

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	89 (1998)
Heft:	10
Artikel:	Hoher Energieertrag auf Jungfraujoch : die ersten vier Betriebsjahre der netzgekoppelten 1,1-kW-Photovoltaikanlage der ISB
Autor:	Häberlin, Heinrich
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902080

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Photovoltaik im Gebirge

Neben den Untersuchungen an Photovoltaik-Wechselrichtern befasst sich die Ingenieurschule Burgdorf (ISB) seit vielen Jahren auch mit der Systemtechnik ganzer Photovoltaikanlagen (Simulation und Messung des Energieertrags, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Blitzschutz usw.). Im Herbst 1993 konnte sie auf dem Jungfraujoch (3454 m ü.M.) dank Unterstützung durch verschiedene Institutionen eine kleine netzgekoppelte Photovoltaikanlage mit einer nominellen Solargeneratorleistung von 1,152 kW_p errichten. Diese Anlage konnte im Rahmen eines Auftrages des Bundesamtes für Energie (BFE) 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 [1]. Die Anlage Jungfraujoch arbeitet seit ihrer Inbetriebnahme Ende Oktober 1993 störungsfrei mit einer Verfügbarkeit von Energieproduktion und Messdaten von 100%.

Hoher Energieertrag auf Jungfraujoch

Die ersten vier Betriebsjahre der netzgekoppelten 1,1-kW-Photovoltaikanlage der ISB

■ Heinrich Häberlin

Übersicht über die PV-Anlage Jungfraujoch

Der Solargenerator der Anlage besteht aus 24 Modulen Siemens-Solar M75 (48 W_p) und hat eine nominelle Spitzenleistung von 1152 W_p bei STC. Er ist in zwei parallel geschaltete Arrays zu je zwölf Modulen unterteilt, die vertikal an der Fassade der hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch montiert sind (Bild 1). Auf dieser Höhe kommen hin und wieder nahezu STC-Bedingungen (1 kW/m², AM1,5, Zellentemperatur 25 °C) vor, so dass mit der vorhandenen genauen Messtechnik eine effektive Solargeneratorleistung von 1,13 kW_p bestimmt werden konnte. Die Ausrichtung des ersten Arrays weicht gegenüber der Südrichtung um 12°, die des zweiten Arrays um 27° 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.

Betriebserfahrungen

Die Anlage hat bisher allen Belastungen standgehalten. Sie 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. Abkühlen der Solarzellen bei Sonnenuntergang: Temperatursturz von etwa 40 °C innerhalb von 30 Minuten, totale Temperaturdifferenz Tag–Nacht bis zu 70 °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 52 Monaten seit Inbetriebnahme der Anlage einwandfrei. Als einziges betriebliches Problem der

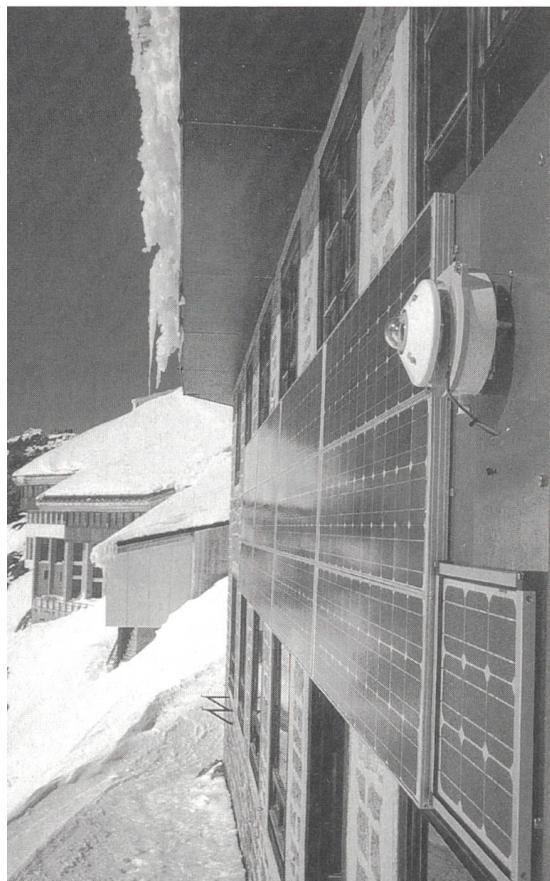


Bild 1 Ansicht des Solargenerators der ISB-Photovoltaikanlage an der Fassade der hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch (3454 m) mit dem Restaurant Jungfraujoch im Hintergrund.

