

# Langzeiterfahrungen mit zwei hochalpinen Photovoltaikanlagen

Prof. Dr. Heinrich Häberlin

Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Informatik (HTI)

Fachbereich EKT, Photovoltaik-Labor, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ



Tel: +41 34 426 68 11, Fax: +41 34 426 68 13, [www.pvtest.ch](http://www.pvtest.ch), e-Mail [heinrich.haerberlin@bfh.ch](mailto:heinrich.haerberlin@bfh.ch)

## 1. Einführung

Neben Wechselrichtertests führt die HTI (vormals HTA resp. ISB) auch seit 1992 Langzeitmessungen an vielen netzgekoppelten Photovoltaikanlagen durch. Seit 1992 resp. 1993 werden auch Daten von zwei hochalpinen Fassaden-Anlagen erfasst, nämlich der Anlage Birg (4,134 kWp, 2670 m ü.M.) und Jungfrauoch (Nennleistung 1,152 kWp, effektive Leistung 1,13 kWp, 3454 m ü.M.). Nach lückenlosen Messungen über mehr als 12 resp. 11 Jahre liegen nun auch seriöse Langzeit-Messdaten vor, die belegen, dass derartige Anlagen nicht nur kurzfristig, sondern auch im langjährigen Mittel sehr hohe Energieerträge aufweisen und dass solche PV-Anlagen das hochalpine Klima auch langfristig sehr gut ertragen. Bei hochalpinen Fassadenanlagen treten typischerweise zwei Produktions-Maxima pro Jahr auf, nämlich ein Hauptmaximum im Frühling und ein Nebenmaximum im Herbst.

## 2. Kurze Übersicht über die beiden Anlagen

Bei beiden Anlagen ist der Solargenerator vertikal an der Fassade montiert und es wird die Einstrahlung in die Generatorebene, die Umgebungs- und die Solarmodultemperatur, die Spannung und der Strom auf der Gleichstromseite, die ins Netz eingespeiste Leistung sowie die Netzspannung gemessen. Diese Werte werden alle 2 Sekunden abgetastet und in einem Datenlogger CR10 gespeichert. Aus diesen Werten werden 5-Minuten-Mittelwerte gebildet, welche jeweils in der Nacht ans Photovoltaiklabor übermittelt werden (weitere Details siehe [1] und [2] oder unter [www.pvtest.ch](http://www.pvtest.ch)).

<p><b>Jungfrauoch (1,152 kWp, 3454 m ü.M.):</b>                  2 Teilgeneratoren zu je 12 Modulen M75 (48 Wp), West-Abweichung von Süden <math>\gamma = 12^\circ</math> resp. <math>27^\circ</math>.                  STC-Nennleistung: 1152 Wp, (effektiv 1130 Wp).                  WR: bis Juli 1996 Top Class 1800, dann Top Class 2500/4 Grid III.</p>	<p><b>Birg (4,134 kWp, 2670 m ü.M.):</b>                  PV-Generator: 78 Module M55 (53Wp) mit <math>\gamma = 5^\circ</math>.                  STC-Nennleistung: 4134 Wp.                  WR: SOLCON 3400 bis Jan. 2003, dann Top Class 4000 Grid III. PV-Generator bezüglich WR etwas überdimensioniert!</p>
	
<p><b>Bild 1:</b>                  Blick auf eine Hälfte des PV-Generators der Anlage an der Fassade der hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch (3454m) mit beheiztem Pyranometer und Referenzzelle.</p>	<p><b>Bild 2:</b>                  PV-Generator der Anlage Birg an der Fassade der Zwischenstation Birg der Schilthornbahn (2670m). Rechts gerade noch sichtbar: Pyranometer und Umgebungstemperatur-Sensor.</p>

