# Betriebsauswertung von Solarzellenanlagen im Netzparallelbetrieb

Autor(en): **Moser, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **82 (1991)**

Heft 10

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902962

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Betriebsauswertung von Solarzellenanlagen im Netzparallelbetrieb

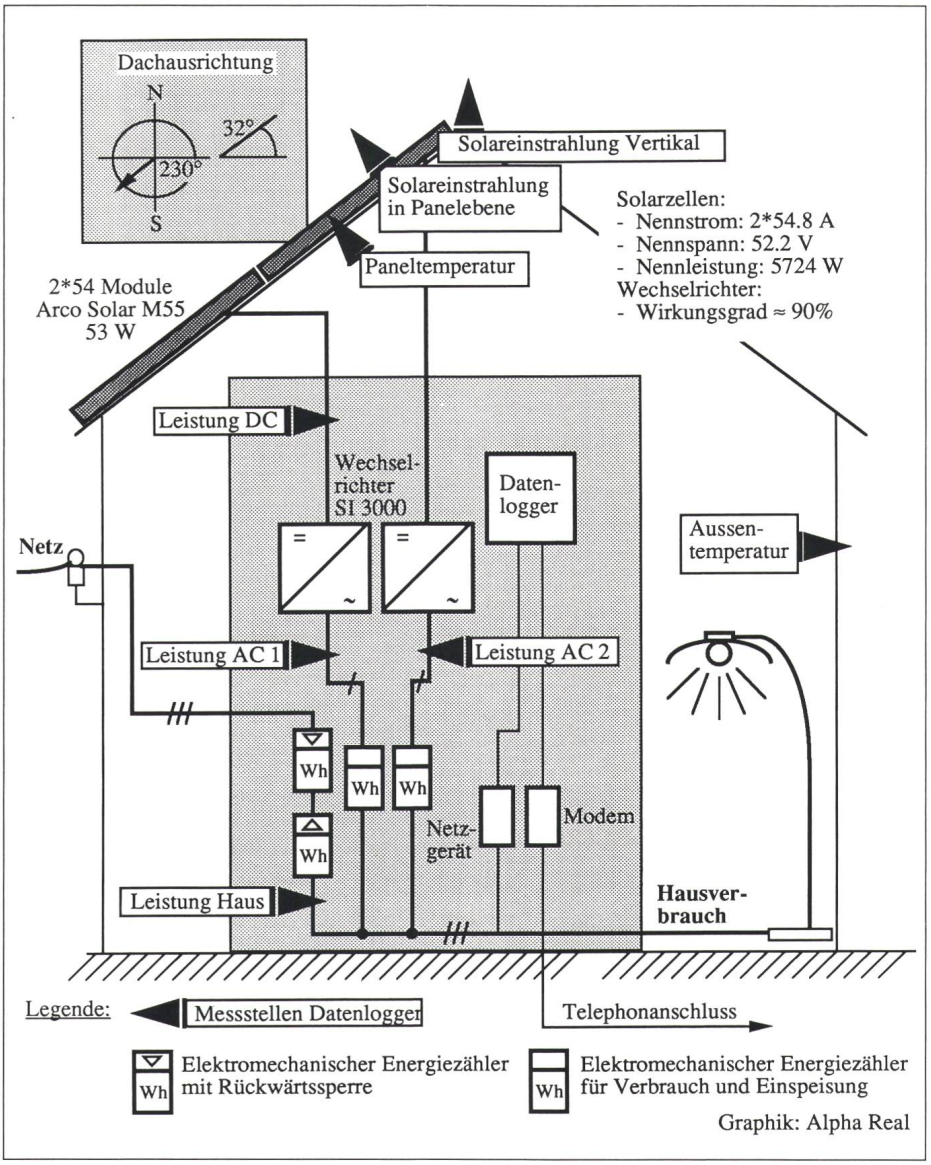
R. Moser

***Netzgebundene Solarzellenanlagen könnten in der Schweiz unter den neuen erneuerbaren Energien am ehesten einen gewissen Beitrag zur Elektrizitätserzeugung leisten. Über das Betriebsverhaltens dieser Anlagen fehlten allerdings bisher detaillierte Kenntnisse. Im Rahmen eines Projektes des Bundesamtes für Energiewirtschaft wurden deshalb während den vergangenen zwei Jahren fünf netzgekoppelte Solarzellenanlagen ausgemessen. Der vorliegende Bericht stellt die wichtigsten Resultate der Untersuchung zusammen.***

***Des installations photovoltaïques reliées au réseau pourraient, en Suisse, fournir à long terme une certaine contribution à la production d'électricité. Des connaissances détaillées sur l'exploitation de ces installations étant toutefois jusqu'à présent inexistantes, cinq installations photovoltaïques reliées au réseau ont été analysées durant deux ans dans le cadre d'un projet de l'Office fédéral de l'énergie. Le présent article réunit les principaux résultats de l'étude.***

## Einleitung

Netzgebundene Solarzellenanlagen existieren in der Schweiz seit 1987. Ihre Zahl hat seither kontinuierlich zugenommen und liegt heute bei gegen 200. Im Wissen um die Bedeutung solcher dezentraler Elekrizitätserzeuger hat das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) 1988 bei der Alpha Real AG in Zürich eine Studie in Auftrag gegeben.

