

Überdurchschnittlicher Energieertrag von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen in Burgdorf

Dank der Vergütung von Fr. 1.– für jede von einer Photovoltaikanlage ins Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde durch das lokale EW («Burgdorfer Modell») sind in Burgdorf in den letzten Jahren viele netzgekoppelte Photovoltaikanlagen entstanden. Mit einer total installierten Leistung von 210 kWp oder etwa 14 Wp pro Einwohner hat Burgdorf auch die Ziele von Energie 2000 bereits 1995 weit übertraffen. Das Burgdorfer Modell wirkt sich aber auch bezüglich des Energieertrags der realisierten Anlagen sehr positiv aus. Der Energieertrag der mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten Anlagen liegt mit 860 kWh/kWp in einem Normaljahr um einige Prozente über dem schweizerischen Durchschnittswert. Anlagen neuester Technologie erreichen sogar Energieerträge von über 1000 kWh/kWp/Jahr.

Einleitung

Aus einem von der ISB im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, des Wasser- und Energiewirtschaftsamtes des Kantons Bern und der IBB durchgeführten Projekt waren an vielen Anlagen in Burgdorf noch Messgeräte vorhanden, die eine zeitlich fein aufgelöste Analyse des Energieertrags der Anlagen in Burgdorf erlaubten, so dass auch speziellere Anlageprobleme (z. B. sporadische Wechselrichter-Fehlfunktionen) erkennbar waren.

Um die verschiedenen Anlagen in einfacher Weise miteinander vergleichen zu können, wird in diesem Beitrag der spezifische Energieertrag der Anlagen in Kilowattstunden pro Kilowatt peak (kWh/kWp) angegeben. Weil dabei der Energieertrag durch die Anlage-Nennleistung dividiert wird, spielt diese keine Rolle mehr, der Energieertrag wird bei jeder Anlage auf 1 kWp (1 Kilowatt Spitzenleistung bei Standard-Bedingungen: Sonneneinstrahlung 1 kW/m², Zellentemperatur 25 °C, Normspektrum AM 1.5) umgerechnet.

Energieproduktion von Juli 1995 bis Juni 1996 (12 Monate)

In der ersten Hälfte des vergangenen Jahres wurden insgesamt fünf neue

Anlagen in Betrieb genommen. Insbesondere wurden auf dem Schlossmattschulhaus vier Anlagen neuester Technologie realisiert. Um diese interessanten Anlagen ebenfalls in die Auswertung über ein vollständiges Jahr einbeziehen zu können, wurde als Auswertungsperiode die Zeit vom 1. Juli 1995 bis 30. Juni 1996 gewählt. Anlagen, die nach dem 1. Juli 1995 in Betrieb genommen wurden, sind in den folgenden Ergebnissen *nicht* berücksichtigt.

Die mittlere Energieproduktion der 20 mehr als ein Jahr alten Anlagen in dieser

Bezugsperiode lag mit 877 kWh pro kWp deutlich über dem schweizerischen Mittelwert von 820 kWh pro kWp. Betrachtet man nur die mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten Anlagen, beträgt der Energieertrag sogar 908 kWh pro kWp.

Anlagen neuester Technologie erreichten Produktionswerte, welche weit über der magischen Grenze von 1000 kWh/kWp lagen. Die beste Anlage erreichte in dieser Zeit gar 1092 kWh pro kWp.

Insgesamt betrug der Energieertrag nur gerade bei vier Anlagen weniger als 850 kWh pro kWp. Alle anderen Anlagen erreichten, z. T. trotz Wechselrichterausfällen, 850 kWh pro kWp und mehr.