### 3. Normierte Ertragsdarstellung zum fairen Vergleich verschiedener Anlagen

Um die Leistung von PV-Anlagen verschiedener Grösse und an verschiedenen Orten miteinander vergleichen zu können, sind normierte Grössen sehr nützlich. Wird die Energieproduktion in einem gegebenen Zeitraum (Monat, Jahr) durch die nominelle PV-Generator-Spitzenleistung bei STC dividiert (bei Jungfrauoch 1,152 kWp, bei Birg 4,134 kWp), erhält man den Generatorertrag  $Y_a$  (DC) und den Endertrag  $Y_f$  (AC). Den Strahlungsertrag  $Y_r$  erhält man, indem die in der gleichen Periode gemessene Strahlungssumme in die Ebene des PV-Generators durch  $1 \text{ kW/m}^2$  dividiert wird (mit Pyranometer gemessen). Wenn die Generatortemperatur gemessen wird, kann damit auch der temperaturkorrigierte Strahlungsertrag  $Y_T$  berechnet werden, indem die temperaturbedingte Reduktion des Wirkungsgrades der Solarmodule berücksichtigt wird (Details siehe [3]). Durch Verwendung durchschnittlicher Tageswerte kann zudem der Einfluss der verschiedenen Monatslängen eliminiert werden.

## 4. Anlage Jungfrauoch

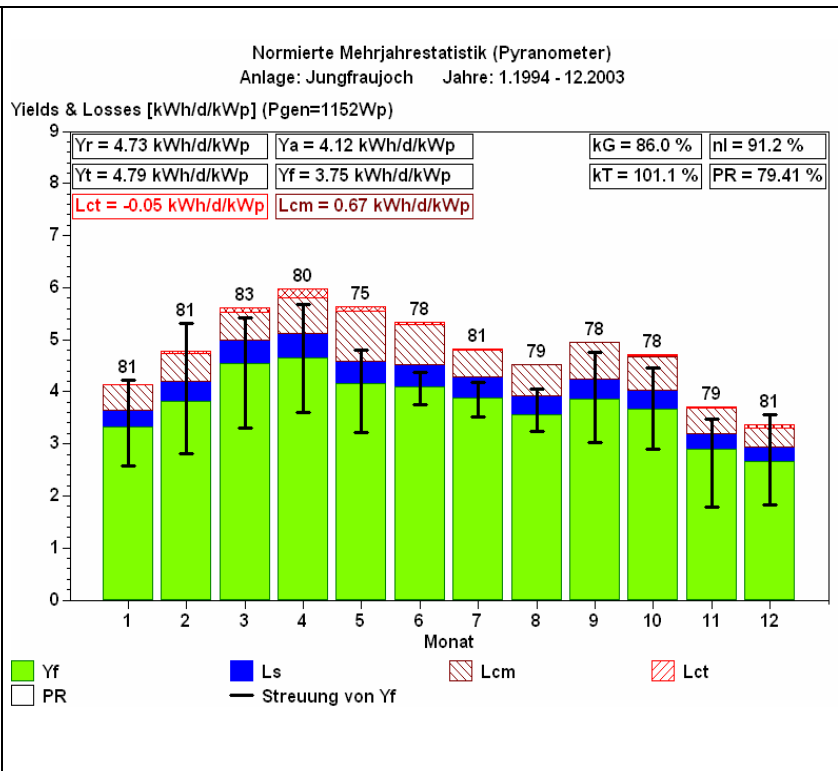
### 4.1 Betriebserfahrungen

Die Anlage hat erfreulicherweise bisher allen Beanspruchungen standgehalten. Sie überstand viele Stürme mit Windgeschwindigkeiten bis über 250 km/h und heftige Gewitter mit Naheinschlägen. Es traten kurzzeitige Strahlungsspitzen mit Werten bis  $1720 \text{ W/m}^2$  auf. Die hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen durch grosse und schnelle Temperaturänderungen (z.B. Abkühlen der Solarzellen bei Sonnenuntergang: Temperatursturz von etwa  $40^\circ\text{C}$  innerhalb von 30 Minuten, totale Temperaturdifferenz Tag-Nacht bis zu  $70^\circ\text{C}$ , Modultemperaturen zwischen  $-29^\circ\text{C}$  und  $+66^\circ\text{C}$ ) konnten ihr ebenfalls nichts anhaben. Der Wechselrichter hatte dank der relativ guten Netzverhältnisse und dank dem aufwendigen Überspannungsschutz keine nennenswerten Probleme und funktionierte ausser ganz wenigen durch Spannungsschwankungen verursachten Kurzabschaltungen einwandfrei.

