

# Hoher Energieertrag auf Jungfrauoch: Die ersten fünf Betriebsjahre der netzgekoppelten 1,1kWp-Photovoltaikanlage der HTA Burgdorf

Prof. Dr. H. Häberlin und Ch. Renken

Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Burgdorf,

Labor für Photovoltaik, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf

Tel: +41 / 426 68 11, Fax: +41 / 34 426 68 13

e-mail: heinrich.haeberlin@isburg.ch (später heinrich.haeberlin@hta-bu.bfh.ch)

## 1. Einführung

Im Herbst 1993 wurde von der HTA Burgdorf (vormals ISB) auf dem Jungfrauoch (3454 m) eine kleine netzgekoppelte Photovoltaikanlage mit einer nominellen Solargeneratorleistung von 1,152 kWp errichtet. Diese Anlage konnte im Rahmen eines Auftrages des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) und des Wasser- und Energiewirtschaftsamtes (WEA) des Kantons Bern mit einer aufwendigen Messtechnik ausgerüstet werden, die präzise Messungen von Sonneneinstrahlung, Leistung auf der Gleich- und Wechselstromseite sowie Modul- und Umgebungstemperatur gestattet. In [1] wurde über den Aufbau dieser Anlage und die ersten Betriebsmonate ausführlich berichtet. Die Anlage Jungfrauoch arbeitet seit ihrer Inbetriebnahme Ende Oktober 1993 störungsfrei mit einer Verfügbarkeit von Energieproduktion und Messdaten von 100%.

## 2. Kurzübersicht über die PV-Anlage Jungfrauoch

Der Solargenerator der Anlage besteht aus 24 Modulen Siemens Solar M75 (48Wp) und besitzt eine nominelle Spitzenleistung von 1152 Wp bei STC. Er ist in zwei parallel geschaltete Arrays zu je 12 Modulen unterteilt, die vertikal an der Fassade der hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch montiert sind (siehe Bild 1). Die Ausrichtung des ersten Arrays weicht gegenüber der Südrichtung um  $12^\circ$ , die des zweiten Arrays um  $27^\circ$  gegen Westen ab, ist also nicht weit vom Optimum entfernt. Der vom Solargenerator erzeugte Gleichstrom wurde zunächst von einem Wechselrichter Top Class 1800 Grid in netzkonformen Wechselstrom umgewandelt. Im Juli 1996 wurde der Wechselrichter zur Steigerung des Energieertrags durch ein verbessertes Modell Top Class 2500/4 Grid III ersetzt. Aus dem gleichen Grund wurden im Juli 1996 auch die Strangdioden überbrückt. Weitere Details, spezielle Eigenschaften und Probleme der Anlage sind in [1] beschrieben.



**Bild 1:**

Ansicht des Solargenerators der Photovoltaikanlage der HTA Burgdorf an der Fassade der hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch (3454m) mit dem Restaurant Jungfrauoch im Hintergrund.

## 3. Betriebserfahrungen

Die Anlage überstand erfolgreich viele Stürme mit Windgeschwindigkeiten bis über 250 km/h und heftige Gewitter mit Naheinschlägen, die in anderen Experimenten in der Forschungsstation Schäden verursachten. Die hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen durch starke und schnelle Temperaturänderungen (z.B. totale Temperaturdifferenz Tag-Nacht bis zu  $70^\circ\text{C}$ ) konnten ihr ebenfalls nichts anhaben.

Auch der Wechselrichter hatte dank der relativ guten Netzverhältnisse (grosse Trafos in der Nähe) und dank dem aufwendigen Überspannungsschutz keine nennenswerten Probleme und funktionierte ausser ganz wenigen durch Spannungsschwankungen verursachten Kurzabschaltungen in den über 62 Monaten seit Inbetriebnahme der Anlage einwandfrei. Als einziges betriebliches Problem der Anlage treten ab und zu temporäre Reif- und Schneebedeckungen des Solargenerators auf.

