

# Energietransfer aus Solarzellen

Autor(en): **Guekos, G. / Tenchio, G. / Descombes, A.**

Objektyp: **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): **71 (1980)**

Heft 13

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905262>

## **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.



### Energietransfer aus Solarzellen

Von G. Guekos, G. Tenchio, A. Descombes, P. Ceppi und H. Melchior

621.383:621.315;

*Der Energietransfer aus einem photovoltaischen Solarzellen-Generator in den Verbraucher hängt stark von der Sonnenbestrahlung, der Temperatur und vom Alterungszustand der Zellen sowie von der Verbraucherkennlinie ab. In der Praxis entsteht aus technischen und wirtschaftlichen Gründen das Bedürfnis nach Maximalisierung des Energietransfers. Es werden Methoden und elektronische Schaltungen vorgestellt, die den Leistungsfluss vom Solargenerator zum Verbraucher optimieren. Die Ergebnisse der Leistungsoptimierung mit Hilfe einer aufgebauten elektronischen Laborschaltung für Kleinpanels werden gezeigt.*

*Le transfert de l'énergie d'un générateur photovoltaïque à cellules solaires à un consommateur d'énergie dépend beaucoup du rayonnement solaire, de la température et de l'état de vieillissement des cellules, ainsi que de la caractéristique du récepteur. En pratique, des raisons d'ordre technique et économique exigent une maximalisation de ce transfert. Les auteurs indiquent des méthodes et des circuits électroniques permettant d'optimiser le flux de puissance entre générateur et récepteur, ainsi que les résultats obtenus avec un circuit électronique de laboratoire monté sur petits panneaux photovoltaïques.*

#### 1. Einleitung

Als neue Nutzungsarten der Sonnenenergie für terrestrische Zwecke stehen gegenwärtig zwei Methoden als besonders aussichtsreich im Vordergrund. In der ersten wird die Sonnenenergie direkt in Wärme umgewandelt, entweder in Kleinanlagen für Warmwasseraufbereitung [1] oder versuchsweise in Grossanlagen zur Dampf- und Energieerzeugung in einer Dampfturbine [2]. In der zweiten Methode wird die Sonnenenergie mit Hilfe von Solarzellen teilweise direkt in elektrische Energie umgewandelt [3]. Eine Kombination der beiden Methoden hat in Versuchsaufbauten zur Erzeugung sowohl thermischer als auch elektrischer Energie geführt [4]. Die vorliegende Publikation befasst sich mit der direkten Erzeugung von elektrischer Energie mit Solarzellen.

Die Funktionsweise der Solarzellen ist wohl bekannt [3; 5; 6], und ihr Einsatz bei der Erzeugung elektrischer Energie für spezielle Anwendungen, wie beispielsweise in Weltraum-Satelliten, ist seit Jahren erfolgreich. Im Hinblick auf den vermehrten Einsatz von Solarzellen für terrestrische Anwendungen finden gegenwärtig in den Industrieländern weltweit grosse Anstrengungen statt. In den USA hat das Department of Energy (DOE) im Jahr 1979 für die Entwicklung und Realisierung von Solarzellen-Panels über 100 Mio. \$ ausgegeben. Für die 80er Jahre sind Investitionen von etwa 1,5 Mia. \$ geplant für die Entwicklung grosstechnischer Methoden zur Fabrikation billigster Solarzellen. Damit sollte der gegenwärtig noch relativ hohe Preis von ca. 10 US \$/Watt-peak (Watt-Spitzenleistung,  $W_p$ ) nach der Zielsetzung des DOE auf etwa 0,5 US \$/Watt-peak im Jahre 1986 zurückgehen. Bezüglich der jährlich installierten Leistung rechnet das DOE mit einigen GW<sub>p</sub> im Jahre 2000 verglichen mit etwa 1 MW<sub>p</sub> im Jahre 1979.

Wenn auch diese Zahlen noch Prognosen darstellen, so kann doch erwartet werden, dass in Zukunft billige, auf grosstechnologischer Basis gefertigte Solarzellen erhältlich sein werden, welche die praktische Ausnützung der Sonnenenergie zur direkten Erzeugung elektrischer Energie für terrestrische Anwendungen aussichtsreich gestalten.

Auch im privaten Industriesektor werden grosse Investitionen getätigt. Die meisten Anstrengungen zielen auf die Verbesserung bekannter Herstellungsmethoden, damit der Preis der Zellen und Panels stark reduziert werden kann. In den USA werden vor allem drei Technologien verfolgt für die Erzeugung billiger grossflächiger Silizium-Scheiben, die dann zu Solarzellen verarbeitet werden: die Ingot-Technologie, d. h. das Ziehen aus der Silizium-Schmelze von langen (1 m), breiten (Durchmesser ca. 10 cm) Silizium-Barren, die Silizium-Ribbon-Technologie, d. h. das Ziehen von dünnen, breiten Siliziumbändern aus der Schmelze und das Anbringen von dünnen Silizium-Schichten direkt auf billigen Keramik-Substraten. Auch in der Bundesrepublik Deutschland wird in einigen spezialisierten Grossfirmen an Solarzellen gearbeitet, wobei eine Hauptrichtung die Herstellung von günstigen polykristallinen Silizium-Solarzellen betrifft (AEG-Telefunken, Wacker-Chemie).

Bei der Anwendung der Solarzellen stellt sich nun das Problem, wie das Maximum an elektrischer Energie von den Solarzellen-Panels extrahiert und optimal, d. h. unter bestmöglicher Vermeidung von Verlusten, zum Verbraucher transferiert wird. Die Energie aus Solarzellen-Panels ist in den meisten praktischen Fällen nicht die maximale Energie, die die Panels unter den gegebenen Umweltverhältnissen, wie Sonnen-

bestrahlung und Umgebungstemperatur, liefern können. Eine Maximalisierung der gelieferten Energie bedeutet in der Praxis eine Erhöhung des System-Wirkungsgrades und die Verbesserung von dessen Wirtschaftlichkeit.

Obwohl auch an diesem Problem, wie aus der Literatur zu entnehmen ist [7...11] weltweit gearbeitet wird, erschien es uns sinnvoll, diesbezügliche Arbeiten auch in der Schweiz aufzugreifen, sind doch die Lösungen anwendungsspezifisch und von den Verbraucherbedingungen abhängig. Vor allem in der Entwicklung und Fabrikation optimierter Wandlerschaltungen sehen wir nicht zuletzt eine Chance für die Schweizer Industrie.

