

Überdurchschnittlicher Energieertrag von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen in Burgdorf / Schweiz

Prof. Dr. H. Häberlin und Ch. Beutler
Ingenieurschule Burgdorf (ISB),
Labor für Photovoltaik, Jlcoweg 1,
CH-3400 Burgdorf

T. Blättler, Direktor
Industrielle Betriebe Burgdorf (IBB),
Bernstrasse 102,
CH-3402 Burgdorf

Tel: +41 34 426 68 11, Fax +41 34 426 68 13 Tel: +41 34 420 00 20, Fax: +41 34 420 00 38

Dank der Vergütung von Fr. 1.- pro kWh für von Photovoltaikanlagen ins Stromnetz eingespeiste Energie durch das lokale EVU ("Burgdorfer Modell") sind in Burgdorf in den letzten Jahren viele netzgekoppelte Photovoltaikanlagen entstanden. Mit einer total installierten Leistung von gegenwärtig 230 kWp oder über 15 Wp pro Einwohner hat Burgdorf die Ziele von Energie 2000 bereits weit übertroffen. Das "Burgdorfer Modell" wirkt sich auch bezüglich des Energieertrags der realisierten Anlagen sehr positiv aus. Der Energieertrag der mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten Anlagen liegt mit 872 kWh/kWp in einem Normaljahr um einige Prozente über dem schweizerischen Durchschnittswert. Anlagen neuester Technologie erreichen sogar Energieerträge von über 1000 kWh/kWp/Jahr.

1. Das Burgdorfer Modell zur Förderung der Photovoltaik

Seit 1991 wird die Photovoltaik gemäss "Burgdorfer Modell" von der Stadt Burgdorf gefördert. Mit einem Rücknahmepreis von einem Franken pro Kilowattstunde, der während 12 Jahren entrichtet wird, wurde ein starker Anreiz für die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen geschaffen. Dank diesen günstigen Voraussetzungen konnten bis Ende August 1996 32 Photovoltaik-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 230 kWp in Betrieb genommen werden. Mit diesen Anlagen können pro Jahr etwa 200'000 kWh elektrische Energie produziert werden. Die Stadt Burgdorf hat mit 15 Wp pro Einwohner die vom Bundesamt für Energiewirtschaft im Aktionsprogramm "Energie 2000" gesetzte Zielvorgabe von 7,2 Wp pro Einwohner bereits weit übertroffen.

Das "Burgdorfer Modell" wurde später von mehreren Städten in der Schweiz und in Deutschland (z.B. in Aachen, "Aachener Modell") in ähnlicher Form realisiert.

2. Energieproduktion von Dezember 1995 bis November 1996 (1 Jahr)

Um auch möglichst viele der 1995 erstellten Anlagen neuester Technologie in die Auswertung über ein vollständiges Jahr einbeziehen zu können, wurde als Auswertungsperiode die Zeit vom 1. Dez. 1995 bis 30. Nov. 1996 gewählt. Anlagen, die nach dem 1. Dezember 1995 in Betrieb genommen wurden, sind in den folgenden Ergebnissen *nicht* berücksichtigt. Die mittlere Energieproduktion der 26 mehr als ein Jahr alten Anlagen in dieser Bezugsperiode lag mit 851 kWh/kWp deutlich über dem schweizerischen Mittelwert von 820 kWh/kWp. Betrachtet man nur die mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten Anlagen, beträgt der Energieertrag sogar 889 kWh/kWp. Anlagen neuester Technologie erreichten Produktionswerte, welche über der magischen Grenze von 1000 kWh/kWp lagen. Die beste Anlage erreichte in dieser Zeit 1031 kWh/kWp.

3. Meteorologische Bedingungen in Burgdorf

In Meteororm 95 [1] sind von einer Vielzahl von A-Netz-Stationen der SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt) langjährige Mittelwerte der Sonneneinstrahlung angegeben. Der Vergleich mit anderen Standorten im Schweizer Mittelland zeigt, dass Burgdorf ein ganz durchschnittlicher Standort ist (siehe Bild 1). Es gibt Standorte mit bis zu 6% mehr, aber auch Standorte mit entsprechend weniger Sonneneinstrahlung als Burgdorf.