Meteorologische Bedingungen in Burgdorf

Weshalb erreichen denn nun die Burgdorfer Anlagen so hohe Energieerträge? Ist Burgdorf etwa sonneneinstrahlungs-

Anlage/Standort	P ₀ [kWp]	β [°]	Wechselrichter	Module	Winter-Energie [%]	Ertrag Y ₁ [kWh/kWp]
Schlossmatt 7	3.18	30	Solarmax S	Siemens M55	29.1	1034
Schlossmatt 8	3.18	30	Solarmax S	Siemens M55	29.1	1025
Schlossmatt 6	3.18	30	Solarmax S	Siemens M55	27.2	993
Schlossmatt 9	3.24	30	Solarmax S	Kyocera G108	29.0	969
Firma 4	3.06	30	Solcon 3400HE	Kyocera K51	29.1	962
Schlossmatt 3	3.06	30	TopClass 2500 II	Kyocera G102	30.0	929
Schlossmatt 5	3.18	30	TopClass 4000 II	Siemens M55	29.4	919
GIBBU	3.07	30/60	Solcon 3400HE	Solarex MSX64	31.4	911
Schlossmatt 1	3.18	30	TopClass 4000 II	Siemens M55	30.6	908
Schlossmatt 2	3.18	30	TopClass 4000 II	Siemens M55	30.4	891
IBB/Gsteighof	16.00	30	Solarmax 15	Solarex MSX120	27.6	890
Schlossmatt 4	3.06	30	Solcon 3400HE	Kyocera G102	30.2	873
Firma 3	2.97	35	TopClass 3000	Siemens M55	29.1	849
ISB	59.66	30	Diverse	Siemens M55HO	28.0	826
Privathaus 2	3.18	45	Solcon 3300HE	Siemens M55	30.1	811
Privathaus 1	3.18	28	TopClass 3000	Siemens M55	25.9	811
Gymnasium	3.06	30	TopClass 2500 II	Kyocera K51	28.4	793
Firma 1	63.00	25	Rot. Masch.	Siemens M55	26.1	771
Privathaus 3	1.44	38	PVWR 1500	Solarex MSX60	27.0	771
Firma 2	3.18	60	Solcon 3300HE	Siemens M55	32.9	605
Mittelwert:						831
Mittelwert der Anlagen mit elektronischem Wechselrichter:						860

Tabelle 1: Energieertrag der Burgdorfer PV-Anlagen in einem Normaljahr (Sonneneinstrahlung entspricht langjährigem Mittel).

*Christian Beutler
Dipl. El.-Ing. HTL, Assistent ISB
Dr. sc. techn. Heinrich Häberlin
Dipl. El.-Ing. ETH, Prof. ISB

mässig besser als andere Standorte im Mittelland?

In Meteonorm 95 sind von einer Vielzahl von A-Netz-Stationen der SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt) langjährige Mittelwerte der Sonneneinstrahlung und von anderen klimatischen Daten gespeichert. Der Vergleich mit anderen Standorten im Mittelland zeigt, dass Burgdorf durchaus ein durchschnittlicher Mittellandstandort ist. Es gibt im Mittelland Standorte wie Neuchâtel, Bern-Liebefeld oder Payerne, die bis zu 6 % mehr Sonneneinstrahlung aufweisen als Burgdorf. Natürlich gibt es auch schlechtere Standorte wie Schaffhausen, Wynau oder Luzern, die weniger Sonneneinstrahlung erhalten als Burgdorf.

Zu betrachten ist nun die Sonneneinstrahlung in Burgdorf in unserer Bezugsperiode (Juli 1995 bis Juni 1996) im Vergleich zum langjährigen Mittel. Die Sonneneinstrahlung in Horizontalebene wird seit mehr als 4½ Jahren auf dem Hauptgebäude der ISB gemessen. In unserer Bezugsperiode betrug die Sonneneinstrahlung in Horizontalebene 1207 kWh/m². Für die Umrechnung auf ein sog. 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 4½-Jahres-Durchschnittswert der ISB-Messung in Burgdorf erhält man den Wert 1143 kWh/m². Damit war die Sonneneinstrahlung in der Zeit zwischen Juli 1995 und Juni 1996 in Burgdorf um 5.6 % zu hoch. Die folgenden Umrechnungen der Energieerträge basieren auf diesem Wert.

