

Programm
Aktive Sonnenenergienutzung, Photovoltaik

PV-Dachintegration von Solarmodulen mit integriertem Inverter und Hybridnutzung am Schindeldach des Bauernhauses „Zaugg“

Band 1: Bericht

Ausgearbeitet durch

**Andreas Eckmanns, wissenschaftliche Projektleitung, Autor
Beat Stucki, Projektleitung
Atlantis Energie AG
Lindenrain 4, 3012 Bern**

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Einsatz von modulintegrierten Wechselrichter in einer dachintegrierten PV-Anlage. Am Projekt „Zaugg“ konnte ausserdem Erfahrungen mit einer Zwangshinterlüftung gesammelt werden, was interessante Zusatzinformationen ergab.

Die normierte Auswertung zeigte, dass die Mini-WR bei Modultemperaturen über 60°C Leistung ausregeln, um sich vor Überhitzung zu schützen.

Die Performanz des einzeln ausgemessenen Wechselrichters lag im Winter bei 71% und im Sommer bei 62%. Es ist eine Jahresperformanz der Gesamtanlage von 62% zu erwarten.

Der prognostizierte Jahresertrag wurde aus folgenden Gründen nicht erreicht:

- Ausgeschaltete Einspeisesicherung (11%)
- Verluste durch MPT der WR (7%)
- Minderleistung der PV-Module (6%)
- Sonstige Verluste (2%)

Der effektiv zu erwartende Ertrag liegt bei ca. 11'600 kWh Strom p.a. Zusätzlich werden durch die kürzere Laufzeit des Heugebläses ca. 645 kWh Strom eingespart.

Die thermische Leistung beträgt ca. 80 kW. Dies ist doppelt so viel wie erwartet und röhrt vom sehr leistungsfähigen Heugebläse her. Der thermische Ertrag liegt bei rund zwei Dritteln des Erwarteten bei ca. 6'900 kWh p.a., dies aufgrund der begrenzten Nutzungsdauer der Heubelüftung.

Die Vorerwärmung der Zuluft im Hinterlüftungskanal der PV-Anlage reduziert die Heubelüftungszeit auf die Hälfte, wodurch zusätzlich zur photovoltaisch gewonnenen elektrischen Energie ca. 645 kWh Strom eingespart werden.

Durch das Entfallen der AC-Installation konnten gut CHF 3'000.— oder 0.2 CHF/Wp eingespart werden. Zusatzaufwendungen entstanden jedoch durch die Installation einer zentralen Fehlerüberwachung auf dem Elektrotabelleau, welche in der selben Grössenordnung lagen. Insgesamt entstand kein Kostenvorteil, wohl jedoch eine komfortablere Situation der Anlagenüberwachung.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichtes verantwortlich.

Abstract

In spring 1995 a new farm with an additional living house for the family Zaugg was built. Due to the favourable exposition the south roof offered good conditions for the use of active solar systems.

The newly with PV-shingles covered roof section, was previous covered with tiles. The heat collected under the tiles was used for the hay ventilation. With the installation of the hybrid PV-thermal system the efficiency of the heating increased considerably resulting in reduced working periods of the ventilation system. For this project PV-modules with integrated micro-inverters have been used.

Three technological attributes are associated with this project: roof integrated PV system, PV-thermal hybrid system and the module-integrated inverter. It is the goal of the project to gain practical experience (electrical and thermal characteristics) of the micro-inverter in the special operating conditions of a roof-integrated, PV-thermal hybrid system.

The normalised evaluation showed that the Micro-Inverters trigger down the power when the module temperature raises over 60°C.

The Performance Ratio of the measured inverter was 71% during the winter measurement period and 62% in summer. For the whole year a Performance Ratio of 62% can be expected.

The expected annual yield was not reached due to the following reasons:

- PV-plant partially switched off (11%)
- MPT losses of the inverters (7%)
- Nominal power of PV lower than specified (6%)
- Other losses (2%)

The thermal output power is about 80 kW what is two times the expected value. The reason therefore is the very high powered hay ventilator. The thermal yield is two third of the expected (6'900 kWh), due to the limited working periods of the fan.

Inhalt

1 Einführung	5
2 Ziele.....	5
3 Anlagenbeschrieb.....	5
4 Messungen und Resultate	7
4.1 Normierte Auswertung	8
4.1.1 Übersicht.....	8
4.1.2 Elektrischer Ertrag	8
4.1.3 Performanz	8
4.1.4 Feld-Leistung	9
4.1.5 Feld-Spannung	9
4.1.6 Feld-Wirkungsgrad.....	9
4.1.7 WR-Wirkungsgrad.....	10
4.1.8 Histogramm WR-Leistung.....	10
4.2 Beurteilung der gesamten Anlage	10
4.2.1 Elektrischer Ertrag	10
Performanz	12
4.3 Aktive Hinterlüftung	13
4.4 Thermische Leistung und Ertrag	13
4.5 Thermisches Verhalten der Mini-WR	14
4.6 Erfahrungen mit reiner AC-Installation	14
4.7 Schlussfolgerungen und Aussichten	14
5 Abkürzungen und Symbole.....	15
5.1 Abkürzungen	15
5.2 Symbole	15
5.3 Indizes.....	15
6 Literatur	16

1 Einführung

Beim vorliegenden Projekt "Zaugg" kamen drei Technologien zum Einsatz: Dachintegration, Hybridnutzung, modulintegrierte Inverter. Davon waren die ersten beiden bereits bekannt, die dritte Technologie wurde bisher ausschliesslich als freiaufgeständerte Anlage ausgeführt. Das Projekt "Zaugg" bot nun die Möglichkeit, über den Einsatz der Modulwechselrichter in einer Dachintegration detaillierte Erfahrungen zu sammeln. Die Verwendung der PV-Hinterlüftung als Aufheizstrecke der Zuluft für die Heubelüftung ergibt zusätzliche Erkenntnisse.

