

Ludo van Caenegem und Alina Solltermann

# Kombinierte elektrische und thermische Nutzung von Photovoltaikanlagen

Baut man Photovoltaik-Module in die Dachhaut ein, so kann man mehr Sonnenenergie nutzen, indem man die Unterseite der Module belüftet. Versuche an der Forschungsanstalt ART in Tänikon zeigen, dass die Wärmeabgabe der PV-Module vier bis fünf Mal höher ist als die Stromproduktion. Durch die Belüftung kann die Solarzellentemperatur um bis zu 15 °C gesenkt werden, was eine Steigerung der Stromproduktion um etwa 6 % bedeutet. Wird die warme Luft darüber hinaus für Trocknungszwecke genutzt, kann die Trocknungszeit und entsprechend der Energiebedarf stark verringert werden. Mit Hilfe einer numerischen Berechnungsmethode lässt sich die thermische Effizienz der PV-Anlage voraussagen.

## Schlüsselwörter

Photovoltaik, Wärmeproduktion, Energieeffizienz, Heutrocknung, Energieeinsparung

## Keywords

Photovoltaic, heat production, energy efficiency, hay drying, energy saving

Van Caenegem, Ludo and Solltermann, Alina

## Combined electrical and thermal use of photovoltaic panels

Landtechnik 65 (2010), no. 1, pp. 10-14, 4 figures, 2 tables, 5 references

Integrating photovoltaic panels (PV) into the roof allows to increase the energy efficiency by ventilating the underside of the panels. Investigations carried out at the research station ART Taenikon show that the heat production of the PV panels is four to five times higher than the electricity production. By ventilating the temperature decrease of the panels amounts to 15 °C, resulting in a 6 % increase in electricity production. Using the warm air for drying hay permits significant saving of energy by reducing the drying time. A numerical model has been developed and validated allowing the calculation of the thermal efficiency of the photovoltaic plant.

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



Experimentelle PV-Anlage. Foto: ART Tänikon  
Fig 1: Experimental PV plant

lungssensor (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 10 % 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 Quotienten 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

Die Versuche wurden während 14 Tagen im Juli, 6 Tagen im August, 3 Tagen im September und 2 Tagen im Oktober 2008 durchgeführt. Die Geschwindigkeit im Kollektor variierte zwischen 0,2 und 6,0 m/s (**Tabelle 1**). Die Messergebnisse zeigen,

Tab. 1

Messdaten vom Juli, August, September und Oktober 2008

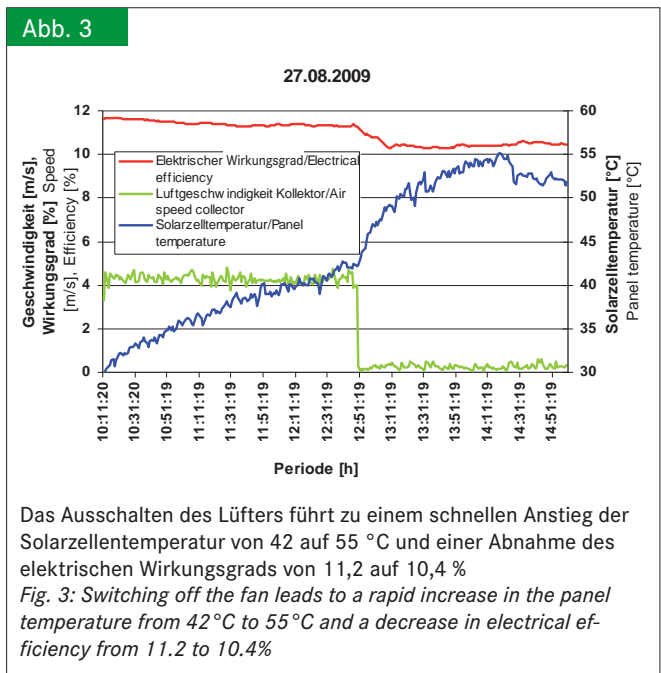
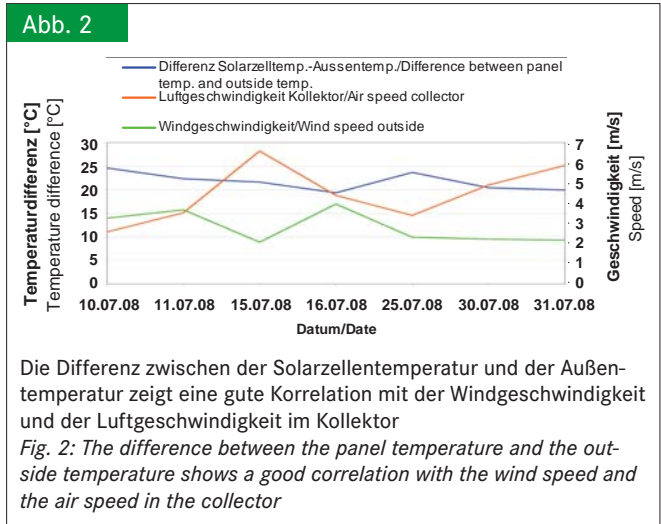
Table 1: Data from the measurements made in July, August, September and October 2008