#### 4. Energieproduktion

Für einen ersten Überblick über die Energieproduktion und allfällig aufgetretene betriebliche Probleme eignen sich *normierte Jahresstatistiken* sehr gut. Bei dieser Darstellung werden die normierten Grössen  $Y_r$  (Strahlungsertrag in Generatorebene in  $(\text{kWh}/\text{m}^2/\text{d})/(\text{kW}/\text{m}^2)$ ),  $Y_a$  (Generator-Ertrag auf der DC-Seite in  $\text{kWh}/\text{kWp}/\text{d}$ ) und  $Y_f$  (Endertrag auf der AC-Seite in  $\text{kWh}/\text{kWp}/\text{d}$ ) sowie die Performanz  $PR = Y_f / Y_r$  als durchschnittliche Tageswerte für jeden Monat angegeben [2]. Die Bilder 2 bis 6 zeigen die normierten Jahresstatistiken der Anlage Jungfrauoch für 1994 bis 1998.

Im Jahre **1994** erzielte die Anlage mit einem auf die nominelle Generatorleistung von 1,152 kWp bezogenen spezifischen Energieertrag von 1247  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung von 1,13 kWp gar 1272  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ) bereits einen Rekordwert für die Jahresproduktion, der von keiner anderen Anlage in der Schweiz übertroffen wurde. Der Energieertrag wurde in diesem Jahr durch teilweise Schneebedeckung des Generators im Frühling (April bis Juni) beeinträchtigt. Der Winterenergieanteil betrug in diesem Jahr 48,0%. Der Jahreswert der Performanz PR erreichte einen Wert von gegen 81,8% (siehe Bild 2).

Im Jahre **1995** stieg die Einstrahlung in die Generatorebene gegenüber dem Vorjahr deutlich an. Zudem war die Schneebedeckung im Frühling wesentlich geringer als 1994. Deshalb erhöhte sich 1995 die spezifische Energieproduktion auf 1377  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar auf 1404  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ). Trotz eines Anstiegs der Winterenergieproduktion in Vergleich zum Vorjahr sank der relative Winterenergieanteil wegen eines noch stärkeren Anstiegs der Sommerenergieproduktion auf 45,0%. Der Jahreswert der Performanz PR stieg auf 84,1% (siehe Bild 3).

Im Jahre **1996** erreichte die Anlage einen spezifischen Energieertrag von 1426  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1454  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ). Die in der Generatorebene gemessene Einstrahlung stieg gegenüber dem Vorjahr erneut leicht an. Die hohen Energieerträge sind sicher auch der in diesem Jahr sehr geringen Schneebedeckung im Frühling zu verdanken. Der Winterenergieanteil betrug in diesem Jahr 44,6%. Die Wirkung der im Juli 1996 durchgeführten Massnahmen zur Leistungssteigerung ist deutlich zu erkennen, liegen doch die PR-Werte ab August 1996 meist etwa 2% bis 3% höher als in vergleichbaren Monaten der Jahre 1994 und 1995. Der Jahreswert der Performanz PR erreichte einen Wert von 84,7% (siehe Bild 4).