Energieproduktion in einem Normaljahr

Rechnet man die Ertragsdaten von Juli 1995 bis Juni 1996 auf ein Normaljahr um, so erhält man als Durchschnittswert immer noch 831 kWh pro kWp (s. Tabelle 1). Betrachtet man wiederum nur die Anlagen mit elektronischem Wechselrichter, so beträgt der Energieertrag 860 kWh pro kWp (s. Bild 2). Dieser Wert liegt um fast 5 % über dem schweizerischen Durchschnittswert. Die besten Anlagen erreichen auch in einem Normaljahr Energieerträge von über 1000 kWh pro kWp. Der Winterenergie-

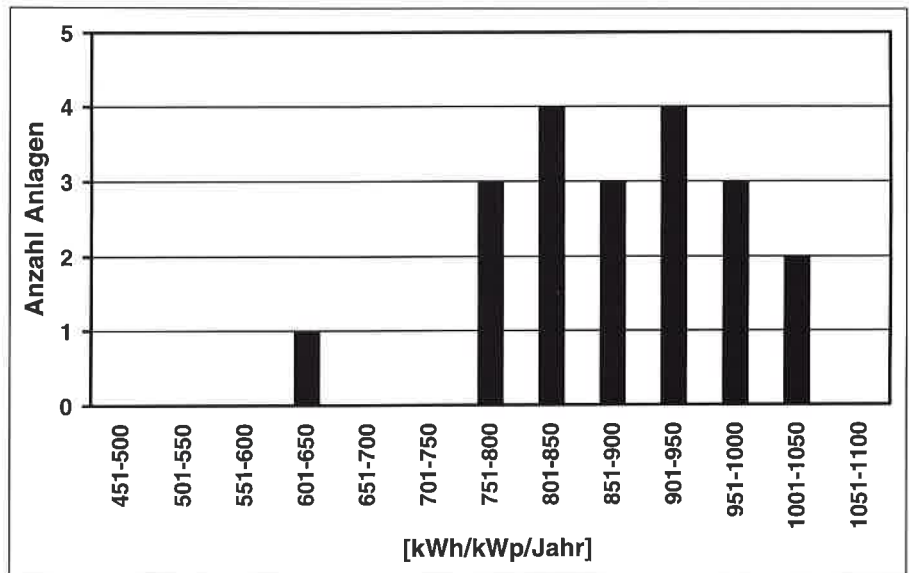


Bild 1: Endertrag der Burgdorfer PV-Anlagen in Klassen aufgeteilt in einem Normaljahr.

anteil liegt zwischen 26.1 % und 32.9 %. Ordnet man die einzelnen Anlagen bestimmten Ertragsklassen zu, so ist ersichtlich, dass die meisten Anlagen einen Ertrag zwischen 800 und 950 kWh pro kWp aufweisen (s. Bild 1). Nur gerade vier Anlagen liegen unter 800 kWh pro kWp. Fünf Anlagen weisen Erträge von 950 kWh pro kWp und mehr auf.

Analyse der Energieproduktion

Im folgenden sollen nun die Unterschiede im Energieertrag der einzelnen Anlagen in Burgdorf näher analysiert werden.

Die besten Anlagen

Spitzenreiter bezüglich Energieproduktion sind die 1995 in Betrieb genommenen Anlagen mit Siemens-Solarmodulen und dem trafolosen Wechselrichter Solarmax S (Schlossmatt 6–8). Sie übertreffen die älteren Anlagen am gleichen Standort um bis zu 18 %. Die Gründe für diese starke Steigerung des Energieertrages liegen vor allem in der einfachen, verlustarmen Gleichstromverkabelung. Dank der hohen Betriebsspannung und dem kleinen Betriebsstrom können die Verluste sehr tief gehalten werden. Weiter fallen die Verluste an den Strangdioden weg. Auf der Solar- modulseite können zurzeit nur Vermutungen angestellt werden: Die effektiv gelieferte Leistung neuerer Solarmodule stimmt wahrscheinlich besser mit den Herstellerangaben überein, d. h. die

gelieferte Leistung ist nicht mehr 10 %–15 % tiefer als die spezifizierte Leistung, wie dies früher oft der Fall war. Wesentlich ist auch die Streuung der Modulleistungen, die bei neueren Modulen vermutlich kleiner ist als früher. Dadurch können die Mismatch-Verluste tief gehalten werden.