| Datum<br>Date             | Zeit<br>Time     | Wind<br>Wind<br>[m/s] | v Kollektor<br>v Collector<br>[m/s] | PV-Temp.<br>PV-temp.<br>[°C] | E-solar<br>E-solar<br>[kWh/m <sup>2</sup> ] | Elektr. Wirk.<br>Electr. eff.<br>[%] | Term. Wirk.<br>Heat eff.<br>[%] |
|---------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------|
| 01.07.08                  | 11:00-17:05      | 1,71                  | -                                   | 51,9                         | 5,15  | 9,18                                 | -                               |
| 02.07.08                  | 07:56-16:46      | 1,69                  | -                                   | 47,9                         | 6,58  | 9,33                                 | -                               |
| 04.07.08                  | 07:42-16:05      | 1,99                  | 3,85                                | 32,6                         | 5,25  | 9,81                                 | 54,29                           |
| 08.07.08                  | 07:53-16:45      | 3,97                  | 4,26                                | 27,6                         | 5,26  | 9,83                                 | 46,77                           |
| 10.07.08                  | 07:22-16:25      | 2,32                  | 2,18                                | 41,6                         | 6,80  | 9,50                                 | 44,71                           |
| 11.07.08                  | 10:07-16:25      | 2,42                  | 2,95                                | 47,2                         | 5,23  | 9,58                                 | 48,37                           |
| 15.07.08                  | 08:13-16:07      | 1,81                  | 5,60                                | 35,4                         | 6,25  | 10,13                                | 63,84                           |
| 16.07.08                  | 07:50-16:34      | 2,81                  | 3,76                                | 36,8                         | 6,54  | 10,05                                | 49,54                           |
| 21.07.08                  | 07:50-16:34      | 3,52                  | 4,37                                | 25,4                         | 4,14  | 10,22                                | 46,86                           |
| 23.07.08                  | 08:10-23:59      | 1,80                  | 6,00                                | 26,2                         | 7,56  | 10,09                                | 50,26                           |
| 24.07.08                  | 00:00-24:00      | 1,51                  | 5,45                                | 21,6                         | 7,72  | 9,97                                 | 44,95                           |
| 25.07.08                  | 00:00-16:06      | 1,22                  | 2,84                                | 25,2                         | 6,02  | 10,00                                | 11,52                           |
| 28.07.08                  | 08:11-16:44      | 2,01                  | 2,03                                | 43,0                         | 5,60  | 9,54                                 | 41,96                           |
| 29.07.08                  | 08:14-16:52      | 1,89                  | 3,35                                | 39,8                         | 5,52  | 9,82                                 | 45,83                           |
| 30.07.08                  | 08:09-16:25      | 1,56                  | 4,24                                | 39,7                         | 5,21  | 9,94                                 | 54,51                           |
| 31.07.08                  | 07:58-16:22      | 1,65                  | 5,08                                | 40,7                         | 6,03  | 9,98                                 | 57,55                           |
| <b>Mittelwert/Average</b> | <b>Juli</b>      | <b>2,12</b>           | <b>4,00</b>                         | <b>36,42</b>                 | <b>5,93</b>                                 | <b>9,81</b>                          | <b>49,57</b>                    |
| 06.08.08                  | 08:40-16:55      | 1,57                  | 3,57                                | 39,9                         | 5,59  | 10,21                                | 51,04                           |
| 07.08.08                  | 13:02-16:22      | 2,82                  | 3,54                                | 41,5                         | 1,93  | 9,79                                 | 49,84                           |
| 11.08.08                  | 10:05-16:06      | 1,37                  | 5,79                                | 36,2                         | 3,51  | 10,14                                | 56,81                           |
| 13.08.08                  | 13:18-16:42      | 3,16                  | 3,54                                | 35,4                         | 2,18  | 10,55                                | 48,62                           |
| 18.08.08                  | 10:09-17:48      | 2,52                  | 4,38                                | 39,0                         | 5,31  | 10,98                                | 52,69                           |
| 21.08.08                  | 11:00-16:13      | 1,61                  | 0,20                                | 42,9                         | 3,31  | 10,15                                | -                               |
| 27.08.08                  | 10:11-12:49      | 1,63                  | 4,28                                | 37,3                         | 1,88  | 11,44                                | 64,04                           |
| <b>Mittelwert/Average</b> | <b>August</b>    | <b>2,10</b>           | <b>3,61</b>                         | <b>38,87</b>                 | <b>3,39</b>                                 | <b>10,47</b>                         | <b>53,84</b>                    |
| 08.09.08                  | 07:48-17:05      | 1,02                  | 4,44                                | 34,8                         | 3,84  | 12,27                                | 63,28                           |
| 09.09.08                  | 08:18-16:43      | 1,27                  | 3,52                                | 35,5                         | 4,84  | 12,06                                | 61,16                           |
| 30.09.08                  | 14:09-16:05      | 2,26                  | 2,09                                | 18,3                         | 0,42  | 11,03                                | 33,33                           |
| <b>Mittelwert/Average</b> | <b>September</b> | <b>1,52</b>           | <b>3,35</b>                         | <b>29,53</b>                 | <b>3,03</b>                                 | <b>11,79</b>                         | <b>52,45</b>                    |
| 14.10.08                  | 12:12-17:18      | 2,50                  | 3,37                                | 30,76                        | 1,23  | 14,40                                | 53,7                            |
| 15.10.08                  | 11:45-17:42      | 2,60                  | 4,08                                | 28,26                        | 1,41  | 14,80                                | 51,2                            |
| <b>Mittelwert/Average</b> | <b>Oktober</b>   | <b>2,59</b>           | <b>3,73</b>                         | <b>28,5</b>                  | <b>1,32</b>                                 | <b>14,60</b>                         | <b>52,45</b>                    |