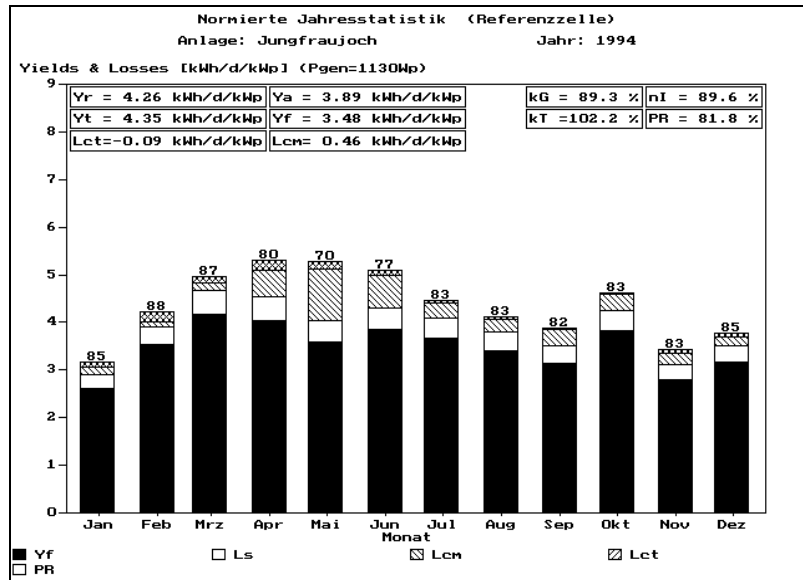
Im Jahre **1997** erzielte die Anlage mit einem spezifischen Energieertrag von 1476  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1504  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ) den bisherigen Rekordwert für die Produktion in einem Kalenderjahr. Die in der Generatorebene gemessene Einstrahlung stieg gegenüber dem Vorjahr erneut leicht an. Der Winterenergieanteil betrug in diesem Jahr 44,9%. Der Jahreswert der Performanz PR stieg auf 85,3% (siehe Bild 5).

Im Jahre **1998** war die Produktion der Anlage primär wegen geringerer Einstrahlung (gleich wie 1995!) wieder etwas geringer. Der Energieertrag betrug 1424  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1452  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ). In diesem Jahr war die Energieproduktion (vor allem in der zweiten Jahreshälfte) relativ gleichmässig. Es wurden sowohl beim Winterenergieanteil (48,5%) als auch beim Jahreswert der Performanz PR (87%) neue Rekordwerte erreicht (siehe Bild 6).

Im **Mittel über diese fünf Jahre** betrug die **Energieproduktion** 1390  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1417  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ). In der bisherigen Rekordperiode, der Zeit von März 1997 bis Feb. 1998, erreichte die jährliche Energieproduktion mit 1512  $\text{kWh}/\text{kWp}$  (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1541  $\text{kWh}/\text{kWp}$ ) den bisher höchsten Wert. Die Jahres-Performanz PR betrug in diesen 12 Monaten 85,2% und der Winterenergieanteil 46,2%.

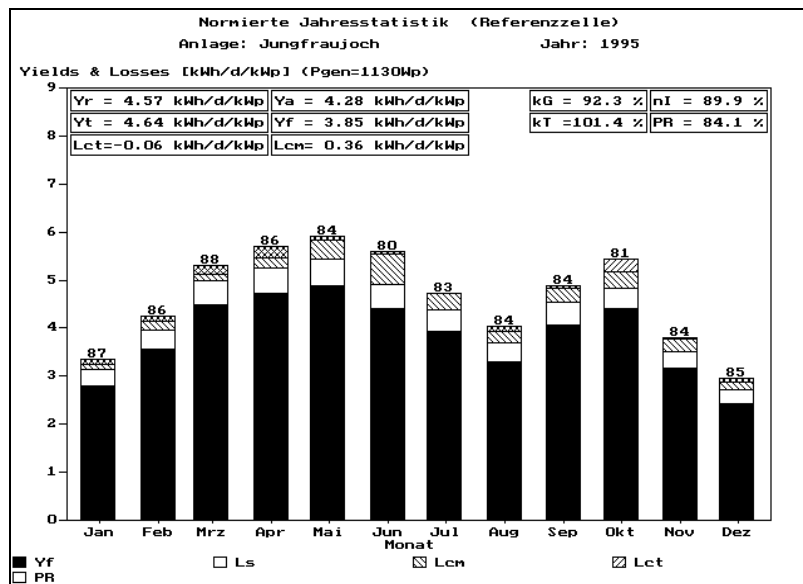
**Bild 2:**

Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfrauoch für 1994 .