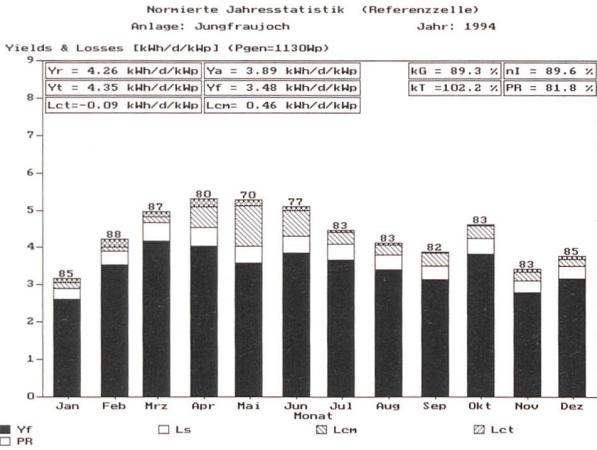


Bild 2 Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfraujoch (3454 m) für 1994.

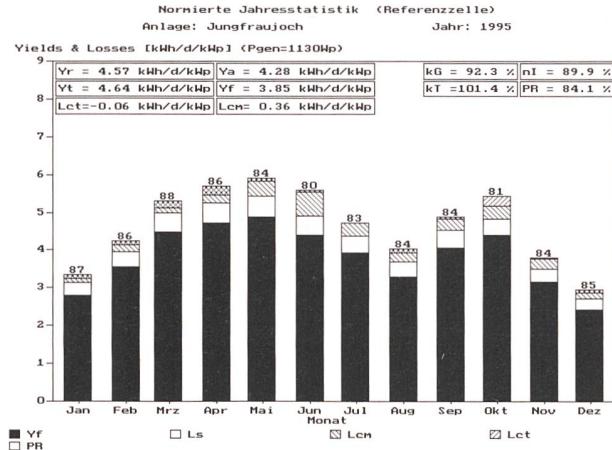


Bild 3 Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfraujoch (3454 m) für 1995.

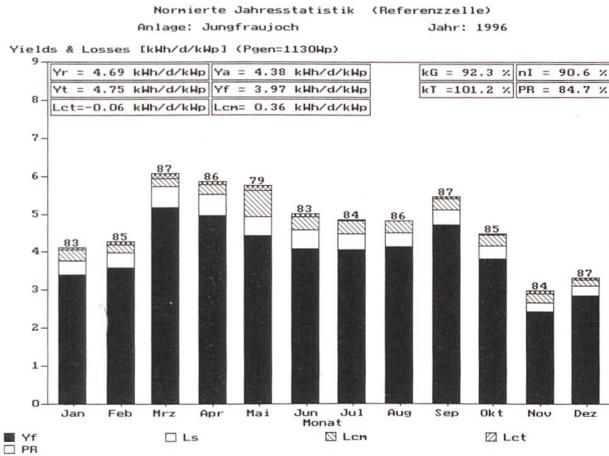


Bild 4 Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfraujoch (3454 m) für 1996.

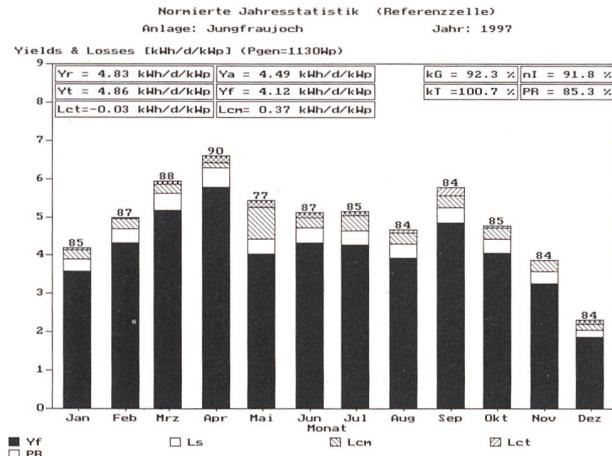


Bild 5 Normierte Jahresstatistik für die Energieproduktion der netzgekoppelten Photovoltaikanlage Jungfraujoch (3454 m) für 1997.