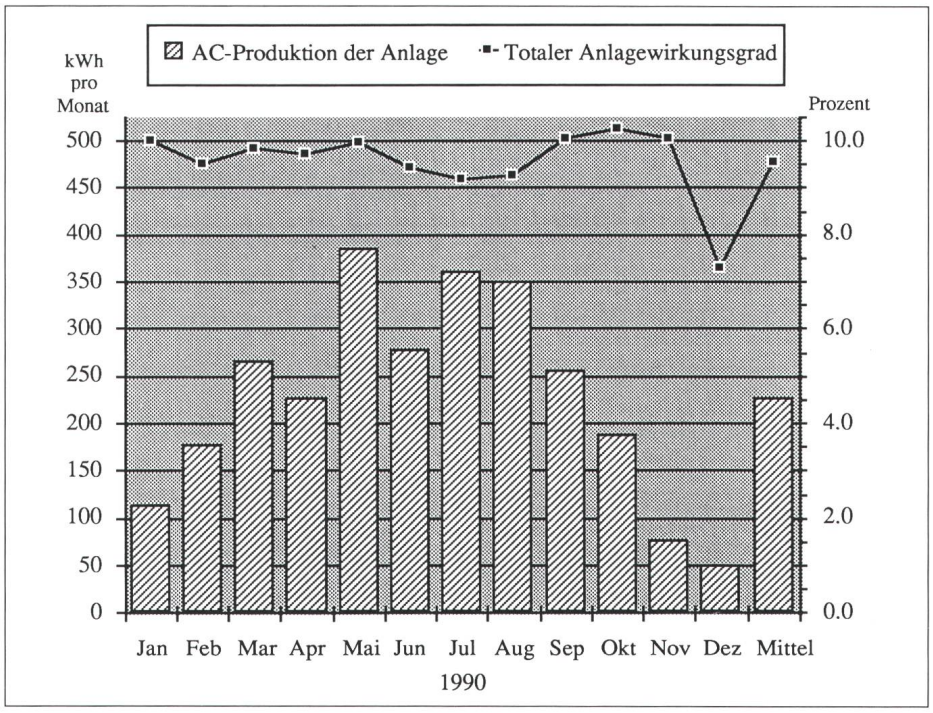



**Figur 1 Anlageskizze der Solarzellenanlage Mönchaltorf.** Die Skizze zeigt die wichtigsten Anlageteile sowie alle eingebauten Messsonden. Die umfangreichen Ausmessungen erlauben eine detaillierte Beurteilung der Anlage sowohl in kurzzeitigen als auch in langfristigen Abläufen.

**Adresse des Autors**
*Rolf Moser*, Alpha Real AG,
Feldeggstrasse 89, 8008 Zürich

Diese sollte einige solcher Anlagen detailliert ausmessen. Den folgenden Punkten sollte dabei besondere Beachtung geschenkt werden:

- Netzgekoppelte Solarzellenanlagen sind von besonderem Interesse für die Elektrizitätswerke. Hier stehen verschiedenste Fragen zur Beantwortung an. Es geht insbesondere darum, wie gut solche Anlagen als Energielieferant für ein öffentliches Netz geeignet sind.
- Neben der Solaranlage sollte bei einzelnen Standorten auch der angeschlossene Haushalt ausgemessen werden. Hier sollen Aussagen über das Zusammenspiel der Anlage und des Haushaltes gemacht werden können.
- Planer einer Solarzellenanlage stützen sich bei der Voraussage des zu erwartenden Energieertrages auf Simulationsmodelle. Besonders häufig wird dabei die Meteonorm verwendet, die die Berechnung der jährlichen Einstrahlungsmenge auf beliebig geneigte Flächen erlaubt. Anhand der Messdaten sollen nun verschiedene Simulationsprogramme mit den tatsächlichen Produktionsdaten verglichen werden.