### 4.2 Energieertrag

Bild 3 zeigt die normierte monatliche Energieproduktion für das Durchschnittsjahr zwischen 1994 und 2003 für die PV-Anlage Jungfrauoch. Die mittlere Jahresenergieproduktion ist mit **1371 kWh/kWp** sehr hoch. Die Energieproduktion ist auch relativ gut über das ganze Jahr verteilt, der **mittlere Winterenergieanteil beträgt 46,2%** (Minimum 43,2%, Maximum 50,7%).

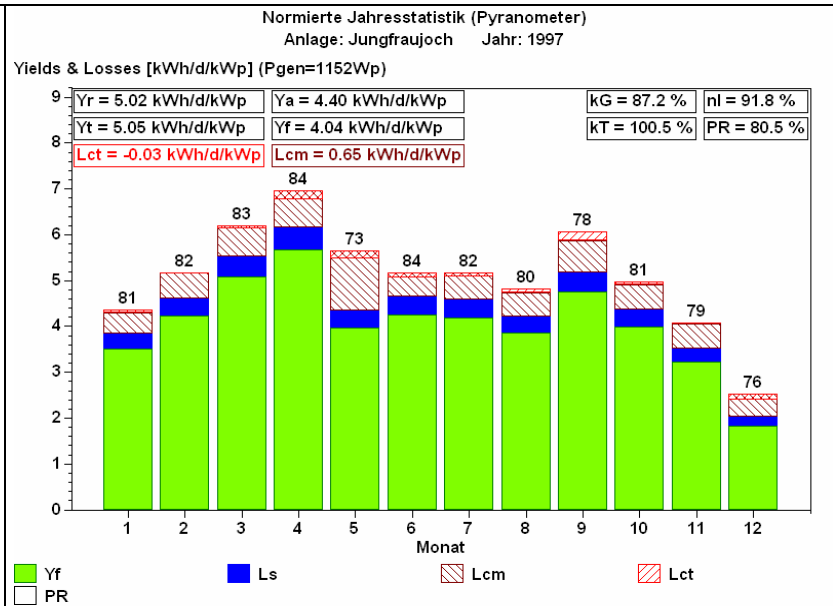
**Bild 3:** Normierte monatliche Energieproduktion für das Durchschnittsjahr zwischen 1994 und 2003 für die PV-Anlage Jungfrauoch (Strahlungsmessung: Pyranometer). Teilweise Schneebedeckungen des PV-Generators im Frühling haben höhere  $L_{CM}$ -Werte und tiefere PR-Werte speziell in den Monaten Mai und Juni zur Folge. Die Produktion von August bis Oktober ist infolge von Teilbeschattungen durch Unterhaltarbeiten an der Fassade zwischen 1999 und 2001 etwas beeinträchtigt. Die monatlichen PR-Werte liegen zwischen 75% und 83%, das Jahresmittel beträgt 79,4%. Würden die Werte auf die effektive Generator-Nennleistung von 1,13 kWp bezogen, lägen  $Y_f$  und PR etwa 2% höher.



Im Jahre 1994 war die Einstrahlung und der Energieertrag in der Zeit von 1994 bis 2003 am tiefsten, im Jahre 1997 dagegen am höchsten (Bild 4). Im Jahr 2003 wurden im Flachland Rekordwerte von Einstrahlung und Sommertemperaturen erreicht. Auf Jungfrauoch war 2003 aber bezüglich Einstrahlung in die Generatorebene und Energieertrag nur das zweitbeste Jahr in dieser Zeit.

