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: 73 (1982)

Heft: 11

Artikel: Die Übertragung der photovoltaischen Solarenergie zum Verbraucher oder ins 220-V-Netz

Autor: Ulmi, R. / Ceppi, P. / Guekos, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904970

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: 04.12.2025

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

Die Übertragung der photovoltaischen Solarenergie zum Verbraucher oder ins 220-V-Netz

R. Ulmi, P. Ceppi, G. Guekos

620.92::523.9-7:621.31;

Die elektrische Leistung aus Solarzellen-Generatoren muss im allgemeinen in eine Form aufbereitet werden, die den Verbraucherbedingungen entspricht. Die Aufbereitungsanlage soll möglichst effizient arbeiten, d.h. sie soll dem Generator die maximale Energie entziehen und unter minimalen Verlusten zum Verbraucher führen. Die wichtigsten Methoden für die Energieaufbereitung werden behandelt. Ist eine Energiespeicherung notwendig, kann der Energiefluss zum Speicher mit verlustarmen elektronischen Schaltungen optimiert werden. Die Einspeisung ins öffentliche Netz wird besprochen und eine realisierte Schaltung vorgestellt, die es erlaubt, die photovoltaische Energie ohne Zwischenspeicherung in Batterien optimal ins Netz zu leiten.

La puissance électrique fournie par des générateurs à cellules solaires doit généralement être adaptée aux conditions de ses récepteurs. Des montages électroniques à faibles pertes optimisent le flux d'énergie en soutirant constamment la puissance maximale du générateur solaire.

Les méthodes principales pour l'adaptation de cette énergie sont traitées dans cet article. L'introduction de l'énergie produite par des cellules solaires dans le réseau de distribution public est discutée et on présente un montage réalisé, qui permet de transférer d'une façon optimale la puissance des générateurs photovoltaïques au réseau sans l'utilisation d'accumulateurs intermédiaires.

1. Einleitung

Die an den Klemmen eines Solarzellen-Generators auftretende elektrische Leistung erscheint zwar in dc-Form[1]), ist aber Langzeit- und Kurzzeitänderungen infolge Variation der Bestrahlungsstärke, Temperatur und Alterung der Zellen unterworfen. In der Praxis ist es notwendig, die maximal verfügbare Leistung von den Generatorklemmen unter bestmöglicher Vermeidung von Verlusten zum Verbraucher zu transferieren. Die Maximierung des Leistungstransfers vergrössert den Wirkungsgrad der photovoltaischen Anlage und erhöht deren Wirtschaftlichkeit. Bei gleicher Abgabeleistung werden die Kosten des Generators kleiner, und es wird auch weniger Fläche benötigt.

Wie das Blockschaltbild eines typischen terrestrischen photovoltaischen (PV) Systems (Fig. 1) zeigt, sorgt eine Aufbereitungsanlage mit einem Wandler für die Umformung der Leistung, bevor sie dem Verbraucher zugeführt wird. Der Wandler soll gleichzeitig auch eine elektrische Anpassung des Verbrauchers an den Generator bewerkstelligen, damit der Generator am Punkt seiner maximalen Leistung funktioniert. Wird von den Zellen mehr Leistung erzeugt, als der Verbraucher aufnimmt, fliesst der Überschuss zum Energiespeicher. Wird hingegen die Energienachfrage vom Solarzellen-Generator nicht voll gedeckt, wird die zusätzliche Energie von einem Unterstützungsnetzwerk, wie das öffentliche Netz, geliefert. Das Netz kann auch die Überschussenergie aufnehmen und somit den Speicher ersetzen.

Ein hoher Systemwirkungsgrad wird in erster Linie, abgesehen von der Leistungsumformung in den Zellen und im Verbraucher, durch Optimierung des Energietransfers durch die Aufbereitungsanlage zustande gebracht. Für typische Verbraucherkonfigurationen wird die Aufbereitungsanlage die variable dc-Spannung an den Generatorklemmen in eine konstante ac- oder dc-Spannung umwandeln und den Punkt maximaler Leistung der Generatorkennlinie dauernd verfolgen. Beide Funktionen, Umwandlung (Konversion) und Verfolgung der maximalen Leistung (maximum power tracking MPT) müssen unter kleinstmöglichem Leistungsverbrauch ausgeführt werden.