2 Ziele

Ziel dieses Projekts war es, praktische Erfahrungen bezüglich elektrischem und thermischem Betriebsverhalten der Mini-WR beim Einsatz in einem (hybriden) Schindeldach zu sammeln.

- Thermisches Verhalten

Die thermische Situation beim Einsatz des Mini-WR in der Gebäudeintegration ist gänzlich anders als bei freier Aufständerung. Die Inverter müssen höheren Lufttemperaturen standhalten, werden durch die Montage im Hinterlüftungskanal jedoch einem konstanteren Luftfluss ausgesetzt. Dieser wiederum wirkt sich positiv auf deren Kühlung aus. Das thermische Verhalten der WR im Hinterlüftungskanal und bei hoher Umgebungstemperatur sollte hier analysiert werden.

- Elektrisches Verhalten

Im vorliegenden Projekt soll das Arbeitsverhalten der Mini-WR unter erhöhter Umgebungstemperatur überprüft werden.

- Installation

Das Wegfallen der DC-Verkabelung bei der Montage einer PV-Anlage ergibt Einsparungen. Diese zu quantifizieren war ein weiteres Ziel.

Gezeigt werden soll weiter, dass sich PV-Anlagen neben der ästhetischen Einfügung ins Gesamtbild eines Bauernhofes auch optimal ins Energiekonzept integrieren.

3 Anlagenbeschrieb

Im Frühjahr '95 wurde in Iffwil der Hof mit angegliedertem Wohnhaus der Familie Zaugg neu errichtet. Das Süddach des Gebäudes bot sich durch seine optimale Ausrichtung und Neigung für eine solare Nutzung an. Es wurde bereits eine Kollektoranlage in einen Teil der Dachfläche integriert.

Die mit Photovoltaikmodulen eingedeckte Dachfläche wurde bereits vor der Errichtung dieser Anlage (mit Dachziegeln bedeckt) als Aufwärmstrecke für die Zuluft der Heubelüftung genutzt. Die Installation einer hybriden PV-Anlage steigert nun den Aufheizungsprozess der Luft erheblich, was eine Verkürzung der Betriebszeit des Ventilators bewirkt.



Bild 1: Dach des Bauernhauses „Zaugg“ mit Solaranlagen

Die Anlage „Zaugg“ weist eine installierte elektrische Leistung von 15.8 kWp und eine thermische Spitzenleistung von ca. 80 kW auf. Die PV-Dachintegration wurde in Schindeltechnik als netzgekoppelte Anlage mit Modulwechselrichtern ausgeführt. Die Warmluft wird mittels eines Heubelüfters gewonnen. Der Ventilator saugt Außenluft durch den Kanal zwischen den PV-Dachschindeln und dem Unterdach an. Durch erzwungene Konvektion wird Wärme von den PV-Elementen an die Luft im Kanal abgegeben. Mit dem Heubelüfter wird die gewonnene Warmluft zur Heutrocknung weitergeleitet. Sollte der Ventilator nicht in Betrieb sein, ist die Hinterlüftung der PV-Elemente durch freie Konvektion gewährleistet (der Hinterlüftungskanal wurde entsprechend ausgelegt). Die Frischluftzufuhr erfolgt in diesem Fall über manuell zu öffnende Luken.

Das Fehlermelde- und -lokalisierungssystem der Modulwechselrichter erlaubt eine schnelle Fehlererkennung pro Panelreihe (Fehlermeldung mittels optischem Signal auf Elektrotableau). Eine Leuchtdiode am Inverter dient der Identifizierung des fehlerhaften Moduls bzw. Wechselrichters.