Ebenfalls auf fast 1000 kWh/kWp bringt es die Anlage Schlossmatt 9, die mit Kyocera-Solarmodulen und dem Wechselrichter Solarmax S ausgerüstet ist.

Von den älteren Anlagen schneidet diejenige der Firma 4 besonders gut ab. Hier wirken sich optimale geographische Bedingungen (Neigung 30°, Ausrichtung genau nach Süden, keine Abschattungen) und der sehr gute Teillastwirkungsgrad des Solcon-Wechselrichters positiv aus. Zur Steigerung des Energieertrages hat der Anlagebesitzer zudem im Winter gefallenen Schnee jeweils rasch entfernt.

Die Anlagen mit dem geringsten Energieertrag

Die Anlage Gymnasium wird, besonders in den Wintermonaten, recht stark durch Bäume beschattet. Dies konnte durch Aufnahme eines Besonnungsdiagrammes leicht bestätigt werden. Besonders beim Vorhandensein von (Laub-)Bäumen besteht oft die Meinung, ein Baum ohne Blätter (im Winter) verursache ja keinen relevanten Schatten. Dem ist leider nicht so.

Negativ auf den Energieertrag wirkt sich auch der Einsatz einer mechanischen

Umformergruppe (Gleichstrommotor-Asynchrongenerator) anstelle eines elektronischen Wechselrichters aus. Besonders im Winter entstehen durch den sehr schlechten Teillastwirkungsgrad der Umformergruppe grosse Verluste. Die Anlage Firma 1 liegt deshalb sehr weit hinten. Ein ähnliches Problem hat die kleinste Burgdorfer Anlage, die Anlage Privathaus 3: Hier ist ein älterer Wechselrichter mit einem schlechten Teillastwirkungsgrad in Kombination mit einem unterdimensionierten Solargenerator im Einsatz.

Als Schlusslicht in der Rangliste fungiert die Fassadenanlage Firma 2. Negativ wirken sich hier der Anstellwinkel von 60°, die starke Beschattung durch einen Gebäudeteil im Sommer sowie wiederum der schlechte Teillastwirkungsgrad des Wechselrichters aus.

Die Anlagen im Mittelfeld

Energieerträge um 850 kWh pro kWp sind für Anlagen nicht mehr neuester Technologie sicher sehr gut. Einzelne Anlagen sollten aber gleichwohl höhere Erträge aufweisen, so z.B. die Anlage Schlossmatt 4, deren Zurückfallen gegenüber der Anlage Schlossmatt 3 ohne weitere Messungen nicht erklärbar ist.

Energieproduktionsverluste können auch bei Anlagen entstehen, die nicht nur der reinen Stromproduktion dienen, sondern an denen Messungen, Versuche und wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt werden. Dies betrifft vor allem die 60-kWp-Anlage der ISB und die

3-kWp-Anlage der Gewerblich-Industriellen Berufsschule GIBBU.

Wechselrichter- und andere Ausfälle

Leider treten auch heute noch ab und zu Anlage-Ausfälle auf. Meistens betreffen diese den Wechselrichter. Hierbei wurden aber in den letzten Jahren deutliche Verbesserungen erzielt, waren doch noch vor ein paar Jahren mehrere Ausfälle pro Jahr nicht aussergewöhnlich.

Je nachdem in welcher Jahreszeit solch ein Ausfall auftritt und wie schnell er bemerkt wird, kann der Jahresenergieertrag recht stark beeinträchtigt werden. Ein Beispiel hierzu ist der Wechselrichter-Ausfall der Anlage Schlossmatt 6 Ende Februar 1996: Der Wechselrichter lief zwar noch, speiste jedoch nur noch einen Teil der Solarenergie ins Netz ein. Obschon der Defekt innert kurzer Zeit entdeckt wurde und die Reparatur sehr rasch erfolgte, entstand innerhalb von 9 Tagen ein Energieproduktionsverlust von 97 kWh oder fast 3% des Jahresenergieertrages!

Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Energieertrag der mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten netzgekoppelten Photovoltaikanlagen in Burgdorf erreicht in einem Normaljahr 860 kWh pro kWp. Er liegt damit um einige Prozente höher als der schweizerische Durchschnitt. Optimal dimen-

sionierte PV-Anlagen neuester Technologie erreichen in Burgdorf Jahresenergieerträge von über 1000 kWh pro kWp.