Dieser Aufsatz entspricht dem Vortrag an der SEV-Tagung über Photovoltaische Energieumwandlung vom 15. April 1982. Die Arbeit wurde im Rahmen eines vom Nationalen Energieforschungs-Fonds (NEFF) finanzierten Projektes ausgeführt.

[1]) dc = direct current, Gleichstrom,
ac = alternative current, Wechselstrom.

Im folgenden werden die wichtigsten Methoden für die Ausführung der Aufbereitungsanlage vorgestellt, miteinander verglichen und eine labormässig realisierte Anlage für kleine Leistungen beschrieben.

2. Aufbereitungsanlage

Da sowohl die elektrischen Charakteristiken der Solargeneratoren als auch der Energiebedarf des Verbrauchers variieren, muss ein effizienter Wandler seine Eingangsimpedanz an die wechselnde Ausgangsimpedanz des Generators dauernd anpassen und die elektrische Leistung zum Verbraucher regeln. Mit der Impedanzanpassung wird an der Strom-Spannungs-Kennlinie (*I–U*-Kennlinie) des Generators der Punkt maximaler Leistung (Fig. 2) eingestellt, und dessen Lage auf der sich ändernden Kennlinie verfolgt [1].

Nur in wenigen Spezialfällen kann auf eine Aufbereitungsanlage verzichtet werden, wie z.B. bei einfachem Wasserpumpenantrieb (Direktanschluss Solarzellen–Generator–Pumpe) [2]. Im allgemeinen wird eine Aufbereitungsanlage für den Energietransfer eingesetzt. Einige typische Anlagen, unterteilt nach Gleichstrom- und Wechselstromlasten, werden im folgenden vorgestellt.

2.1 Gleichstromlasten

Für die Speisung von Verbrauchern, die sehr kleine Leistung erfordern (weniger als 100 W), kann der photovoltaische Generator direkt an die Batterie angeschlossen werden, wobei eine Blockdiode die Batterieentladung über den Generator verhindert (Fig. 3a). Zwischen Generator und Batterie kann

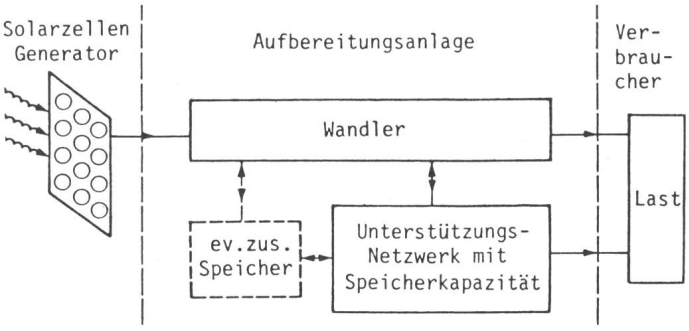

Fig. 1 Blockschaltbild eines photovoltaischen Energieversorgungssystems

auch eine elektronische Vorrichtung für den Überladungsschutz eingebaut werden (Fig. 3b) [3; 4].

Die Anlagen der Figur 3 werden relativ oft eingesetzt und liefern befriedigende Resultate in Fällen wie Meßstationen, Repeater für Kommunikationssysteme, Speisung von Geräten und Vorrichtungen für den Haushalt, Warnlampen usw.