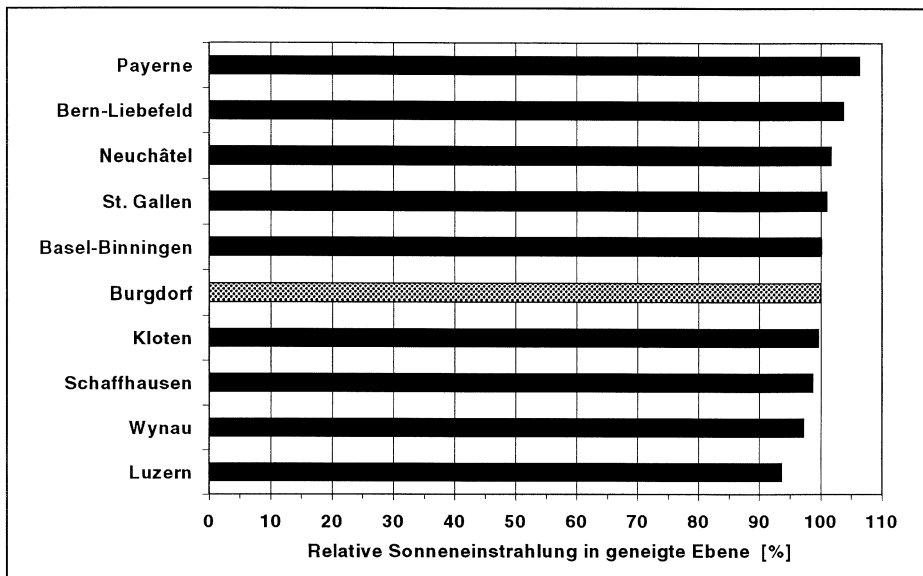


Bild 1: Vergleich der mittleren jährlichen Einstrahlung in eine genau nach Süden orientierte geneigte Ebene (Anstellwinkel $\beta = 30^\circ$) an verschiedenen Orten in der Schweiz (gemäss Meteonorm 95 [1]).

In Burgdorf wird die Sonneneinstrahlung in die Horizontalebene seit 5 Jahren auf dem Hauptgebäude der ISB gemessen. In unserer Bezugsperiode (Dez. 1995 bis Nov. 1996) betrug die Sonneneinstrahlung in die Horizontalebene 1165 kWh/m^2 . Für die Umrechnung auf ein sogenanntes Normaljahr (d.h. Sonneneinstrahlung entspricht dem langjährigen Mittel) wurden Daten aus drei verschiedenen Quellen hinzugezogen. Durch Mittelung der Werte aus Meteonorm 95 (Interpolation), Meteonorm 85 (ebenfalls Interpolation) und dem 5-Jahres-Durchschnittswert der ISB-Messung in Burgdorf erhält man den Wert 1143 kWh/m^2 . Damit war die **Sonneneinstrahlung** in der Zeit zwischen **Dez. 1995 und Nov. 1996 in Burgdorf um 1,9% zu hoch**. Die folgenden Umrechnungen der Energieerträge basieren auf diesem Wert.

4. Energieproduktion in einem strahlungsmässigen Normaljahr

Rechnet man die Ertragsdaten von Dez. 1995 bis Nov. 1996 auf ein Normaljahr um, so erhält man als Durchschnittswert immer noch 835 kWh/kWp (siehe Tabelle 1). Betrachtet man nur die Anlagen mit elektronischem Wechselrichter, so beträgt der Energieertrag sogar 872 kWh/kWp . Dieser Wert liegt um 6,3% über dem schweizerischen Durchschnittswert der Jahre 1992 bis 1995 von 820 kWh/kWp [2]. Die besten Anlagen erreichen auch in einem Normaljahr Energieerträge von über 1000 kWh/kWp . Der Winterenergieanteil liegt zwischen 26 % und 33 %.

Ordnet man die einzelnen Anlagen bestimmten Ertragsklassen zu, so ist ersichtlich, dass die meisten Anlagen den Klassen zwischen 900 und 1000 kWh/kWp zugeordnet werden können (siehe Bild 2). Nur 4 von 26 Anlagen liegen in den Klassen unter 800 kWh/kWp . 3 Anlagen liegen in der Klasse 1000 kWh/kWp und weisen damit Erträge zwischen 975 und 1024 kWh/kWp auf. Der Winterenergieanteil liegt zwischen 26 % und 33 %.