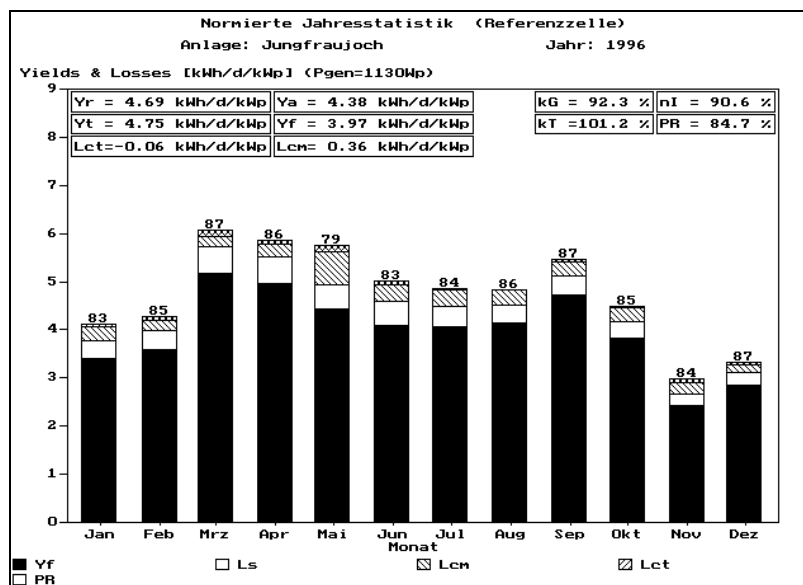
**Bild 3:**

Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfrauoch für 1995 .



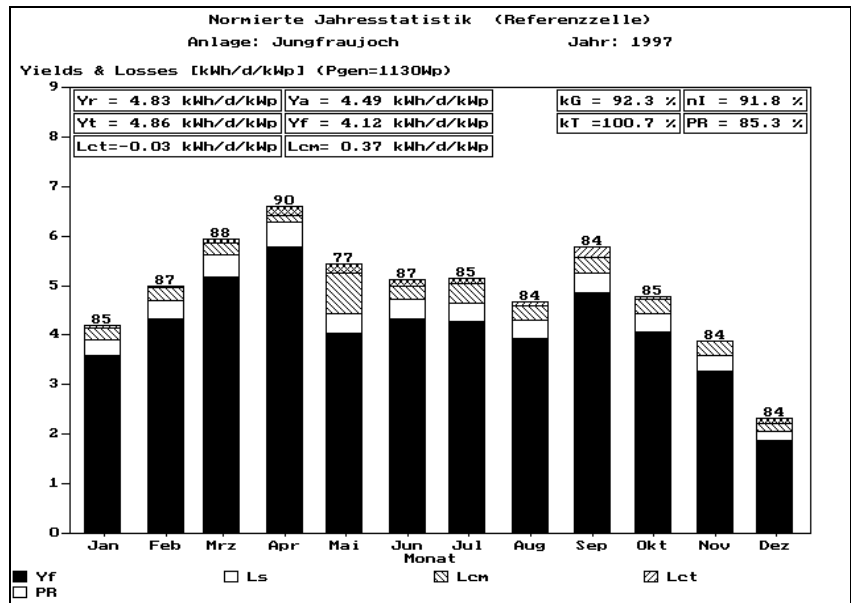
**Bild 4:**

Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfrauoch für 1996 .



