

## Thermische Nutzung von In-Dach-Photovoltaikanlagen

### Wärme für Trocknungszwecke nutzen und gleichzeitig mehr Strom produzieren

Ludo Van Caenegem, Hubert Bollhalder, Renate Dörfler, Christian Gazzarin, Franz Nydegger, Hans-Rudolf Ott, Alina Pasca, Alfons Schmidlin, Forschungsanstalt Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen

Baut man Solarmodule von Photovoltaikanlagen in die Dachhaut ein, so kann man mehr Sonnenenergie nutzen, als bisher. Dies zeigt eine Pilotanlage der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Heute werden lediglich 10 bis 15 Prozent der Sonnenstrahlung in elektrischen Strom umgewandelt, der Rest hingegen wird konvektiv als Wärme an die Umgebung abgegeben oder abgestrahlt. Werden jedoch Solarmodule, die aus mehreren Solarzellen aufgebaut sind, als Dachhaut eingebaut, besteht die Möglichkeit, sie nicht nur zur Strom-, sondern auch zur Wärmeproduktion zu nutzen, indem man im Kollektor zwischen Solarmodulen und Unterdach einen Luftstrom erzeugt. Dabei erhöht sich durch die Kühlung der Solarzellen gleichzeitig deren elektrischer Wirkungsgrad. An einer Pilotanlage von ART wurde untersucht, wie viel Wärme Solarmodulen in Abhängigkeit verschiedener Parame-

ter wie Luftrate und Luftgeschwindigkeit im Kollektor, Windgeschwindigkeit sowie Globalstrahlung entzogen werden kann. Die Messergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Luftgeschwindigkeit im Kollektor sowie thermischem und elektrischem Wirkungsgrad. An sonnigen Tagen konnte den Solarmodulen bis zu 3,9 kWh Wärme und 0,77 kWh Strom pro Quadratmeter entzogen werden. Während der Lüftung sank die Temperatur der Solarzellen bis zu 15 Grad und nahm die Stromproduktion bis sechs Prozent zu. Da die Wärme auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau zur Verfügung steht, sind ihre Nutzungsmöglichkeiten beschränkt. Am besten lässt sich die Wärme für Trocknungszwecke wie beispielweise der Heu- oder Holzschnitzeltrocknung nutzen. Die erwärmte Luft besitzt ein höheres Sättigungsdefizit. Dies verkürzt die Trocknungszeit und reduziert den Energiebedarf des

Lüfters. Ausserhalb der Belüftungszeit sollten die Solarzellen, wenn möglich, durch eine natürliche Lüftung gekühlt werden. Dies bedingt eine freie Durchströmung des Kollektors bei genügend grossem Abstand zwischen Solarmodulen und Unterdach und wenig Verengungen, damit der Luftwiderstand nicht zu gross wird. Bleibt die Wärmenutzung aus, ist der Einsatz von Ventilatoren dann sinnvoll, wenn die zusätzliche gewonnene Stromproduktion der Solarzellen grösser ist als der Energiebedarf der Lüfter.

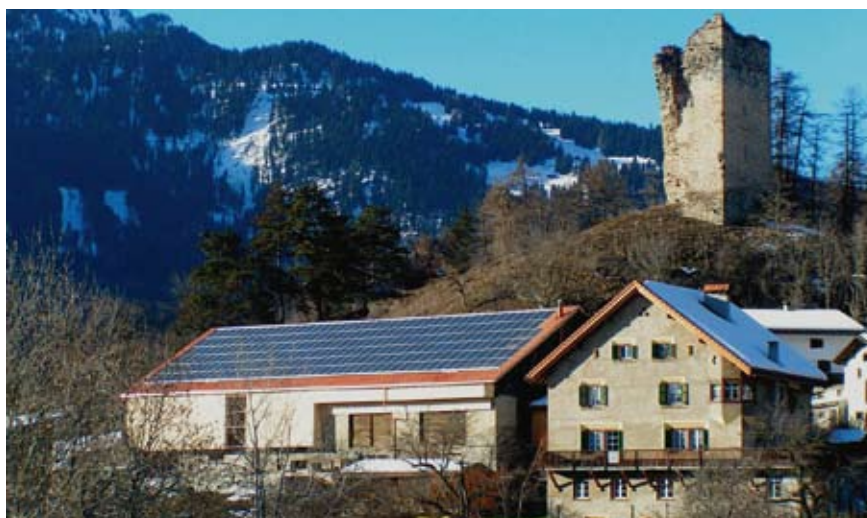


Abb. 1: In-Dach-Anlage

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Versuchsanlage	2
Versuchsergebnisse	2
Nutzung der Wärme für Trocknungszwecke	5
Kühlung ausserhalb der Belüftungszeit	5
Schlussfolgerungen	7
Literatur	8



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD

Forschungsanstalt  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

## Problemstellung

Es wird oft argumentiert, dass eine ungenügende Kühlung der Solarzellen hohe Temperaturen und einen niedrigen Wirkungsgrad zur Folge habe und dass dies folglich gegen die In-Dach-Konstruktionen von Photovoltaikanlagen spreche. Gelingt es jedoch durch Lüftung, die Solarzellen das ganze Jahr über gezielt zu kühlen, so produzieren In-Dach-Anlagen mindestens so viel Strom wie Auf-Dach-Anlagen, die oft auf der unteren Seite ungenügend vom Wind angeströmt werden. Die Wärme, die durch In-Dach-Anlagen potenziell erzeugt werden kann, beträgt ein Vielfaches der von den Solarzellen produzierten elektrischen Energie. Damit die Stromerzeugung maximiert und möglichst viel Wärme genutzt werden kann, ist es notwendig, schon bei der Planung die Dachkonstruktion, die Solarmodule und die Lüftung optimal aufeinander abzustimmen.