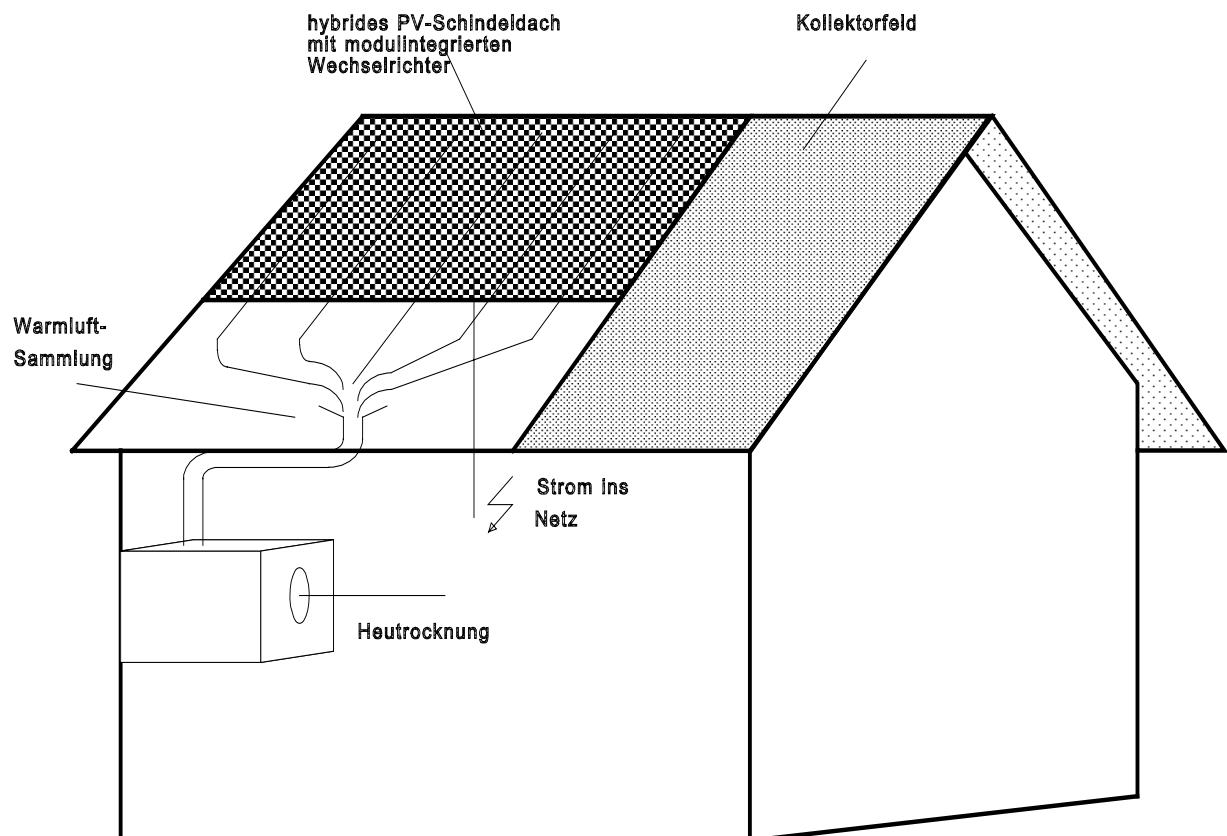


Abb. 1: Schematische Darstellung des Gebäudes mit hybrider Schindeldach-Integration mit modulintegrierten Invertern und Kollektorfeld

Anlagedaten:

Installierte Leistung:	15.8 kW _{el}	ca. 80 kW _{th}
Erwarteter Energieertrag:	13'700 kWh _{el}	ca. 10'400 kWh _{th} nutzbar

4 Messungen und Resultate

Die Messung des P&D-Objektes „Zaugg“ erfolgte nach dem Konzept des „mobilen Mess-Systems“ in zwei Messperioden, eine im Winter und eine im Sommer. Da es sich bei diesem Projekt um eine Anlage mit modulintegrierten Wechselrichtern – insgesamt 72 Stück – handelt, wird die Gesamtbeurteilung hauptsächlich aufgrund des durch Zählerablesung ermittelten Energieertrages und der dazugehörigen Performanz getätigt.

Um über das DC-Verhalten dennoch Aussagen machen zu können, wurde an drei WR in der Mitte des Daches, einer aus der untersten, einer in der mittleren und einer in der obersten Panelreihe, Abgriffe zu Messzwecken eingebaut. Es hat sich jedoch

gezeigt, dass diese DC-Werte nicht wie beabsichtigt auf die Gesamtanlage hochrechenbar sind, da die einzelnen Wechselrichter zu individuell arbeiten - insbesondere bei Teilbeschattung durch den Kamin oder durch Schnee - und sich daraus unrealistische Resultate ergeben. Aus diesem Grund wurde neben dieser Messung zusätzlich je zwei Wochen in Einzelkonfiguration gemessen. D.h. dass DC-Strom und DC-Spannung eines einzelnen Inverters sowie die dazugehörige AC-Leistung erfasst wurden. Dies ermöglichte bei dieser Anlage trotz der Verwendung von AC-Modulen eine normierte Auswertung des gemessenen Moduls (Nr. 4.5) mit integriertem Wechselrichter durchführen zu können. Die Messperioden mit dieser Konfiguration dauerten vom 3. bis 17. Februar sowie vom 15. bis 26. Juli 1999. Die Auswirkung der Heubelüftung wird aufgrund der gemessenen Lufttemperaturen im Hinterlüftungskanal sowie der Zelltemperaturen in den PV-Modulen sichtbar.

4.1 Normierte Auswertung

Die normierte Auswertung wurde aufgrund der gemessenen Modulleistung von 205 Wp erstellt (siehe 4.1.4 Feld-Leistung).

4.1.1 Übersicht

In der Übersichtstabelle 02/99 fällt auf, dass ein durchschnittlicher Anlagenausfall von 1% erscheint. Dies bedeutet, dass der gemessene WR in diesen Fällen trotz Einstrahlungen von mind. 120 W/m² weniger als 5% Leistung ins Netz abgegeben hat, was auf ein zögerliches Einschaltverhalten der WR bei niedrigen Einstrahlungen hinweist.

4.1.2 Elektrischer Ertrag

Die Ertragsgrafiken geben Auskunft über die Erträge und die Verluste der Anlage. Hierbei fallen die vereinzelt gross ausfallenden Generatorverluste während der Sommermessperiode auf. Dies liegt an der teilweise unbefriedigenden Hinterlüftungssituation während der Heubelüftungsphase: Da die Heubelüftung feuchtigkeit gesteuert ein- bzw. ausschaltet, entstehen zwischen den Lüftungsintervallen Pausen, in denen die freie Konvektion hinter den PV-Modulen nicht gewährleistet ist (z.B. am 17. Juli), da die Zuluftluken geschlossen bleiben. Dadurch erwärmen sich einerseits die PV-Module stark, andererseits reicht aber auch die Kühlung der Mini-WR im Hinterlüftungskanal nicht mehr aus, weshalb Leistung ausgeregelt wird (siehe 4.1.4 Feld-Leistung).