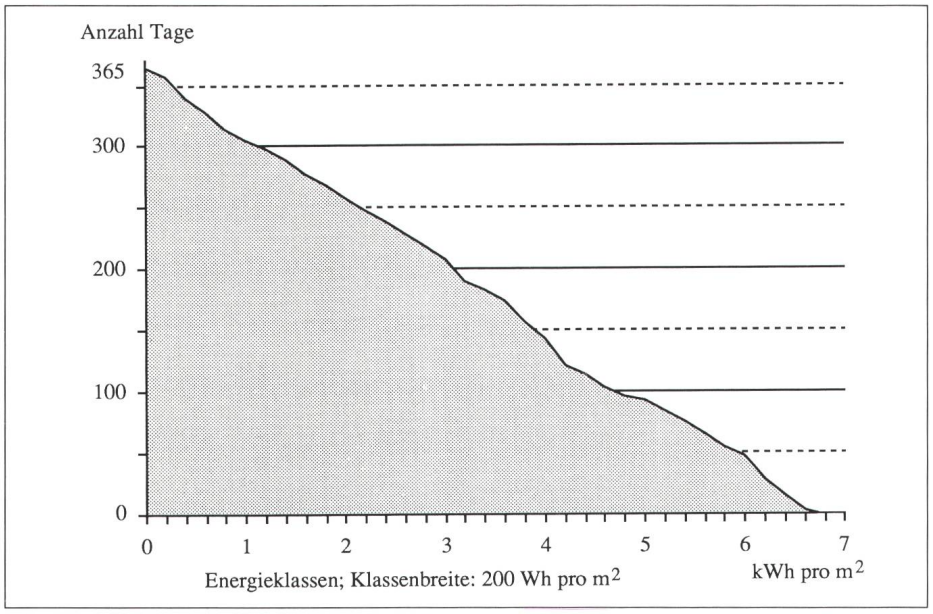



**Figur 2 AC-Produktion und totaler Anlagewirkungsgrad pro Monat der Solarzellenanlage Liestal im Jahre 1990.**
Die Produktion zeigt im April und im Juni wetterbedingte Einbrüche gegenüber einem mittleren Jahr. Der totale Anlagewirkungsgrad liegt üblicherweise leicht unter 10%. Der Einbruch im Dezember rührt von den massiven Schneefällen im letzten Winter her, die sich bei der Strahlenmessung weniger stark niedergeschlagen haben als bei der Produktion.

## Solarzellenanlagen im netzparallelen Betrieb

Solarzellen werden schon seit den 60er Jahren zur Elektrizitätserzeugung genutzt. Sie wurden lange Zeit nur dann eingesetzt, wenn kein öffentliches Netz in der Nähe die Elektrizitätsversorgung gewährleistete oder wenn ein netzunabhängiger Betrieb erwünscht war (z.B. Satelliten). Bei einem solchen Betrieb stellt sich jedoch immer das Problem, dass überschüssig produzierte Elektrizität gespeichert werden muss. Allerdings existieren auch heute noch nur Elektrizitätsspeicher mit sehr beschränkter Energiekapazität. Für eine grössere Solarzellenanlage muss deshalb überzähliger Strom anders genutzt werden. Das Netz bietet sich hier als «Zwischenspeicher» an. Momentan nicht genutzter Strom wird eingespeist und von anderen Bezügern gebraucht. Falls der Bedarf im Haus die Produktion der Anlage übersteigt, wird wiederum Energie aus dem Netz bezogen.

Wird Elektrizität derart eingespeist, hat das allerdings auch direkte Folgen für das angeschlossene Netz. Für betroffene Elektrizitätswerke ist eine genaue Kenntnis des Verhaltens von Solarzellenanlagen spätestens dann nötig, wenn diese einen nennenswerten Anteil der verbrauchten elektrischen Energie beisteuern.




**Figur 3 Verfügbarkeit der Einstrahlung (Tagessumme der Panelstrahlung) bei der Solarzellenanlage Liestal im Jahre 1989.**
Die Grafik zeigt auf, an wievielen Tagen im Jahr eine bestimmte Einstrahlungsenergie erreicht wurde. Ist man beispielsweise auf mindestens 2 kWh pro Quadratmeter und Tag angewiesen, so wird man mit dieser Einstrahlungsenergie an gut 250 Tagen im Jahr rechnen können. Übertragen auf die Elektrizitätsproduktion der Solarzellenanlage, die eine vergleichbare Charakteristik besitzt, bedeutet dies: Je höher die gewünschte Anzahl Tage mit einer bestimmten Mindestproduktion ist, desto kleiner ist die entsprechende Produktion.

## Messapparatur

Um alle erwähnten Auswertungen durchführen zu können, mussten die betreffenden Anlagen mit einer aufwendigen Messapparatur versehen werden (siehe Bild 1). Folgende Bedingungen sollten die aufgenommenen Datensätze erfüllen:

- Neben den wichtigsten elektrischen Kenngrössen (z.B. DC- und AC-Leistung) der Anlage interessieren auch meteorologische Grössen wie Aussentemperatur und Einstrahlung in der Ebene der Module. Ausserdem wollte man bei einzelnen Anlagen den Haushaltsverbrauch erfassen.
- Um Aussagen über momentane Zusammenhänge dieser Grössen machen zu können, mussten Messungen in möglichst kurzen Intervallen gemacht werden. Andererseits ist es nicht möglich, Messwerte im Sekundenbereich aufzuzeichnen, weil sich daraus Datensätze in nicht mehr handhabbarer Grösse ergeben. Mit diesen beiden Voraussetzungen wählte man schliesslich ein Intervall von 10 Minuten, das auch bei meteorologischen Messungen (z.B. der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt) üblich ist.