**Bild 4:**

Normierte monatliche Energieproduktion für 1997, dem Jahr mit der höchsten Jahresproduktion in 10 Jahren.



## 5. Anlage Birg

### 5.1 Betriebserfahrungen

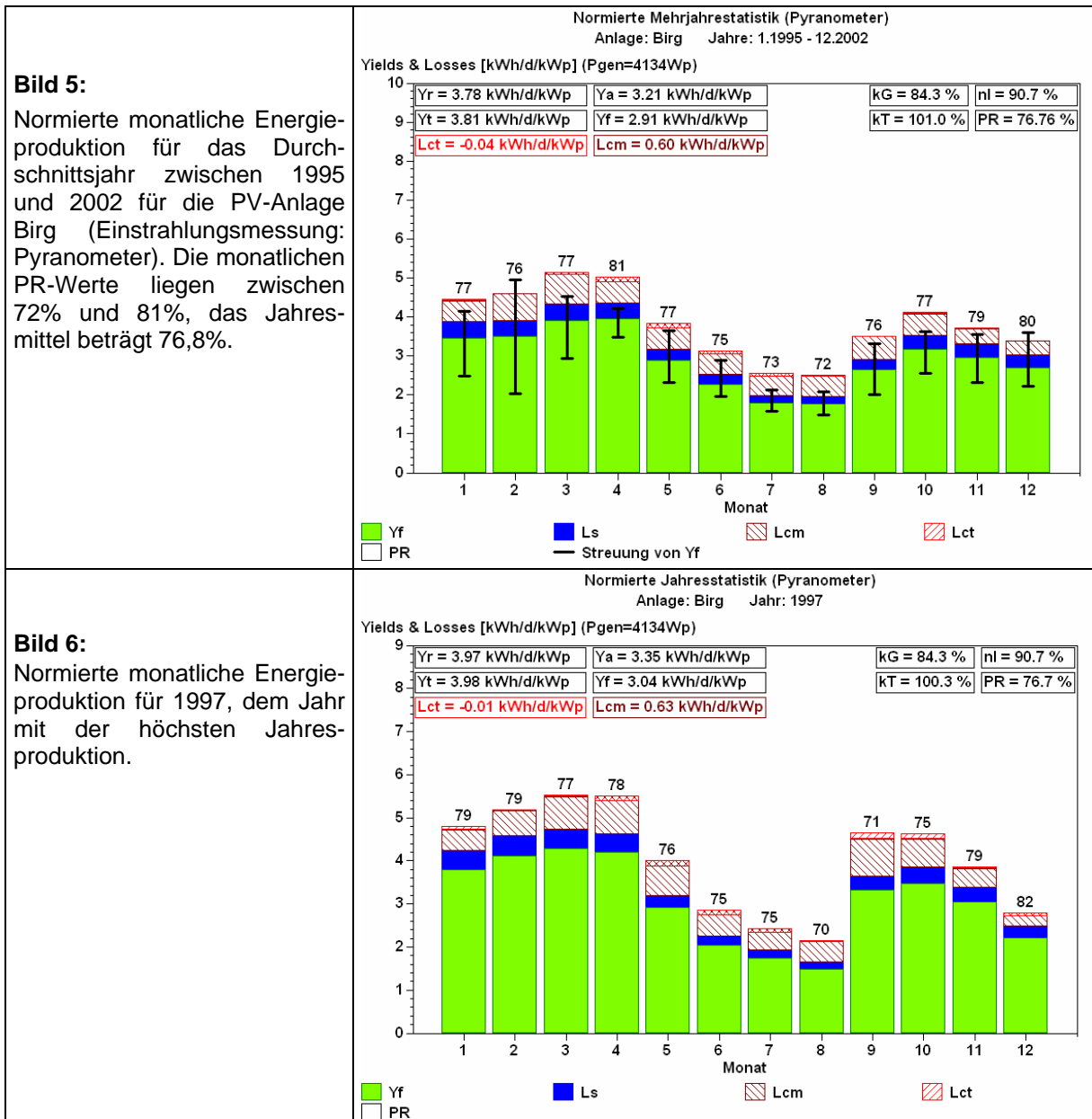
Wegen schlechter Netzverhältnisse treten beim Anfahren des Seilbahnantriebs oft starke Spannungsschwankungen im Netz auf, die den Wechselrichter stören. Die Anlage, die Ende 1992 in Betrieb genommen wurde, hatte deshalb anfänglich oft Wechselrichterprobleme. Bis Mitte 1994 traten neben sporadischen Wechselrichter-Fehlfunktionen 5 Hardwaredefekte am Wechselrichter auf. Nach mehreren Versuchen gelang es dem Hersteller, das Gerät soweit gegen diese Störungen zu immunisieren, dass beim Anfahren des Seilbahnantriebs nur noch Kurzabschaltungen ohne grossen Einfluss auf die Energieproduktion, jedoch keine Hardwaredefekte mehr auftreten. Der Wechselrichter SOLCON 3400 funktionierte danach während über 8 Jahren einwandfrei. Im Januar 2003 ereignete sich ein weiterer Wechselrichterdefekt. Wegen des Alters des Geräts und des eingeschränkten Reparaturservice durch den Hersteller entschied sich der Anlagenbetreiber, einen neuen Wechselrichter einzusetzen. Der Wechselrichter wurde durch einen neuen ASP Top Class 4000/6 Grid III ersetzt.

