

## Die netzgekoppelte 1.1kWp-Fotovoltaik-Testanlage der ISB auf dem Jungfrauojch (3454m.ü.M.)

Dr. H. Häberlin und Chr. Beutler  
Ingenieurschule Burgdorf (ISB), Labor für Fotovoltaik  
Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf  
Tel: ++41 34 23 68 11, Fax: ++41 34 23 68 13

### 1. Einleitung

Mit dem Projekt Jungfrauojch werden folgende Ziele anvisiert:

- **Test von PV-Komponenten:** Der Betrieb im Hochgebirge ist ein Hätetest für sämtliche Komponenten (Sonneneinstrahlungsspitzen von über  $1.5\text{kW/m}^2$ , heftige Stürme und Gewitter, grosse Temperaturdifferenzen).
- Experimentelle **Ermittlung des Energieertrages** einer hochalpinen Anlage.
- **Maximale Verfügbarkeit** von Energieertrag und Messtechnik.

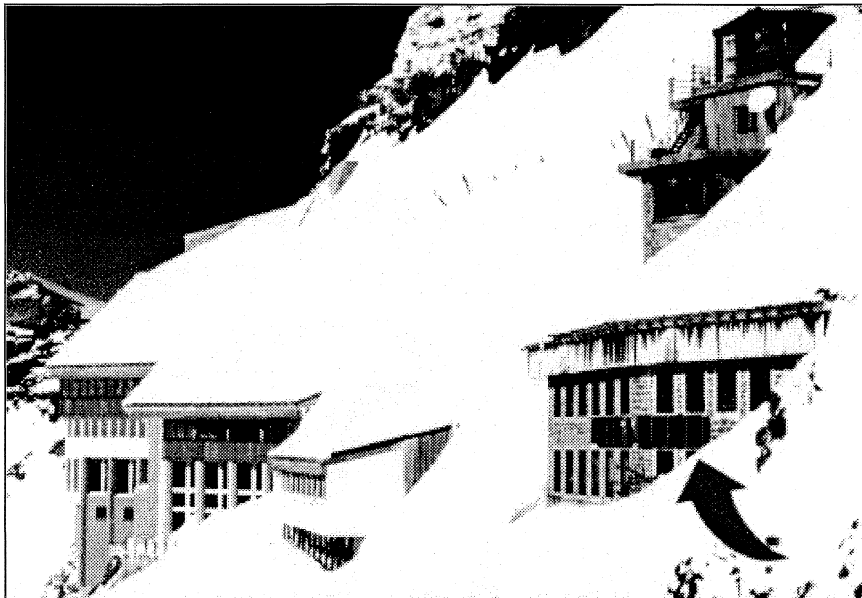


Bild 1: Flugaufnahme der PV-Anlage Jungfrauojch (Foto Siemens)

Die Testanlage der ISB auf dem Jungfrauojch - höchstgelegene netzgekoppelte PV-Anlage der Welt - wurde im Oktober 1993 gebaut und in Betrieb genommen. Sie arbeitet seither einwandfrei, d.h. ohne Betriebsunterbrüche und mit einer Verfügbarkeit der Messdaten von 100%. Die Messdaten haben bereits viele interessante Betriebsauswertungen ermöglicht.

Nachfolgend wird auf einige ausgewählte Erkenntnisse, Resultate und Auswertungen eingegangen.

## 2. Härtetest

Um bei einer hochalpinen PV-Anlage eine möglichst **hohe Zuverlässigkeit** zu erreichen, werden besondere Anforderungen an die verwendeten Komponenten und das Systemdesign gestellt. Unter das Systemdesign fallen z.B. der Blitz- und Überspannungsschutz, aber auch die mechanische Konstruktion.