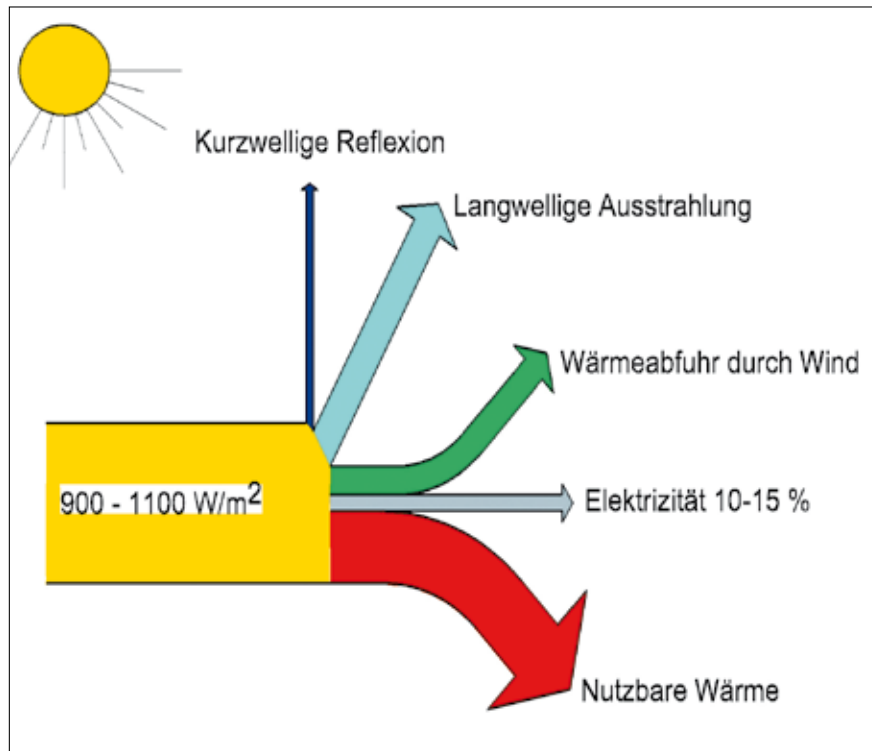


Abb. 2: Von der Sonnenenergie, die auf ein Solarmodul fällt, wird nur ein kleiner Teil (10–15%) in Elektrizität umgesetzt. Etwa 40 bis 50 % kann als Wärme genutzt werden, der Rest wird durch den Wind abgeführt oder strahlt ab.

## Versuchsanlage

Die PV-Anlage besteht aus acht Photovoltaik Modulen (Typ Megaslate 1,316 x 0,975 m, 136 Wp, 3S Swiss Solar Systems AG), die im Dach integriert und einem Wechselrichter (Sunny Boy 1100 LV) angeschlossen sind (Abb. 3). Die Dachneigung beträgt 20 Grad. In einem Abstand von 20 Zentimeter unter den Modulen befindet sich ein Unterdach aus Spanplatten, die zusammen mit den Solarmodulen und seitlichen Pfetten einen Kollektor von 10,5 Meter Länge und 0,83 Meter Breite bilden. Der Luftstrom im Kollektor wird von einem Axialventilator ( $\Delta$  50 cm) mit vorgeschaltetem Messventilator erzeugt. PT-100 Sensoren messen die Lufttemperatur (Genauigkeit von 0,1 °C) am Anfang und am Ende des Kanals sowie auch die Temperatur der Solarzellen (Genauigkeit von 0,5 °C) in der Mitte der Anlage.

Die Luftgeschwindigkeit im Kollektor und die Windgeschwindigkeit oberhalb der Solarzellen werden jeweils von einem Hitzdraht-Anemometer (Schmidt SS20.502 300 428) erfasst. Ein Strahlungssensor (Ahlborn Typ FLA 613-GS, SN 6557/08)

misst die Globalstrahlung der Sonne auf einer horizontalen Ebene. Die Stromproduktion wird nach dem Wechselrichter gemessen. Sie ist wegen der Energieverluste bei der Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom und des Spannungsabfalls in den Verbindungsleitungen etwa zehn Prozent geringer als die von den Solarzellen abgegebene elektrische Energie. Alle Daten werden im Sekundentakt erfasst, jeweils über eine Minute gemittelt und registriert.

Aus der Luftgeschwindigkeit im Kollektor wird die Luftrate berechnet, und mit dem Wert des Messventilators verglichen. Aus der Temperaturdifferenz der Luft zwischen Anfang und Ende des Kollektors, der Luftrate und der Luftdichte lässt sich die aufgenommene Wärme ermitteln. Elektrischer und thermischer Wirkungsgrad ergeben sich aus dem Quotient der elektrischen beziehungsweise thermischen Leistung ( $W/m^2$ ) zur Globalstrahlung ( $W/m^2$ ) auf einer horizontalen Ebene. Während der Messungen war das Dach immer nach Süden orientiert.

## Versuchsergebnisse

Von der Sonnenenergie, die auf einem Solarmodul anfällt, wird nur ein kleiner Teil (10–15 %) in Elektrizität umgewandelt (Abb. 2). Ein Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung wird nicht absorbiert, sondern direkt reflektiert. Von der absorbierten Energie wird ein Teil als langwellige Strahlung gegen das All abgestrahlt. Ein weiterer Teil wird konvektiv an Windströmungen, die über den Solarzellen streichen, abgegeben. Der Rest dringt durch die Solarmodule und kann auf der unteren Seite als Wärme abgeführt werden. Wie viel Wärme genutzt werden kann, lässt sich nur durch Versuche in Abhängigkeit der wichtigsten Einflussgrößen – die Geometrie der Anlage, die Luftgeschwindigkeit an der oberen und unteren Seite der Solarmodule, die Globalstrahlung, die Neigung und Himmelsrichtung des Dachs ebenso wie der Wärmewiderstand der Solarmodule – exakt ermitteln. Aus diesem Grund wurde an der ART in Tänikon eine Photovoltaik-Versuchsanlage (PV-Anlage) gebaut, die im Sommer 2008 Messungen der elektrischen und thermischen Wirkungsgrade erlaubte.

### Vorversuche ohne Unterdach

Die ersten zwei Tage (01.07.08 und 02.07.08) war das Unterdach noch nicht

montiert, sodass die Solarmodule sowohl unten wie auch oben frei vom Wind angeströmt wurden. Die Solarzelltemperatur lag am 01.07.08 in der Periode 13.00 bis 13.30 h durchschnittlich um 26,5 Grad über der Aussentemperatur. Der mittlere elektrische Wirkungsgrad betrug 8,91 Prozent, die mittlere Windgeschwindigkeit 1,7 m/s. Der elektrische Wirkungsgrad bezieht sich auf die Globalstrahlung auf einer horizontalen Ebene. Am nächsten Tag (02.07.08) wurden bei der gleichen mittleren Windgeschwindigkeit ähnliche Werte gemessen (Abb. 4). Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s sind im schweizerischen Mittelland während Schönwetterperioden keine Ausnahme.



Abb. 3: Die Versuchsanlage (PV-Anlage) der ART besteht aus acht Photovoltaikmodulen im Dach integriert (20°). Ein Ventilator (unten rechts) mit vorgeschaltetem Messventilator erlaubt eine stufenlose Luftgeschwindigkeitsregelung zwischen 1 und 7 m/s.