Die aus diesen Punkten resultierende Menge von Daten konnte nicht während der ganzen Messperiode von zwei Jahren im lokalen Messaufnehmer gespeichert werden. Aus diesem Grunde mussten die Daten regelmässig bei allen Anlagen eingesammelt werden. Um den Aufwand dafür zu reduzieren, wurden modernste elektronische Hilfsmittel eingesetzt. In der realisierten Lösung werden die Daten jede Nacht vom Messaufnehmer (Datalogger) via Modem und Telephonleitung an den zentralen Computer der Alpha Real AG in Zürich übermittelt. Diese Anordnung hat ausserdem den Vorteil, dass regelmässig überprüft werden kann, ob der Wechselrichter richtig funktioniert.

Resultat dieser aufwendigen Messungen sind somit die Datensätze aller relevanten Grössen von zwei Jahren. Diese Daten erlauben es nicht nur, Aussagen über aufsummierte Werte, beispielsweise die monatliche Produktion der Solarzellenanlage, zu machen, es lassen sich auch Quervergleiche über bestimmte Tageszeiten oder über Leistungen der Produktion oder des Verbrauches anstellen.

## Gesamtwirkungsgrade

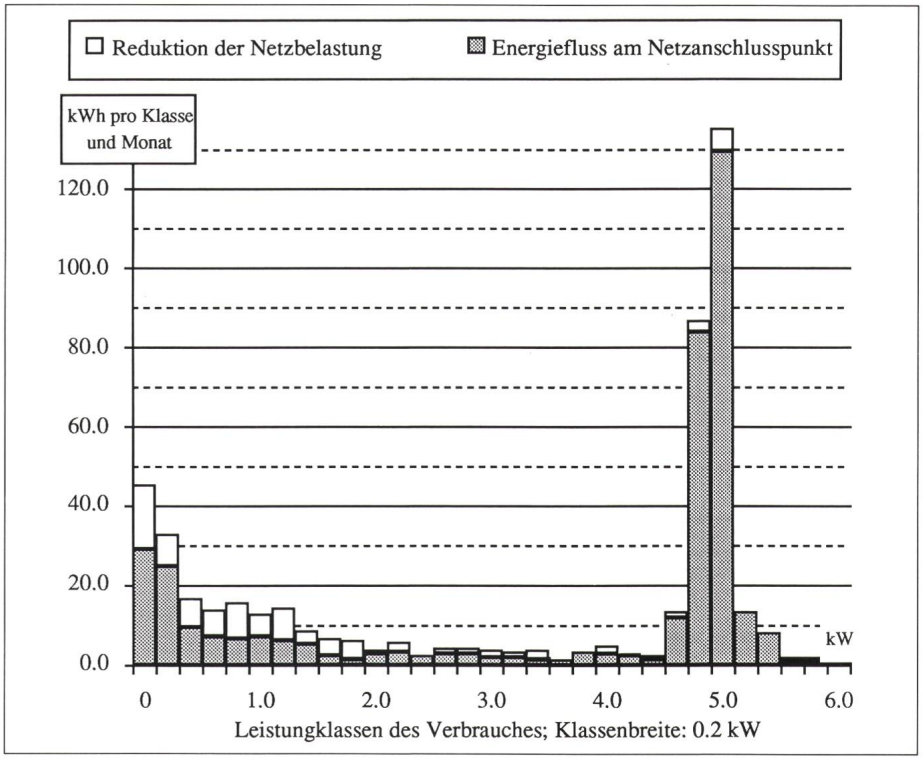
Die ausgemessenen Anlagen liegen im Bereich von 2 bis 6 $kW_p$-DC-Anlageleistung. Diese (maximale) DC-Leistung tritt allerdings nur bei optimalsten Verhältnissen auf und reduziert sich durch den Wechselrichter noch um jeweils etwa 10%.

Neben diesen momentanen Aussagen der Leistung interessieren den Anlagebetreiber die Ertragsdaten über das ganze Jahr. Hier wurden im Mittelland Erträge von etwa 950 kWh pro $kW_p$ installierter DC-Leistung gemessen. Für die Anlage im Tessin betrug dieser Wert etwas mehr als 1000 kWh pro $kW_p$. Dieser letzte Wert sollte eigentlich wegen den guten Wetterverhältnissen in diesem Landesteil höher liegen. Die entsprechende Anlage hat jedoch einige schlechte Parameter (Ausrichtung, Wechselrichterauslastung usw.), die sich negativ kumulieren.