Nachteilig bei dieser Auslegung ist die Tatsache, dass dem Generator nicht die maximale Leistung entnommen wird, weil keine elektrische Anpassung zwischen Batterie und Generator existiert, und zwar infolge der Verschiebung des Punktes maximaler Leistung mit der Beleuchtung. Zudem ist es bei grossen Schwankungen der Umgebungstemperatur oder bei Ausfall von einzelnen Zellen möglich, dass der Generator der Batterie wenig oder gar keine Leistung liefert. Um eine Überladung zu verhindern, werden in den einfachen Schutzschaltungen die Überschussenergie des Generators in Wärme vernichtet oder die Batterien vom Generator getrennt. Zudem ist der Einsatz von Batteriespeichern grosser Kapazität umständlich und kostspielig [3; 4]. Diese Nachteile fallen für Anlagen grösserer Leistung vermehrt ins Gewicht. Durch Hinzufügen eines verlustarmen dc-dc-Konverters mit Maximum Power Tracking (MPT) zwischen Generator und Batterie (Fig. 4) wird die variable dc-Spannung des Generators in eine konstante dc-Spannung am Konverterausgang umgewandelt; dabei sorgt die Ansteuerung des Konverters mit dem MPT für kontinuierliche Maximierung der Leistungsentnahme vom Generator. Bei ausreichender Speicherkapazität und kleinem Energieverbrauch der Elektronik des Konverters und der MPT-Ansteuerung stellt diese Anlage eine Optimierung des Leistungstransfers für den dc-Fall dar.

2.2 Wechselstromlasten

Photovoltaische Systeme für die Speisung von ac-Lasten, jedoch ohne Anschlussmöglichkeit an das Netz oder an ein anderes nicht-solares Unterstützungsnetzwerk, also für Inselbetrieb, sind auf eigene Energiespeicherung angewiesen. Diese Funktion übernehmen zurzeit Batterien (Fig. 5).

Der Wechselrichter (dc-ac-Konverter) wandelt die Batteriespannung in Wechselspannung um, die je nach den Anforderungen der Lasten rechteck-, trapez- oder sinusförmig sein kann. Mit der Regelung werden die Leistung und ihre zeitliche Variation dem Verbraucherbedarf angepasst. Das Erreichen einer hohen Versorgungssicherheit mit dem System der Figur 5 wird für Verbraucherleistungen ab etwa einigen Kilowatt technisch schwierig und kostspielig (grosse erforderliche Generatorfläche und Speicherkapazität).

Für Solarzellen-Anlagen, die in der Nähe des öffentlichen Netzes aufgestellt werden, bringt die Verbindung des Wechselrichterausgangs mit dem Netz eine Linderung der Anforderungen an Generatorfläche und Batteriegrösse. Für den Fall, dass die Leistung der photovoltaischen Anlage viel kleiner ist als die Leistung, die das Netz liefern kann, übernimmt das Netz die Speicherfunktion für die Solarzellenenergie (Fig. 6). Auf zusätzliches Speichern kann verzichtet werden.

Mit der Eliminierung der Batterien entfallen viele damit verbundene Nachteile wie Wartung, Platzbeanspruchung, begrenzte Lebensdauer usw.; es steigen jedoch die Anforderungen an den Wechselrichter, weil dessen Eingangsspannung nun zwischen weiten Grenzen variiert. Zudem soll der Wechselrichter möglichst die maximal verfügbare Leistung des Generators unter minimalen Eigenverlusten zum Netz transferieren.

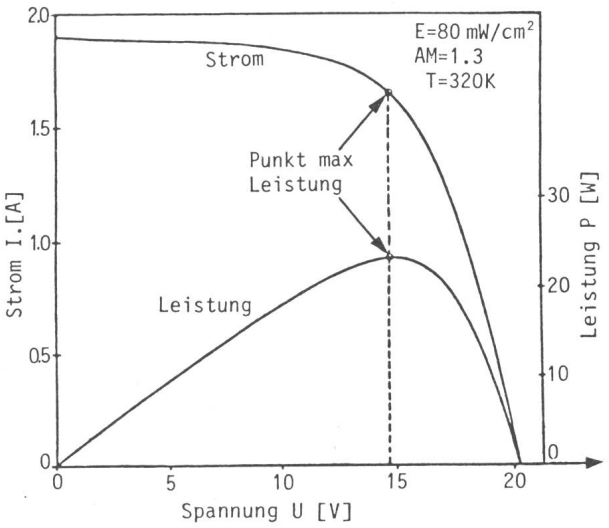

Fig. 2 Gemessene Strom-Spannungs(I–U)- und Leistungs-Spannungs(P–U)-Kennlinie eines Moduls aus monokristallinen Silizium-Solarzellen