Anlage treten ab und zu temporäre Reif- und Schneebedeckungen des Solar-generators auf. Im Normalfall haben diese keine grossen Energieproduktionsausfälle zur Folge, nach ein paar Stunden Sonnenschein ist das Eis oder der Schnee auf dem Generator wieder weggeschmolzen. Nur im Frühling (April bis Juni) kann besonders nach schneereichen Wintern (z.B. Winter 93/94) zeitweise eine längere teilweise Schneebedeckung der einen Generatorhälfte auftreten, da bei ergiebigen Schneefällen die Schneehöhe über 3 m ab Boden erreichen kann. Die Energieproduktion des Jahres 1994 war durch dieses Problem deutlich beeinträchtigt.

Grössen Y_r (Strahlungsertrag in Generatoren-Ebene in kWh/m²/d), Y_a (Generatorertrag auf der DC-Seite in kWh/kWp/d) und Y_f (Endertrag auf der AC-Seite in kWh/kWp/d) sowie die Performanz $PR = Y_f/Y_r$ als durchschnittliche Tageswerte für jeden Monat angegeben [2]. Die Bilder 2 bis 5 zeigen die normierten Jahresstatistiken der Anlage Jungfraujoch für 1994 bis 1997.

Im Jahre 1994 erzielte die Anlage mit einem auf die nominelle Generatorleistung von 1,152 kW_p bezogenen spezifischen Energieertrag von 1247 kWh/kW_p (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1272 kWh/kW_p) bereits einen Rekordwert für die Jahresproduktion, der von keiner anderen Anlage in der Schweiz übertroffen wurde. Die von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) auf dem Jungfraujoch gemessene Jahressumme der Sonneneinstrahlung in die Horizontalebene lag in diesem Jahr um 3,9% unter dem in [3] angegebenen langjährigen Mittelwert.

Der Energieertrag wurde in diesem Jahr durch teilweise Schneebedeckung des Generators im Frühling beeinträchtigt (relativ niedrige PR-Werte von April 1994 bis Juni 1994). Der Winterenergieanteil betrug in diesem Jahr 48,0%. Der Jahreswert der Performanz PR erreichte einen Wert von 81,8%.

Im Jahre 1995 stieg die Einstrahlung in die Generatorebene gegenüber dem Vorjahr deutlich an. Zudem war die Schneebedeckung im Frühling wesentlich geringer als 1994 (wesentlich höhere PR-Werte von April 1995 bis Juni 1995 im Vergleich zum Vorjahr). Deshalb erhöhte sich 1995 die spezifische Energieproduktion auf 1377 kWh/kW_p (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar auf 1404 kWh/kW_p). Trotz eines Anstiegs der Winterenergieproduktion im 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%. Auf

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

Photovoltaik im Gebirge

den ersten Blick erstaunlich ist die Tatsache, dass die von der SMA gemessene Einstrahlung in die Horizontalebene in diesem Jahr um 4,7% unter dem langjährigen Mittelwert lag, also noch etwas unter dem Wert von 1994. Wegen Provisorien, die durch den Umbau des Observatoriums Sphinx bedingt waren (durch den Autor selbst beobachtet), dürfte aber die SMA-Strahlungsmessung in den Jahren 1995 und 1996 etwas zu tiefe Werte geliefert haben.

Im Jahre 1996 erreichte die Anlage einen spezifischen Energieertrag von 1426 kWh/kW_p (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1454 kWh/kW_p). 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 Schneedeckung im Frühling (nennenswerte Produktionsbeeinträchtigung nur im Mai 1996) zu verdanken. Der Winterenergieanteil betrug in diesem Jahr 44,6%. Die Wirkung der im Juli 1996 durchgeföhrten 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%. Die von der SMA gemessene Sonneneinstrahlung in die Horizontalalebene (immer noch etwas zu tief) lag in diesem Jahr 6,4% unter dem langjährigen Mittel.

