Photovoltaische Energieumwandlung

Autor(en): **Guekos, G.**

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): **73 (1982)**

Heft 11

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904971

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

Photovoltaische Energieumwandlung

Bericht über die SEV-Informationstagung vom 15. April 1982 an der ETH Zürich

Ziel der Tagung war es, allen auf diesem Gebiet Tätigen sowie allen potentiellen Anwendern einen Überblick über den Stand der Technologie und anhand konkreter Beispiele über die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Solarzellensystemen zur Stromerzeugung zu vermitteln. Der Tagungsband mit den ausführlichen Referaten kann beim SEV, Abt. VVW, zum Preis von Fr. 50.– (plus Versandkosten) bezogen werden.

1. Einleitung

Das Interesse an der direkten Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie für terrestrische Anwendungen führte in den letzten Jahren zu einer Fülle innovativer Arbeiten in Physik und Technologie von Solarzellen. Es wurden beachtliche Erfolge erzielt, sowohl im Bereich der Herstellung grossflächiger Solarzellen und ihrer Verarbeitung zu Moduln als auch in der Frage der Senkung des Leistungspreises. Trotz dieser Fortschritte bleibt der Einsatz von Solarzellensystemen (photovoltaische Systeme) nur auf wenige spezielle Anwendungsbereiche beschränkt. Auch in den nächsten Jahren wird der Beitrag der Solarzellen zur Energieversorgung sehr bescheiden ausfallen. Doch werden in den grossen Industrieländern bedeutende Investitionen der privaten und der öffentlichen Hand getätigt. Diese Aktivität führt dazu, dass auch wirtschaftlich immer mehr interessante Anwendungsmöglichkeiten erschlossen werden.

2. Stand der Technologie und Aussichten der Elektrizitätsversorgung mit Solarzellen

In einem einführenden Referat, das im vorliegenden Bulletin SEV/VSE[1]) publiziert ist, hat *E. Bucher,* Universität Konstanz, zuerst physikalische Grundlagen, Aufbau und Eigenschaften von Solarzellen erläutert. Anschliessend ist er auf ökonomische Aspekte und Zukunftsaussichten des Einsatzes von photovoltaischen Systemen eingegangen. Der Solarzellenmarkt soll demzufolge bis etwa Ende des Jahrhunderts von der Siliziumzelle beherrscht werden. Es ist jedoch nicht klar, in welcher Form, d.h. mono-, poly-, mikrokristallin oder auch amorph, sich die Zellen marktmässig durchsetzen werden. Allerdings ermöglichen die marktüblichen Solargeneratoren aus mono- und polykristallinen Siliziumsolarzellen bereits heute eine kostengünstige Elektrizitätsversorgung in Spezialfällen, z.B. in der Speisung von Anlagen in abgelegenen Gegenden (Mess- und Relaisstationen, Wasserpumpen usw.).

K.D. Rasch, AEG Telefunken, Heilbronn (BRD), berichtete über die Verwendung von polykristallinem Silizium zur Herstellung von Solarzellen. Polykristalline Zellen weisen einen bezüglich der monokristallinen Zellen etwas tieferen Wirkungsgrad auf. Da aber die Gestehungskosten für das Ausgangsmaterial niedriger sind als bei den monokristallinen Zellen, sollen sie einen günstigeren Leistungspreis ermöglichen. Anhand vieler Diapositive hat der Autor interessante Anwendungsfälle erläutert und die Frage der Systemauslegung diskutiert.

M. Juillerat von der jungen Schweizer Photovoltaikfirma Pasan SA, Nyon, ging in seinem Referat auf die Verbilligung des Silizium-Ausgangsmaterials ein, das zur Herstellung polykristalliner Solarzellen herangezogen wird. Der Quarzsand wird speziell ausgewählt und in einem Ofen reduziert. Danach wird das MG-Silizium-Material (MG = metallurgical grade) unter kontrollierten Gas- und Temperaturbedingungen gemäss einer eigens dafür entwickelten Prozedur in einem quadratischen Tiegel gegossen. Diese Methode verlangt nur 10% der Energie, die zur Herstellung der einkristallinen Siliziumbarren nötig ist, aus denen die monokristallinen Zellen zerlegt werden. Das MG-Silizium enthält aber bedeutend mehr Verunreinigungen als das einkristalline Material. Die ersten Messungen mit Zellen, die aus dem verbilligten Ausgangsmaterial hergestellt wurden, zeigen, dass der Wirkungsgrad bis etwa 8% beträgt. Trotz des tieferen Wirkungsgrades kommen polykristalline Zellen für terrestrische Anwendungen doch in Frage, um so mehr als sie dank ihrer quadratischen Form eine verstärkte Automatisierung des Herstellungsprozesses erlauben. In der Produktion erweisen sie sich auch als weniger brüchig im Vergleich zu den monokristallinen Zellen und besitzen bessere thermische Eigenschaften. Die bisherigen 10×10-cm-Zellen sollen in Zukunft von grösseren abgelöst werden. Mit der neuen Methode erwartet der Referent eine signifikante Senkung der Produktionskosten.