Mit Solarzellen und insbesondere auch mit Problemen der Leistungsentnahme und der Anpassung an den Verbraucher beschäftigt sich die Gruppe Optoelektronik des Instituts für Elektronik der ETHZ seit ca. 5 Jahren.

In der vorliegenden Publikation wird zuerst die Wirkungsweise der Solarzelle kurz erläutert, und Messresultate von typischen Panels werden angegeben und diskutiert. Anschliessend wird auf die Frage der Maximalisierung des Energietransfers zum Verbraucher eingegangen, und verschiedene technisch mögliche Lösungen u. a. auch die Frage der Einspeisung der Energie ins Wechselstromnetz, werden vorgestellt. Schliesslich werden Messungen der optimierten Leistungsabgabe, die mit einer realisierten Laborschaltung für variable ohmsche Lasten gegenüber dem nichtoptimierten Fall erzielt wurde, gezeigt.

## 2. Die Erzeugung und Abgabe elektrischer Energie mit Solarzellen

Zur direkten Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie stehen heute dank billig verfügbaren Materialien und bekannter Technologie vor allem grossflächige Silizium(Si)-Photodioden im Vordergrund des Interesses. Im Prinzip bestehen diese Zellen aus einer grossflächigen pn-Diode (Fig. 1). Bei der Absorption der Sonnenstrahlung (Photonen) entstehen im Silizium freie Ladungsträger-Elektron-Loch-Paare (innerer Photoeffekt). Die Erzeugung einer elektrischen Spannung an den Klemmen der Solarzelle setzt jedoch die Trennung der Elektron-Loch-Paare voraus. Dies geschieht mit Hilfe des über dem pn-Übergang vorhandenen inneren elektrischen Feldes  $\vec{E}$ , das die Elektronen an die eine und die Löcher an die andere Extremität der Diode führt und somit das Aufbau einer elektrischen Spannung über den Klemmen der Solarzelle verursacht [5; 6]. Durch Reihen- und Parallelschaltung von einzelnen Zellen zu einem sog. Panel werden die für den praktischen Fall benötigten Ströme und Spannungen erreicht.

Die gemessene  $I$ - $U$ -Kennlinie eines Solarzellen-Panels (Solarzellen-Generators) bei konstanter Temperatur und Bestrahlungsstärke zeigt Fig. 2. Je nach Grösse der Verbraucherlast  $R$  wird die vom Panel in den Lastkreis abgegebene Leistung verschiedene Werte annehmen. Bei offenem Lastkreis (Leerlaufspannung  $U_0$ ) und beim geschlossenen Lastkreis (Kurzschlussstrom  $I_c$ ) wird keine Leistung an den Verbraucher abgegeben. Zwischen diesen beiden Extremen existiert eine optimale Verbraucherlast  $R_{opt}$ , bei der die maximale Leistung  $P_m$  vom Panel zum Verbraucher fliesst.

In der Praxis variiert aber die Bestrahlungsstärke  $E$  je nach Sonnenbestrahlung. Auch  $R$  kann je nach Verbraucherkonfiguration variieren. Fig. 3 zeigt die gemessenen  $I$ - $U$ -Kennlinien bei verschiedenen Bestrahlungsstärken. Der Punkt maximaler Leistung verschiebt sich auf der angegebenen Ortskurve. Will man das System bezüglich des Energietransfers optimieren, so

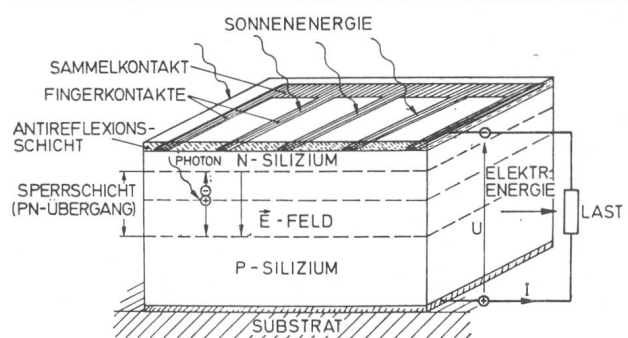


Fig. 1 Schnitt durch eine Silizium-(pn)-Solarzelle und schematische Erzeugung eines Elektrons und eines Loches durch die Absorption eines Photons

muss man dafür sorgen, dass die Gesamtlast in Abhängigkeit von Generator- und Verbraucherkenlinie so variiert werden kann, dass sich der Arbeitspunkt immer auf dem Punkt maximaler Leistung einstellt. Man kann sich eine Vorrichtung vorstellen, die die gesamte Last so steuert, dass eine dauernde Lastanpassung Panel-Verbraucher bewerkstelligt wird. Das in Fig. 4 angegebene vereinfachte Ersatzschaltbild einer Solarzelle soll dies verdeutlichen.  $I_{ph}$  ist der durch die Sonnenbestrahlung erzeugte Photostrom und  $I$  der Strom durch den Lastwiderstand  $R$ .  $I_{ph}$  kann für die Zellenfläche  $A$  für praktische Zwecke als proportional zur Bestrahlungsstärke  $E$  (Watt/m<sup>2</sup>) betrachtet werden. Der von den Kontakten und vom Halbleitermaterial herrührende Seriewiderstand  $R_s$  und der Shuntwiderstand  $R_p$  sind Verlustfaktoren, denn ein Teil der von der Zelle erzeugten elektrischen Leistung wird dort in Verlustwärme umgewandelt. Die Hauptleistung  $P$  fliesst in die Last  $R$ . Es gilt

$$P = U \cdot I, \text{ und am Maximum der Leistung} \\ dP = U \cdot dI + I \cdot dU = 0 \quad (1)$$