Die Anlage hat im ersten Betriebsjahr allen Belastungen standgehalten: Tagelange **Stürme mit Windgeschwindigkeiten bis über 200km/h**, heftige **Gewitter**, sehr hohe **Sonneneinstrahlungsspitzen** (bis  $1660\text{W/m}^2$ ) und hohe mechanische Beanspruchung durch **grosse Temperaturdifferenzen** (z.B. Abkühlen der Solarzellen bei Sonnenuntergang: Temperaturdifferenz  $\approx 40^\circ\text{C}$  innerhalb 30 Minuten; totale Temperaturdifferenz Nacht-Tag: bis zu  $70^\circ\text{C}$ ). Auch der **Wechselrichter** hat den Belastungen standgehalten, es wurde nebst zwei Kurzausfällen ( $< 10\text{s}$ ) kein Problem festgestellt.

Das einzige ernsthaftere Problem der Anlage war die **grosse Schneemenge** im Winter 1993/94. Bereits im Spätherbst war die Schneehöhe überdurchschnittlich und im Frühling wurde eine **Hälfte des Generators** im Verlaufe eines Föhnsturmes grösstenteils **eingeschneit** (Schneehöhe 2-3m). Diese Lage führte dann natürlich zu recht grossen Energieeinbussen, da die Wetterlage erst später ein Freischaufeln erlaubte. Im Verlaufe des Jahres wurde zudem der Generator an einzelnen Tagen - jeweils nach Föhnstürmen bei ungünstiger Umgebungstemperatur - mit einer **Reifschicht** bedeckt. Diese Schicht schmolz aber stets nach ein paar Stunden Sonnenschein von selbst weg.

## 3. Messtechnik

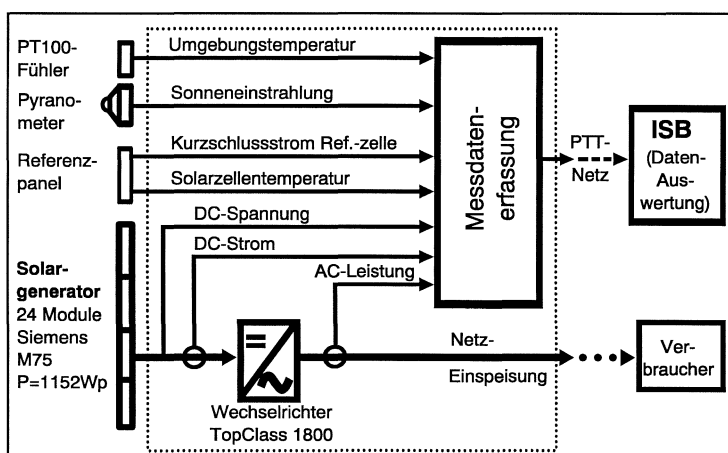


Bild 2: Blockschaubild der PV-Anlage Jungfrauojoch

Auch die Messtechnik arbeitete im ersten Jahr sehr zuverlässig. Es wurde eine **Verfügbarkeit von 100%** erreicht, d.h. es sind **keine Datenverluste** zu beklagen.

Zwei Geräte verursachten Probleme: Die Netzgeräte der **Pyranometerbeheizung** mussten, da sie nicht den Hersteller-Spezifikationen entsprachen und bereits nach einem Monat ausfielen, durch eigene Geräte ersetzt

werden. Durch den Ausfall der Heizungen waren die Pyranometer dann an einigen Tagen ein paar Stunden schneebedeckt. Daneben trat im Februar bei einem **Wirkleistungs-Messumformer** plötzlich ein Messfehler

von ca. 2% auf (Dieser Fehler konnte dank redundanter Energiemessung bestimmt und in den Daten korrigiert werden). Dieser Messumformer wurde dann durch ein neues Exemplar ersetzt und vom Hersteller neu kalibriert. Ein weiteres Problem bereiteten grosse Eiszapfen, die vom Dach zeitweise bis vor die Strahlungssensoren hinab wuchsen. Dadurch ergaben sich an einigen Tagen leichte Beeinträchtigungen der Strahlungsmessung und der Energieproduktion.