Die höchste Energieproduktion stammt von neuen im Jahre 1995 errichteten Anlagen mit Modulen Siemens Solar M55 und traflosen Wechselrichtern Solarmax S. Dank der bei diesen Anlagen sehr hohen MPP-Spannung auf der Gleichstromseite (zwischen 400 V und 600 V) können die Verluste in der Verdrahtung sehr klein gehalten werden. Auch die Umwandlungsverluste DC-AC sind bei diesen Wechselrichtern relativ klein [4].

Anlage	P _{Gen} [kWp]	β	Wechselrichter	Solarmodule	Winterenergieanteil	Endertrag [kWh/kWp]
Schlossmatt 8	3.18	30°	Solarmax S	Siemens M55	28.9%	1012
Schlossmatt 7	3.18	30°	Solarmax S	Siemens M55	28.2%	1007
Schlossmatt 6	3.18	30°	Solarmax S	Siemens M55	26.8%	984
Lindenfeld 6	3.30	35°	Solarmax S	Siemens M55	29.6%	973
Lindenfeld 1	3.30	35°	Solarmax S	Siemens M55	29.5%	970
Lindenfeld 3	3.30	35°	Solarmax S	Siemens M55	29.5%	970
Lindenfeld 5	3.30	35°	Solarmax S	Siemens M55	29.5%	967
Lindenfeld 2	3.30	35°	Solarmax S	Siemens M55	29.3%	964
Schlossmatt 9	3.24	30°	Solarmax S	Kyocera G108	29.0%	956
Lindenfeld 4	3.30	35°	Solarmax S	Siemens M55	29.4%	954
Firma 4	3.06	30°	Solcon 3400HE	Kyocera K51	29.0%	951
Schlossmatt 1	3.18	30°	TopClass 4000 II	Siemens M55	29.3%	933
Schlossmatt 2	3.18	30°	TopClass 4000 II	Siemens M55	29.0%	917
Schlossmatt 5	3.18	30°	TopClass 4000 II	Siemens M55	29.1%	909
Schlossmatt 3	3.06	30°	TopClass 2500 II	Kyocera G102	28.9%	907
GIBBU	3.07	30°/60°	Solcon 3400HE	Solarex MSX64	31.4%	904
IBB/Gsteighof	16.00	30°	Solarmax 15	Solarex MSX120	27.5%	888
Schlossmatt 4	3.06	30°	Solcon 3400HE	Kyocera G102	30.0%	861
ISB	59.66	30°	Diverse	Siemens M55HO	27.4%	831
Firma 3	2.97	35°	TopClass 3000	Siemens M55	29.2%	829
Privathaus 2	3.18	45°	Solcon 3300HE	Siemens M55	29.8%	802
Gymnasium	3.06	30°	TopClass 2500 II	Kyocera K51	28.4%	784
Privathaus 3	1.44	38°	PVWR 1500	Solarex MSX60	26.9%	764
Firma 1	63.00	25°	Umformerguppe	Siemens M55	26.0%	748
Privathaus 1	3.18	28°	TopClass 3000	Siemens M55	29.7%	744
Firma 2	3.18	60°	Solcon 3300HE	Siemens M55	33.0%	614
Mittelwert aller Anlagen						835
Mittelwert der Anlagen mit elektronischem Wechselrichter						872

Tabelle 1: Energieertrag der Burgdorfer PV-Anlagen in strahlungsmässigem Normaljahr.

