halben thermischen und einen ebenfalls suboptimalen halben PV-Kollektor, aber die fördertechnischen Synergien wären nicht von der Hand zu weisen. Für einen guten Verkauf müsste man glaubhaft behaupten, dass sich die beiden Systeme bestens ergänzen, was allerdings nicht ganz einfach wird, weil es der eine Kollektor am liebsten möglichst kalt und der andere möglichst warm hat, um optimal arbeiten zu können. Es wird spannend sein, zu beobachten, ob und wie weit sich der Fördermittelgeber mit einer solchen „Innovation“ vorführen ließe.

Schlusswort

CPC-Vakuümrohrenkollektoren standen lange Zeit im Ruf, vor

allem teuer und dabei kaum besser zu sein als Flachkollektoren. Zu diesem Gerücht trugen und tragen neben den Vertretern der Flachkollektorindustrie weiterhin auch Wissenschaftler und Verbandsfunktionäre bei, was sich in der gesamten Normrichtlinienbildung und Fördergesetzgebung der letzten Jahre widerspiegelt. Die 3 Fachartikel „Wo sich Spreu und Weizen trennen“ sollten mit un-leugbaren wissenschaftlichen Argumenten dazu beitragen, dass nicht weiterhin mit der Rechtfertigung des „Nichtwissens“ oder des „Nichtwissens-Könnens“ Irrtümer fortgesetzt werden. Die Autoren haben als Entwickler und Miterfinder beider Kollektorgenerationen die technische Überlegenheit moderner Vakuümrohrentechnik in Solarsystemen ohne den Einsatz von Frostschutzmitteln in über 30.000 Solaranlagen seit 2004 gezeigt, hoffen aber andererseits, auch hierzu stets genügend kritische Distanz halten zu können, um für den weiteren Fortschritt in der Solarthermie offen zu bleiben. Erst einmal wollten sie aber eine faire, sachliche, öffentliche und wissenschaftliche Diskussion über dieses Thema anregen. ■

Kennwert	Blauer-Engel-Kollektor	CPC Kollektor	Vorteil CPC
Kollektorsertrag ITW (für Aperturfläche 5 m ²)	389 kWh/(m ² a)	602 kWh/(m ² a)	+55%
Solare Deckungsrate f _{sol} ITW (für Aperturfläche 5 m ²)	45%	67%	+49%
Kollektorsertrag Blauer Engel (bei f _{sol} 40%)	525 kWh/(m ² a)	735 kWh/(m ² a)	+40%
Benötigte Aperturfläche Blauer Engel (f _{sol} 40%)	3,2 m ²	2,3 m ²	-28%