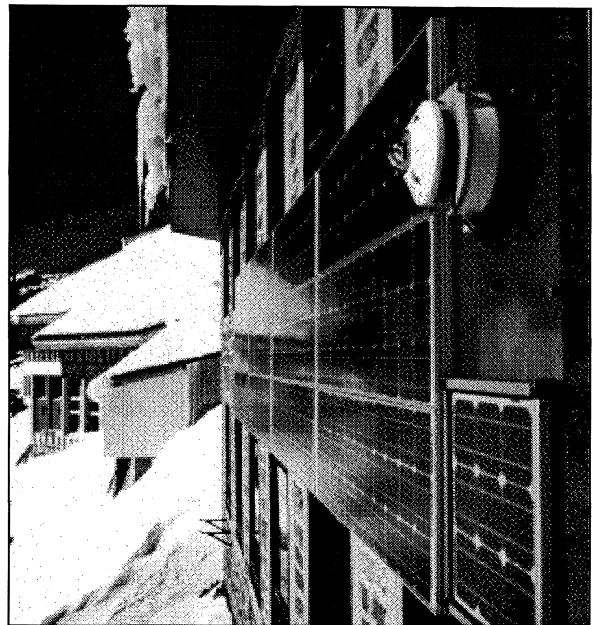


Bild 3: Ansicht der einen Hälfte des Generators und der Sonneneinstrahlungssensoren (Pyranometer und Referenzzelle).

#### 4. Energieproduktion 1994

Mit einem **Endertrag von 1247kWh/kWp** (bezogen auf die nominelle Generatorleistung) wurden die Erwartungen erfüllt. Bezogen auf die effektive Generatorleistung von etwa 1.13kW bei STC betrug die Energieproduktion sogar 1272kWh/kWp, was ein **Performance Ratio von 82%** ergibt. Wenn dabei berücksichtigt wird, dass in dieser Zeitspanne die Einstrahlungssumme ca. 7% unter dem langjährigen Mittel lag, könnte in einem Normaljahr ein Endertrag von ca. 1340 resp. 1367kWh/kWp erreicht werden. Ferner könnte der Ertrag durch **Vermeidung von Schneebedeckung** und Verändern der Generatorneigung noch weiter gesteigert werden.

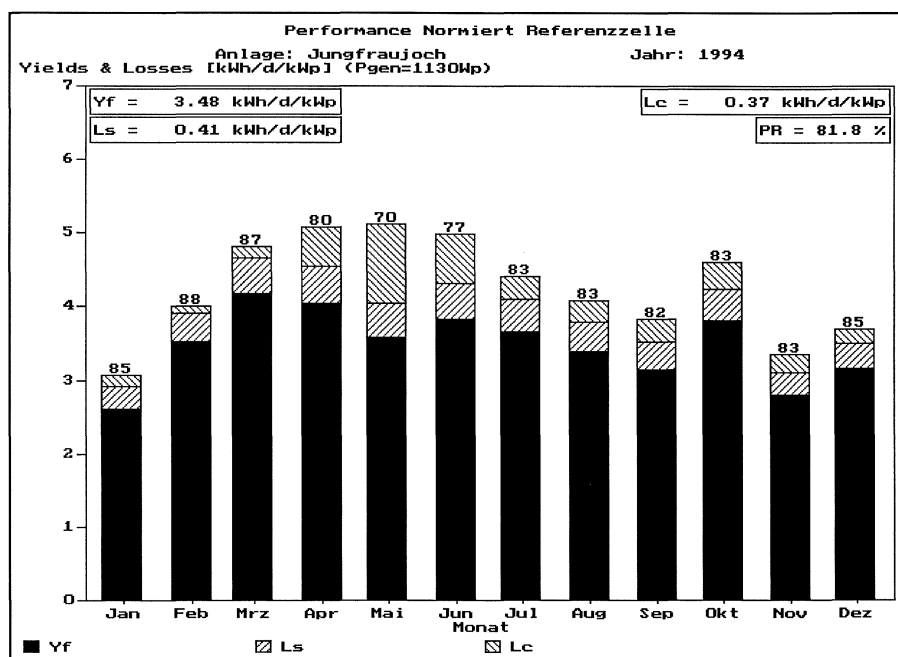


Bild 4: Normierte Jahresstatistik von 1994 der Anlage Jungfrauoch bezogen auf die effektive Solargeneratorleistung von 1.13kWp

Sehr interessant ist auch der Vergleich zwischen Sommer- und Winterenergie: Die Voraussage, dass rund die Hälfte der Jahresenergie im **Winter** erzeugt wird, konnte mit einem **Anteil von 48.0%** bestätigt werden.