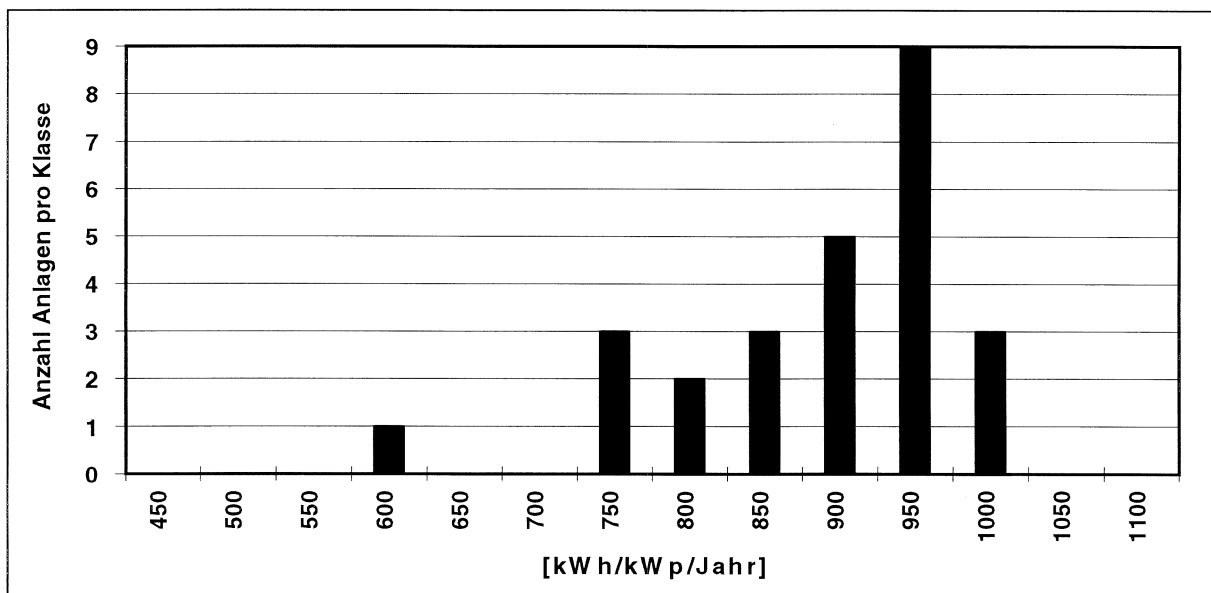


Bild 2: Ertragsverteilung der Burgdorfer PV-Anlagen in strahlungsmässigem Normaljahr.

Eine andere mögliche Ursache für diese Mehrproduktion (durch Messungen noch nicht bestätigt) könnte darin liegen, dass die Leistung neuerer Module näher bei der vom Hersteller spezifizierten Nennleistung liegt (und nicht wie früher 10 % bis 15 % darunter). Auch die Streuung der Nennleistungen ist möglicherweise kleiner, sodass die Mismatch-Verluste geringer sind.

Eine hohe Energieproduktion bei einer konventionellen Anlage weist auch die Anlage Firma 4 auf. Sie weist eine optimale Auslegung aus (Anstellwinkel 30°, Ausrichtung genau nach Süden, absolut keine Beschattung, auf gut zugänglichem Flachdach) und wird auch sehr gut gewartet (z.B. rasche Schneeräumung im Winter!).

Bild 3 zeigt den durchschnittlichen monatlichen Energieertrag aller Photovoltaikanlagen mit elektronischen Wechselrichtern in Burgdorf in einem strahlungsmässigen Normaljahr.