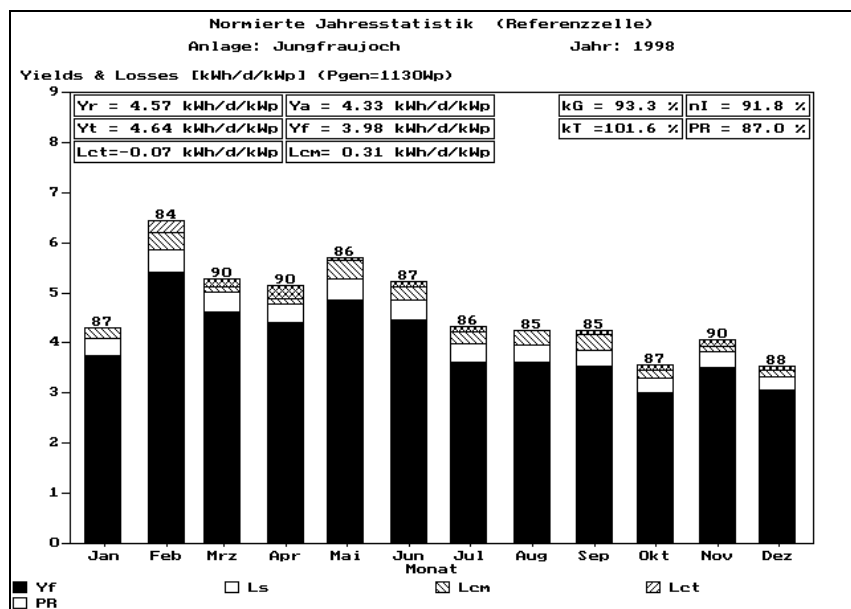
**Bild 5:**

Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfrauoch für 1997 .



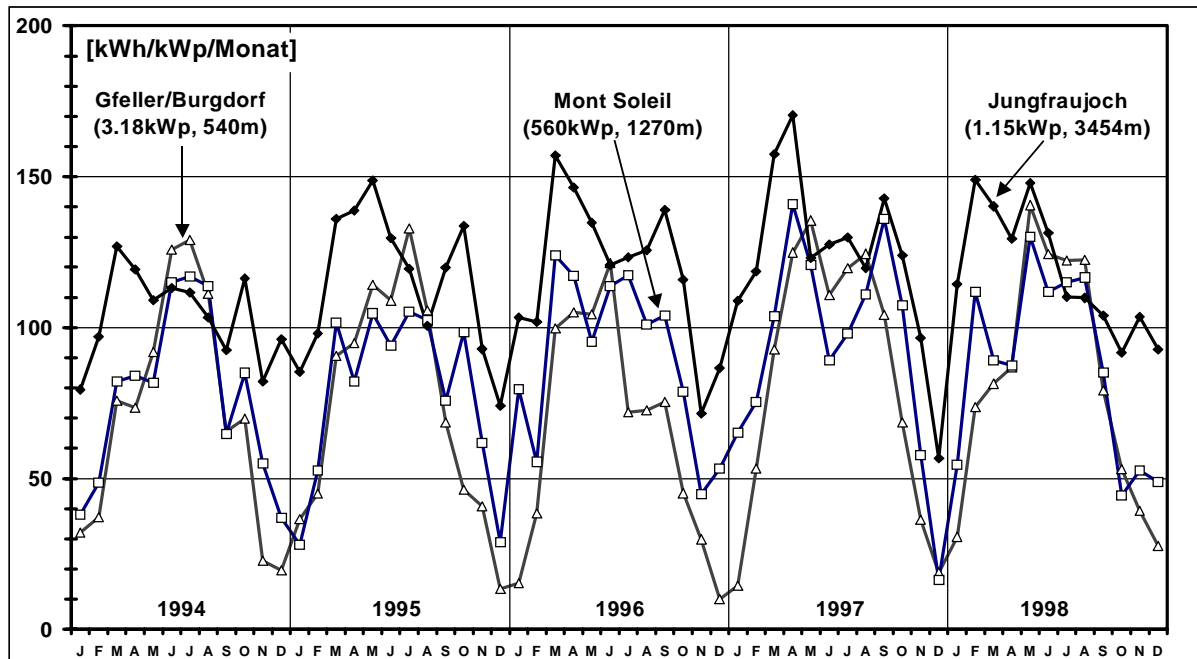
**Bild 6:**

Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfrauoch für 1998 .