E ist die Bestrahlungsstärke auf der Modulfläche, AM die Luftmasse (air mass) und T die absolute Temperatur des Modulgehäuses

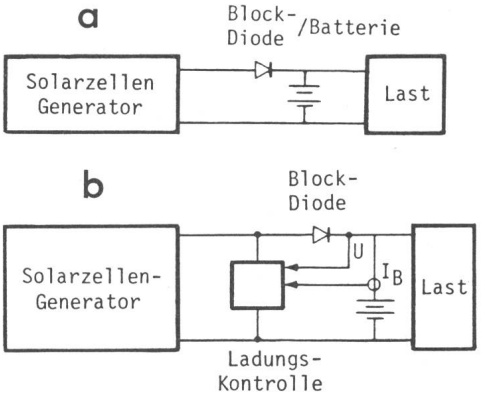

Fig. 3 Photovoltaische Anlage mit Batterie für die Speisung von Gleichstromlasten

a Ohne Überladungsschutz b Mit Überladungsschutz

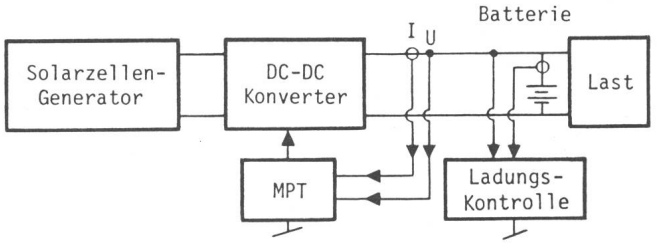

Fig. 4 Photovoltaische Anlage mit dc-dc-Konverter und Batterie

Mit dem MPT (maximum power tracking) wird der Konverter auf maximale Leistungsentnahme vom Generator gesteuert

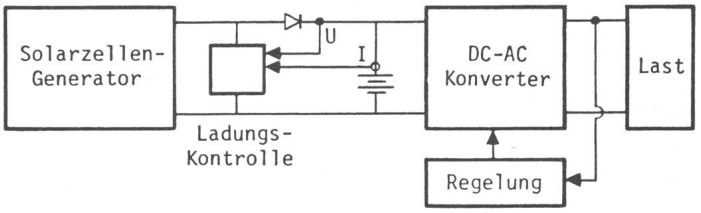

Fig. 5 Photovoltaische Anlage mit dc-ac-Konverter und Batterie

Mit der Regelung wird die Form des Signals und die Leistung am Konverterausgang eingestellt

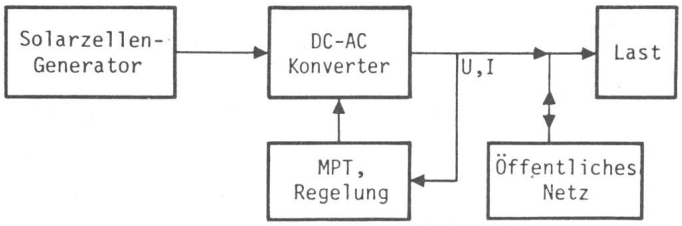

Fig. 6 Direkte Einspeisung der Solarzellen-Energie ins öffentliche 220-Volt-Netz ohne Pufferbatterien

Die Ankopplung des photovoltaischen Systems an das Netz stellt zweifellos eine attraktive und vielversprechende Anwendungsmöglichkeit für Solarzellen dar. Eine wichtige Voraussetzung für die Effizienz eines solchen Systems ist die Entwicklung von verlustarmen dc-ac-Konvertern mit grosser Eingangsdynamik und kontinuierlicher Verfolgung des Punktes maximaler Leistung des Solarzellen-Generators (MPT).