dass der thermische Wirkungsgrad vier bis fünf Mal höher ist als der elektrische [1; 2]. Die Schwankungen hinsichtlich des Wirkungsgrades sind vor allem auf unterschiedliche Wind- und Luftgeschwindigkeiten im Kollektor zurückzuführen.

**Beziehung zwischen Solarzellentemperatur und Luftgeschwindigkeit**

Die Solarzellentemperatur hebt sich um so mehr von der Umgebungstemperatur ab, je tiefer die Windgeschwindigkeit oben und die Luftgeschwindigkeit unten sind (Abbildung 2). Am 10. Juli 2008 (13.00–13.30 Uhr) war die Differenz zwischen der Solarzellentemperatur und der Außentemperatur am höchsten (24,6 °C). An diesem Tag betrug die mittlere Windgeschwindigkeit 2,8 m/s und die Luftgeschwindigkeit im Kollektor 2,2 m/s. Am 16. Juli 2008 wurde die geringste Temperaturdifferenz (19,3 °C) verzeichnet. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 3,4 m/s, die Luftgeschwindigkeit 3,8 m/s.



**Beziehung zwischen Solarzellentemperatur und elektrischem Wirkungsgrad**

Mit steigender Solarzellentemperatur nimmt der elektrische Wirkungsgrad ab. Am 27. August 2008 wurde der Ventilator um 12.49 Uhr abgeschaltet (Abbildung 3). Dadurch sank die Luftgeschwindigkeit im Kollektor von etwa 5,2 auf etwa 0,3 m/s. Die restliche Luftgeschwindigkeit war auf Windeinfluss und thermischen Auftrieb zurückzuführen. Durch das Ausfallen der aktiven Lüftung stieg die Solarzellentemperatur innerhalb einer halben Stunde von etwa 42 auf 55 Grad. Der elektrische Wirkungsgrad verschlechterte sich von 11,2 (bei 42 °C) auf 10,4 Prozent (bei 55 °C).