Im Jahre 1997 erzielte die Anlage mit einem spezifischen Energieertrag von 1476 kWh/kW_p (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar 1504 kWh/kW_p) den bisherigen Rekordwert für die Produktion in einem Kalenderjahr. 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 Schneedeckung im Frühling (nennenswerte Produktionsbeeinträchtigung nur im Mai) zu verdanken. Der Winterenergieanteil betrug in diesem Jahr 44,9%. Die im Juli 1996 durchgeföhrten Massnahmen zur Leistungssteigerung wirkten sich in diesem Jahr erstmals voll aus. Gegenüber 1995 ist der Wechselrichter-Nutzungsgrad η_l (in Bild 3 und 5 als η_l bezeichnet) um fast 2% angestiegen. Von Januar bis April und im Juni und Juli lag die Performanz PR der Anlage deutlich über den Vorjahreswerten. Dagegen war die Schneedeckung der Anlage im Mai 1997 und erstmals auch im Dezember 1997 deutlich höher als im Vorjahr. Auch die Solarmodultemperatur in den Monaten August bis November lag über den

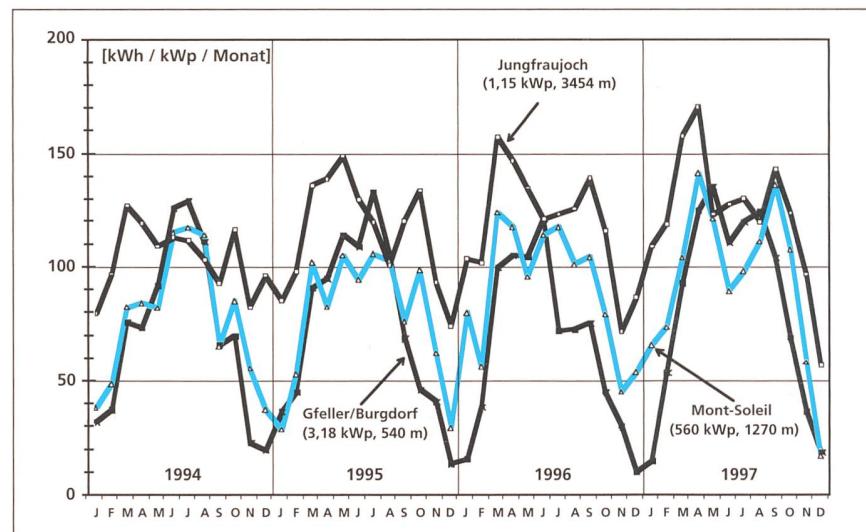


Bild 6 Auf die nominelle Generatorleistung bezogene Energieproduktion der Anlagen Jungfraujoch (1,152 kW_p), Mont-Soleil (560 kW_p) und Gfeller/Burgdorf (3,18 kW_p).

Werten des Vorjahrs. Der Jahreswert der Performanz PR stieg deshalb nicht so stark an wie ursprünglich erhofft. Immerhin erreichte er einen neuen Rekordwert von 85,3%. Die von der SMA gemessene Sonneneinstrahlung in die Horizontalalebene (jetzt vermutlich wieder korrekt gemessen) lag in diesem Jahr 0,7% über dem langjährigen Mittel.

In allen vier Jahren fällt auf, dass die maximale Energieproduktion nicht wie bei den meisten Anlagen im Schweizer Mittelland im Sommer auftritt, sondern dass **zwei Maxima im Frühling und Herbst** auftreten. Das Hauptmaximum tritt im Frühling in den Monaten März, April oder Mai auf, ein zweites, etwas niedrigeres Maximum, in den Herbstmonaten. Generell bemerkenswert ist, dass die **Energieproduktion über das ganze Jahr relativ gleichmäßig** ist. Dank der starken vom Gletscher reflektierten Strahlung ist auch die Sommerproduktion trotz des für den Sommer ungünstigen Anstellwinkels $\beta = 90^\circ$ sehr hoch.

In der bisherigen Rekordperiode, der Zeit von Dezember 1996 bis November 1997, erreichte die jährliche Energieproduktion mit **1506 kWh/kW_p** (bezogen auf die effektive Generatorleistung gar **1535 kWh/kW_p**) den bisher höchsten Wert. Die Einstrahlung in die Horizontalebene lag in dieser Periode um 1,2% über dem langjährigen Durchschnittswert und die mittlere tägliche Einstrahlung in die Generatorebene erreichte mit $Y_r = 4,92 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ einen neuen Spitzenwert. Die Performanz PR erreichte in diesen zwölf Monaten 85,4%. Der Winterenergieanteil betrug in dieser Zeit 46,0%.