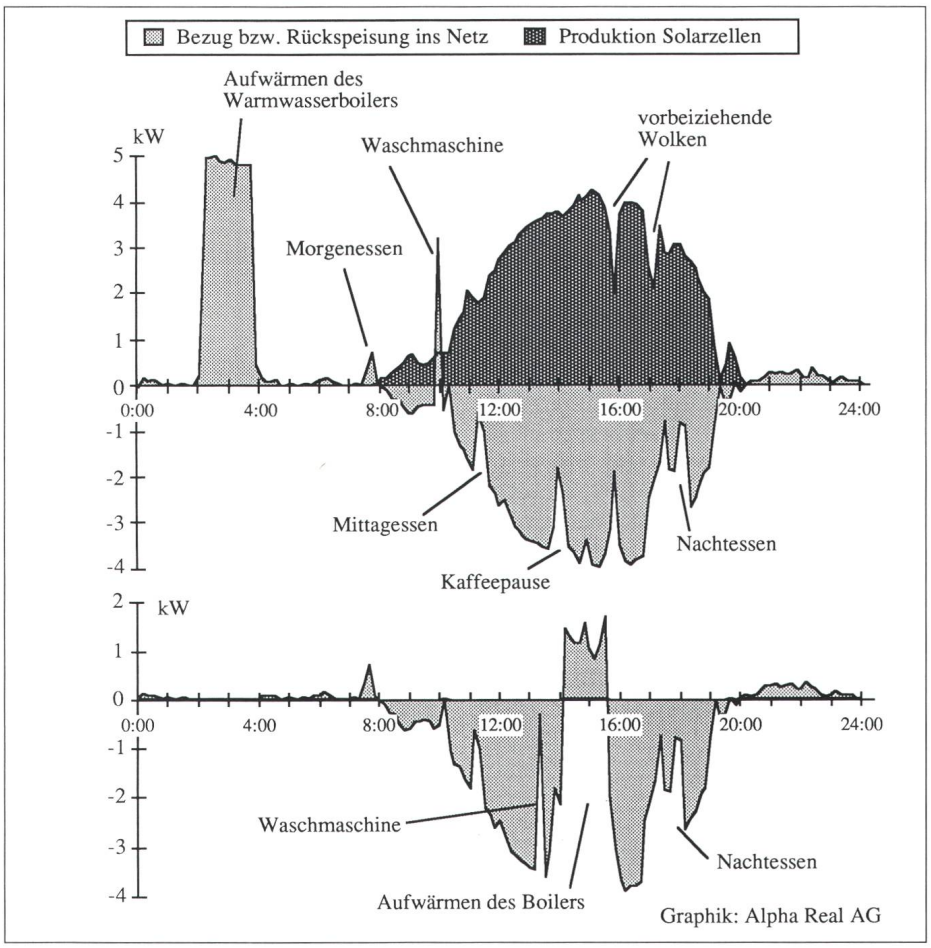
Neben den Erträgen der Anlage wurden auch die der Anlage zur Verfügung stehenden Einstrahlungen gemessen. Dies erlaubt es auszurechnen, wieviel der anfallenden Sonnenenergie in einem ganzen Jahr in Elektrizität umgewandelt wird. Diese Grösse des totalen Anlagewirkungsgrades hängt von verschiedenen Effekten ab:

- Die Solarzellen können ihrerseits lediglich einen Teil des Sonnenlichtes verwerten. Bei den verwendeten Modulen liegt dieser Wert bei 12,5%. Leider kann er aus technischen Gründen nicht beliebig gesteigert werden. Bei heutigen Laboraufbauten erreicht man Wirkungsgrade von höchstens 20% für Zellen, die mit normalem Sonnenlicht arbeiten.
- Bei hohen Temperaturen nimmt der Wirkungsgrad der Solarzellen ab. Vergegenwärtigt man sich, dass im normalen Betrieb Solarmodule häufig 50 °C warm werden, resultieren daraus weitere Einbussen im Bereich von 10% (bei 50 °C) der DC-Produktion.
- Auf der Gleichstromseite der Anlage, also zwischen Solarzellen und Wechselrichter, treten relativ grosse Ströme auf. Diese verursachen je nach Auslegung der Anlage Verluste im Bereich von 1% der DC-Produktion.
- Um den durch die Solarzellen produzierten Gleichstrom ins öffentliche Netz einspeisen zu können, muss dieser zuerst in Wechselstrom umgewandelt werden. Dies besorgt ein Wechselrichter, der gleichzeitig die Anlage in einem optimalen Arbeitspunkt betreibt. Die Wechselrichterverluste sind besonders bei kleinen umgesetzten Leistungen relativ gross. Oberhalb von etwa einem Sechstel der Nennleistung beträgt der Wechselrichterwirkungsgrad rund 90%.

Es ist relativ schwierig, diese Effekte rechnerisch für beispielsweise ein gan-




**Figur 4 Reduktion der Netzbelastung durch die produzierte Solarenergie bei der Solarzellenanlage Mönchaltorf im September 1989.**
Die durch die Anlage produzierte Energie kann ohne Umweg über das öffentliche Netz direkt im Haus verbraucht werden. Dadurch verringert sich die Belastung des Netzes um den jeweils während dem Verbrauch produzierten Anteil. In der obigen Grafik ist dieser Anteil weiss aufgetragen. Die Netzbelastung nimmt vor allem in den unteren Leistungsbereichen ab. Die grosse Belastung bei ca. 5 kW stammt hauptsächlich vom Warmwasserboiler des Hauses, der in der Nacht erwärmt wird. Dieser Anteil wird deshalb nur wenig reduziert. Eine Lastverschiebung gemäss Figur 5 könnte hier eine wesentliche Verbesserung bewirken.