3. Realisiertes System zur direkten Rückspeisung ins Netz

Um die verschiedenen Konzepte der Energierückspeisung ins Netz zu prüfen und miteinander zu vergleichen, wurden elektronische Schaltungen für den Wechselrichter (dc-ac-Konverter), die Verfolgung der maximalen Leistung und die Speisung der Elektronik aus den Solarzellen entworfen und realisiert. Beim ausgeführten System wird die Generatorleistung von einem geregelten dc-ac-Wandler direkt ins Netz gespeist. Dies ist ein Vorteil gegenüber der üblichen Methode, bei der zwischen dem Generator und dem Wechselrichter noch ein dc-dc-Wandler eingeschaltet wird, der eine konstante Eingangsspannung zum Wechselrichter liefert. Im folgenden wird der Aufbau der Laborschaltung für Spitzenleistung bis 300 W beschrieben (Fig. 7).

Wechselrichter: An den Wechselrichter (WR) werden die folgenden Anforderungen gestellt: hoher Wirkungsgrad, geringe Netzbelastung, wenig Blindleistungsverbrauch bei grosser Dynamik der Eingangsspannung U_e.

Der ausgeführte WR besteht aus einem zwangskommutierten WR, der einen modulierten dc-dc-Konverter (Down-Wandler) und einen Trafo mit Mittelanzapfung umfasst. Der Down-Wandler wird mit einer Schaltfrequenz von 20 kHz betrieben und liefert an die Halbbrücke (Trafo) einen vollweggleichgerichteten sinusförmigen Strom. Dieser Strom wird mit den Schaltern S2 und S3 im Gegentakt mit einer Frequenz von 100 Hz umgepolt. Dadurch entsteht ein sinusförmiger 50-Hz-Strom, welcher ins Netz eingespeist wird.

Der Eingangskondensator C_e übernimmt die Anpassung der dc-Eingangs- an die ac-Ausgangsleistung. Der hochfrequente gepulste Strom im Down-Wandler wird mit den beiden Kondensatoren C_e, C_a und der Induktivität L geglättet. Der Chopperschalter S1 wurde mit Leistungs-Feldeffekt-Transistoren verwirklicht. Die langsamen Umschalter S2 und S3 wurden hingegen aus Kostengründen mit Bipolartransistoren ausgeführt. Der Wirkungsgrad des aufgebauten Wechselrichters beträgt ca. 80 % bei einer Eingangsspannung von 20 V dc und einer Ausgangsleistung von 200 W [5; 6; 7; 8].

MPT und Regelung: Der MPT hat die Aufgabe, den Solarzellen-Generator in seinem Punkt maximaler Leistung zu betreiben. Da beim Parallelbetrieb mit dem Netz die Ausgangsspannung der WR vom Netz vorgegeben ist, wird die Ausgangsleistung durch die Amplitude und die Phase des Ausgangsstroms bestimmt. Die Maximierung der Abgabeleistung des Systems reduziert sich zu einer Maximierung des Ausgangsstroms. In Figur 8 wird das vereinfachte Blockdiagramm des MPT mit der Regelung gezeigt.

Der innerste Regler 1 steuert den WR so an, dass ein möglichst sinusförmiger Ausgangsstrom entsteht. Der vorgeschaltete Regler 2 sorgt dafür, dass die momentan vom Solargenerator maximal zur Verfügung stehende Leistung ins Netz gespeist wird. Wird versucht, mehr Leistung zu übertragen, als zur Verfügung steht, kann der Ausgangsstrom I_a dem vorgegebenen Sollwert I_{soll} nicht folgen und wird bei der Amplitude abgeschnitten, die der maximalen verfügbaren Leistung entspricht (Fig. 9).