In [4] findet man einen ausführlichen Vergleich des Energieertrags der Anlage Jungfraujoch mit dem Energieertrag ei-

ner anderen hochalpinen Anlage (Birg auf 2670 m), der Anlage Mont-Soleil (1270 m) und einer Anlage in Burgdorf.

Vergleich mit anderen Anlagen im Kanton Bern

Bild 6 zeigt die auf die nominelle Solargenerator-Spitzenleistung bezogene monatliche Energieproduktion in den Jahren 1994 bis 1997 bei einer Anlage in Burgdorf (3,18 kW_p, 540 m), der Anlage Mont-Soleil (560 kW_p, 1270 m) und der Anlage Jungfraujoch (1,152 kW_p, 3454 m). Im Jahre 1996 war die Energieproduktion der Anlage in Burgdorf durch einen längeren Wechselrichterausfall ausgerechnet während der Ferien des Anlagebesitzers (Ende Juli/Anfang August) 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 weniger ausgeprägt und der Winterenergieanteil ist deutlich höher. Noch günstiger sind aber die Verhältnisse bei der Anlage Jungfraujoch. Die Jahresenergieproduktion ist wesentlich höher als bei den andern Anlagen, sie verläuft viel gleichmässiger (geringere Streuung der Monatsenergieproduktion), es treten pro Jahr zwei Produktionsmaxima auf (statt nur einem), das Verhältnis zwischen Maximum und Minimum liegt nur noch knapp über 2 und der Winterenergieanteil liegt zwischen 44,6% und 48%.

Die bisherigen Messungen haben auch gezeigt, dass sich die Produktion von alpinen netzgekoppelten Photovoltaikanlagen und die Produktion von Wasserkraftwerken sehr gut ergänzen. Im relativ niederschlagsarmen Winter 1995/1996 lag die Produktion der schweizerischen Wasserkraftwerke sehr tief. In der gleichen Zeit war die Energieproduktion der Anlage Jungfraujoch sehr hoch und erreichte fast jeden Monat neue Rekordwerte.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die nun einige Jahre durchgeföhrten Messungen belegen, dass eine richtig dimensionierte hochalpine netzgekoppelte Photovoltaikanlage dank der heute stark verbesserten Wechselrichterqualität den erwarteten Jahres-Energieertrag (je nach Lage 1000 kWh/kW_p bis 1400 kWh/kW_p, [5]) in der Praxis auch tatsächlich erreichen und unter günstigen Bedingungen sogar noch etwas übertreffen kann.

Durch die im Juli 1996 durchgeföhrten Massnahmen zur Leistungssteigerung konnte die Jahres-Performanz der Anlage Jungfraujoch wie erwartet etwas gesteigert werden. Die im Juli 1996 durchgeföhrten Massnahmen zur Leistungssteigerung waren im Jahr 1997 erstmals voll wirksam. Allerdings wurde ihre Auswirkung auf die Energieproduktion und die Performanz gemindert durch den seit dem Beginn der Messungen zu beobachtenden allmählichen Anstieg der gemessenen Modultemperatur: Der Jahres-Temperatur-Korrekturfaktor [2] verringerte sich infolge des Anstiegs der Modultemperatur von 102,2% im Jahre 1994 auf nur noch 100,7% im Jahre 1997. Die allmähliche Klimaerwärmung wirkt sich offenbar auch in dieser Höhe bereits aus. Ebenso konnte gezeigt werden, dass in einem strahlungsmässig durchschnittlichen und nicht zu schneereichen Jahr bei der Anlage Jungfraujoch der in [4] vorausgesagte magische Wert von 1500 kWh/kW_p tatsächlich erreicht und sogar noch etwas überschritten werden kann.

Für hochalpine netzgekoppelte Photovoltaikanlagen eignen sich sonnenexpionierte 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 Ener-

gie von PV-Anlagen im Mittelland. In den Monaten November bis Februar produzieren sie pro installiertes kW_p Solargeneratorleistung ein *Mehrliches der Energie von entsprechenden Anlagen* auf Dächern oder an Fassaden von Gebäuden im Mittelland. Dank der meist vor direkten Blitzschlägen geschützten Lage in der Fassade lassen sich die in den Alpen häufigen atmosphärischen Überspannungen mit geeigneten Schutzmassnahmen gut beherrschen. Es ist deshalb sinnvoll, derartige Anlagen an Gebäuden der touristischen Infrastruktur im Gebirge zu realisieren, sofern die Netzverhältnisse einen Wechselrichteranschluss zulassen [6]. Dabei ist bei Seilbahnstationen im Hochgebirge zu beachten, dass durch den Bahnbetrieb bedingte Transienten den Wechselrichterbetrieb etwas beeinträchtigen können, wenn diese allzu stark sind. Richtig konzipierte Wechselrichter neuerster Bauart sollten jedoch dadurch keine Hardwaredefekte mehr erleiden.