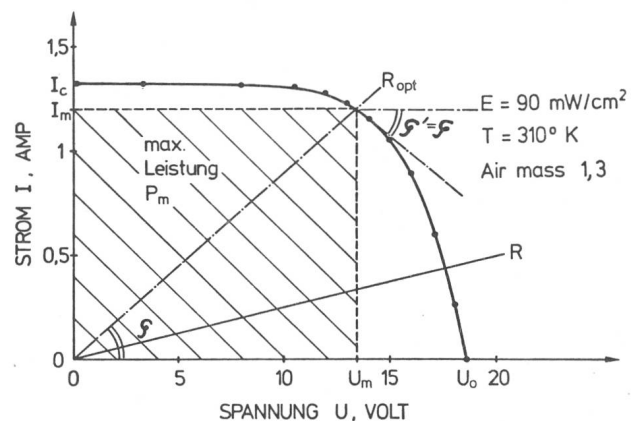


Fig. 2 Gemessene Strom-Spannungs-( $I$ - $U$ )-Kennlinie eines Solarzellen-Panels, bestehend aus 36 monokristallinen Silizium-Solarzellen in Serie

Messort Zürich. Die Messung wurde am Mittag durchgeführt, und der Panel war auf maximale Bestrahlungsstärke eingestellt; Bestrahlungsstärke konstant 90 mW/cm<sup>2</sup>. Bei Belastung mit dem Widerstand  $R_{opt}$  liefert der Panel die maximale elektrische Leistung  $P_m$  in  $R_{opt}$ . In diesem Fall gilt  $I/U = -dI/dU$ , d.h., die Winkel  $\phi$  und  $\phi'$  sind gleich. Air mass ist ein Mass für den Einstrahlungswinkel:  $AM = 1/\cos \alpha$ , wobei  $\alpha$  der Winkel zwischen der Senkrechten und der Einstrahlungsrichtung ist.

Daraus folgt:

$$dU/dI = -U/I \quad (2)$$

wobei  $dU/dI = R_d$  den differentiellen Widerstand der Zelle und  $U/I = R$  den Gesamtlastwiderstand bedeutet.  $R_{opt}$  und  $R_d$  am optimalen Arbeitspunkt entsprechen dem  $\text{ctg}\varphi$  der Fig. 2. Für maximale Leistungsabgabe muss also der von der Zelle gesehene Lastwiderstand gleich dem negativen differentiellen Widerstand des Solargenerators gemacht werden.

Damit die in der Zelle umgesetzte Verlustleistung gering bleibt, müssen Shuntleitwert  $1/R_p$  und Seriewiderstand  $R_s$  minimisiert werden. Es gilt dann  $R_p \gg R_s + R$

$$I = I_{ph} - I_s (e^{e(R+R_s) \cdot I/kT} - 1) \quad (3)$$

$$U = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) - IR_s \quad (4)$$

$$P = U \cdot I = I \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) - I^2 \cdot R_s \quad (5)$$

wobei

$I_s$  = Sättigungsstrom des pn-Überganges

$k$  = Boltzmannsche Konstante =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Ws/K

$T$  = absolute Temperatur in Kelvin

$e$  = Elektronenladung

Die Kennlinie des Panels ist aber auch von der Temperatur und von der Alterung der Zellen abhängig. Fig. 5 zeigt z. B. die gemessene  $I$ - $U$ -Kennlinie unseres Panels für zwei Temperaturen des Panelgehäuses bei konstanter Bestrahlungsstärke. Durch die Temperaturerhöhung hat der Kurzschlußstrom  $I_c$  leicht zu- und die Leerlaufspannung  $U_0$  deutlich abgenommen. Die Abnahme der Leerlaufspannung mit  $T$  ist in der Hauptsache von der Zunahme des Stromes  $I_s$  mit  $T$  verursacht (Gl. 4). Als Folge des Temperatureinflusses verschiebt sich auch der Punkt maximaler Leistung. Veränderungen des Kennlinienfeldes treten auch mit der Alterung oder als Folge von Defekten einzelner Zellen auf. In der Praxis entsteht also der Wunsch nach einer Vorrichtung, die die Gesamtlast des Panels so steuert, dass die der Zelle entnommene Leistung maximal bleibt, unabhängig von Veränderungen der Zellenkennlinie und/oder der Last.

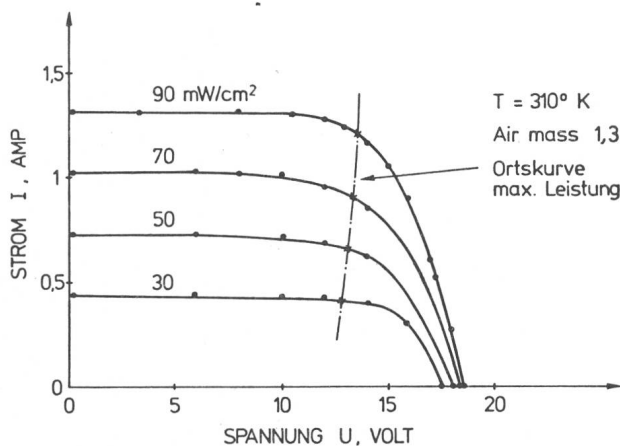


Fig. 3 Gemessene Strom-Spannungs-Kennlinien des Panels der Fig. 2 für verschiedene Bestrahlungsstärken ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

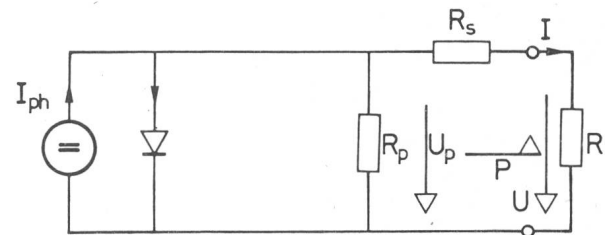
Die Bestrahlungsstärken wurden durch Neigen des Panels eingestellt

### 3. Allgemeine Problemstellung

Das allgemeine Blockschaltbild einer Vorrichtung zur direkten Erzeugung elektrischer Energie mit Solarzellen-Panels und Speisung eines Verbrauchers zeigt Fig. 6a. Die Spannung  $U_1$  und der Strom  $I_1$  an den Klemmen des Panels und somit die elektrische Leistung bzw. Energie aus dem Panel sind variable Größen, die von der Sonnenbestrahlung, der Paneltemperatur und von der Last des Panels abhängen. Die Spannung  $U_2$  und der Strom  $I_2$  am Eingang des Verbrauchers können nach dem wechselnden Energiebedarf des Verbrauchers auch variieren. Zwischen Solarzellen-Panel und Verbraucher wird nun eine Umformerschaltung (Wandler) eingeschaltet, deren Hauptaufgabe die Sicherstellung der maximalen Leistungsabgabe des Panels und des möglichst effizienten Übergangs der elektrischen Leistung vom Panel an den Verbraucher ist und dies unter veränderlicher Panel-Bestrahlung und Temperatur.