[1]) *E. Bucher:* Stand und Zukunftsaussichten der photovoltaischen Energiegewinnung. Bull. SEV/VSE 73(1982)11, S. 497...504.

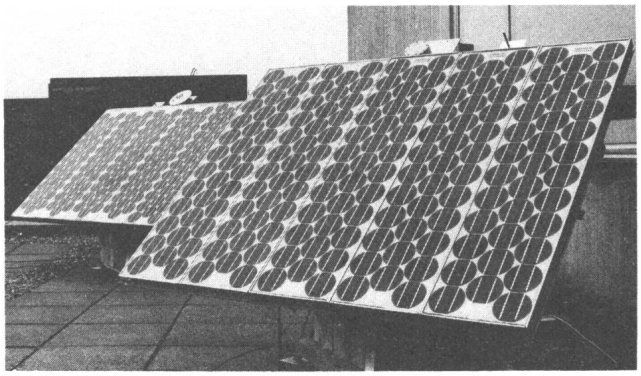
3. Photovoltaische Systeme, Converterschaltungen, 220-V-Netzrückspeisung

Bekanntlich tritt die elektrische Leistung an den Klemmen eines Solarzellen-Generators in dc-Form auf; sie ist aber Langzeit- und Kurzzeitänderungen unterworfen. *R. Ulmi* (Institut für Angewandte Physik, ETHZ) stellte verschiedene Methoden vor, die erlauben, die photovoltaische Leistung effizient zum Verbraucher zu transferieren[2]). Der Autor setzte sich insbesondere mit den schaltungstechnischen Anforderungen an die Netzrückspeisung auseinander und zeigte einen neuartigen, für kleinere Leistungen labormässig aufgebauten dc-ac-Converter, der die maximal mögliche Energie des Solarzellengenerators in das 220-V-Netz einspeist.

Auch der darauffolgende Vortrag entstammt dem Gebiet der Solarzellenumrichter für Netzspannung. Der Referent, *M. Blatter,* Institut für Automatik und industrielle Elektronik der ETHZ, beschrieb einen geregelten Umrichter, der zwar für eine Nennleistung von 1,5 kW realisiert wurde, jedoch bis 10 kW ausgebaut werden kann. Im Leistungsgebiet des Umrichters wird die variable Spannung des Solarzellenfeldes zunächst in eine konstante dc-Spannung und anschliessend mit einem Wechselrichter in 220 V/50 Hz umgewandelt. Im Regelteil sorgt ein Arbeitspunktregler für die Einstellung des Punktes maximaler Leistung auf der Generatorkennlinie des Solarzellenfeldes. Die Synchronisation des Stroms mit der Netzspannung und die Einhaltung der Phase (Wirkleistung) werden von einem Netzsynchronisator übernommen. Der Referent berichtete, dass die Schaltelemente des Leistungsteils mit parallelgeschalteten Feldeffekttransistoren (MOSFET) bei 20 kHz Taktfrequenz realisiert wurden. Bemerkenswert ist der hohe Wirkungsgrad der Anlage, inklusive Steuerelektronik, bei einer hohen Dynamik der Eingangsleistung. Der maximale Wirkungsgrad beträgt 93%.

Ein photovoltaisches Kleinsystem im Netzverbund wurde von *J. Schmid,* Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg i.Br. (BRD), vorgestellt. Besondere Aufmerksamkeit verdient der Umrichter, bei dem die vier einzelnen Solarzellengeneratoren im Rhythmus der Sinus-Wechselspannung über schnelle Leistungs-

[2]) *R. Ulmi, P. Ceppi, G. Guekos:* Die Übertragung der photovoltaischen Solarenergie zum Verbraucher oder ins 220-V-Netz. Bull. SEV/VSE 73(1982)11, S. 510...513.