## 5. Vergleich mit anderen Anlagen im Kanton Bern

Bild 7 zeigt die auf die nominelle Solargenerator-Spitzenleistung bezogene monatliche Energieproduktion in den Jahren 1994 bis 1998 bei einer Anlage in Burgdorf (3,18 kWp, 540m), der Anlage Mont Soleil (560 kWp, 1270m) und der Anlage Jungfrauoch (1,152 kWp, 3454m). Im Jahre 1996 war die Energieproduktion der Anlage in Burgdorf durch einen längeren Wechselrichter ausfall ziemlich stark beeinträchtigt. Bei der Anlage im Flachland tritt ein ausgeprägtes Sommermaximum und ein ebenso prominentes Winterminimum auf (Verhältnis nahezu 10:1) und der Winterenergieanteil liegt unter 30%. Bei der höher gelegenen Anlage Mont Soleil ist die Situation ähnlich, allerdings ist das Verhältnis zwischen Sommermaximum und Winterminimum viel weniger ausgeprägt und der Winterenergieanteil ist deutlich höher. Noch günstiger sind aber die Verhältnisse bei der Anlage Jungfrauoch. Die Jahresenergieproduktion ist wesentlich höher als bei den andern Anlagen, sie verläuft viel gleichmässiger, es treten pro Jahr meist zwei Produktionsmaxima auf, das Verhältnis zwischen Sommermaximum und Winterminimum beträgt nur noch etwa 2 und der Winterenergieanteil liegt zwischen 44,6% und 48,5%.



**Bild 7:**

Auf die nominelle Generatorleistung bezogene Energieproduktion der Anlagen Jungfrauoch (1,15kWp), Mont Soleil (560kWp) und Gfeller/Burgdorf (3,18kWp) in den Jahren 1994 - 1998.

## 6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die nun einige Jahre durchgeführten Messungen belegen, dass eine richtig dimensionierte hochalpine netzgekoppelte Photovoltaikanlage dank der heute stark verbesserten Wechselrichterqualität den erwarteten Jahres-Energieertrag (je nach Lage 1000 kWh/kWp bis über 1400 kWh/kWp) in der Praxis auch tatsächlich erreichen und unter günstigen Bedingungen sogar noch etwas übertreffen kann. Durch die im Juli 1996 durchgeführten Massnahmen zur Leistungssteigerung konnte die Jahres-Performanz der Anlage Jungfrauoch wie erwartet etwas gesteigert werden. Für hochalpine netzgekoppelte Photovoltaikanlagen eignen sich sonnenexponierte Fassaden von Gebäuden mit Netzanschluss besonders gut. Wenn die Unterkante des Solargenerators genügend hoch über dem Erdboden oder Dächern montiert wird (deutlich höher als die zu erwartende mittlere Schneehöhe), sind die Energieverluste infolge Schnee- und Reifbedeckung gering. Die von derartigen Anlagen produzierte Energie passt viel besser ins Lastprofil der Stromversorgung in der Schweiz als die Energie von PV-Anlagen im Mittelland. Dank der meist vor direkten Blitzeinschlägen geschützten Lage in der Fassade lassen sich die in den Alpen häufigen atmosphärischen Überspannungen mit geeigneten Schutzmassnahmen gut beherrschen.

## Verdankungen

Die in diesem Artikel verwendeten Daten wurden im Rahmen eines Langzeit-Messprojektes im Auftrag des PSEL (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft), des BFE (Bundesamt für Energie) und der IBB gewonnen. All diesen Institutionen gebührt Dank für ihre wertvolle Unterstützung.

## Literatur

- [1] H. Häberlin und Ch. Beutler: "Die netzgekoppelte Photovoltaikanlage der ISB auf dem Jungfrauoch". 10. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1995.
- [2] H. Häberlin, Ch. Beutler: "Analyse des Betriebsverhaltens von PV-Anlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung". 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie Staffelstein, 1996.