**Beziehung zwischen Luftgeschwindigkeit im Kollektor und thermischem 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. Dies 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 Kollektor zur Verfügung. Folglich ist der thermische Wirkungsgrad umso besser, je mehr die Luftgeschwindigkeit im Kollektor die Windgeschwindigkeit übertrifft. Bei einer Luftgeschwindigkeit im Kollektor von 2,21 m/s und einer Windgeschwindigkeit von 2,79 m/s (Unterschied: -0,58 m/s) betrug der thermische Wirkungsgrad 43,5 %. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 5,64 m/s und einer Windgeschwindigkeit von 1,77 m/s (Unterschied: 3,87 m/s) erreichte der thermische Wirkungsgrad 59,5 %.

**Numerische Berechnungsmethode**

Die Energiebilanz der Solarmodule kann für die stationäre Wärmeübertragung in Abhängigkeit der absorbierten Sonnenstrahlung ( $a_s \cdot G_{PV}$ ), der reflektierten Strahlung ( $Q_{IR,x}$ ), der diffusen Strahlung ( $Q_{refl,x}$ ), der in Strom umgewandelten Energie ( $E_{el,x}$ ), der konvektiven Wärmeabgabe an den Wind ( $U'_{PV} \cdot (\theta_{PV,x} - \theta_a)$ ) und der Wärmeabgabe an die Luft im Kollektor ( $\alpha_{PV} \cdot (\theta_{PV,x} - \theta_{L,x})$ ) ausgedrückt werden (Gleichung 1):

$$[(a_s \cdot G_{PV} - Q_{IR,x} + Q_{refl,x} - E_{el,x} - U'_{PV} \cdot (\theta_{PV,x} - \theta_a)) \cdot B_{PV1} - \alpha_{PV} \cdot (\theta_{PV,x} - \theta_{L,x}) \cdot B_{PV2}] \cdot dx \cdot dt = 0 \quad (Gl. 1)$$

Die Auflösung der Gleichung bedingt, dass die Solarzellentemperatur  $\theta_{PV,x}$  als Funktion der Lufttemperatur im Kollektor  $\theta_{L,x}$  ausgedrückt werden kann. Wegen der Interdependenz zwischen  $Q_{IR,x}$  und  $\theta_{PV,x}$  ist dies jedoch analytisch nicht möglich. Unterstellt man für  $\theta_{PV,x}$  einen konstanten Wert über die ganze Länge der PV-Anlage, kann man die Gleichung zwar lösen, die Genauigkeit der berechneten Werte ist aber, vor allem bei größeren Anlagen, ungenügend.

Das Problem der Interdependenz kann man mit einer numerischen Methode umgehen, indem man den Kollektor in eine

große Anzahl (n) Teilstrecken  $\Delta x$  unterteilt. Die Solarzellentemperatur  $\theta_{PV,i}$  und die Wärmeströme der Teilstrecke  $\Delta x_i$  werden aus der Lufttemperatur ( $\theta_{L,i-1}$ ) der vorangehenden Teilstrecke ( $\Delta x_{i-1}$ ) berechnet. Indem man die Teilstrecken genügend klein definiert, erreicht man eine hohe Genauigkeit (**Gleichung 2**):

$$\theta_{PV,i} = \frac{(a_s \cdot G - Q_{IR,i} + Q_{refl} - E_{el} + U'_{PV} \cdot \theta_a) B_{PV1}}{\alpha_{PV} \cdot B_{PV2} + U'_{PV} \cdot B_{PV1}} + \frac{\alpha_{PV} \cdot \theta_{L,i-1} \cdot B_{PV2}}{\alpha_{PV} \cdot B_{PV2} + U'_{PV} \cdot B_{PV1}} \quad (Gl. 2)$$

Aus der Solarzellentemperatur lässt sich der Wärmestrom ( $Q_{PV,i}$ , W) zwischen Modulunterseite und Luftstrom errechnen. Die Lufttemperatur am Ende des Kollektors ( $\theta_{L,L}$ , °C) errechnet sich durch Addition der Temperaturerhöhungen der Teilstrecken zur Anfangstemperatur ( $\theta_{L,0}$ , °C). Die Temperaturerhöhung in jeder Teilstrecke ergibt sich jeweils durch Division der Wärmeströme zwischen Luftstrom und Unterseite der Module ( $Q_{PV,i}$ , W) und Kollektorboden ( $Q_{u,i}$ , W) durch die Luftfrate ( $V$ , m<sup>3</sup>/h), die spezifische Wärme (0,28 Wh/kg K) und die Luftdichte ( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>) (**Gleichung 3**):

$$\theta_{L,L} = \theta_{L,0} + \sum_{i=0}^{i=n} \frac{Q_{PV,i} + Q_{u,i}}{V \cdot 0.28 \cdot \rho} \quad (Gl. 3)$$