4.1.3 Performanz

Die gemessene Performanz (PR) des AC-Moduls Nr. 4.5 lag im Winter bei 71% und im Sommer bei 62%. Hier muss berücksichtigt werden, dass die aktive Hinterlüftung in der 12-tägigen Sommermessperiode an 6 Tagen teilweise in Betrieb war, was die PR positiv beeinflusst, andererseits treten im Hinterlüftungskanal wegen geschlossener Zuluftluken hohe Temperaturen auf, die eine Leistungsabsregelung des Mini-WR bewirken, was die PR wiederum vermindert.

Vergleicht man die Performanzen zweier sonniger Tage, einen ohne Zwangshinterlüftung, den anderen mit, so findet man Performanzen von 57% (17.7.99) bzw. 66% (24.7.99). Diese grosse Differenz ist etwa zur Hälfte auf erhöhte Generatorverluste zurückzuführen (siehe Anhang 3.4). Die zweite Hälfte entsteht durch die Leistungsabsregelung des Mini-WR (siehe 4.1.4 Feld-Leistung).

4.1.4 Feld-Leistung

Die Feldleistungsgrafik der Sommermessung zeigt die temperaturkompensierte DC-Leistungsgerade. Es ist ersichtlich, dass insbesondere im oberen Leistungsbereich die Messwerte wesentlich von der Sollgerade abweichen. Dies ist die Folge von übertemperaturbedingter Leistungsausregelung der Wechselrichter. Die separate Betrachtung der Feldleistungskennlinien ohne bzw. mit eingeschalteter Heubelüftung veranschaulicht dies deutlich (siehe auch Anhang 3.5). In Fig. 1 und Fig. 2 sieht man, dass bei aktiver Hinterlüftung bzw. bei Modultemperaturen $< 60^{\circ}\text{C}$ eine lineare Leistungsgerade entsteht, die allerdings mit einer relativ grossen Streuung behaftet ist. Die effektive Arbeitsgerade des WR weicht also wesentlich von der Sollgerade ab (siehe auch 4.2.1 Elektrischer Ertrag).

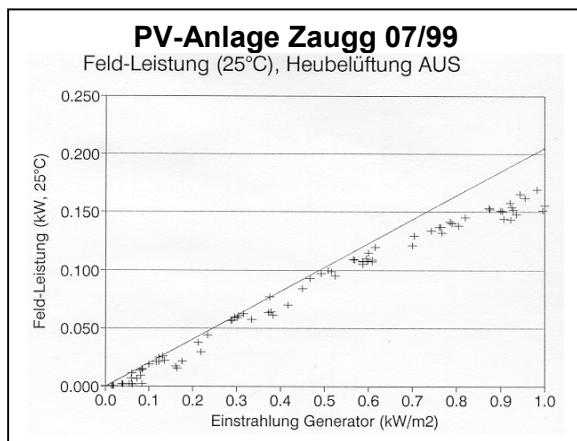


Fig. 1: Feldleistungskennlinie bei ausgeschalteter Heubelüftung

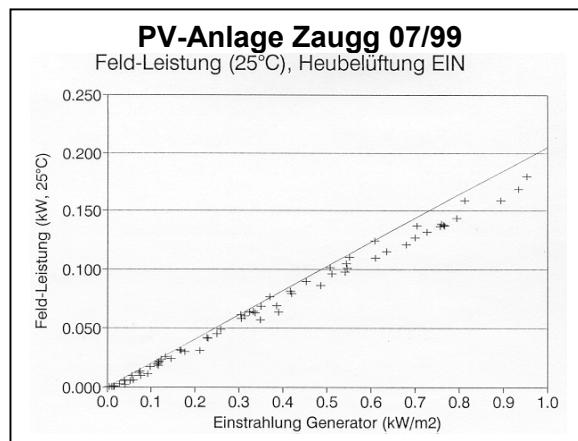


Fig. 2: Feldleistungskennlinie bei eingeschalteter Heubelüftung

4.1.5 Feld-Spannung

Auch in den Feldspannungsgrafiken des Moduls Nr. 4.5 ist der Einfluss der Leistungsausregelung des WR sichtbar: Während im Winter die Messpunkte in der Nähe des Sollwertes von 50V bei 25°C liegen, pendelt sich im Sommer bei hohen Temperaturen (z.B. 65°C) ein Wert von 46V ein, welcher deutlich über dem theoretischen MPP-Wert von 40V liegt.

4.1.6 Feld-Wirkungsgrad

Der Feld-Wirkungsgrad zeigt im Winter ein gewohntes Bild und liegt dort durchschnittlich bei ca. 10%. Im Sommer hingegen nimmt der Feldwirkungsgrad ab Modultemperaturen von knapp 60°C stark ab (siehe Anhang 3.5). Fokussiert man auch hier wieder auf die Tage mit eingeschalteter Heubelüftung, zeigt sich ein ganz anderer Feldwirkungsgradverlauf. Der Durchschnitt beträgt jetzt etwa 9.5%.