Um ein originelles Erscheinungsbild zu erreichen, wurde bei dieser Anlage auf Wunsch des Gebäudeeigentümers der untere Teil des PV-Generators etwas zu weit nach unten gezogen, so dass dieser recht nahe über einem relativ schwach geneigten Vordach liegt. Auf diesem Vordach bildet sich im Winter nach starken Schneefällen eine Schneemauer, die den unteren Teil des Generators abdeckt und die Energieproduktion reduziert. Im Monat Februar ist die Streuung des Ertrags wegen der von Jahr zu Jahr variierenden Schneehöhe auf dem Dach vor dem Generator relativ gross. Auch im März treten oft nennenswerte Ertragsverluste infolge Schneebedeckung des unteren Generators auf. Durch eine bessere Anordnung des PV-Generators hätte dieses Problem leicht vermieden werden können.

Wenn keine Schneebedeckung des PV-Generators vorliegt, tritt wegen der leichten Überdimensionierung des Generators an schönen Wintertagen über die Mittagszeit eine Leistungsbegrenzung auf, da der Wechselrichter höchstens mit seiner Nennleistung ins Netz einspeisen kann. An solchen Tagen können während längerer Zeit Einstrahlungswerte von 1,1 – 1,3 kW/m<sup>2</sup> auftreten. Dies führt an solchen Tagen zu einem gewissen Energieproduktionsverlust. Bei hochalpinen Anlagen ist eine Überdimensionierung des PV-Generators deshalb weniger zweckmässig als im Flachland.

### 5.2 Energieertrag

Für einen fairen Vergleich des Energieertrags mit der Anlage Jungfrauoch wird nur die Zeit von **1995-2002** herangezogen, in der keine Wechselrichter-Ausfälle auftraten. Bild 5 zeigt die normierte monatliche Energieproduktion für das Durchschnittsjahr zwischen 1995 und 2002 für die PV-Anlage Birg. Da die Anlage Birg nur auf 2670 m liegt und keinen Gletscher vor dem Generator hat, tritt ein ausgeprägtes Sommerloch auf. Die mittlere Jahresenergieproduktion ist mit **1062 kWh/kWp** zwar deutlich tiefer als bei der Anlage Jungfrauoch, aber immer noch höher als bei vergleichbaren Anlagen im Flachland. Der **mittlere Winterenergieanteil beträgt 56,3%** (Minimum 53,4%, Maximum 58,4%). Der Wechselrichterdefekt im Frühjahr 2003 hatte einen Produktionsverlust von 10,5% zur Folge.