Der Regler kontrolliert also die Differenz der Scheitelwerte von I_{soll} und I_a. Solange der Ist-Wert I_a dem Sollwert I_{soll} folgen kann, wird der Sollwert vergrössert. Sobald der Istwert dem Sollwert nicht mehr folgt, wird der Sollwert verkleinert. Der Punkt maximaler Leistung wird somit eingehalten. Um diesen Punkt entsteht eine niederfrequente Pendelung (0,2 bis 10-Hz-Probebewegung), die charakteristisch für selbstoptimierende Systeme ist [10; 11].

Diesen beiden Regelungen ist dann noch der Phasenregler 3 für U_N und I_a überlagert. Bei der präsentierten Schaltung des WR ist diese Phase durch den Blindleistungsbedarf des Ausgangsfilters des WR bestimmt. Jedoch lässt sich die Schal-

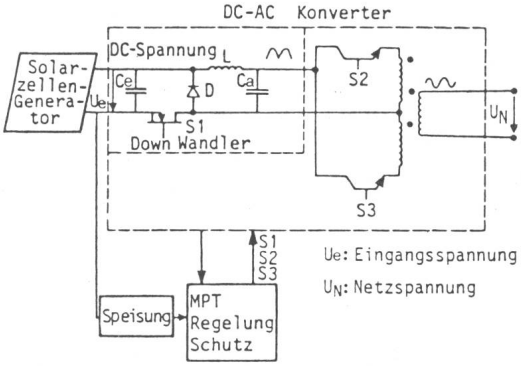

Fig. 7 Blockschaltbild des dc-ac-Konverters für direkte Netzeinspeisung
Die Schalter S1, S2, S3 werden vom MPT und von der Regelung angesteuert

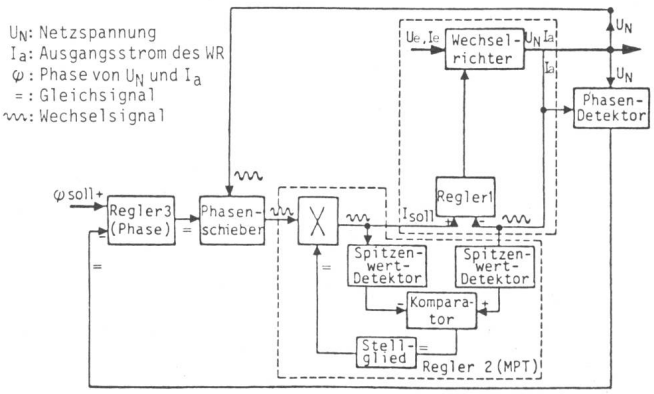

Fig. 8 Vereinfachtes Schaltbild des MPT und der Regelung des Wechselrichters für die direkte Stromeinspeisung

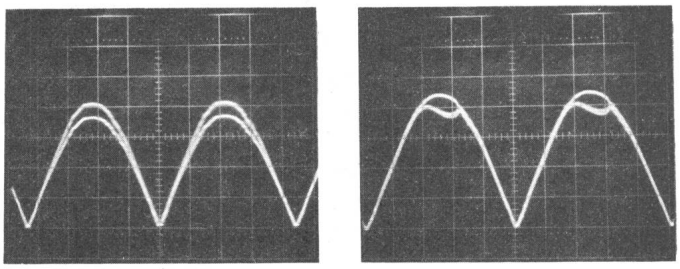

Fig. 9 Oszilloskop-Aufnahme des Stromverlaufs vor der Halbbrücke (Fig. 7)

Obere Kurve: Sollwert, untere Kurve: Istwert.
Links: Die aus den Solarzellen abgenommene Leistung ist zunehmend. Rechts: Der Punkt maximaler Leistung wurde absichtlich überschritten, um den Einfluss des MPT zu verdeutlichen

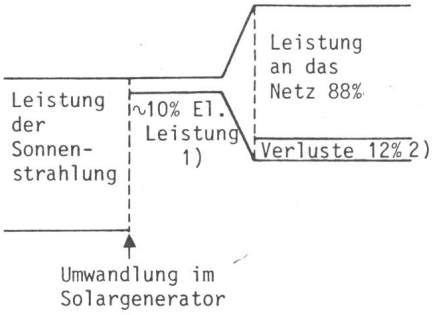

Fig. 10 Diagramm des Leistungsflusses einer Anlage in der Grössenordnung von 2 kW bei hoher Bestrahlungsstärke