In der Praxis stellen Antriebsmotoren eine wichtige Gruppe von Verbrauchern mit variabler Leistungsaufnahme dar. In diese Kategorie gehören auch Wasserpumpen für die Förderung von Wasser in ein Reservoir.

Besonders interessant ist die Rückspeisung der gewonnenen elektrischen Energie ins 50-Hz-Wechselstromnetz. Hier ist die Spannung am «Verbraucher» konstant 220  $V_{\text{eff}}$ . Ist die ins Netz zurückgespeiste Energie grösser als die momentane Nachfrage, z. B. in einem Haus, so wird der Energieüber-



$R_s$  : Seriewiderstand

$R_p$  : Shuntwiderstand

Fig. 4 Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer pn-Solarzelle

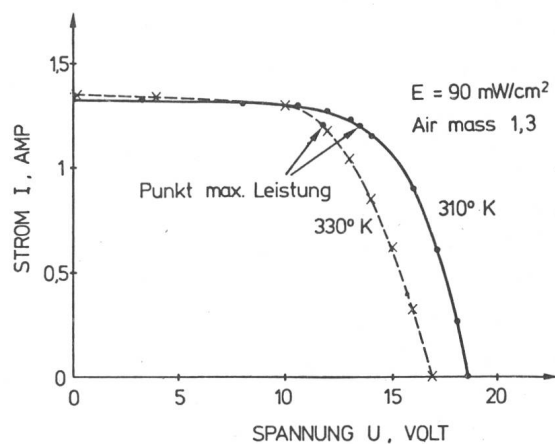


Fig. 5 Gemessene  $I$ - $U$ -Kennlinien bei konstanter Bestrahlungsstärke für zwei Temperaturen des Panelgehäuses

Man beachte die starke Abnahme der Leerlaufspannung mit zunehmender Temperatur und die Verschiebung des Punktes maximaler Leistung

Verbraucher	DC-Betrieb	AC-Betrieb
Z Konstant	Wenig sinnvolle Anwendungen	
Z Variabel (U, I variabel)	- Antriebsmotor - Elektrochemie	- Antriebsmotor
U oder I konstant	- Batterieaufladung - Speisung von Geräten, Schaltungen, Mess- und Relaisstationen usw. - Galvanische Metallabscheidung	- Rückspeisung ins Netz - Speisung von AC-Geräten

schuss vom Netz aufgenommen. Ist dagegen die zurückgespeiste Energie kleiner als die Nachfrage, wird der fehlende Energieanteil vom Netz gedeckt. Das Wechselstromnetz stellt also das Puffermedium dar. Die Aufgabe des Wandlers ist, den maximalen Energiefluss vom Solarzellen-Panel ins Netz zu gewährleisten. Tabelle I gibt in einer kurzen Übersicht weitere Anwendungen, in denen eine Optimierung des Leistungstransfers Vorteile bringt. Z ist die Verbraucherimpedanz  $U/I$ .

Der Wandler zwischen Panel und Verbraucher wird mit verlustarmen elektronischen Schaltungen aufgebaut. Die Wirtschaftlichkeit der Lösung wird jedoch nicht nur von der technischen Realisierung allein, sondern auch von anderen Faktoren, wie Art der Anwendung, klimatische Bedingungen am Einsatzort usw. abhängen. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage ist auch die Kenntnis des Energiegewinns, den der Einsatz einer optimierten Wandlerschaltung gegenüber dem nichtoptimierten Fall erbringen kann, eine wichtige Voraussetzung.

Die naheliegendste Anordnung für die Optimierung des Leistungsflusses Panel → Verbraucher ist ein verlustarmer Wandler, der seinen Eingangswiderstand  $R_{in}$  automatisch, kontinuierlich oder schrittweise ändert, bis die maximale Leistung  $P_m$  von der Zelle entnommen wird, Fig. 6b. Bei jedem Wert von  $R_{in}$  wird der momentane Leistungswert registriert. Wird

nun  $R_{in}$  in eine Richtung variiert, so wird gleichzeitig festgestellt, ob die Leistung zu- oder abnimmt. Bei Zunahme der Leistung wird die Variationsrichtung von  $R_{in}$  so lange beibehalten, bis eine Abnahme von  $P$  eintritt. Dann wird  $R_{in}$  in die umgekehrte Richtung geändert, bis  $P_m$  wieder knapp überschritten wird, wobei die Variationsrichtung von  $R_{in}$  nochmals umkehrt usw. Die Leistung pendelt also nahe des Maximalwertes  $P_m$  unabhängig von Änderungen der Panelbestrahlung, der Temperatur und der Last.

Die Ausgangsleistung des Wandlers kann in DC- oder AC-Form geliefert werden. Grundsätzlich kann der DC/AC-Wandler als ein DC/DC-Wandler [14] betrachtet werden, dessen Referenzsignal sinusförmig moduliert wird. Da es in beiden Fällen darauf ankommt, das  $R_{in}$  zu variieren, können wir uns in der Folge darauf beschränken, nur die Funktionsweise des DC/DC-Wandlers als Impedanzanpassungsglied für einen Solarzellen-Panel zu umreißen.

Die Prinzipschaltung ist in Fig. 7 dargestellt [7]. In der ersten Phase (Schalter S auf Position 1) übernimmt die Spule L elektrische Energie von der Solarzelle und der Kapazität  $C_1$ . In der zweiten Phase (Position 2) fließt gespeicherte Energie von der Spule zum Verbraucher R, während die Zelle  $C_1$  wieder auflädt. Durch die Kapazität  $C_2$  wird der Energiefluss geglättet, so dass in R praktisch eine kontinuierliche Leistung fließt. Der Eingangswiderstand  $R_{in}$  des verlustlos angenommenen Konverters beträgt:

$$R_{in} = \frac{U_1^2}{P} = \frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot R \tag{6}$$

Das Verhältnis der Spannungen  $U_1/U_2$  kann durch Änderung der Verweilzeit des Schalters S auf Position 1 oder 2 leicht modifiziert werden, und somit wird auch  $R_{in}$  variabel. Wird z. B. S mit der Frequenz  $f$ , Periode  $T = \tau_1 + \tau_2$  entsprechend der Verweilzeit auf 1 und 2 geschaltet, so gilt zwischen  $U_1$  und  $U_2$  die Beziehung

$$U_1 = U_2 \cdot N \tag{7}$$

mit  $N = \text{Übersetzungsverhältnis} = T/\tau_1 - 1 = 1/\alpha - 1$

wobei  $\alpha = \tau_1/T = \text{Tastverhältnis (duty-cycle)}$ .