Photovoltaische Anlage für Experimentierzwecke des Instituts für Angewandte Physik der ETH Zürich

transistoren in Serie geschaltet werden. Die Spannungen der Solarzellengeneratoren entsprechen einer Binärreihe, die eine sechzehnfache Abstufung der Ausgangsspannung ermöglicht. Die Solarzellen werden mit Batterien überbrückt, die als Speicher der Energie in den Schaltpausen dienen. Die Synchronisation mit dem Netz gewährleistet ein Analog-Digital-Wandler, der die Netzspannung abtastet und die Schalttransistoren ansteuert. Der Umrichter kommt ohne induktive Elemente aus und besitzt eine hohe Zuverlässigkeit (Sicherheit gegen Überspannungen, automatisches Abschalten bei Netzzusammenbrüchen u.a.).

Die Sonneneinstrahlung verursacht eine Erhöhung der Solarzellentemperatur, die den Wirkungsgrad verschlechtert. Die Temperaturerhöhung kann in Aufbauten, die das Licht der Sonne auf die Solarzelle konzentrieren, erheblich sein. Die auftretende Wärme kann aber zum Teil mit einer zirkulierenden Flüssigkeit, die den hinteren Teil der Zelle bzw. des Gehäuses durchspült, abtransportiert und verwertet werden. Auf diese Weise entsteht neben der elektrischen auch thermische Nutzleistung. *M. Posnansky,* Atlantis Energie AG, Bern, berichtete über Aufbau, Eigenschaften und Wirtschaftlichkeit von Hybridsystemen (elektrisch und thermisch). Besondere Erwähnung verdient die Mitteilung, dass der Leistungspreis (Fr./W Peak) bei nichtkonzentrierenden Hybridkollektoren beim heutigen Preisniveau der Solarzellen (ca. Fr. 20.–/W Peak) nur geringfügig (10–15 %) unter dem Leistungspreis für die Solarzellen allein liegt. Doch sinkt mit einer Verbilligung der Solarzellen auf ca. Fr. 5.–/W Peak der Leistungspreis auf Fr. 2.50/W Peak. Werden andererseits konzentrierende Hybridkollektoren verwendet, fällt die Reduktion des Leistungspreises bereits beim heutigen Zellenpreisniveau bedeutend aus. Die gezeigte Konzentratorvorrichtung besteht aus flachen Spiegellamellen, die das Licht auf die monokristallinen Siliziumsolarzellen richten, die ihrerseits auf einem wassergekühlten Rohr montiert sind. Der Konzentrationsfaktor ist relativ gering (8,5 ×), die Spitzenleistung beträgt elektrisch 40 W/m² und thermisch 350 bis 400 W/m² bei 1000 W/m² Globalstrahlung.

4. Erfahrungen mit bestehenden Solarzellenanlagen

Die Kenntnis der elektrischen Kennlinien von einzelnen und von zu grösseren Anlagen zusammengeschalteten Solarzellen ist für den Anwender eine wichtige Voraussetzung für die Planung eines photovoltaischen Systems. Wie die Kennlinien gemessen und interpretiert werden, war Thema des Vortrages von *P. Ceppi,* Institut für Angewandte Physik der ETHZ. Nebst der Messung der Strom-Spannungs-Charakteristik und der Bestimmung ihrer Beeinflussung durch Bestrahlungsstärke und Temperatur wurde auch die Messung des Serie- und Parallelwiderstandes diskutiert. Besonders interessant war die Feststellung, dass bei Ausfall oder Beschattung einer Solarzellengruppe, die 8 % der Fläche einer Seriekonstruktion ausmacht, nur noch 30 % der Leistung an den Generatorklemmen zur Verfügung stehen. Zudem verformt sich die Kennlinie derart, dass nun mehrere Spitzenwerte in der Leistungs-Spannungs-Charakteristik auftreten. In photovoltaischen Anlagen mit Maximum Power Tracking (MPT), d.h. mit einer elektronischen Vorrichtung zur Verfolgung des Punktes maximaler Leistung, kann das Auftreten von mehreren Spitzenwerten erhebliche Schwierigkeiten verursachen. Die üblichen MPT-Schaltungen können den absoluten Spitzenwert in der Regel nicht finden. Für die vorgestellten Messungen musste eine neuartige elektronische Messvorrichtung entwickelt und aufgebaut werden, die den speziellen Anforderungen bei der Kennlinienaufnahme, wie z.B. Analyse von stark gekrümmten Kennlinienteilen, Rechnung trägt.