### Versuche mit Unterdach

Nach der Montage des Unterdachs (03.07.08) wurde die Anlage während 25 Schönwettertagen, 14 Tage im Juli, 6 Tage im August, 3 Tage im September und 2 Tage im Oktober betrieben (Tab. 1). Die Luftgeschwindigkeit im Kollektor (Kanal zwischen Solarmodulen und Unterdach) variierte zwischen 2,66 und 6,83 m/s. Im Juli lag der mittlere thermische Wirkungsgrad bei etwa 50 Prozent, der elektrische bei 10 Prozent. Es zeigt sich, dass der Sonnenstrahlung etwa fünfmal mehr Energie in Form von Wärme als in Form von Elektrizität (gemessen nach dem Wechselrichter) entzogen werden kann.

Der elektrische Wirkungsgrad war im August trotz leicht höherer mittlerer Solarzelltemperatur um 0,7 Prozent besser als im Juli. Dies ist auf die horizontale Bezugsebene der Globalstrahlung zurückzuführen. Mit abnehmender Sonnenhöhe nimmt das Verhältnis der Sonnenstrahlung auf der geneigten Dachfläche (20°) zur gemessenen Sonnenstrahlung auf der horizontalen

Ebene zu. Die Tendenz verstärkt sich in den Monaten September und Oktober. Die Differenzen beim thermischen Wirkungsgrad (40–65 %) sind auf die unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten im Kollektor und den Windgeschwindigkeiten an der oberen Seite der Solarmodule zurückzuführen. Der elektrische Wirkungsgrad (9–12 %) wird hauptsächlich von der Solarzelltemperatur bestimmt. Diese ist von der Umgebungstemperatur, der Sonneneinstrahlung (Globalstrahlung), der Abstrahlung der Solarmodule (Langwellenbereich) sowie auch von der Kühlung durch den Wind oben und den Luftstrom unten abhängig.

### Beziehung zwischen Solarzelltemperatur und Luftgeschwindigkeit

Die Solarzelltemperatur hebt sich desto mehr von der Umgebungstemperatur ab, je tiefer die Windgeschwindigkeit oben und die Luftgeschwindigkeit unten sind (Abb. 5). Am 10.07.08 (13.00–13.30 h) war die Differenz zwischen der Solarzelltemperatur und Aussentemperatur am höchsten

(24,6 °C). An dem Tag war die mittlere Windgeschwindigkeit 2,8 m/s, die Luftgeschwindigkeit im Kollektor 2,2 m/s. Am 16.07.08 wurde die geringste Temperaturdifferenz (19,3 °C) verzeichnet. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 3,4 m/s die Luftgeschwindigkeit 3,8 m/s.

### Beziehung zwischen Solarzelltemperatur und elektrischem Wirkungsgrad

Mit steigender Solarzelltemperatur nimmt der elektrische Wirkungsgrad ab. Am 27.08.08 wurde der Ventilator um 12.49 h abgeschaltet (Abb. 6). Dadurch sank die Luftgeschwindigkeit im Kollektor von etwa 5,2 m/s auf etwa 0,3 m/s. Die restliche Luftgeschwindigkeit war auf Windeinfluss und thermischen Auftrieb zurückzuführen. Durch das Ausfallen der aktiven Lüftung stieg die Solarzelltemperatur innerhalb einer halben Stunde von etwa 42,2 auf 51,6 Grad. Der elektrische Wirkungsgrad verschlechterte sich von 11,2 (bei 42 °C) auf 10,4 Prozent (bei 55 °C).

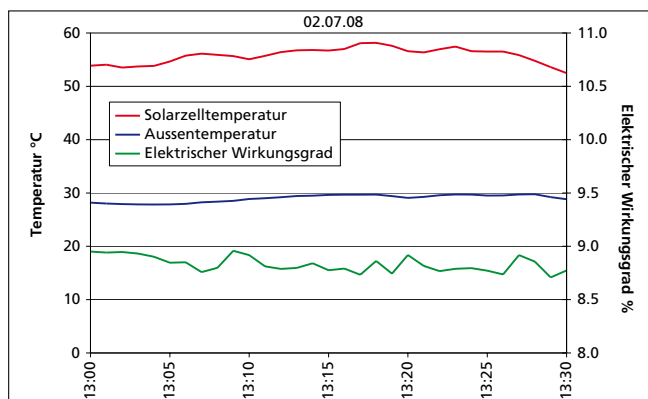


Abb. 4: Elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Aussentemperatur und der Solarzelltemperatur für unten und oben frei vom Wind umströmte Solarmodule am 2. Juli 2008 (mittlere Windgeschwindigkeit 1,7 m/s).

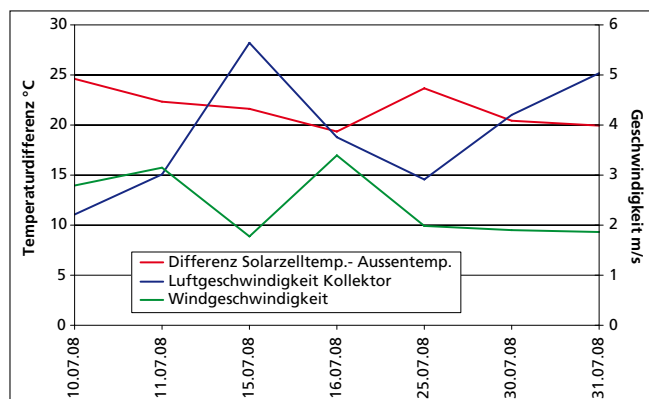


Abb. 5: Die Differenz zwischen Solarzelltemperatur und Aussentemperatur hängt von der Windgeschwindigkeit über den Solarmodulen und der Luftgeschwindigkeit im Kollektor ab. Messwerte zwischen 13.00 und 13.30 h.