Damit wird

$$R_{in} = R \frac{(1 - \alpha)^2}{\alpha^2} \tag{8}$$

Durch Änderung des Tastverhältnisses  $\alpha$  kann also  $R_{in}$  dem differentiellen Widerstand der Zelle angepasst werden. Der Betrag der übertragenen Leistung ist eine Funktion von Eingangsspannung und Einschaltzeit  $\tau_1$  bzw. Ausgangsspannung und Ausschaltzeit  $\tau_2$ . Da  $R_{inopt}$  und somit das Verhältnis von  $\tau_1$  und  $\tau_2$  durch die Bestrahlungsstärke und Tempera-

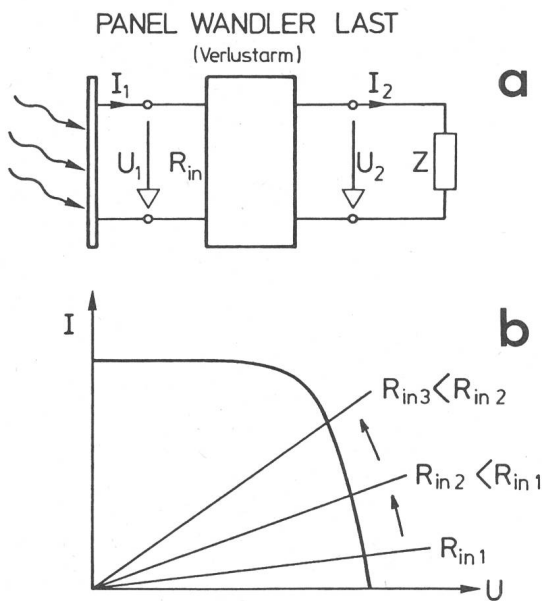


Fig. 6 Anordnung mit verlustarmem Wandler zwischen Zellen-Panel und Last, die den Eingangswiderstand  $R_{in}$  automatisch ändert, bis der Leistungsfluss vom Panel maximal wird (Impedanzanpassung)

- a Prinzipschaltung
- b Schrittweise Änderung des Eingangswiderstandes



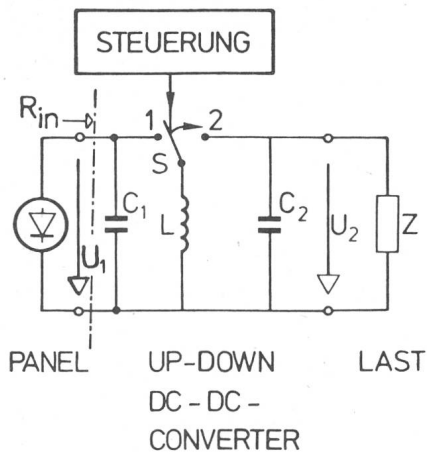


Fig. 7 Prinzipschaltung der Kombination «Panel-DC/DC-Wandler-(Auf/Abwandler-)Last», mit der durch Steuerung des Wandlers eine Leistungsoptimierung erreicht wird

tur vorgegeben sind, erreicht der Wandler den maximalen Leistungsfluss durch Veränderung der Periode  $T$ . Der Schalter wird am besten mit elektronischen Bauelementen realisiert (z.B. Transistor oder Thyristor), die in der Lage sind, die auftretenden Leistungen möglichst verlustarm mit der geforderten Schnelligkeit zu schalten. Neben dem gezeigten Auf-Ab-Converter kann je nach Anwendung auch ein Auf- oder Ab-Converter eingesetzt werden.

Ein wichtiger Punkt bei der Anpassung ist jedoch die Steuerung des Wandlers. Wenn es nämlich darum geht, eine maximale Leistung von der Solarzelle zu beziehen, dann gelten für die Ansteuerung des Wandlers ganz andere Bedingungen als sie von den herkömmlichen DC/DC- oder DC/AC-Wandlern bekannt sind. Wie aus Tabelle I hervorgeht, müssen gewisse Freiheitsgrade bei der Speisung der Last gewährleistet werden, z. B. bei der Ansteuerung eines Motors mit Solarpanels. Unter Steuerung versteht man hier die Regelung des Tastverhältnisses  $\alpha$  und somit des Eingangswiderstandes  $R_{in}$  mit einer Grösse, die Information über den momentanen Leistungsfluss aus der Zelle bzw. in den Verbraucher beinhaltet. Im folgenden werden die wichtigsten Methoden und Schaltungen für die Steuerung des Wandlers angegeben.

#### 4. Steuerung des Wandlers

Die Steuerungsmethoden unterscheiden sich durch die Art der Registrierung der momentanen Leistungsverhältnisse an der Zelle oder am Verbraucher und durch die schaltungstechnische Implementierung der Variation des Wandlerwiderstandes gemäss Fig. 6b.

##### 4.1 Steuerung mit der Leistung am Verbraucher

Zur Maximalisierung der elektrischen Energie am Verbraucher wird für einen beliebigen Wert des Tastverhältnisses  $\alpha$  die in die Last fließende Leistung  $P$  gemessen und der Messwert gespeichert. Dann wird  $\alpha$  um  $\Delta\alpha$  geändert, und der neue Messwert von  $P$  wird mit dem alten verglichen. Ist der neue Wert grösser als der gespeicherte Wert, wird  $\alpha$  weiter in der gleichen Richtung geändert. Ist der gemessene Wert kleiner als der gespeicherte Wert, wird die Änderungsrichtung von  $\alpha$  gekehrt. Die schrittweise Änderung von  $\alpha$  bewirkt, dass  $R_{in}$  immer zwischen dem jeweiligen  $R_{opt}$  und  $(R_{opt} - \Delta R_{opt})$  pendelt, wobei

$\Delta R_{opt}$  durch die Wahl von  $\Delta\alpha$  bestimmt wird. Die Messung der Leistung  $P$  kann einfach mit einem Analogmultiplikator  $I \times U = P$  ausgeführt werden. Der maximale Wert von  $P$  kann mit einem Peak-Detektor festgehalten werden. Dieser Wert wird mit Hilfe eines Komparators mit dem Momentanwert  $P$  der Leistung verglichen. Eine logische Schaltung ändert den Schalterzustand, sobald  $P$  unterhalb eines festgelegten Prozentsatzes des Maximalwertes sinkt.