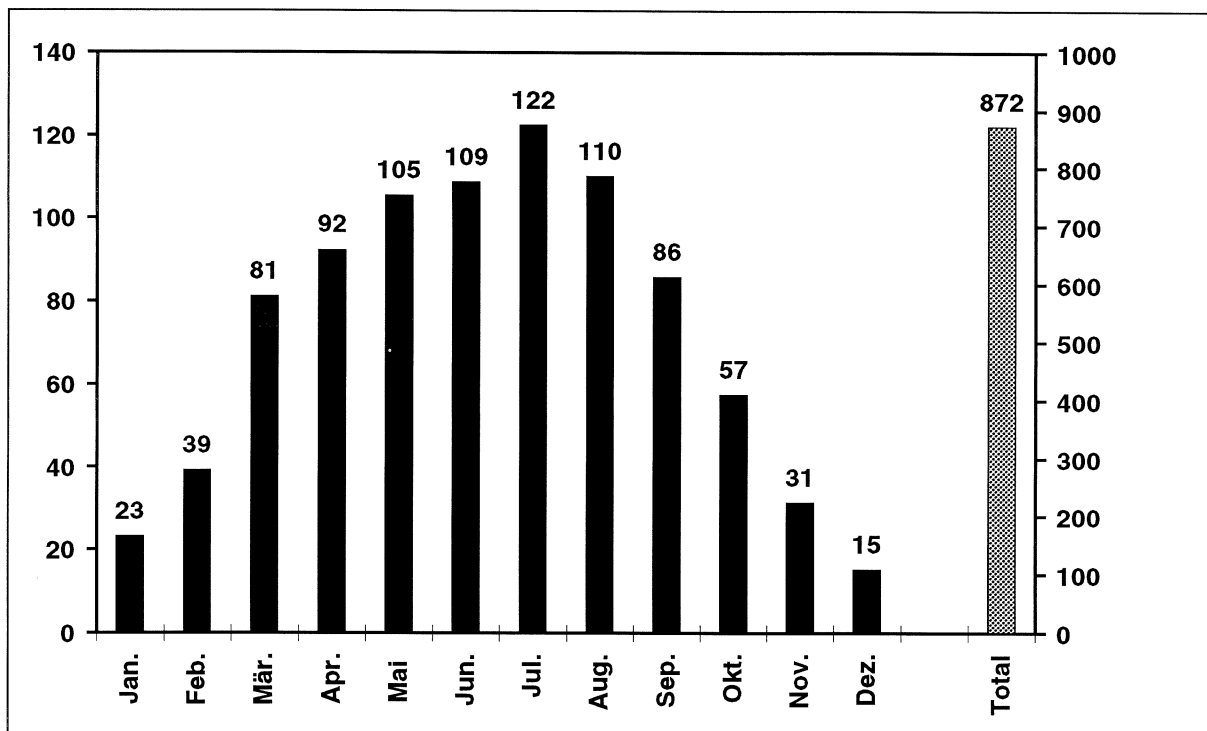


Bild 3: Durchschnittlicher Energieertrag der netzgekoppelten, mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten PV-Anlagen in Burgdorf in einem Normaljahr in kWh/kWp.

5. Detaillierte Analyse des Betriebsverhaltens

Die Sonneneinstrahlung wird in Burgdorf an der ISB zentral gemessen und für jede Anlage auf die entsprechende Solargeneratoreinigung und -orientierung umgerechnet. Bei jeder Anlage ist ein einfaches Datenerfassungsgerät installiert, das die Energieproduktion misst. Mit diesen Daten lässt sich die normierte Darstellung mit den Werten für Referenzertrag Y_f , Endertrag Y_f , Gesamtverluste L_C+L_S sowie Performance Ratio PR für jede Anlage erstellen. Obwohl der messtechnische und somit finanzielle Aufwand recht gering ist, können Fehlfunktionen (siehe Bild 4, *oben auf nächster Seite*) sicher erkannt werden (siehe auch [3]).

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Energieertrag der mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten netzgekoppelten PV-Anlagen in Burgdorf erreicht in einem Normaljahr 872 kWh/kWp. Er liegt damit um einige Prozent höher als der schweizerische Durchschnitt. Optimal dimensionierte PV-Anlagen neuester Technologie erreichen in Burgdorf Jahresenergieerträge von über 1000 kWh/kWp.

Sehr positiv auf den Energieertrag der Burgdorfer Anlagen wirkt sich sicher das "Burgdorfer Modell" (Vergütung von Fr. 1.- / kWh) aus, das die Anlagebesitzer anspornt, ihre Anlagen gut zu warten. Dank dem Förderprogramm des Bundes und der Möglichkeit, in Burgdorf auf Schulhausdächern Privatanlagen zu errichten, entstanden ab 1994 viele Anlagen neuerer Technologie. Bei diesen neueren Anlagen wurden, im Vergleich zu älteren, verbesserte Komponenten eingesetzt, die eine Erhöhung des Energieertrages zur Folge hatten.