Wie gut das Langzeitverhalten netzgekoppelter Photovoltaikanlagen in den Alpen ist, wie rasch die verwendeten Komponenten altern und ob allfällige Degradationserscheinungen auftreten, sollte aber durch eine Fortsetzung der Messungen an einigen Anlagen weiter untersucht werden. Bisher wurden an dieser Anlage noch keine Degradationserscheinungen festgestellt. Im Rahmen eines im Oktober 1996 begonnenen Anschlussprojektes werden diese Messungen deshalb für einige weitere Jahre fortgesetzt.

Verdankungen

Die PV-Anlage auf dem Jungfraujoch konnte nur dank Spenden verschiedener Firmen und Institutionen erstellt werden, nämlich der Siemens AG (Solarmodule), des VSE, der Jungfraubahn und der Fabrimex Solar AG (Wechselrichter). Die Entwicklung und Beschaffung der Mess-

Adresse des Autors
Dr. Heinrich Häberlin
Ingenieurschule Burgdorf (ISB)
Jlcweg 1
CH-3400 Burgdorf

technik und die Messungen bis Mai 1995 erfolgten im Rahmen eines vom BFE und vom WEA des Kantons Bern finanzierten Messprojektes. Seit Oktober 1996 werden die Messungen im Rahmen eines vom PSEL und vom BFE finanzierten Anschlussprojektes weitergeführt. All diesen Firmen und Institutionen sei an dieser Stelle für ihre wertvolle Unterstützung gedankt. Dank gebührt auch der Internationalen Stiftung Hochalpine Forschungsstation Jungfraujoch, welche die Montage des Solargenerators an der Fassade ihres Gebäudes gestattet hat und unter ihrem Dach den Wechselrichter und die Messapparaturen beherbergt.

Dank gebührt auch meinem ehemaligen Assistenten, Herr Ch. Beutler, welcher die Messtechnik und die Auswertesoftware dieser hochinteressanten Anlage entworfen und realisiert hat, und seinem Nachfolger, Herr Ch. Renken, der die Anlage seit Herbst 1997 weiter betreut.

Literatur

[1] H. Häberlin und Ch. Beutler: Die netzgekoppelte 1,1-kW-Photovoltaikanlage auf dem Jungfraujoch. Bulletin SEV/VSE 10/94.

[2] H. Häberlin und Ch. Beutler: Analyse des Betriebsverhaltens von Photovoltaikanlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung. Bulletin SEV/VSE 4/95.

[3] J. Remund, E. Salvisberg und S. Kunz: Meteonorm 1995. BEW Bern, 1995.

[4] H. Häberlin und Ch. Beutler: Energieertrag von hochalpinen netzgekoppelten Photovoltaikanlagen. Elektrotechnik 9/96.

[5] H. Häberlin: Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen in Tourismusregionen. Elektroniker 11/92.

[6] H. Häberlin: Photovoltaik-Wechselrichter für Netzbundanlagen – Normen, Vorschriften, Probleme, Lösungsmöglichkeiten. Elektroniker 6+7, 1992.

Haute production énergétique sur la Jungfraujoch

L'Ecole d'ingénieurs de Berthoud exploite depuis 1993 l'installation photovoltaïque couplée au réseau le plus élevé du monde, sur la Jungfraujoch (3454 m). Les données recueillies à ce jour dans cette installation expérimentale permettent d'évaluer le haut potentiel photovoltaïque des régions élevées, où le rayonnement solaire, surtout en hiver, est beaucoup plus abondant. Ce site aux conditions climatiques extrêmes offre également des possibilités de tests de résistance idéales pour l'ensemble d'une installation photovoltaïque et pour les matériaux spécifiques (cellules, onduleurs, etc.).