Bild 4 zeigt die normierte Jahresstatistik mit Monatswerten von Endertrag Yf, Systemverlusten Ls, Feldverlusten Lc und Performance Ratio PR.

## 5. Vergleich mit anderen Anlagen im Kanton Bern

Durch die normierten Auswertungen ist ein direkter Vergleich verschiedener Anlagen sehr einfach möglich geworden. Der Vergleich der Anlage Jungfrauoch mit einer **Anlage in Burgdorf (3kWp)** und der Anlage auf dem **Mont Soleil (560kWp)** ist sehr aussagekräftig (s. untenstehende Grafik).

Auffallend sind in dieser Grafik die verschiedenen Verteilungen des Ertrages über die einzelnen Monate: Bei den Anlagen in Burgdorf und auf dem Mont Soleil liegt das Schwergewicht beim Sommerertrag, bei der Anlage Jungfrauoch ist der Ertrag relativ regelmässig verteilt.

Die Jahressumme zeigt einen um **46% höheren Ertrag der Anlage Jungfrauoch bezüglich der Anlage in Burgdorf!** Auch der Ertrag von Mont Soleil wurde um 35% übertroffen.

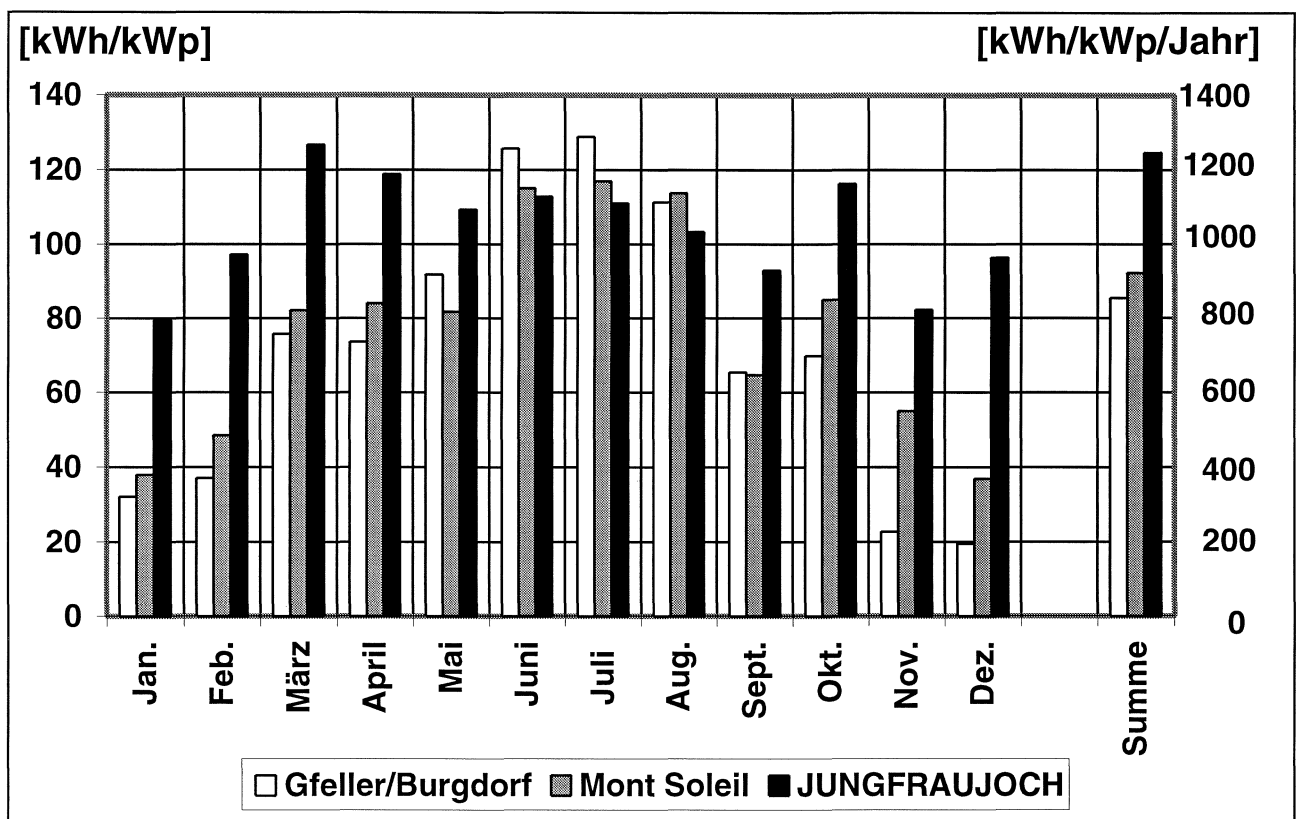


Bild 5: Vergleich des auf die nominelle Solargenerator-Nennleistung bezogenen Energieertrages einer 3.18kWp-Anlage in Burgdorf (540m.ü.M.), einer 560kWp-Anlage auf dem Mont Soleil (1270m.ü.M.) und der 1.152kWp-Anlage Jungfrauoch (3454m.ü.M.).

## 6. Ausblick

- Die **Energieproduktion** sollte durch die Vermeidung von Schneebedeckung weiter **gesteigert** werden können.
- Mit Hilfe **neuer (normierter) Auswertungen** soll das Betriebsverhalten der Anlage noch detaillierter analysiert werden.
- Der Ertrag soll mit Resultaten von **Simulationsprogrammen** verglichen werden. Dadurch können die Simulationen für alpine Anlagen verbessert werden.