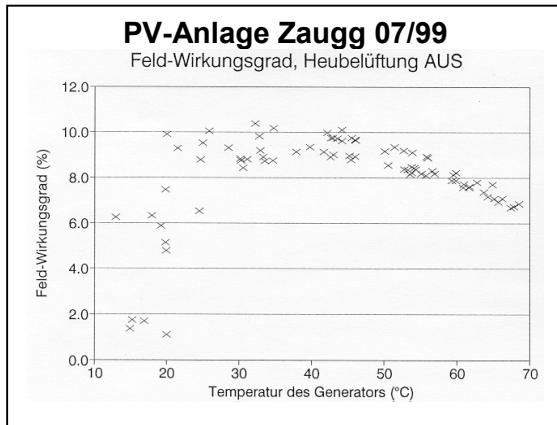


Fig. 3: Feld-Wirkungsgradiagramm bei ausgeschalteter Heubelüftung

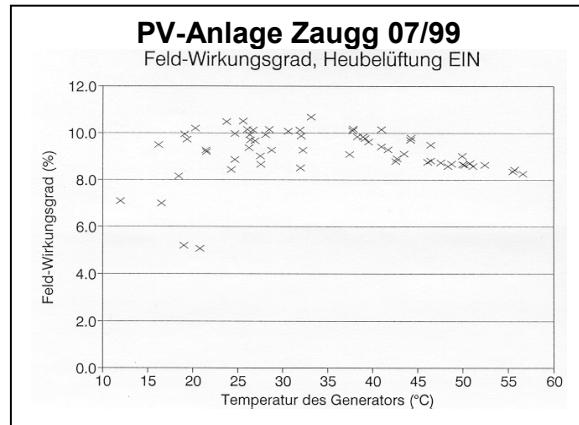


Fig. 4: Feld-Wirkungsgradiagramm bei eingeschalteter Heubelüftung

4.1.7 WR-Wirkungsgrad

Auf den Wechselrichterwirkungsgrad kann im Rahmen dieser Arbeit in quantitativer Hinsicht nur bedingt eingegangen werden. Da das „mobile Mess-System“ für Anlagen ab 1kWp konzipiert ist, konnte hier eine Genauigkeit von $\pm 9\%$ nicht unterschritten werden (siehe Anhang 3.6). Der Wechselrichterwirkungsgrad liegt in den Grafiken bei 80% ($\pm 9\%$). Der spezifizierte Wert von 86% liegt innerhalb des Toleranzbereiches.

Der qualitative Wirkungsgradverlauf wird jedoch gut sichtbar. Er entspricht dem heutigen Stand der Technik.

4.1.8 Histogramm WR-Leistung

Das Histogramm zeigt den Jahreszeiten entsprechende Häufigkeiten der Wechselrichterleistungen. In beiden Grafiken ist die höchste erreichte Klasse die von 60% bis 65% der Anlagennennleistung.

4.2 Beurteilung der gesamten Anlage

4.2.1 Elektrischer Ertrag

Der elektrische Ertrag vom 21.12.98 bis 24.11.99 betrug 9772 kWh. Dies entspricht 74% des prognostizierten Ertrages (Berechnung siehe Anhang 4.1).

Betrachtet man im Feldleistungsdiagramm die effektive Leistungskennlinie so ergibt diese eine effektiv genutzte Nennleistung von ca. 190 Wp pro Modul. Daraus resultiert ein Minderertrag von rund 13% (siehe Anhang 4.3). Diese Verluste sind teilweise dem PV-Modul (Toleranz der Leistungsspezifikationen $\pm 10\%$), andernteils dem Power-Tracking des Mini-WR (MPP-Mismatch) zuzuschreiben. Letzterer beträgt mindestens 7% wie in Fig. 5 ersichtlich.