Tab. 1: Messdaten der Photovoltaik Anlage von Juli, August, September und Oktober 2008

Datum	Zeit	Mittlere Luftgeschwindigkeit im Kanal (m/s)	Mittlere Solarzelltemperatur °C	Global-strahlung horiz. Ebene kWh/m <sup>2</sup>	Elektr. Wirkungsgrad %	Thermischer Wirkungsgrad %	Verhältnis Wärme/ Strom
01.07.08	11:00–17:05	– <sup>1</sup>	51.9	5.15	9.18	–	–
02.07.08	07:56–16:46	– <sup>1</sup>	47.9	6.58	9.33	–	–
04.07.08	07:42–16:05	3.85	32.6	5.25	9.81	54.29	5.5
08.07.08	07:53–16:45	4.26	27.6	5.26	9.83	46.77	4.8
10.07.08	07:22–16:25	2.18	41.6	6.80	9.50	44.71	4.7
11.07.08	10:07–16:25	2.95	47.2	5.23	9.58	48.37	5.0
15.07.08	08:13–16:07	5.60	35.4	6.25	10.13	63.84	6.3
16.07.08	07:50–16:34	3.76	36.8	6.54	10.05	49.54	4.9
21.07.08	08:34–16:36	4.37	25.4	4.14	10.22	46.86	4.6
23.07.08	08:10–23:59	6.00	26.2	7.56	10.09	50.26	5.0
24.07.08	00:00–24:00	5.45	21.6	7.72	9.97	44.95	4.5
25.07.08	00:00–16:06	2.84	25.2	6.02	10.00	44.52	4.5
28.07.08	08:11–16:44	2.03	43.0	5.60	9.54	41.96	4.4
29.07.08	08:14–16:52	3.35	39.8	5.52	9.82	45.83	4.7
30.07.08	08:09–16:25	4.24	39.7	5.21	9.94	54.51	5.5
31.07.08	07:58–16:22	5.08	40.7	6.03	9.98	57.55	5.8
<b>Mittelwert Juli</b>		<b>4.00</b>	<b>36.42</b>	<b>5.93</b>	<b>9.81</b>	<b>49.57</b>	<b>5.0</b>
06.08.08	08:40–16:55	3.57	39.9	5.59	10.21	51.04	5.0
07.08.08	13:02–16:22	3.54	41.5	1.93	9.79	49.84	5.1
11.08.08	10:05–16:06	5.79	36.2	3.51	10.14	56.81	5.6
13.08.08	13:18–16:42	3.54	35.4	2.18	10.55	48.62	4.6
18.08.08	10:09–17:48	4.38	39.0	5.31	10.98	52.69	4.8
21.08.08	11:00–16:13	0.20	42.9	3.31	10.15	–	–
27.08.08	10:11–12:49	4.28	37.3	1.88	11.44	64.04	5.6
<b>Mittelwert August</b>		<b>3.61</b>	<b>38.87</b>	<b>3.39</b>	<b>10.47</b>	<b>53.84</b>	<b>5.1</b>
08.09.08	07:48–17:05	4.44	34.8	3.84	12.27	63.28	5.2
09.09.08	08:18–16:43	3.52	35.5	4.84	12.06	61.16	5.1
30.09.08	14:09–16:05	2.09	18.3	0.42	11.03	33.33	3.0
<b>Mittelwert September</b>		<b>3.35</b>	<b>29.53</b>	<b>3.03</b>	<b>11.79</b>	<b>52.59</b>	<b>4.4</b>
14.10.08	12:12–17:18	3.37	30.76	1.23	14.40	53.7	3.7
15.10.08	11:45–17:42	4.08	28.26	1.41	14.80	51.2	3.5
<b>Mittelwert Oktober</b>		<b>3.73</b>	<b>29.51</b>	<b>1.32</b>	<b>14.60</b>	<b>52.45</b>	<b>3.59</b>

<sup>1</sup> Am 01.07.08 und 02.07.08 war das Unterdach noch nicht montiert.

Damit man den elektrischen Wirkungsgrad unterschiedlicher Tage vergleichen kann, darf die elektrische Energie nicht auf die Globalstrahlung der horizontalen Ebene bezogen werden, sondern auf die Sonnenstrahlung, die auf die schräge Dachfläche anfällt. Das Verhältnis zwischen der Sonneneinstrahlung pro Quadratmeter auf dem nach Süden gerichteten Dach (20 °) zur Sonneneinstrahlung auf einer horizontalen Ebene ist nicht konstant, sondern nimmt mit abnehmender Sonnenhöhe zu. Es beträgt zum Zeitpunkt des Sonnenzenits (zirka 13.20 h) beispielsweise am 1. Juli 1,095 und am 29. Juli 1,13. Korrigiert man die Globalstrahlung um dieses Verhältnis,

lässt sich aus den Messdaten von Juli 2008 eine Abnahme des elektrischen Wirkungsgrads von etwa 0,4 Prozent pro Grad Temperaturanstieg der Solarzellen berechnen (Abb. 7).

#### Luftgeschwindigkeit im Kollektor und elektrischer Wirkungsgrad

Die Messergebnisse zeigen eine deutliche Beziehung zwischen der Luftgeschwindigkeit im Kollektorkanal und dem elektrischen Wirkungsgrad (Abb. 8). Je höher die Luftgeschwindigkeit, desto grösser der elektrische Wirkungsgrad. Da die anderen Einflussgrößen wie Aussentemperatur, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung

an den verschiedenen Tagen unterschiedliche Werte aufweisen, ist die Parallelität der beiden Kurven nicht vollkommen.

#### Luftgeschwindigkeit im Kollektor und thermischer Wirkungsgrad

Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit im Kanal nimmt der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Unterseite der Module und der vorbeiströmenden Luft zu. Hierdurch wird mehr Wärme durch die Luft aufgenommen. Das Gleiche gilt auch für die obere Seite der Module. Je höher die Windgeschwindigkeit, desto höher die Wärmeabgabe an die Aussenluft und desto weniger Wärme steht für die Nutzung im

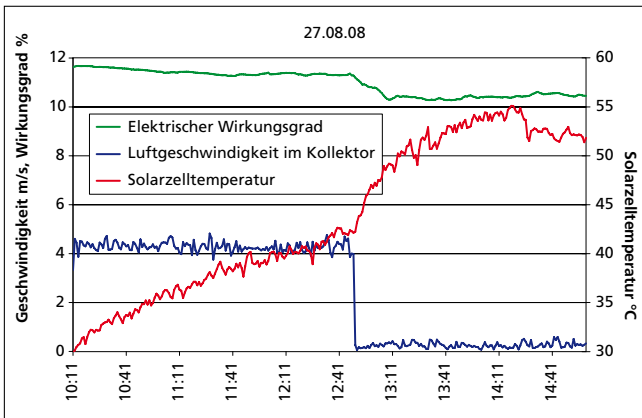


Abb. 6: Nach Abschalten des Lüfters stieg die Temperatur der Solarzellen von 42 °C bis auf 55 °C. Der elektrische Wirkungsgrad verringerte sich von 11,2 auf 10,4%.