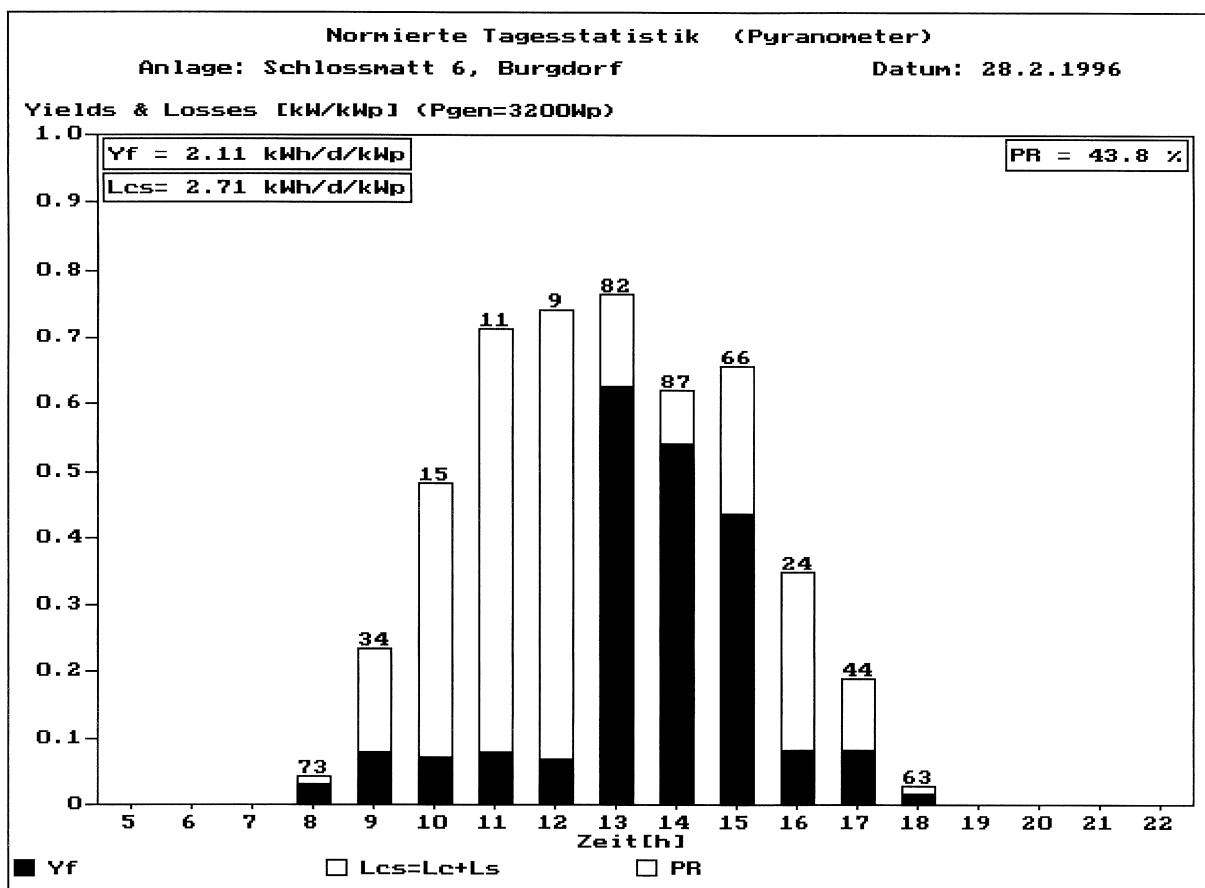


Bild 4: Wechselrichter-Fehlfunktion, dokumentiert mit einfacher normierter Darstellung [3]. Der Wechselrichter speist zeitweise nur einen Teil der Energie ins Netz ein (tiefes Performance Ratio). Wäre an dieser Anlage keine Messdatenerfassung vorhanden, würde die Fehlfunktion u.U. über längere Zeit nicht entdeckt.

Im Rahmen eines neuen Projektes (Beginn Oktober 1996, Finanzierung durch PSEL, BEW und IBB) ist vorgesehen, die Gründe für diese hohen Erträge an einzelnen auffälligen Anlagen durch genaue Messungen zu eruieren.

Verdankungen

Die Arbeiten der ISB auf dem Gebiet der Photovoltaik werden unterstützt durch das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), den Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), die Industriellen Betriebe Burgdorf (IBB), die BKW Energie AG und das Elektrizitätswerk der Stadt Bern. All diesen Institutionen gebührt für ihre Unterstützung, ohne die diese Arbeiten nicht hätten durchgeführt werden können, herzlicher Dank.

Literatur

- [1] J. Remund, E. Salvisberg und S. Kunz: „Meteonorm 1995“. BEW Bern, 1995.
- [2] Ch. Meier: „Photovoltaik-Energiestatistik 1995“. SEV/VSE-Bulletin 10/96.
- [3] H. Häberlin und Ch. Beutler: „Analyse des Betriebsverhaltens von PV-Anlagen durch normierte Darstellung von Energieertrag und Leistung“. 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, März 1996.
- [4] H. Häberlin, F. Käser, Ch. Liebi, Ch. Beutler: „Resultate von neuen Leistungs- und Zuverlässigkeitstests an Wechselrichtern für Netzverbundanlagen“. 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, März 1996.