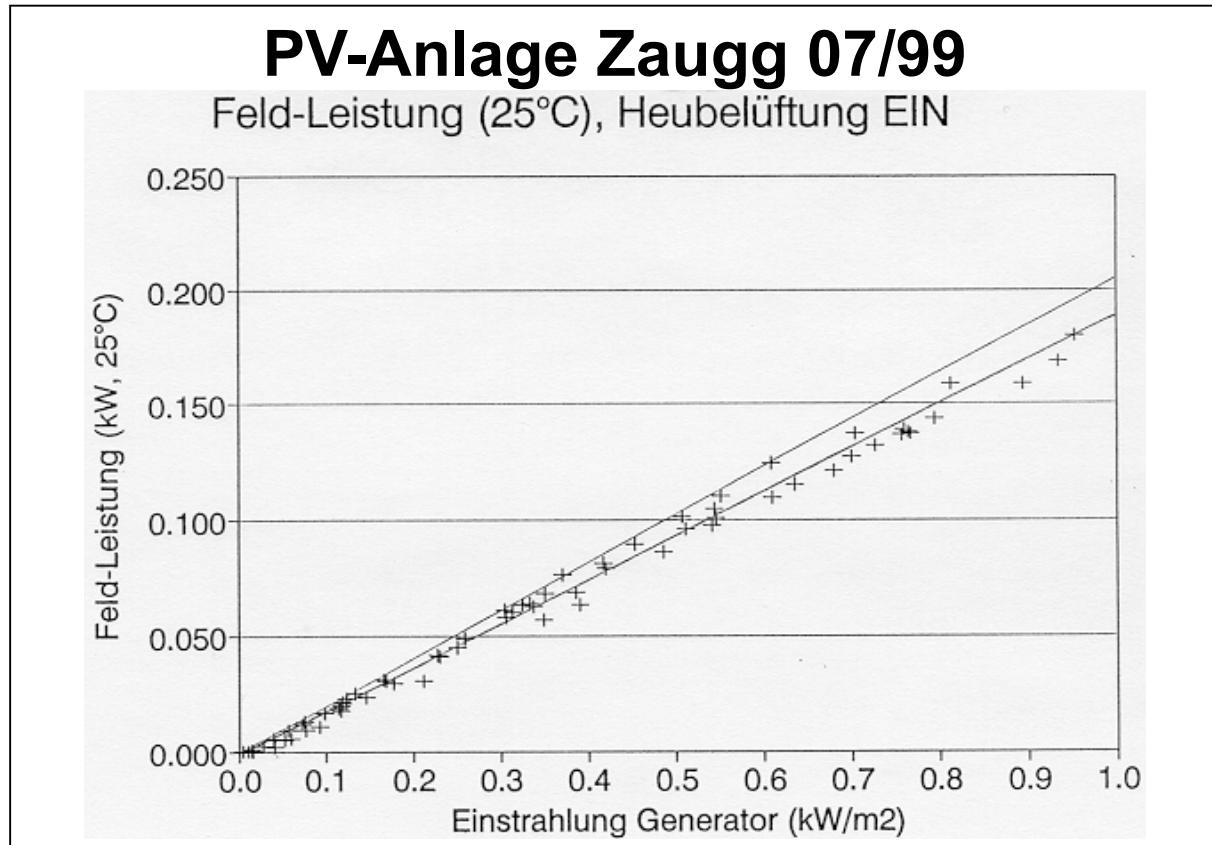


Fig.5: Maximale und effektive Feldleistungsgerade

Fig. 6 zeigt den zeitlichen Verlauf des Energieertrags pro Modulreihe und Tag nach Zählerablesung. Es fällt auf, dass in Reihe 2 ein permanenter Minderertrag erscheint, was auf einen nicht entdeckten, dauernden Ausfall eines WRs hindeutet.

In Reihe 4..8 sowie in Reihe 1 erscheinen je negative Einbrüche. Derjenige vom 15. Juli 99 (Reihe 4..8) erklärt sich dadurch, dass die dazugehörige Sicherung am Einspeisetableau aus nicht bekannten Gründen teilweise ausgeschaltet war. Dieser Ausfall wurde vom Autor selbst anlässlich der Inbetriebnahme der Sommermessung entdeckt und behoben. Reihe 1 wurde während einer Störungssuche zwischen 26. Juli und 4. Aug. 99 mehrfach manuell ausgeschaltet. Einzig die Reihe 3 lieferte über die gesamte Periode kontinuierlich Energie (wobei Abschaltungen der Gesamtanlage hier nicht detektiert werden können). Nimmt man diese als Referenz für den zu erwartenden Ertrag so ergibt dies 11'600 kWh bzw. 785 kWh/kWp p.a. (siehe Anhang 4.2). Dies entspricht 15% weniger als die Prognose und liegt somit im Bereich der anhand der effektiven Leistungskennlinie berechneten Verluste (siehe oben).

Der prognostizierte Jahresertrag wurde aus folgenden Gründen unterschritten:

- Ausgeschaltete Einspeisesicherung (11%)
- Verluste durch MPT der WR (7%)
- Minderleistung der PV-Module (6%)
- Sonstige Verluste (2%; nicht zuordenbar)

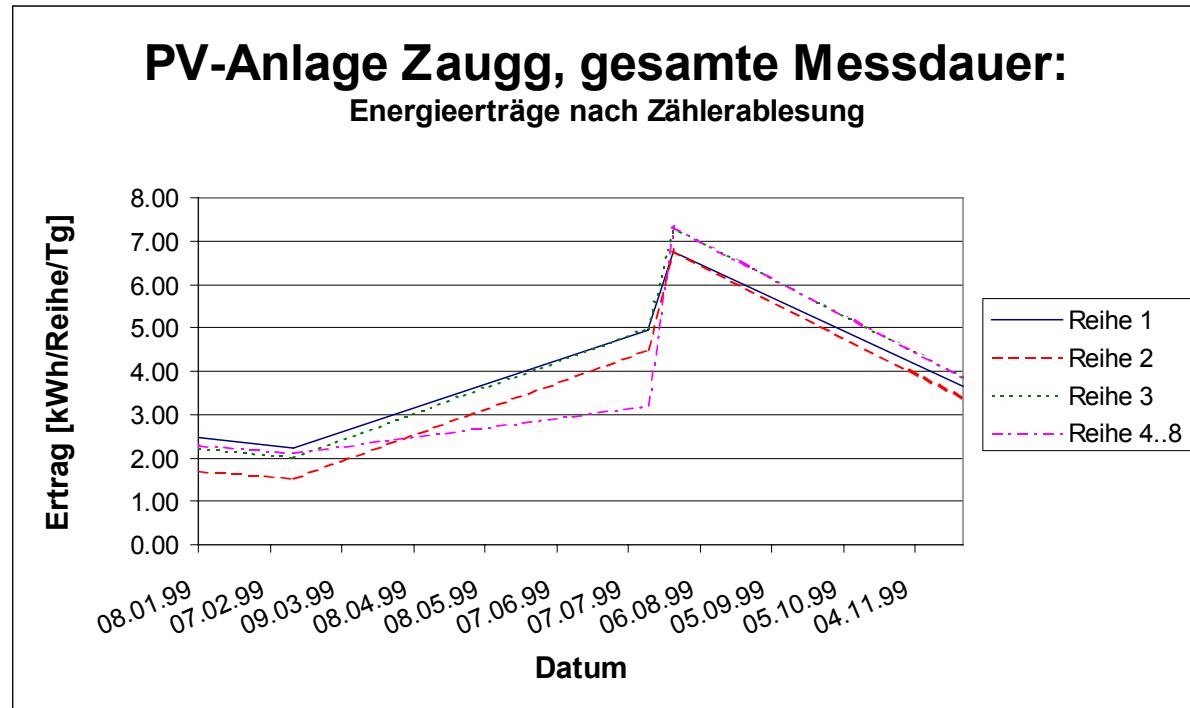


Fig. 6: Energieerträge nach Zählerablesung

4.2.2 Performanz

Die Performanz der Gesamtanlage fielen wie folgt aus:

PV-Anlage Zaugg		Performanz nach		Zählerablesung			
Periode	Yr []	Yf1 Pnsoll []	Yf2 Pneff []	Yf3 Reihe3 []	PR1 Pnsoll [%]	PR2 Pneff [%]	PR3 Reihe3 [%]
Winter 8.1. bis 17.2.99	1.85	1.04	1.11	1.10	56%	60%	60%
Sommer 15.7. bis 26.7.99	6.51	3.65	3.90	3.98	56%	60%	61%
26.7. bis 24.11.99	3.36	1.92	2.05	2.09	57%	61%	62%
Gesamt	3.12	1.77	1.89	1.93	57%	61%	62%

Pnsoll = 219 Wp

Pneff = 205 Wp

Tab. 1: Performanz nach Zählerablesung

PR1 zeigt die Werte bezogen auf die Anlagen-Nennleistung von 15.8 kWp bzw. 219 Wp pro Modul.

PR2 ist die effektive PR.

PR3 zeigt die zu erwartende PR anhand der Erträge der Reihe 3.

Es fällt auf, dass der PR Wert der Wintermessung wesentlich tiefer liegt als derjenige welcher bei der normierten Auswertung an WR Nr. 4.5 gemessen wurde. Ein möglicher Grund dafür sind Schneefälle im Januar bzw. schneebedeckte PV-Module, welche die PR im Januar vermindern und nicht auf die Einzelmessperiode im Februar einwirken.

Die Werte der Sommermessung hingegen korrespondieren mit der PR aus der Einzelmessung.

Aufgrund der Ergebnisse der dritten Messperiode vom 26.7. bis 24.11.99, die sowohl heisse Tage im August sowie kalte im November enthält, kann auf eine durchschnittlich zu erwartende Jahres-PR von 62% geschlossen werden.

4.3 Aktive Hinterlüftung

Wie unter 4.1.3 Performanz aufgeführt, verbessert die aktive Hinterlüftung (Heubelüftung) die Anlagenperformanz erheblich. Allerdings muss anhand der extrem hohen Temperaturen im Hinterlüftungskanal, die am Tag nach Beendigung der Heubelüftung am 26. Juli (siehe Anhang 5) auftraten, auf nicht geöffnete Zuluftschieber geschlossen werden. Der daraus resultierende Minderertrag beträgt in diesem Fall ca. 5% (im Vergleich zum 17. Juli). Ob die heute manuell funktionierenden Schieber aus diesem Grund motorisiert und automatisiert werden sollen, muss von der Bauernsfamilie entschieden werden.

4.4 Thermische Leistung und Ertrag

Die thermische Leistung wird anhand der Messwerte vom 24.7.99, 16h verifiziert, wo die grösste Temperaturdifferenz im Hinterlüftungskanal auftrat: Mit der aufgrund der Ventilatorspezifikationen berechneten Luftgeschwindigkeit im Hinterlüftungskanal von 2.4 m/s ergibt sich eine thermische Leistung von ca. 80 kW (siehe Anhang 6). Dass dies doppelt so viel als erwartet ist, röhrt vom sehr leistungsfähigen Gebläse mit einem Volumenstrom von 9.4 m³/s her.

Fig. 7 zeigt den Verlauf der Kanaltemperaturen bei aktiver Hinterlüftung. Da die Luft von oben nach unten angesaugt wird, kehrt sich das Temperaturgefälle im Luftkanal um, so dass oben die tiefste und unten die höchste Temperatur erscheint.