**Figur 5 Simulierte Lastverschiebung an einem sonnigen Tag (24. April 1989).**
Das Diagramm oben zeigt die gemessenen Tagesverläufe von Produktion (■) sowie der Summe von Produktion und Verbrauch (■) der Netzbelastung. Das untere Diagramm zeigt die reduzierte Netzbelastung bei Verlegen der Boilererwärmung in die Zeit der maximalen Produktion. Bei der Solarzellenanlage Mönchaltorf liegt dieses Maximum im frühen Nachmittag, weil die Zellen relativ stark gegen Westen orientiert sind. Je weniger die Solarzellenanlage dann produziert, desto stärker würde die Netzbelastung durch die Boilererwärmung.

zes Jahr zu kumulieren. Aus diesem Grund sind Messungen, wie sie nun durchgeführt wurden, auch für die generelle Beurteilung solcher Anlagen wichtig. Die bei den Anlagen gemessenen Wirkungsgrade für ein ganzes Jahr betrugen im Mittel 9,5% (Bild 2). Dieser Wert liegt eher noch tiefer als bislang angenommen wurde. Hätte man in diesen Anlagen ausserdem polykristalline Module mit Wirkungsgraden von 11,4% verwendet, so wäre dieser Jahreswirkungsgrad der gesamten Anlage auf 8,7% zu stehen gekommen.

## Keine Bandenergie

Eine besondere Eigenheit von Solarzellenanlagen als Kraftwerk ist ihre Abhängigkeit von einer meteorologischen Grösse, der Einstrahlungsenergie der Sonne. Aus naheliegenden Gründen liefern Solarzellenanlagen nachts keine Energie. Interessant ist nun auch, wie sich die zur Verfügung stehende Sonnenenergie über den Tag verhält. Zu deren Beurteilung wurde in der Studie einerseits die Einstrahlung zu einer festen Tageszeit und andererseits die täglich anfallende Strahlungsenergie beurteilt. Bei der Beobachtung beider Grössen über ein ganzes Jahr wird klar, dass keine unteren Grenzen existieren. Man kann also nicht von einer täglich minimal produzierten Energie ausgehen (Bild 3). Dieser Effekt wird verstärkt durch die Tatsache, dass Solaranlagen während mehreren Tagen im Jahr schneebedeckt sein können. In diesem Zustand produzieren die Zellen keine nennenswerte Elektrizität. Auch in einem grösseren Verbund von Solarzellenanlagen wäre der Effekt in etwa derselbe, da ja bei starkem Schneefall jeweils grosse Teile des Landes betroffen wären.