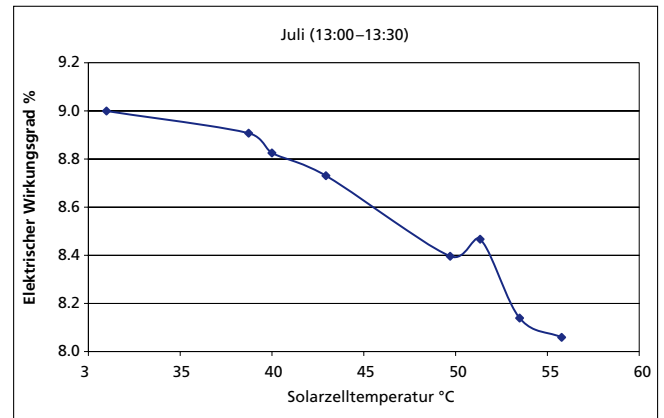


Abb. 7: Bei steigender Solarzelltemperatur nimmt der elektrische Wirkungsgrad mit durchschnittlich 0,4% pro °C ab. Die Bezugsebene ist hier die Sonnenstrahlung auf einer um 20° gegen Süden geneigten Dachfläche.

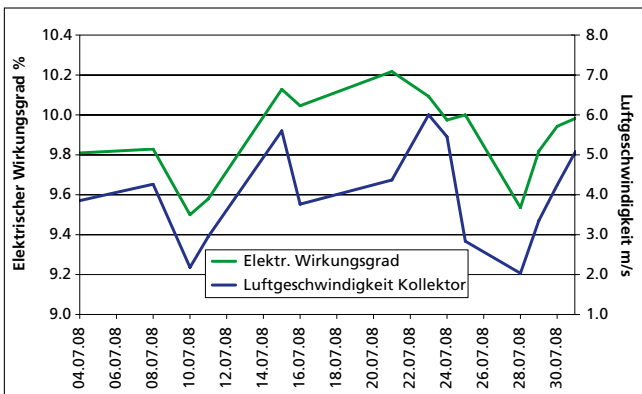


Abb. 8: Die Versuchsergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen elektrischem Wirkungsgrad und Luftgeschwindigkeit im Kollektor.

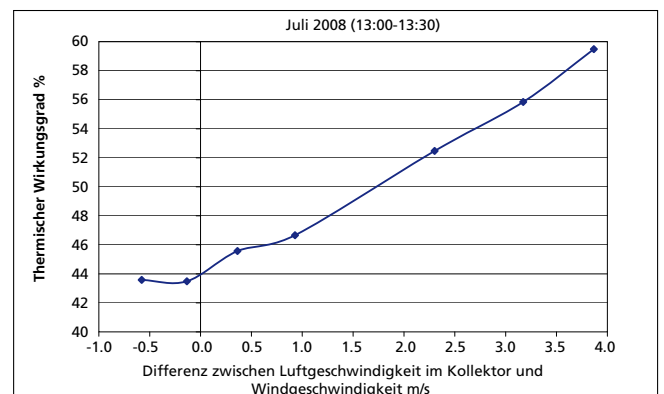


Abb. 9: Je mehr die Luftgeschwindigkeit im Kollektor die Windgeschwindigkeit übertrifft, desto höher ist der thermische Wirkungsgrad.

Kollektor zur Verfügung. Folglich ist der thermische Wirkungsgrad umso besser, je mehr die Luftgeschwindigkeit im Kollektor die Windgeschwindigkeit übertrifft (Abb. 9).

## Nutzung der Wärme für Trocknungszwecke

An sonnigen Tagen kann man durch Belüftung den Photovoltaikmodulen bis zu vier Kilowatt pro Kubikmeter als Wärme entziehen. Die Wärme steht jedoch auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau zur Verfügung. Daher sind ihre Nutzungsmöglichkeiten beschränkt. Am besten kann man sie für Trocknungszwecke nutzen. Durch Erhöhung der Temperatur sinkt die relative Feuchtigkeit der Luft und ihre Wasseraufnahmefähigkeit nimmt zu. Anhand eines theoretischen Beispiels (Abb. 10) wird gezeigt, wie sich durch die Luftanwärmung in der PV-Anlage die Trocknungszeit von Heu

gegenüber einer Kaltbelüftung halbiert. Der Berechnung sind Klimadaten an einem sonnigen Tag in Juni zugrunde gelegt. Die Kollektorlänge beträgt 12 Meter, die Kollektorhöhe 0,2 Meter und die Luftgeschwindigkeit 3,8 m/s. Die Lufttemperaturen am Ende des Kollektors wurden mit Hilfe eines Berechnungsmodells, das aufgrund der Messdaten entwickelt wurde, berechnet. Die mittlere Wasseraufnahme der Luft (g/kg Luft) zwischen 9.00 Uhr morgens und 21.00 Uhr abends wurde einerseits für die Aussentemperaturen (Belüftung ohne PV-Anlage) und andererseits für die Lufttemperaturen am Ende der PV-Anlage ermittelt. Dabei wurde zur Vereinfachung angenommen, dass die Luft beim Verlassen des Heustocks eine durchschnittliche relative Feuchtigkeit von 70 Prozent aufweist und der Wassergehalt der Aussenluft tagsüber konstant 10,9 g/kg Luft beträgt. Vor der Trocknung hat das Heu einen TS-Gehalt von 65 Prozent und nach der Trocknung von 87 Prozent. Die Heustockfläche (155 m<sup>2</sup>) und die Flä-

che der Photovoltaik-Anlage (300 m<sup>2</sup>) wurden hinsichtlich Luftmenge aufeinander abgestimmt. Aus den Berechnungen geht hervor, dass bei der Kaltbelüftung die Luft beim Durchqueren des Heustocks durchschnittlich 1,11 Gramm Wasser pro Kilogramm Luft aufnimmt, bei der Warmbelüftung 2,19 Gramm (Abb. 11, Tab. 2). Es zeigt sich weiter, dass die Energieeinsparung des Lüfters (-557 kWh) durch die kürzere Belüftungszeit viel grösser als die zusätzliche Stromproduktion (38 kWh) durch die Kühlung der Solarzellen ist. Finanziell gewinnt Letztere jedoch an Bedeutung, wenn der Solarstrom teurer verkauft werden kann, als für den Strombezug zu bezahlen ist.

## Kühlung ausserhalb der Belüftungszeit

### Natürliche Kühlung

Die Solarzellen sollen auch ausserhalb der Heubelüftungszeit gekühlt werden, wenn

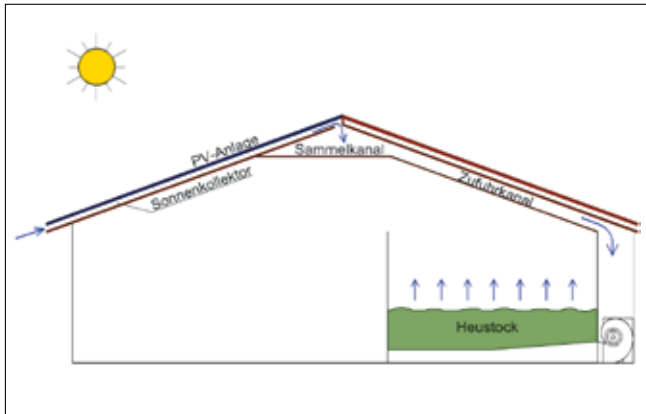


Abb. 10: Die durch die Photovoltaikanlage erwärmte Luft wird für die Heutrocknung genutzt (siehe Tab. 2).