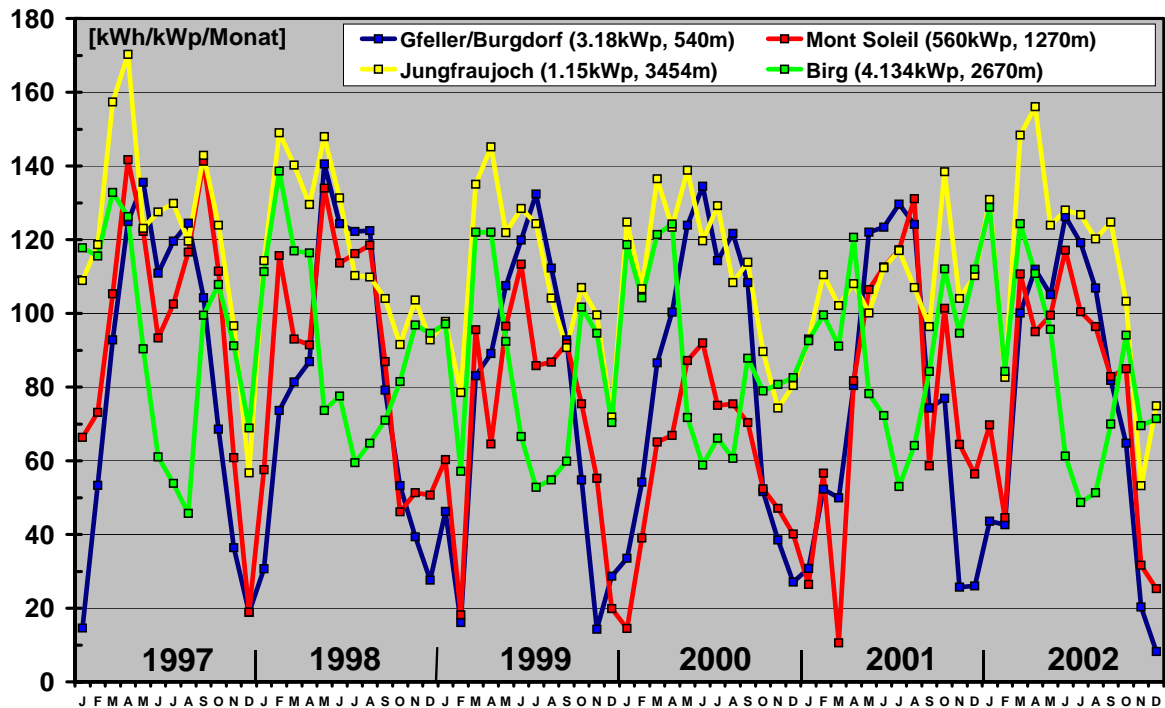


### 6. Vergleich der beiden hochalpinen PV-Anlagen mit anderen Anlagen

Bild 7 zeigt die normierte monatliche Energieproduktion bezogen auf die PV-Generator-Spitzenleistung in den Jahren 1997 bis 2002 für eine PV-Anlage in Burgdorf (3,18 kWp, 540m), für die Anlage Mont Soleil (560 kWp, 1270m), für die Anlage Birg (4,134 kWp, 2670m) und für die PV-Anlage Jungfrauoch (1,15 kWp, 3454m). In dieser Zeit traten bei allen Anlagen keine Wechselrichterausfälle auf.

Bei der Anlage im Flachland tritt ein ausgeprägtes Sommermaximum und ein markantes Winterminimum auf (mittlerer Winterenergieanteil 29,1%), das Verhältnis Maximum zu Minimum ist bis zu 10:1 . Bei der höher gelegenen Anlage Mt. Soleil ist die Situation ähnlich, aber das Verhältnis zwischen Maximum und Minimum ist i.A. geringer und der Winterenergieanteil steigt auf 38,1%. In einigen Jahren tritt ein Sommer-Maximum wie bei Flachlandanlagen auf, in anderen Jahren treten dagegen zwei Maxima im Frühling und im Herbst auf (wie bei alpinen Anlagen). Noch günstiger sind die beiden alpinen Anlagen. Die Jahresenergieproduktion ist deutlich höher als bei den andern Anlagen und sie verläuft gleichmässiger (geringere Streuung der Monatsenergieproduktion) und es treten pro Jahr zwei Produktionsmaxima auf. Die gemessenen Winterenergieanteile variieren zwischen 43,2 % und 58,4 %.