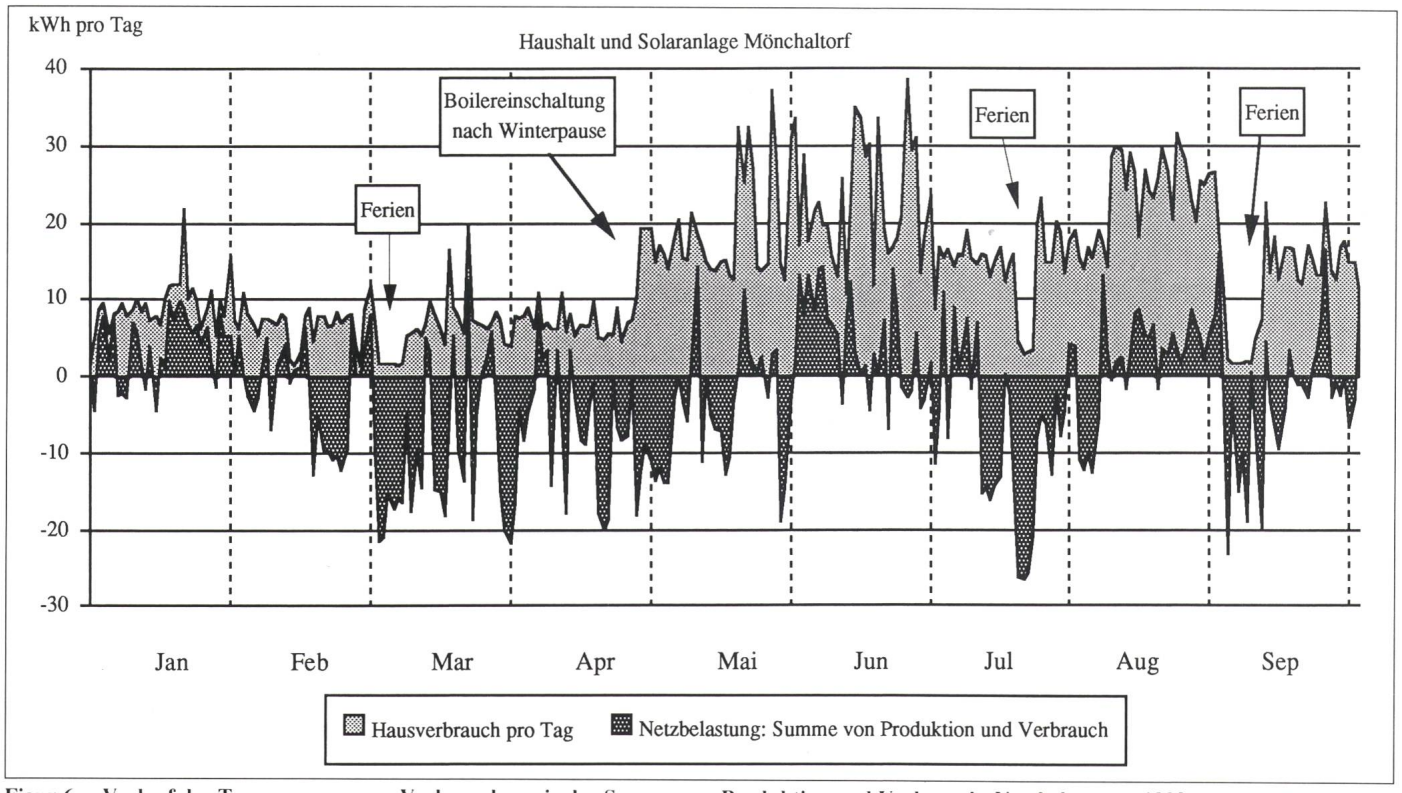
Eine weitere interessante Grösse in diesem Zusammenhang sind die Wechselrichterausfälle. Tatsächlich wurden im Mittel 1,5 Ausfälle pro Jahr und Anlage festgestellt. Dieser Wert kann damit erklärt werden, dass es sich um sehr neue Produkte handelt, schon im zweiten Messjahr konnte diese Quote reduziert werden. Langfristig ist bei den Wechselrichtern mit wesentlich weniger Ausfällen zu rechnen. Da Solarzellenanlagen sonst keine anfälligen Teile besitzen, wird ihre Verfügbarkeit dann durch Ausfälle kaum mehr beeinträchtigt. Ausserdem treten Wechselrichterausfälle punktuell auf. Für ein Verbundnetz entstehen daher bei Ausfällen einer Anlage keine wesentlichen Beeinträchtigungen.

## Eigenverbrauch

Die oben erwähnten Vorteile des netzparallelen Betriebes ziehen nach sich, dass im Netz durch das Einspeisen Übertragungsverluste entstehen. Der optimale Fall für das Netz tritt deshalb dann auf, wenn die produzierte Energie direkt durch angeschlossenen Verbraucher bezogen wird. Für das Elektrizitätswerk von besonderem Interesse ist der Fall, dass durch die Produktion der Solarzellenanlage Spitzen im Hausverbrauch des entsprechenden Bezügers gedeckt werden können. Somit interessieren sowohl zeitliches als auch leistungsmässiges Zusammenspiel von Produktion und Verbrauch.

Die Aussagen über den gemessenen Eigenverbrauch stützen sich lediglich auf einen Haushalt ab, in dem recht viele elektrisch betriebene Geräte verwendet werden. Neben Kochherd, Backofen und Tiefkühltruhe ist insbesondere ein elektrischer Boiler zu erwähnen. Ausserdem benutzen die Bewohner zeitweise ein Solarmobil. Ferner muss erwähnt werden, dass seitens der Hausbewohner keinerlei Anstrengungen unternommen wurden, Produktion und Verbrauch bewusst zu koordinieren. Ihr Verhalten entspricht also dem eines durchschnittlichen Verbrauchers.

Die leistungsmässige Übereinstimmung, die im Messprogramm festgestellt wurde, ist relativ gering (Bild 4). Zwar konnte in den niedrigen Leistungsbereichen eine generelle Reduktion des Verbrauches durch die produzierte Energie festgestellt werden. Besonders der Boiler aber, der nachts betrieben wird, trägt zu einer massiven Netzbelastung bei. Diese wird natürlich durch die nur tagsüber Energie produzierende Anlage nicht reduziert. Hier könnte allerdings mit einer Lastverschiebung recht viel erreicht werden (Bild 5). Auch andere elektrische Geräte liessen sich auf die Produktion abstimmen (z.B. Waschmaschine). Dies bedingt aber relativ grosse Umstellun-




**Figur 6 Verlauf der Tagessummen von Verbrauch sowie der Summe von Produktion und Verbrauch (Netzbelastung) 1990.**
Ist der Wert der Netzbelastung negativ, wurde mehr Strom produziert als verbraucht. Deutlich erkennbar sind der Einschaltpunkt des Boilers und die Ferien. Das Warmwasser wird in diesem Haushalt im Winter mit Holz erwärmt. In der Ferienzeit treten die grössten Produktionsüberschüsse auf.

gen im Verhalten der Benutzer der elektrischen Geräte. Wegen den bereits erwähnten Eigenschaften von Solarzellenanlagen (keine minimale Energieproduktion pro Tag) lassen sich allerdings Verbrauchsspitzen nicht immer auffangen.