Burgdorf kann durchaus als durchschnittlicher Mittellandstandort betrachtet werden. Dies belegen langjährige Klimadaten von diversen Stationen im Mittelland. Umgesetzt auf die Schweiz bedeuten somit die Burgdorfer Ergebnisse, dass der in der VSE-Statistik ermittelte Durchschnittswert von 820 kWh pro kWp keineswegs als obere Grenze zu betrachten ist. Falls in Zukunft viele optimale Anlagen gebaut werden, kann auch der schweizerische Mittelwert ansteigen.

Positiv auf den Energieertrag der Burgdorfer Anlagen wirkt sich sicher das Burgdorfer Modell (Vergütung von Fr. 1.– pro 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 Anlagen verbesserte Komponenten eingesetzt, die eine Erhöhung des Energieertrages zur Folge hatten.

Abschliessend ist festzuhalten, dass es auch heute nicht nur eine «ideale, beste» PV-Anlage gibt. Die Ergebnisse der Burgdorfer Anlagen zeigen, dass der Energieertrag innert ein paar Jahren massiv gesteigert werden konnte. Zuverlässige Anlagen mit hohen Energieerträgen können heute mit mehreren Konfigurationen, mit optimal aufeinander abgestimmten Komponenten, realisiert werden.

Es wäre sehr interessant, durch gezielte Messungen an einzelnen auffälligen Anlagen die genauen Gründe für die Rekorderträge auch messtechnisch zu erhärten und das gewonnene Wissen für die Verbesserung und Optimierung künftiger Anlagen einzusetzen.

Verdankungen

Die Arbeiten der ISB auf dem Gebiet der Photovoltaik werden unterstützt durch das Bundesamt für Energiewirtschaft, die Industriellen Betriebe Burgdorf, die BKW Energie AG und das Elektrizitätswerk der Stadt Bern. Dank gebührt auch den Anlagebesitzern, die ihre Anlagen für unsere wissenschaftlichen Untersuchungen zur Verfügung stellen.

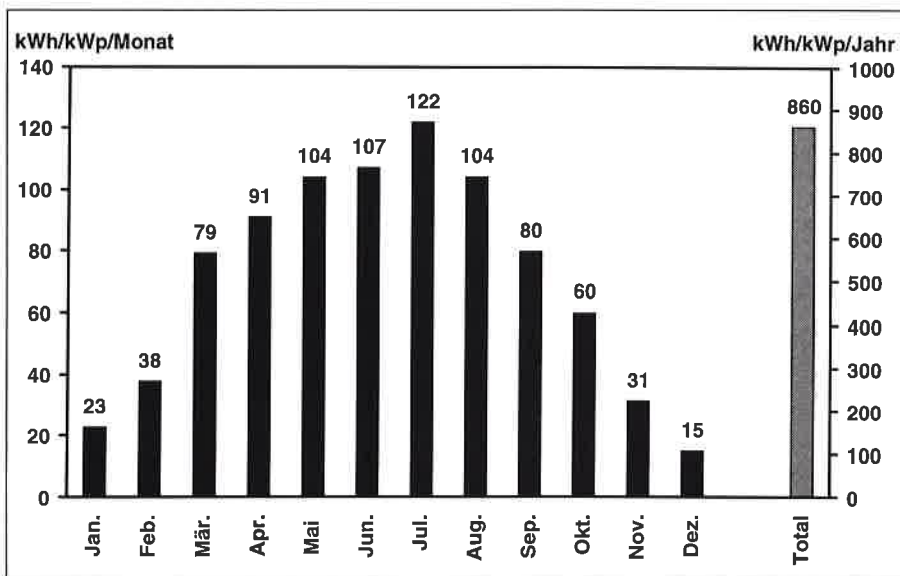


Bild 2: Durchschnittlicher Energieertrag der netzgekoppelten, mit elektronischen Wechselrichtern ausgerüsteten PV-Anlagen in Burgdorf in einem Normaljahr.