### Nutzung der Wärme

Die Nutzung der Wärme mit gleichzeitiger Erhöhung der Stromproduktion verbessert die Rentabilität der PV-Anlage [3]. An sonnigen Tagen kann die durch Belüftung abgeführte Wärme bis zu 4 kWh pro m<sup>2</sup> Solarmodule betragen. Die Wärme bewirkt

eine Temperaturerhöhung und eine Senkung der relativen Feuchtigkeit der Luft [4]. Eine relativ geringe Temperaturerhöhung von 5 bis 8 °C reicht aus, um die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf zu verdoppeln (**Abbildung 4**). Nutzt man die warme Luft für die Heutrocknung, halbiert sich folglich die Trocknungszeit.

Anhand einer numerischen Berechnungsmethode [5] lässt sich die Zeit und der Energiebedarf für die PV unterstützte Heutrocknung in Abhängigkeit der Geometrie der PV-Anlage sowie auch des Heustocks berechnen (**Tabelle 2**). Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Energieeinsparung gegenüber einer Belüftung mit Außenluft etwa 30 Wh pro kg TS Heu beträgt.

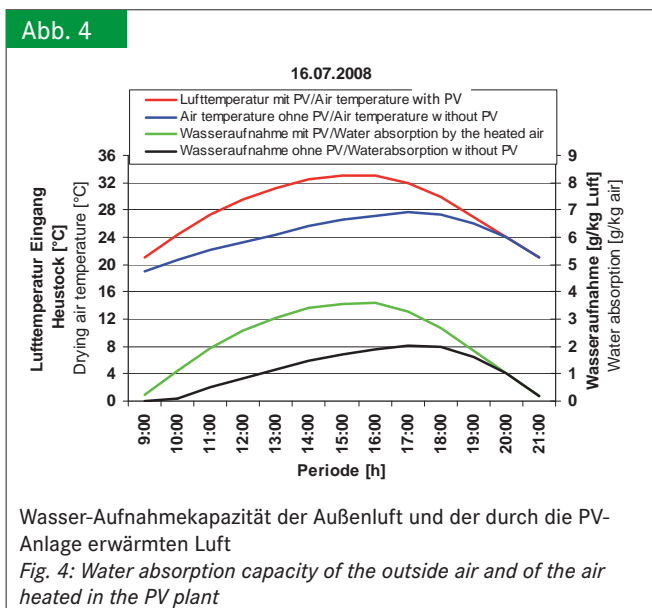
Tab. 2

Vergleich des Zeit- und Energiebedarfs für die Heutrocknung einerseits mit Außenluft (ohne PV) und andererseits mit durch die PV-Anlage erwärmte Luft im Juli 2008

Table 2: Comparison of the time and energy needed for hay drying with outside air (without PV) and with air heated by the PV plant (with PV) based on weather conditions in July 2008