## Simulationsprogramme

Simulationsprogramme spielen bei der Planung einer Solarzellenanlage eine relativ wichtige Rolle. Ihre Hauptaufgabe besteht meist darin, das Strahlungsangebot der Sonne für einen bestimmten Standort und eine bestimmte Dachausrichtung auszumachen. In einem zweiten Schritt muss aus dieser Sonnenenergie die zu erwartende produzierte elektrische Energie berechnet werden. Dieser zweite Schritt kann am einfachsten durch Einsetzen eines Gesamtwirkungsgrades, wie er oben beschrieben wurde, ausgeführt werden. Für genauere Resultate müssen spezielle Programme das Verhalten der Anlage zu beispielsweise jeder Halbstunde eines ganzen Jahres simulieren. Die Aufgabe der Studie bestand darin, die Güte und den Wert der verwendeten Simulationsprogramme festzustellen. Dazu konnten gemessene und simulierte Daten verglichen werden.

Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem von BEW herausgegebenen Meteonorm-Programm zu. Dieses berechnet die in beliebig geneigten Flächen anfallende Sonnenenergie pro Monat. Wie oben beschrieben wird daraus üblicherweise mittels Gesamtwirkungsgrad der Anlage die Elektrizitätsproduktion ermittelt. Wie die Studie zeigt, ist die Berechnung mit diesem Verfahren relativ genau, sofern man die oben angegebenen Gesamtwirkungsgrade einsetzt. Lediglich für die Tessiner Anlage zeigten sich grössere Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Diese sind einerseits auf die bereits erwähnten Schwächen dieser Anlage zurückzuführen. Andererseits wurde bei der Messstation Locarno-Monti, auf die sich die Meteonorm-Daten beziehen, vor wenigen Jahren auf automatische Messwerterfassung umgestellt. Die neuen Strahlungsdaten liegen durchwegs tiefer als die alten, die in die Meteonorm eingeflossen sind.

Der Einsatz von komplizierten Simulationsprogrammen lohnt sich lediglich, wenn detaillierte Daten über Horizont-, Kabel- oder Wechselrichterverluste vorausgesagt werden müssen. Dies empfiehlt sich vorwiegend für Grossanlagen im Bereich von einigen 10 kW Nennleistung.

## Ausblick

Angesichts der sehr jungen Technik, die bei der Realisierung von Solarzellenanlagen zur Anwendung kommt, kann schon in wenigen Jahren damit gerechnet werden, dass deren Zuverlässigkeit im Rahmen von bekannten technischen Geräten liegen wird. Die vorliegende Studie zeigt auf, dass die in den EGES-Szenarien angenommenen Berechnungsgrundlagen weitgehend richtig sind. In diesem Sinne sind auch die vorausgesagten Zahlen für den Photovoltaikanteil (rund 8% des Elektrizitätsverbrauches im Jahre 2025) immer noch erreichbar. Allerdings sind die dazu nötigen Unterstützungsbeiträge des Staates weiter zu erhöhen. Die Studie gibt hier interessante Anhaltspunkte über die Eigenschaften der Solarzellenanlagen im netzparallelen Betrieb. Auch in diesem Bereich darf die Forschung nicht stehen bleiben, sondern muss Möglichkeiten der guten Integration dieser neuen Energiequellen ins öffentliche Netz aufzeigen.

**Literatur**

[1] *R. Moser* et al., Alpha Real AG; Betriebsauswertung netzgebundener Solarzellenanlagen in verschiedenen klimatischen Regionen der Schweiz; BEW-Projekt EF-REN (88) 024.
[2] Meteonorm; BEW 1985; INFOSOLAR, Postfach 311, 5200 Brugg.

SPRECHER ENERGIE

# Damit die Lichter nie ausgehen – $SF_6$-isolierte Mittelspannungsanlagen von Sprecher Energie

Absolute Betriebssicherheit, kleiner Raumbedarf, keine Wartung und Umweltunabhängigkeit sind für die $SF_6$-isolierten Mittelspannungsanlagen vom Typ PG 100 selbstverständlich.

Die metallgekapselten Anlagen für 12/24/36 kV mit fest eingebauten Vakuumleistungsschaltern mit Einfach- oder Doppelsammelschienen und je nach Bedarf mit eingebauter Feldleittechnik bewähren sich täglich im anspruchsvollen Einsatz.

Verlangen Sie unverbindlich Unterlagen.

Lugano/Schweiz

**Sprecher Energie AG**
**Mittelspannungsanlagen**
**CH-5034 Suhr**
**Telefon: 064/33 77 33**
**Telex: 982 120 ssm**
**Fax: 064/33 77 34**