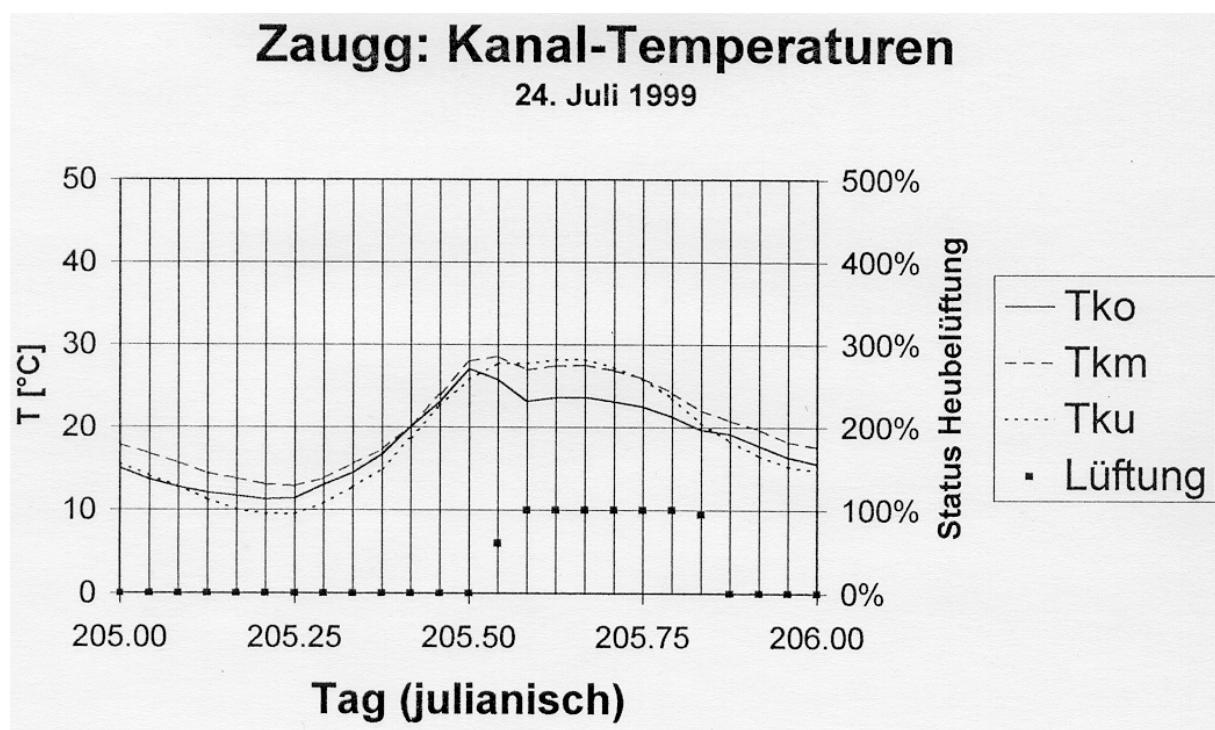


Fig. 7: Verlauf der Kanaltemperaturen am 24. Juli 1999

Der thermische Ertrag liegt bei rund zwei Dritteln des Erwarteten bei ca. 6'900 kWh p.a. Dies resultiert aus der begrenzten Nutzungsdauer der Heubelüftung. Die Vorerwärmung der Zuluft im Hinterlüftungskanal der PV-Anlage reduziert gemäss Erfahrung der Bauernsfamilie Zaugg die Heubelüftungszeit auf die Hälfte. Dies bedeutet, dass zusätzlich zur photovoltaisch gewonnenen Energie elektrische Energie eingespart wird. Bei einer jährlichen Laufzeit der Heubelüftung von ca. 86 h (vier Heubelüftungsperioden à 21.5 h) ergibt dies 645 kWh eingesparten Strom.

4.5 Thermisches Verhalten der Mini-WR

Wie unter 4.1.6 Feld-Wirkungsgrad gezeigt, regeln die modulintegrierten Mini-WR ab einer Modultemperatur von knapp 60°C Leistung aus. Liegen die Modultemperaturen unter 60°C zeigen sie eine lineare Leistungskennlinie (siehe 4.1.4 Feld-Leistung).

4.6 Erfahrungen mit reiner AC-Installation

Die Verwendung modulintegrierter Wechselrichter erübrigte eine DC-Installation. Beim Bau der Anlage Zaugg zeigte sich, dass dadurch die Kosten der AC-Installation nicht zunahmen. Es konnte so gut CHF 3'000.— oder 0.2 CHF/Wp eingespart werden.

Zusatzaufwendungen entstanden jedoch durch die Installation einer zentralen Fehlerüberwachung auf dem Elektrotableau, welche in der selben Grössenordnung lagen. Insgesamt entstand also kein Kostenvorteil, wohl jedoch eine komfortablere Situation der Anlagenüberwachung.

4.7 Schlussfolgerungen und Aussichten

Der Mini-WR eignet sich zum modulintegrierten Einsatz für PV-Anlagen mit einer maximalen Modultemperatur von 60°C. Diese wird bei einer Dachintegration im Sommer öfters überschritten, weshalb sich die Mini-WR für diese Anwendung ohne Zwangshinterlüftung nicht eignen. Denkbare zukünftige Einsatzgebiete sind Fassaden, Lärmschutzwände, frei aufgeständerte AC-Module oder Anlagen, bei denen der Mini-WR nicht auf das PV-Modul montiert wird.

Die MPT-Regelung des Mini-WR bedarf einer Verfeinerung bzw. Weiterentwicklung, da die MPT-Verluste gemessen am heutigen Stand der Technik relativ hoch ausfallen.

Die quantitative Überprüfung des Übertragungswirkungsgrades des Wechselrichters ist mit dem „mobilen Mess-System“ nicht durchführbar und bedarf einer separaten Messung mit dafür geeigneten Messgeräten.

Die hybride Nutzung der PV-Module ist sehr effizient und resultiert in 50% Energieeinsparung für das Heugebläse.

5 Abkürzungen und Symbole

5.1 Abkürzungen

PV	Photovoltaik
WR	Wechselrichter
PR	Performanz (Performance Ratio)
TK	Temperaturkoeffizient
STC	Standard Testing Conditions
AM	Air Mass
DC,dc	Gleichstrom
AC, ac	Wechselstrom
MPP	Maximum Power Point
MPT	Maximum Power Tracker

5.2 Symbole

U	Spannung
I	Strom
E	elektrische Energie
Q	thermische Energie
A	Querschnittsfläche
T	Temperatur
dT	Temperaturdifferenz

5.3 Indizes

el	elektrisch
th	thermisch
g	Generator
k	Kanal
o	oben
m	mitte
u	unten
amb	aussen (ambient)
n	nenn
eff	effektiv

6 Literatur

- [1] BEW Förderprogramm Photovoltaik, Normierte Datenauswertung von Photovoltaik-Netzverbundanlagen - Tagungsunterlagen, 17. Mai 1994
- [2] Kuchling, Taschenbuch der Physik, 8. Auflage, 1986
- [3] BEW, Stephan Gnos, Hanspeter Hochreutener, Atlantis Energie AG, Photovoltaik Schindeldach auf der Rigi, April 1995
- [4] CEC, 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, H.Haeberlin, ISB, Comparison of Pyranometer and Si-reference Cell solar Irradiation Data in long Term PV Plant Monitoring, 1995
- [5] BEW, Andreas Eckmanns, Beat Stucki, Atlantis Energie AG, Realisierung eines hybriden PV-Schindeldaches mit kombinierter, ganzjähriger Warmwasser-Vorerwärmung, 1998