A. Wyss, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, berichtete über die Erfahrungen aus dem zweijährigen Betrieb einer photovoltaischen 1,8-kW-Versuchsanlage in Zürich. Die Anlage besteht aus Moduln mit monokristallinen Solarzellen, die auf dem Hausdach montiert, südwärts orientiert und 32° gegenüber der Horizontalen geneigt sind. Aus der Anlage werden die 50-V-Batterien einer Telefonzentrale gespeist. Die wichtigsten Charakteristiken werden kontinuierlich von einem automatischen Meßsystem gemessen und die Werte gespeichert. Die Effizienz bei der Energieabgabe war erst bei relativ guter Einstrahlung, ab etwa 200 W/m² Globalstrahlung, befriedigend. Staubablagerungen verursachten keine Probleme, wohl aber die Schneebedeckung. Der Wartungsaufwand war äusserst gering. Demnächst soll auch ein MPT eingesetzt werden, der für maximale Leistungsentnahme aus dem Solargenerator sorgt. Insgesamt wurden positive Erfahrungen mit den Moduln gemacht, nachdem eine erste Modulserie niedrigerer Qualität ersetzt worden war.

Die elektrische Speisung von abgelegenen nachrichtentechnischen Anlagen ist ein für die Photovoltaik auch in bezug auf Wirtschaftlichkeit interessanter Anwendungsbereich. Die Firma Hasler AG, Bern, hat in Zusammenarbeit mit der Generaldirektion PTT eine Anzahl von Solarzellensystemen für diesen Anwendungsfall entwickelt und in verschiedenen Orten in der Schweiz installiert. *A. Winet,* Hasler AG, berichtete über die damit gesammelten Erfahrungen. Erwähnenswert erscheint die beobachtete Degradation der Solarzellenabdeckung aus Siliziumkautschuk mit der Betriebsdauer. Die Degradation äussert sich in einer Abnahme der Lichtdurchlässigkeit, kommt jedoch in Moduln mit Glasabdeckung nicht vor. Messdaten werden zurzeit gesammelt und ausgewertet, so z.B. auch bei der auf dem Corvatsch im Engadin auf 3300 m Höhe aufgestellten Versuchsanlage. Diese Langzeituntersuchungen werden die Tauglichkeit der Solarzellenmoduln zur Speisung von elektronischen Fernmeldeeinrichtungen kleiner Leistung prüfen.

Ein für die photovoltaische Anwendung in der Schweiz interessantes Thema wurde von *M. Real,* Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR), Würenlingen, behandelt. Der Autor stellte das Vorhaben des EIR vor, das operationelle Verhalten eines grösseren Solarzellenfeldes in den Alpen bezüglich Einschneiung, Windverwehungen und Eis- bzw. Reifansatz zu untersuchen. Eine grösstenteils aus Holzattrappen bestehende Anlage, aber auch mit einigen echten Moduln, wurde oberhalb von Davos auf 2700 m Höhe in drei Modulreihen aufgestellt. Eine automatische Datenerfassungsanlage registriert periodisch die verschiedenen Messgrössen wie Zellencharakteristik, Sonneneinstrahlung, Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit, und eine fotografische Kamera nimmt in kurzen Zeitabständen Bilder der Anlage auf. Damit können die Einflüsse der Umweltbedingungen in den Alpen auf die Solarzellen kontinuierlich verfolgt und festgehalten werden. Da sich das Projekt noch in der Anfangsphase befindet, kann aus den vorhandenen Messungen kein Schluss gezogen werden. Immerhin liefern die vorliegenden Erfahrungen den Hinweis, dass mit der gewählten Bauart der Anlage die schneetechnischen Probleme befriedigend gelöst werden können.

5. Energiebewertung und wirtschaftliche Aspekte

Die an den Klemmen eines Solarzellenkraftwerkes auftretende elektrische Leistung erreicht unter günstigen Sonnenstrahlungsbedingungen ihren Spitzenwert in der Mittagszeit, d.h. etwa gleichzeitig mit dem maximalen Verbrauch an elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz, und kann so als Spitzenleistung angesehen werden. Andererseits hängt die Energieumwandlung des Solarkraftwerkes direkt von den Wetterbedingungen ab, so dass eine Langzeitverpflichtung aufgrund von Solarenergie verunmöglicht wird. Um diesen Nachteil zu umgehen, hat *P. Silberring,* Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETHZ, in seinem Referat über die Bewertung der in einem Solarkraftwerk erzeugten elektrischen Energie ein Simulationsmodell vorgestellt, in dem das Solarzellenkraftwerk parallel zu einem hydraulischen Speicherwerk geschaltet wird. Das Speicherwerk ermöglicht dem Betreiber des Kraftwerkes, Lieferverträge abzuschliessen, in denen er sich zum voraus verpflichtet, in einem bestimmten Zeitpunkt eine festgesetzte Energiemenge zu liefern. Damit wird der Wert der Solarenergie gesteigert, weil nun Ausfälle derselben mit dem Speicherwerk überbrückt werden. Mit einem vereinfachten Computermodell wurde die Kombination eines Solarkraftwerkes und eines Speicherwerkes von je 100 MW installierter Leistung in den Alpen in bezug auf die Energieproduktion, die importierte Energiemenge, die Energielieferverpflichtungen und weitere Charakteristiken simuliert. Die Resultate geben einen ersten Einblick in die Problematik der Energiebewertung von Solarkraftwerken.