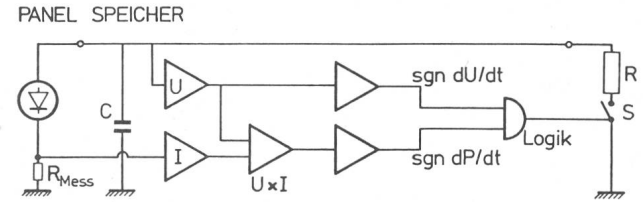


Fig. 8 Blockschaltbild für die Leistungsmaximalisierung durch Steuerung des Schalters S mit dem Vorzeichenwechsel der Ableitungen  $dP/dt$  und  $dU/dt$  [8]

##### 4.2 Steuerung auf Grund der gemessenen Leistungsänderung

Die vorgehend beschriebene Methode lässt sich bezüglich der elektronischen Ausführung für Lastwiderstände kleiner als die optimale Last am Panel vereinfachen. Die entsprechende Schaltung basiert auf dem Vorzeichenwechsel der zeitlichen Ableitung  $dP/dt$  der Leistung  $P$ , Fig. 8 [8].  $P$  wird z. B. analog gemessen und das Vorzeichen  $dP/dt$  von einem Rate-Komparator detektiert. Während der Aufladung der Kapazität  $C$  ist  $dP/dt$  positiv und wird null, wenn  $P = P_m$  wird. Während der Aufladungsphase, d. h. wenn  $R$  abgeschaltet ist, ist die Ableitung  $dU/dt$  der Kondensatorspannung  $U$  auch positiv. Im Moment wo  $dP/dt$  negativ wird, schaltet die logische Schaltung die Last an und der Kondensator entlädt sich über  $R$ .  $P$  sinkt und  $dU/dt$  wird negativ. Der Schalter schaltet die Last wieder ab, sobald eine untere Grenze der Leistung  $P$  erreicht wird. Die Spannung über  $R$  in Fig. 8 weist zwar eine Welligkeit auf, die aber nötigenfalls mit  $LC$ -Filtern minimiert werden kann.

##### 4.3 Steuerung mit dem Laststrom oder mit der Lastspannung

Eine Maximalisierung des Leistungsflusses in den Verbraucher bedeutet in vielen praktischen Fällen gleichzeitig eine Maximalisierung der Klemmenspannung oder des Stromes. Daher ist es oft sinnvoll und einfacher, nur die Spannung oder den Strom am Verbraucher zu messen [9]. Für diese Fälle wird man mit dem Resultat der analogen oder digitalen Messung von  $U$  oder  $I$  das Tastverhältnis des Schalters solange ändern, bis der Maximalwert von  $U$  resp.  $I$  am Verbraucher erreicht wird.

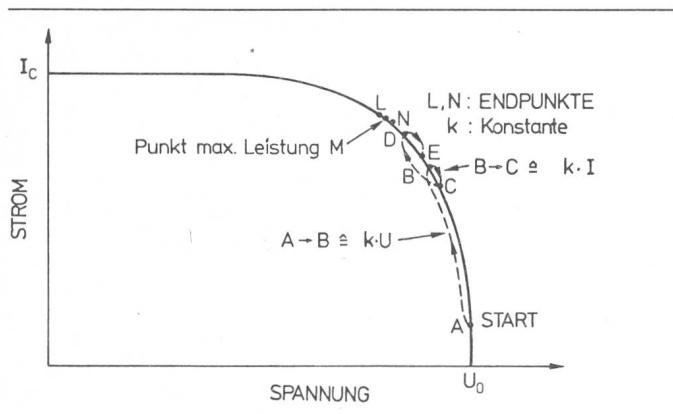
##### 4.4 Steuerung mit konstanten relativen Strom- und Spannungsschritten

Die Bedingung für die Maximalisierung der Leistungsabgabe aus der Solarzelle nach Gl. (2) ist in einer ersten Approximation erfüllt, wenn die durch das Schliessen und Öffnen des Schalters entstehenden Strom- und Spannungsänderungen an der Zelle den Beziehungen

$$\Delta U = -c \cdot U \quad \text{und} \quad \Delta I = c \cdot I \quad (9)$$

$$\text{oder} \quad \Delta I = -c \cdot I \quad \text{und} \quad \Delta U = c \cdot U \quad (10)$$

wegen  $\Delta U/\Delta I = -U/I$  im optimalen Arbeitspunkt genügen, wobei  $c$  eine Konstante darstellt [10]. Anhand der Fig. 9 soll



**Fig. 9 Steuerungsvorgang mit konstanten, relativen Strom- und Spannungsschritten**  
 Start bei beliebigem Punkt A der Kennlinie. Endzustand: Pendeln der Leistung zwischen L und N um den Punkt maximaler Leistung M.  $k = \text{konstant}$

diese Methode kurz erläutert werden. Ausgehend von einem beliebigen Punkt A der Kennlinie wird das Tastverhältnis  $\alpha$  solange variiert, bis ein Punkt B erreicht wird, bei dem die Spannung  $U_B = k \cdot U_A$  ist (Verkleinerung von  $R_{in}$ ),  $0 < k < 1$ . Nun wird  $\alpha$  in die umgekehrte Richtung geändert (Vergrößerung von  $R_{in}$ ) bis ein neuer Punkt C erreicht wird, bei dem der Strom  $I_C = k \cdot I_B$  ist. Vom Punkt C fängt ein neuer Suchzyklus an, der zu den Punkten D und E führt. Der Vorgang wiederholt sich, bis ein Grenzyklus erreicht wird mit den Punkten L und N beidseitig des Punktes maximaler Leistung M, für die  $U_L = k \cdot U_N$  und  $I_N = k \cdot I_L$  ist. Im Grenzyklus werden die Gleichungen (9) und (10) erfüllt, wobei  $c = (1 - k)$  beträgt. Der Eingangswiderstand des Wandlers pendelt zwischen zwei Werten entsprechend den Punkten L und N, und die der Zelle entnommene Leistung ist für beide Punkte gleich:

$$P = U_L \cdot I_L = U_N \cdot I_N \quad (11)$$

Wird die Konstante  $k$  gross gemacht ( $k \rightarrow 1$ ), liegt  $P$  nahe an  $P_m$ . In der Praxis kann allerdings ein kleines  $k$  bewirken, dass der Endzustand schneller, d. h. nach relativ wenigen Zyklen, erreicht wird. Ein Kompromiss in bezug auf Schnelligkeit der Anpassung und Annäherung an  $P_m$  wird also hier zu schliessen sein.