|   |                          |                      |
|---|--------------------------|----------------------|
| PV-Fläche / Surface of the PV plant [m <sup>2</sup> ]   | 300                      |                      |
| Luftgeschwindigkeit Kollektor / Air speed in the collector [m/s]  | 3,8                      |                      |
| Gesamtquerschnitt Kollektor / Free section of the collector [m <sup>2</sup> ]   | 4,5                      |                      |
| Lufrate Kollektor / Air flow in the collector [m <sup>3</sup> /h]   | 17,1                     |                      |
| Heustockfläche / Surface of the haystack [m <sup>2</sup> ]  | 155                      |                      |
| Lufrate Heustock / Air flow through the haystack [m <sup>3</sup> /s m <sup>2</sup> ]  | 0,11                     |                      |
| Schichthöhe pro Füllung / Thickness of the haystack per charge [m]  | 1,5                      |                      |
| Heumenge in TS pro Füllung / Hay quantity per charge [kg TS/DM]   | 18 655                   |                      |
| TS-Gehalt des Heus vor Trocknung / DM content of the hay before drying [%]  | 65                       |                      |
| TS-Gehalt des Heus nach Trocknung / DM content of the hay after drying [%]  | 87                       |                      |
| Erforderlicher Wasserentzug / Required dehydration [kg/TS Heu kg/DM hay]  | 0,39                     |                      |
| Erforderlicher Wasserentzug gesamt / Total required dehydration [kg]  | 7257                     |                      |
|   | <b>Ohne / Without PV</b> | <b>Mit / With PV</b> |
| Mittlerer Wasserentzug / Average water absorption [g/kg Luft / Air]   | 1,1                      | 2,2                  |
| Wasserentzug pro Stunde / Total water absorption [kg/h]   | 76                       | 150                  |
| Theoretische Trocknungszeit / Theoretical drying time [h]   | 96                       | 48                   |
| Luftwiderstand / Total pressure drop [Pa]   | 450                      | 525                  |
| Leistungsaufnahme Lüfter / Fan power [ $\eta = 0.60$ ], [kW]  | 12,8                     | 13,8                 |
| Energiebedarf Lüfter / Energy demand of the fan [kWh]   | 1 227                    | 670                  |
| Energieeinsparung Lüfter / Saved energy for the fan [kWh]   |                          | -557                 |
| Zusätzliche Stromproduktion während der Belüftung / Additional electricity produced by the PV plant [kWh]   |                          | 38                   |
| <b>Gesamter Energiegewinn / Total energy gain [kWh]</b>   |                          | <b>595</b>           |
| Mittlere Stromproduktion der Solarmodule / Average electricity production: 65 W/m <sup>2</sup> zwischen / between 09:00 und 21:00, Temperatursenkung der Solarzellen / Temperature decrease of solar cells: 10 °C |                          |                      |

Abb. 4



### Schlussfolgerungen

Die Wärmeenergie, die man durch Belüftung der Solarmodule gewinnen kann, ist vier bis fünf Mal höher als die Stromproduktion. Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit im Kollektor sinkt die Solarzellentemperatur und steigt der elektrische Wirkungsgrad. Je größer die Differenz zwischen Luftgeschwindigkeit im Kollektor und Windgeschwindigkeit, desto größer die thermische Effizienz. Mit Hilfe einer numerischen Berechnungsmethode können die Lufttemperatur am Ende des Kollektors und die Solarzellentemperatur als eine Funktion der Anlagengeometrie, der Luftgeschwindigkeit und der meteorologischen Bedingungen ermittelt werden. Nutzt man die warme Luft anstelle von Außenluft für die Trocknung von Heu, halbiert sich die Trocknungszeit. Hierdurch reduziert sich der Energiebedarf des Lüfters um etwa 30 Wh pro kg TS Heu. 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 bei einem Sparrendach am einfachsten durch thermischen Auftrieb bewerkstelligen.

### Literatur

- [1] Van Caenegem, L., H. Bolhalder, R. Dörfler, C. Gazzarin, F. Nydegger, H.R. Ott, A. Pasca und A. Schmidlin: Thermische Nutzung von In-Dach-Photovoltaikanlagen. ART-Berichte, Agroscope ART, CH-8356 Ettenhausen, Nr. 709, 2009
- [2] Van Helden, W.G. J.; Van Zollingen, R. J. C. and Zondag, H. A.: PV thermal systems - PV panels supplying renewable electricity and heat. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol.12, issue 6 (2004), pp. 415-426
- [3] Gazzarin, C., T. Zumbühl und P. Toggweiler: Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben. ART-Berichte, Agroscope ART, CH-8356 Ettenhausen, Nr. 694, 2008
- [4] Nydegger, F.: Sonnenkollektoren für die Heubelüftung - Planen und Realisieren. FAT-Berichte, Agroscope ART, CH-8356 Ettenhausen, Nr. 407, 1991
- [5] Van Caenegem, L. et A. Pasca: Utilisation électrique et thermique combinée de panneaux photovoltaïques. Recueil des communications. Colloque européen Bâtiments d'élevage du futur, F-Lille, Institut de l'élevage, F-75595 Paris, pp. 7-16, 2009

### Autoren

**Dipl.-Ing. Ludo Van Caenegem** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit der Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz Tänikon, CH-8356 Ettenhausen,  
E-Mail: ludo.vancaenegem@art.admin.ch

**Dipl.-Ing. Alina Solltermann-Pasca** ist Doktorandin in der Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit der Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz Tänikon, CH-8356 Ettenhausen,  
E-Mail: alina.pasca@art.admin.ch