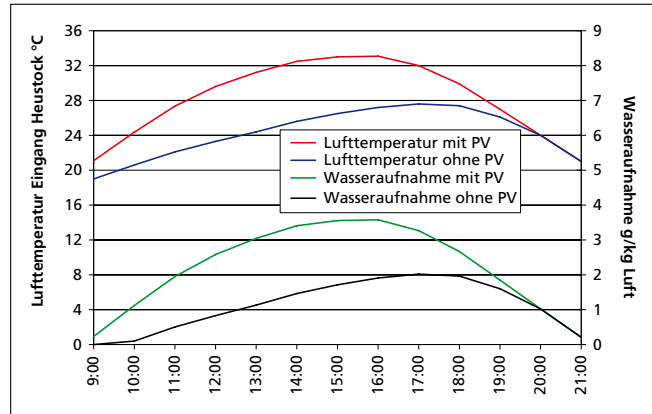


Abb. 11: Temperatur am Eingang des Heustocks und Wasseraufnahme der Luft mit (mit PV) und ohne Vorwärmung (ohne PV) in der Photovoltaikanlage (Modellrechnung für die Anlage nach Tab. 2).

möglich durch natürliche Lüftung (Schwerkraft oder Wind). Eine natürliche Lüftung ist am einfachsten bei einem Sparrendach zu bewerkstelligen, wenn die Luft traufseitig frei ein- und im Firstbereich ausströmen kann (Abb. 12). Je steiler das Dach, je grösser der Abstand zwischen Solarzellen und Unterdach und je geringer der Luftwiderstand, desto grösser der Luftstrom und desto stärker die Kühlung.

Die Solarmodule sind so zu verlegen, dass es möglichst wenig Verengungen (Querlaten, Profile) gibt. Der Abstand zwischen Solarzellen und Unterdach wird in der Regel auf eine Luftgeschwindigkeit von 4 bis 5 m/s während der Heubelüftung ausgelegt. Je nachdem ob während der Heubelüftung die erwärmte Luft oben oder unten abgesaugt wird, braucht es im Trauf- oder Firstbereich Klappen, die sich, wenn der Heulüfter nicht läuft, öffnen. Wird die Luft in der Mitte zwischen Traufe und First entnommen, sind keine Klappen notwendig (Abb. 12). Bei der mittigen Anordnung des Sammelkanals wird die Luft sowohl trauf- wie auch firstseitig angesaugt. Hierdurch verdoppelt sich die Länge der Zuluftöffnungen. Um die gleiche Luftgeschwindigkeit (4 bis 5 m/s) bei der Heubelüftung zu erreichen, muss man den Abstand zwischen Solarzellen und Unterdach halbieren. Die halbierte Kollektorhöhe bewirkt, dass sich ausserhalb der Heubelüftungszeit die natürliche Lüftung und folglich auch die Kühlung und elektrische Leistung verringern. Andererseits ist es deutlich kostengünstiger, wenn die Klappen entfallen.

Es lässt sich berechnen, wie gross die Luftgeschwindigkeit durch thermischen Auftrieb im Kollektor in Abhängigkeit der Dachgeometrie und der Klimabedingungen wird. Sie pendelt sich auf den Schnittpunkt der Luft-

druckkurve und der Luftwiderstandskurve ein (Abb. 13). Im Beispiel liegt sie bei etwa 0,9 m/s für einen Abstand zwischen Unterdach und Solarzellen von 15 Zentimeter. Bezüglich Temperatur und Luftwiderstand liegen der Berechnung Messergebnisse der Pilotanlage von ART zugrunde. Der Luftstrom bewirkt eine Temperatursenkung der Solarzellen von 11,6 Grad und eine Steigerung der Stromproduktion um 4,6 Prozent. Halbiert man den Abstand zwischen Solarzellen und Unterdach (7,5 cm), reduziert sich die Temperatursenkung der Solarzellen auf 7,5 Grad und folglich die Zunahme der Stromproduktion um drei Prozent.

### Mechanische Kühlung

Bei einem Pfettendach kann der thermische Auftrieb nicht genutzt werden und man ist auf Windeinwirkung angewiesen. Diese ist je nach Windintensität und -richtung mehr

oder weniger wirkungsvoll. Je länger der Kollektor, desto grösser der Luftwiderstand und desto geringer die Lüftrate.

Zur Kühlung der Solarzellen könnte man den Heulüfter auch ausserhalb der Heutrocknungszeit laufen lassen. Da dann die erwärmte Luft nicht durch das Heu gedrückt werden muss, sondern direkt nach aussen abgeführt werden kann, verringert sich der Luftwiderstand auf weniger als 100 Pascal. Bei diesem relativ geringen Luftwiderstand ist es nicht sinnvoll Radiallüfter, die auf hohe Drucke ausgelegt sind, einzusetzen. Man sollte Axialventilatoren (Stalllüfter) verwenden, die energieeffizient grosse Luftmengen bei geringem Widerstand fördern. Eine mechanische Kühlung der Solarzellen ist energetisch nur sinnvoll, wenn der Energiebedarf der Lüfter geringer als die Mehrproduktion an Strom durch die Kühlung der Solarzellen ist. Berechnungen

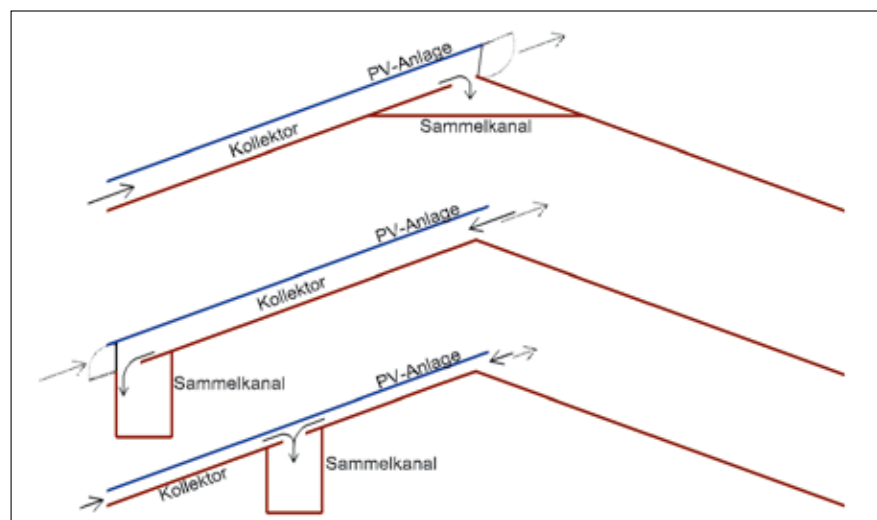


Abb. 12: Um eine minimale Kühlung der Solarzellen ausserhalb der Heubelüftungszeit sicherzustellen, ist eine natürliche Lüftung durch thermischen Auftrieb notwendig. Je nach Position des Sammelkanals sind dazu Klappen zu öffnen.