## Verdankungen

Die PV-Anlage auf dem Jungfrauoch konnte nur dank Spenden und Beiträgen verschiedener Firmen und Institutionen erstellt werden, nämlich der Siemens Albis AG (Solargeneratoren), des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke VSE, der Bahnen der Jungfrauregion und der Fabrimex Solar AG (Wechselrichter). Die Entwicklung und Beschaffung der Messtechnik erfolgte im Rahmen eines vom Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) und vom Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (WEA) finanzierten Messprojektes. All diesen Firmen und Institutionen sei an dieser Stelle für ihre wertvolle Unterstützung herzlich gedankt. Dank gebührt auch der Internationalen Stiftung Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch, welche die Montage des Solargenerators an der Fassade ihres Gebäudes gestattet hat und unter ihrem Dach den Wechselrichter und die Messapparaturen beherbergt. Schliesslich danken wir auch der Elektrowatt Ingenieurunternehmung (EWI), welche die Daten der Anlage Mont Soleil zur Verfügung gestellt hat.

## Literatur

- [1] H. Häberlin: Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz. *AT-Verlag, Aarau, 1991*
- [2] H. Häberlin, C. Beutler and S. Oberli: "Yield and Reliability of Grid-connected PV-Systems at different Locations in the Canton of Berne (Switzerland)", *Proc. 12th EU PV Conference, Amsterdam 1994.*
- [3] H. Häberlin, C. Beutler und S. Oberli: "Hohe Leistung auch im Winter", *Sonnenenergie & Wärmetechnik 4/94.*
- [4] H. Häberlin, C. Beutler und S. Oberli: "Die netzgekoppelte 1,1kW-Fotovoltaikanlage der Ingenieurschule Burgdorf auf dem Jungfrauoch", *SEV-Bulletin 10/94.*
- [5] H. Häberlin, R. Minkner: "Einfache Methode zum Blitzschutz von Photovoltaikanlagen". *SEV-Bulletin 19/94.*