1 Bei der Wirkungsgradangabe wird nur die Gesamtfläche der Solarzellen berücksichtigt

2	Verluste im Wechselrichter	8 %
	MPT, Regelung	1 %
	Speisung	2 %
	Schutzdioden der Module und Leitungen	1 %

tung so erweitern, dass der WR kapazitive und induktive Blindleistung liefern kann.

Der WR kann auch im Inselbetrieb arbeiten. Die dazu nötigen Schaltungen wurden verwirklicht, jedoch hier weggelassen, um das Blockschaltbild nicht zu überladen. Ebenso wird auf die Präsentation der automatischen Synchronisierung und der verschiedenen Schutzschaltungen verzichtet. Das System erfüllt die vom SEV und VSE gestellten Anforderungen [9].

Leistungsfluss: Aufgrund der experimentellen Erfahrungen mit dem aufgebauten System für direkte Netzeinspeisung wurde eine Anlage für 2 kW Spitzenleistung projektiert, die sich in Ausführung befindet. Der berechnete Leistungsfluss in die verschiedenen Systemteile und die Lokalisierung der auftretenden Verluste ist im Diagramm Figur 10 dargestellt.

Die Hauptursachen für die Verluste im Wechselrichter liegen im Eingangskondensator C_e, Chopperschalter S1, Trafo, Treiber der Schalter, in den langsamen Schaltern S2 und S3 und in der Induktivität L. Durch genaue Dimensionierung und gezielte Auswahl der Elemente ist es denkbar, den Wirkungsgrad der Aufbereitungsanlage im kW-Bereich auf über 90 % zu erhöhen.

Literatur

[1] *G. Guekos* u.a.: Energietransfer aus Solarzellen. Bull. SEV/VSE 71(1980)13, S. 665...672.

[2] *J.A. Roger:* Theory of the direct coupling between D.C. motors and photovoltaic solar arrays. Solar Energy 23(1979)3, p. 193...198.

[3] *N.F. Shepard* and *R. Landes:* The conceptual design and analysis of a photovoltaic powered experimental residence. Conference Record of the 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 12(1976), p. 705...714.

[4] *H.K. Köthe:* Akkumulatoren in solarelektrischen Anlagen. Chemie-Technik 8(1979)4, S. 143...152.

[5] *E. Landsman:* Static inverters for use in PV power systems. Proceedings of the 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Boston, MA, 5...10 Aug. 1979, Part. I., p. 239...244.

[6] *G.A. O'Sullivan:* Which dc/ac inverter. Sommerville NJ 08876, Abacus Controls Inc.

[7] *P. Ceppi* und *G. Rigamonti:* DC-AC-Konverter für optimale Nutzung von Solarzellenenergie. Studienarbeit. Zürich, ETH, Institut für Elektronik, 1979.

[8] *S. Cuk:* Discountinuous inductor current mode in the optimum topology switching converter. IEEE Power Electronics Specialists Conference Record –(1978), p. 105...123.

[9] Merkblatt für elektrische Energieerzeugungsanlagen im Parallelbetrieb mit dem Netz und Energiebezug beziehungsweise Rücklieferung in das Netz des Elektrizitätswerkes. Zürich, Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, VSE, 1981.

[10] *A. Leonhard:* Die selbsttätige Regelung. Theoretische Grundlagen mit praktischen Beispielen. 3. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.

[11] *A.F. Boehringer:* Self adapting dc-converter for solar spacecraft power supply. IEEE Trans./AES 4(1968)1, p. 102...111.

Adresse der Autoren

R. Ulmi, P. Ceppi, Dr. *G. Guekos,* ETH-Hönggerberg, Institut für Angewandte Physik, 8093 Zürich.