#### 4.5 Steuerung mit Pilot-Zellen

Bei dieser Methode wird der optimale Arbeitspunkt auf der Panelkennlinie mit der Messung der Strom-Spannungs-Charakteristik einer vom Panel getrennten Solarzelle bestimmt, welche der gleichen Bestrahlung wie der Panel ausgesetzt ist. Mit einer elektronischen Meßschaltung werden in geeigneten Zeitintervallen Messungen der  $I-U$ -Kennlinie der Pilot-Zelle ausgeführt, der jeweilige Wert des optimalen Lastwiderstandes errechnet und der Eingangswiderstand des Wandlers auf diesen Wert gesteuert. Somit wird gesichert, dass der Panel dauernd die maximale elektrische Leistung abgibt. Wichtig bei dieser Methode ist, dass die Pilot-Zelle den gleichen Umweltbedingungen und der gleichen Alterung unterworfen ist wie der Panel. Insbesondere ist bei grossen Anlagen (grosse Panelzahl) zu beachten, dass die Pilot-Zelle gleich wie die Panels beleuchtet wird. Man kann auch mehrere Pilot-Zellen pro Anlage für die Überwachungsfunktion einsetzen.

#### 4.6 Steuerung mit einer Referenzgrösse

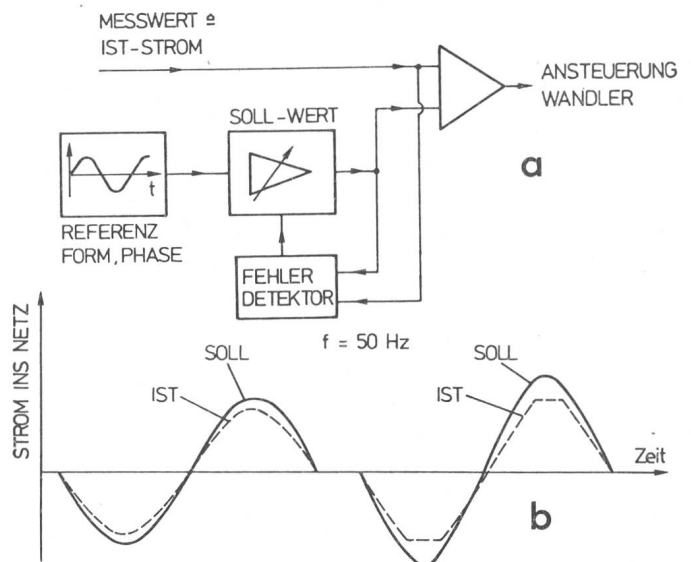
Das Tastverhältnis des Schalters ist, wie erwähnt, die fundamentale Grösse zur Beeinflussung des Übersetzungsverhältnisses des Wandlers und damit zur Steuerung des Leistungsflusses. Solange nicht die maximale Leistung transferiert wird, die Zelle also noch eine Leistungsreserve aufweist, kann durch Variation einer Vorgabegrösse die übertragene Leistung kontinuierlich gesteigert werden. Man gelangt somit zu einem Punkt, wo die tatsächlich gelieferte Leistung der Vorgabe nicht mehr folgen kann, weil die Solarzelle an diesem Punkt ihre maximale Leistungsabgabe erreicht hat. Der Einsatz dieses Punktes wird mit einem Fehlerdetektor detektiert. Das Fehlersignal wird dann benützt, um die Vorgabe zu regeln.

Die entsprechende Regelschaltung hat den Vorteil, dass nicht um das Leistungsmaximum dauernd herumgependelt werden muss. Der optimale Arbeitspunkt wird durch einen Proportionalregelkreis eingehalten. Besonders vorteilhaft wird diese Regelmethode beim DC/AC-Wandler für die 220-V-Netzeinspeisung, Fig. 10a. Die Schaltung weist, verglichen mit den vorgehend genannten Methoden, auffallend wenig elektronische Komponenten auf. In diesem Fall entspricht die maximale elektrische Leistung ins Netz dem maximalen Strom, weil die Spannung vorgegeben ist (vgl. 4.3), zudem stehen Kriterien zur Verfügung, um den Oberwellenanteil unter Kontrolle zu halten (Fig. 10b).

#### Bemerkung zu den Steuerungsmethoden

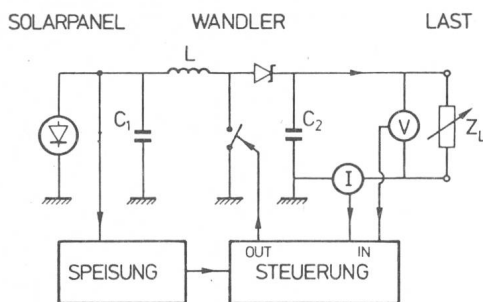
Wie man aus Tabelle I der typischen Solarzellenanwendungen entnehmen kann, gelten verschiedene Regelkriterien für die verschiedenen Anwendungsfälle. Eine Analyse des Schaltungsaufwandes hat ergeben, dass je nach Anwendungsfall bestimmte Regelprinzipien günstiger sind.