**Tab. 2: Berechnung der Zeit und des Energieverbrauchs für die Trocknung von Heu an einem sonnigen Tag im Juni, einerseits ohne Vorwärmung der Luft (ohne PV) und andererseits mit Vorwärmung der Luft (mit PV) in der Photovoltaikanlage (PV).**

Länge PV-Anlage	m	25	
Breite PV-Anlage	m	12	
Höhe Kollektor	m	0.2	
Luftgeschwindigkeit Kollektor	m/s	3.8	
Gesamtquerschnitt Kollektor (abzüglich Sparren)	m <sup>2</sup>	4.5	
Luftrate Kollektor	m <sup>3</sup> /s	17.1	
Mittlere Luftdichte	kg/m <sup>3</sup>	1.11	
Heustockfläche	m <sup>2</sup>	155	
Luftrate Heustock	m <sup>3</sup> /s m <sup>2</sup>	0.11	
Schichthöhe pro Füllung	m	1.5	
Heumenge in TS pro Füllung	kg TS	18655	
TS-Gehalt des Heus vor Trocknung	%	65	
TS-Gehalt des Heus nach Trocknung	%	87	
Erforderlicher Wasserentzug pro kg TS Heu	kg/kgTS	0.39	
Erforderlicher Wasserentzug gesamt kg	kg	7257	
		ohne PV	mit PV
Mittlerer Wasserentzug	g/kg Luft	1.1	2.2
Mittlerer Wasserentzug	g/m <sup>3</sup> Luft	1.23	2.43
Wasserentzug gesamt	kg/h	76	150
Theoretische Trocknungszeit	h	96	48
Luftwiderstand	Pa	450	525
Leistungsaufnahme Lüfter (h=0.60)	kW	12.8	13.8
Energiebedarf Lüfter	kWh	1227	670
Energieeinsparung Lüfter	kWh		-557
Mehrproduktion Strom während der Belüftung*	kWh		38
<b>Gesamter Energiegewinn</b>	kWh		<b>595</b>

\* Mittlere Stromproduktion 65W/m<sup>2</sup>, Temperatursenkung der Solarzellen: 10 °C

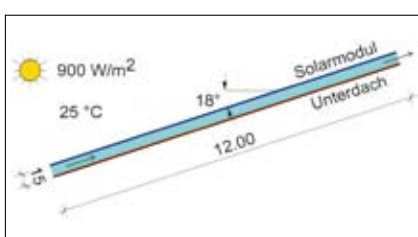
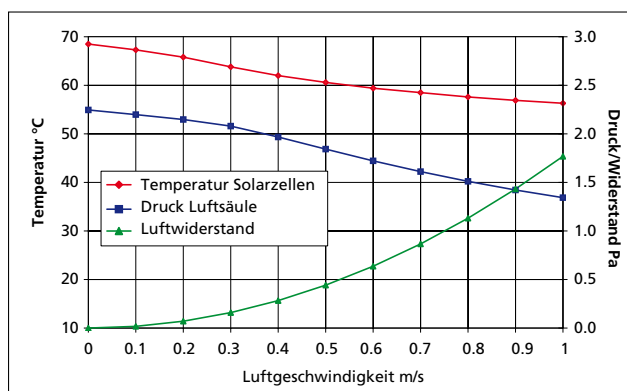


Abb. 13: Die Luftgeschwindigkeit durch thermischen Auftrieb pendelt sich im Sparrendach auf den Schnittpunkt zwischen Luftwiderstand und Druck der Luftsäule ein (0,9 m/s). Die Temperatursenkung der Solarzellen beträgt bei 0,9 m/s 11,6 °C.

zeigen, dass es auch mit Energiesparlüftern nicht sinnvoll ist, im Kollektor höhere Luftgeschwindigkeiten als 2 m/s zu erzeugen. Im Beispiel (Abb. 14) wird die Differenz zwischen zusätzlicher Leistung der Solarzellen und erforderlicher Lüfterleistung maximal (2,01 – 0,55 = 1,45 kW) bei 1,9 m/s und negativ ab 4,6 m/s.

Die zusätzliche Leistung der Solarzellen beträgt bei einer Luftgeschwindigkeit von 0,9 m/s, die sich auch ohne Lüfter mittels Schwerkraftlüftung erreichen lässt, 1,35 Kilowatt (Abb. 13). Sie ist damit etwa gleich gross wie der maximale Netto-Leistungsgewinn bei mechanischer Lüftung. Da auch die Investitionen des Lüfters zu berücksichtigen sind, lohnt sich eine mechanische Luftkühlung der Solarzellen nur, wenn eine ausreichende natürliche Lüftung nicht möglich ist. Wenn man Lüfter einsetzt, sollen sie so gewählt werden, dass ihre spezifische Leistungsaufnahme klein ist (< 20 W/1000 m<sup>3</sup>/h). Übliche Stalllüfter weisen bei 100 Prozent Drehzahl eine Ausblasgeschwindigkeit von 10 m/s auf. Dies entspricht einem dynamischen Druck von etwa 55 Pascal. Andererseits beträgt der gesamte Luftwiderstand im Kollektor und Sammelkanal bei einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/s nur 10 bis 20 Pascal. Das bedeutet, dass der Lüfter etwa 75 bis 85 Prozent seiner Leistung für die Beschleunigung der Luft beim Ausblasen braucht. Das Senken der Ausblasgeschwindigkeit und folglich des dynamischen Drucks erreicht man, indem man einen grösseren Lüfter wählt, und diesen bei reduzierter Drehzahl laufen lässt. Die Drehzahlreduzierung muss jedoch energieeffizient erfolgen (keine Phasenschnittsteuerung), da sonst die Verluste bei der Drehzahlreglung die Effizienzsteigerung zunichte machen.