Von Herbst 1999 bis Frühling 2001 wurde die Anlage Mont Soleil nur rudimentär überwacht, was eine wesentliche Minderproduktion infolge lange unentdeckter Strang-Ausfälle zur Folge hatte. Im Juni 2001 wurde durch die HTI eine neue Messtechnik in Betrieb genommen. Seither ist dank der kontinuierlichen Überwachung die Produktion wieder deutlich angestiegen.



**Bild 7:** Normierte monatliche Energieproduktion (bezogen auf Solargenerator-Nennleistung) der PV-Anlagen Jungfrauoch (1,152 kWp), Birg (4,134 kWp), Mont Soleil (560 kWp) und Gfeller/Burgdorf (3,18 kWp) in den Jahren 1997 bis 2002.

## 7. Schlussbemerkungen

Sonnenexponierte Fassaden von alpinen Gebäuden mit Netzanschluss eignen sich für die Installation von netzgekoppelten PV-Anlagen besonders gut. Die von derartigen Anlagen produzierte Energie passt viel besser ins Lastprofil der Stromversorgung in Europa als die Energie von PV-Anlagen im Flachland und ergänzt die Energieproduktion von Laufkraftwerken sehr gut. In den Monaten *November bis Februar* produzieren sie pro installiertes kWp Solargeneratorleistung ein *Mehrfaches der Energie von entsprechenden Anlagen* auf Dächern oder an Fassaden von Gebäuden *im Flachland*. Bei alpinen Anlagen ist eine Überdimensionierung des Solargenerators im Gegensatz zu Flachlandanlagen kaum zweckmässig. 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. Die seit über 11 Jahren durchgeführten Messungen an den Anlagen Jungfrauoch und Birg belegen, dass nach Überwindung allfälliger Anfangsschwierigkeiten mit guten Wechselrichtern die erwarteten Energieerträge von 1000 bis 1400 kWh/kWp in der Praxis auch tatsächlich erreicht werden können.

## Verdankungen

Die beschriebenen Langzeitmessungen bis Mai 1995 erfolgten im Rahmen eines vom BFE und vom WEA des Kantons Bern finanzierten Messprojektes. Die weiteren Messungen ab Oktober 1996 wurden im Rahmen dreier weiterer Monitoring-Projekte (Finanzierung: BFE, PSEL, Localnet AG Burgdorf, Gesellschaft Mont Soleil und Elektra Baselland) weitergeführt. All diesen Institutionen sei für ihre Unterstützung herzlich gedankt. Ebenso danke ich meinen Assistenten (Ch. Beutler, S. Oberli, Ch. Renken, Ch. Geissbühler), die diese Langzeitmessungen seit 1992 betreut haben.

## Literatur

- [1] H. Häberlin und Ch. Beutler: "Die netzgekoppelte Photovoltaikanlage der ISB auf dem Jungfrauoch". 10. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein / BRD, 1995.
- [2] H. Häberlin, Ch. Renken: "Hoher Energieertrag auf Jungfrauoch: Die ersten 5 Betriebsjahre der netzgekoppelten 1,1kWp-PV-Anlage der HTA Burgdorf". 14. Symposium PV-Solarenergie, 1999.
- [3] H. Häberlin, Ch. Beutler und Ch. Liebi: "Analyse des Betriebsverhaltens von PV-Anlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung". 11. Symposium PV-Solarenergie, 1996.

**Informationen über weitere Aktivitäten des PV-Labors der HTI in Burgdorf und weitere Publikationen (teilweise farbig und online) sind unter <http://www.pvtest.ch> zu finden.**