Die Vortragsreihe schloss mit einem Übersichtsreferat von *R. Minder,* Elektrowatt-Ingenieurunternehmung AG, Zürich, über technische und wirtschaftliche Aspekte der Solarzellen-Elektrizitätserzeugung[3]). Der Autor ging auf systemtechnische Betrachtungen

[3]) *R. Minder:* Technische und wirtschaftliche Aspekte der Elektrizitätserzeugung mit Solarzellensystemen. Bull. SEV/VSE 73(1982)11, S. 505...509.

ein, zeigte einige Beispiele für verschiedene Systemtypen und wies auf die Möglichkeiten hin, die sich bei einer Reihe von Leistungs-Kosten-Niveaus eröffnen. Das Referat wurde mit einigen Marktbetrachtungen und Zukunftsaussichten abgerundet.

6. Paneldiskussion

Zu Beginn der Paneldiskussion wurden in Kurzreferaten weitere aktuelle Arbeiten vorgestellt. *M. Camani,* Umweltdepartement des Kantons Tessin, präsentierte das TISO-Projekt, das die operationelle Erprobung einer in Lugano-Trevano installierten photovoltaischen 15-kW-Anlage betrifft. Damit sollen u.a. Fragen der Speisung der Energie in das öffentliche Netz, der Betriebssicherheit und der Messtechnik behandelt werden. Die ersten Messungen zeigen, dass der Wirkungsgrad der untersuchten polykristallinen Zellen mit abnehmender Bestrahlungsstärke im Vergleich zu monokristallinen Zellen steiler abnimmt. *H. Brechna,* Interkantonales Technikum Rapperswil (ITR), berichtete über die Zielsetzung des Studiums und über die Arbeiten an seiner Schule. Am ITR existieren bereits mehrere Anlagen im Gebiet der Alternativenergien, so z.B. eine photovoltaische (ca. 1 kW), eine solarthermische Anlage mit und ohne Lichtkonzentration, ein Windgenerator (7 kW bei 11 m/s Windgeschwindigkeit), eine Wärme-Kraft-Kopplung und einige Wärmepumpen. An diesen Anlagen führen die Studenten Studien- und Diplomarbeiten aus. *R. Tscharner,* Institut de Microtechnique, Université de Neuchâtel, stellte ein neues Projekt vor, das sich mit hybriden Flachkollektoren befasst. Ziel der Arbeit ist, das Verhalten von Kollektoren für solarelektrische und solarthermische Energieumwandlung durch Simulation und durch Messungen an Modellen messtechnisch zu erfassen und zu analysieren. Schliesslich präsentierte *W. Maag,* Fabrimex AG, Zürich, die neuen Solarzellenmoduln der US-Firma Arco.

Ch. Favre, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, umriss in der darauffolgenden Diskussion kurz die Energiepolitik des Bundes. Basierend auf der Botschaft des Bundesrates über Grundsatzfragen der Energiepolitik in der Schweiz, betonte der Autor die Förderung im Bereich der einheimischen und erneuerbaren Energien wie z.B. der Sonnenenergie. Er ging auch auf die Rolle des Bundes in der Energieforschung ein und erwähnte die Abgrenzung der Rollen des Bundes und der Industrie in der Forschungsförderung. Von Diskussionsteilnehmern wurde festgestellt, dass die Privatinitiative im Gebiet der photovoltaischen Energie in anderen westlichen Ländern vom Staat stärker unterstützt wird. Die Tagung wurde mit einer Diskussion über die Frage der Lebensdauer der photovoltaischen Anlagen und der Energiespeicherung abgeschlossen.

Die Informationstagung hat deutlich zum Ausdruck gebracht, dass weltweit ein grosser Effort für die Verbesserung der Solarzellen und für die Senkung der Anlagekosten im Gange ist. Auch in der Schweiz werden in diesem Sinne in Hochschulen und Industrie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, aus denen ein wertvolles Know-how entsteht. Vorläufig ist die photovoltaische Energieumwandlung nur für spezielle Anwendungen wirtschaftlich. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass die technologische Innovation weitere Möglichkeiten für terrestrische Anwendungen eröffnet. Der zeitliche Ablauf dieser Entwicklung ist allerdings schwer vorauszusehen.

G. Guekos, ETHZ