## Schlussfolgerungen

Bei In-Dach-Anlagen besteht die Möglichkeit, den energetischen Wirkungsgrad der Solarzellen zu steigern, indem ein Teil der absorbierten Sonnenenergie als Wärme für Trocknungszwecke genutzt wird. Parallel zur Wärmenutzung verbessert sich durch die Kühlung der elektrische Wirkungsgrad der Solarzellen.

Messergebnisse an einer Versuchsanlage an der ART zeigen, dass den Solarzellen etwa vier- bis fünfmal mehr Wärme als Elektrizität entzogen werden kann. Als während des Vorversuchs die Solarmodule sowohl unten wie auch oben frei vom Wind angeströmt

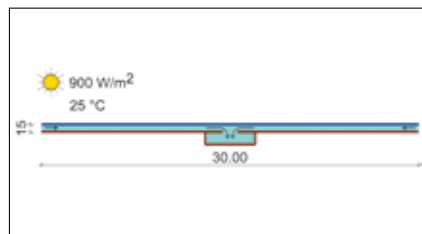
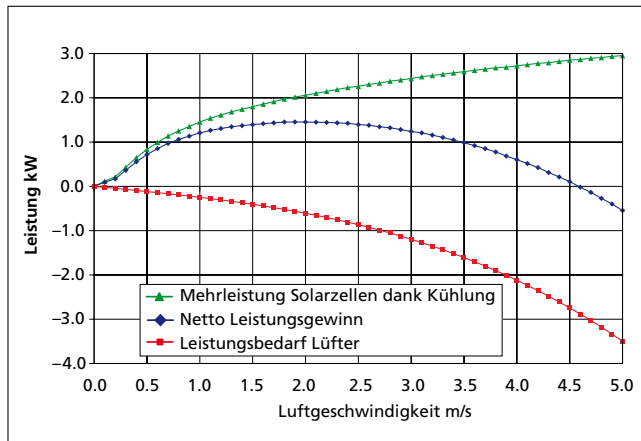


Abb. 14: Der Netto-Leistungsgewinn wird bei einer mechanischen Luftkühlung der Solarzellen in einem Pfettendach maximal für eine Luftgeschwindigkeit von 1,9 m/s.

wurden, überstieg ihre Temperatur um bis zu 27 Grad die Umgebungstemperatur. Bei anschließenden Versuchen, während derer ein Luftstrom zwischen den Solarmodulen und dem Unterdach erzeugt wurde, konnte die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Solarzelltemperatur bei etwa gleicher Sonneneinstrahlung auf 20 Grad begrenzt werden. Eine Senkung der Solarzelltemperatur um einen Grad bewirkt eine Zunahme der Stromproduktion um 0,4 Prozent. An sonnigen Tagen kann man durch aktive Belüftung den Photovoltaikmodulen bis zu vier Kilowattstunden pro Quadratmeter an Wärme entziehen. Die Wärme kann für Trocknungszwecke, zum Beispiel von Heu oder Holzschnitzeln, genutzt werden. Die höhere Temperatur senkt die relative Feuchtigkeit der Luft und steigert ihre Wasseraufnahmefähigkeit. Dadurch verkürzen sich Trocknungszeit und Energiebedarf des Lüf-

ters erheblich. Zusätzlich wird mehr Strom produziert. Je grösser das Verhältnis zwischen Luftgeschwindigkeit im Kollektor und Windgeschwindigkeit ist, desto mehr Wärme kann genutzt werden. Da der Energiebedarf des Lüfters jedoch vom Quadrat der Luftgeschwindigkeit im Kollektorkanal abhängt, soll man sie auf etwa 5 m/s begrenzen. Damit sich die Solarzellen nicht erhitzen, wenn keine Verwendung für die Wärme besteht und der Lüfter abgeschaltet bleibt, sollten sie, wenn möglich, durch einen natürlichen Luftstrom gekühlt werden. Natürliche Lüftung lässt sich am einfachsten bei einem Sparrendach durch thermischen Auftrieb bewerkstelligen. Ist die natürliche Lüftung unzureichend, kann eine mechanische Lüftung sinnvoll sein, auch wenn die Luft keinen Trocknungsprozessen zugeführt wird. Bedingung ist dann, dass der Lüfter weniger Energie braucht als die Solarzellen

zusätzlich durch die Kühlung produzieren. Der Lüfter muss folglich eine niedrige spezifische Leistungsaufnahme besitzen. Photovoltaikanlagen sind mit hohen Anschaffungskosten verbunden. Deshalb lohnt es sich, jede Anlage genau zu berechnen. Die Messergebnisse belegen, dass In-Dach-Anlagen im Vergleich zu Auf-Dach-Anlagen keineswegs eine geringere elektrische Leistung besitzen, wenn durch korrekte Bauweise des Kollektors stets eine ausreichende natürliche oder mechanische Lüftung stattfindet. Im Gegenteil, die Leistung ist sogar besser als bei vielen Auf-Dach-Anlagen, die wegen des zu geringen Abstands zwischen Dach und Solarmodulen unten nur ungenügend gekühlt werden.

## Literatur

Gazzarin C., Zumbühl T. und Toggweiler P., 2008. Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben. ART-Berichte 694, 12 S.

Käppeli E., 1983. Strömungslehre und Strömungsmaschinen, S. 106–118

Kuttler W., 2009. Klimatologie. ISBN 978-3-506-76576-5, S. 59–78.

Nydegger F., 1991. Sonnenkollektoren für die Heubelüftung – Planen und Realisieren. FAT-Berichte 407 (heute ART-Berichte), 20 S.

Recknagel H., Sprenger E. und Shramek R., 2001. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik S, 1209–1245.

Sagelsdorff R. und Frank T., 1993. Wärmeschutz und Energie im Hochbau. Element 29, Schweizerische Ziegelindustrie, Zürich.

Simons W.J., 1979. Warmte overdracht, S. 155–194.

## Impressum

Herausgeber: Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen

Die ART-Berichte erscheinen in rund 20 Nummern pro Jahr. – Jahresabonnement Fr. 60.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: ART, Bibliothek, CH-8356 Ettenhausen. Telefon +41 (0)52 368 31 31, Fax +41 (0)52 365 11 90, doku@art.admin.ch, <http://www.art.admin.ch>

Die ART-Berichte sind auch in französischer Sprache als «Rapport ART» erhältlich. ISSN 1661-7568.

Die ART-Berichte sind im Volltext im Internet ([www.art.admin.ch](http://www.art.admin.ch))