Die Steuerung mit der Pilot-Zelle (4.5) ist grundsätzlich schnell und im Aufbau relativ bescheiden. Einzig bei grossflächigen Panelanlagen kann die Erfassung der Sonnenbestrah-

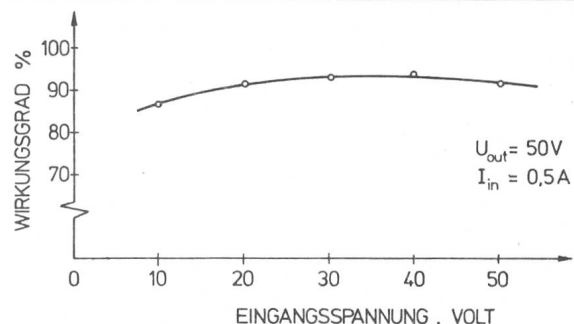


**Fig. 10 Einspeisung der Solarzellenleistung ins Wechselstromnetz 220 V<sub>eff</sub>**

- a Blockschaubild für die Maximalisierung der Stromamplitude
- b Schematische Darstellung der Kurvenform des ins Netz fließenden Stromes. Links: Die aus dem Panel abgenommene Leistung ist zunehmend. Rechts: Der Punkt maximaler Leistung wurde erreicht, die IST-Kurve verflacht sich an der Spitze



**Fig. 11 Schaltdiagramm für die Optimierung des Leistungsflusses in eine variable Impedanz  $Z_L$  (ohmisch)**  
Diese Schaltung wurde als Labormodell für die Optimierung von Kleinpanels aufgebaut



**Fig. 12 Gemessener Wirkungsgrad (Ausgangsleistung/Eingangsleistung) des Wandlers der Fig. 11 ohne Berücksichtigung der Leistungsaufnahme der elektronischen Steuerung und der Speiseschaltung**

lung durch Verschmutzung und Teilschattenbildung verfälscht werden. Zudem können Unterschiede im Alterungsverhalten die Wirksamkeit der Steuerung beeinflussen.

Zur Speisung einer variablen Lastimpedanz ist die Leistungsberechnung aus den Spannungs- und Strommessungen immer notwendig. Für diesen Fall ist die Methode mit der Referenzgröße (4.6) aufwendiger als die Methoden nach 4.1 oder 4.2. Die Steuerungsschaltung nach 4.6 eignet sich besonders gut für den Fall der Einspeisung der Solarzellenleistung ins Wechselstromnetz. Ist eine Referenzgröße zeitunabhängig, z. B. konstante Spannung, so bietet die Methode nach 4.3 einen einfachen schaltungstechnischen Aufbau. Zu jeder Methode ist jedoch zu bemerken, dass die örtlichen Sonnenbestrahlungsbedingungen und die daraus resultierende Leistungsberechnung die Realisierung der Schaltung beeinflussen können. In der Praxis kann man z. B. durch geeignete Abgrenzung des Leistungstransfers an einem oberen und an einem unteren Niveau die Kosten des Wandlers senken, ohne grosse Verluste beim Energietransfer hinzunehmen [15]. Die Kenntnis der meteorologischen Gegebenheiten und die genaue Charakterisierung der Solarzellen-Panels sind somit wichtige Voraussetzungen für die Einschätzung der technisch und wirtschaftlich interessanten Lösung.

## 5. Realisierte Lösung

Um die verschiedenen Methoden zu testen und einen ersten Blick in die praktischen Probleme der Leistungsoptimierung für ein Kleinpanel zu gewinnen, wurden im Labor für den Betrieb eines Kleinpanels elektronische Schaltungen entworfen und aufgebaut. Ein wesentlicher Teil umfasste die Steuerung des Leistungsflusses auf den Maximalwert hin. Eine realisierte Schaltung, welche den Energietransfer von einem Panel zu einer variablen ohmschen Last ( $Z_L$  reell) optimiert, dient im folgenden als Beispiel für die Implementierung der Steuerungsmethode mit der Leistung am Verbraucher, gemäss 4.1.

### Wandler

Die Schaltung zeigt Fig. 11. Das wichtigste Element ist die Drossel  $L$ , die die Energieaufnahme und -abgabe möglichst verlustarm bewerkstelligen muss. Sie kann auch durch einen Transformator ersetzt werden, falls eine galvanische Trennung Eingang/Ausgang nötig ist. Die Werte von  $L$ ,  $C_1$  und  $C_2$  sind auch von der zulässigen Welligkeit der Ströme und Spannungen abhängig und betragen  $L = 0,1$  H,  $C_1 = C_2 = 1$  mF für transferierte elektrische Leistungen zum Verbraucher von 0 bis

ca. 100 W. Den Wirkungsgrad  $\eta$  des Wandlers, definiert als das Verhältnis der effektiven (rms) Ausgangsleistung zur rms Eingangsleistung zeigt Fig. 12 für  $U_2 = 50$  V dc als Funktion der dc-Eingangsspannung. Man sieht, dass  $\eta$  in einem grossen Bereich der Eingangsspannung den Wert von 90% deutlich übertrifft [12].

### Steuerung des Wandlers

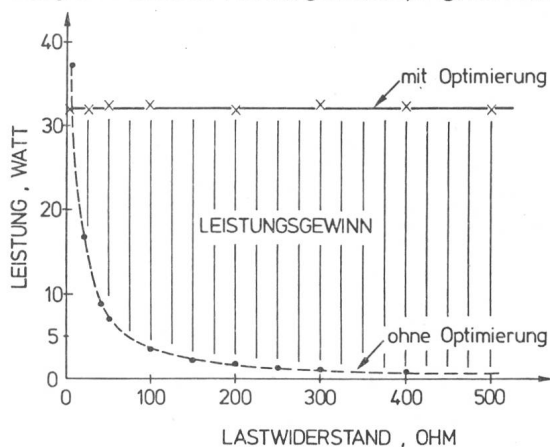
Die Wandlersteuerung wird von der Solarzelle gespeist und enthält einen analogen und einen digitalen Teil [13].

Im analogen Teil wird die Leistung  $P = I \times U$  mit einem einfachen, billigen Transkonduktanz-Verstärker (OTA) gemessen.  $U$  wurde über den Lastklemmen gemessen,  $I$  als Spannungsabfall über einem sehr kleinen Widerstand ( $\ll 1$  Ohm) in Serie mit der Last.

Im digitalen Teil wird das Tastverhältnis  $\alpha$  so lange variiert, bis der Ausgang der Multiplizierstufe maximal wird. Die Suche nach dem optimalen  $\alpha$  beginnt bei  $\alpha_{\min} = 0,1$ , d. h. bei hochohmiger Belastung der Solarzelle. In der Regel ist der Punkt maximaler Leistung nach einigen Sekunden erreicht.

### Resultate

Um die Wirkung der Leistungsoptimierung zu messen, wurden zwei Messungen durchgeführt. Zuerst wurde der Solarzellen-Panel mit einem variablen Widerstand  $R_L$  bei konstanter Bestrahlungsstärke  $E$  belastet und die in  $R_L$  fliessende Leistung als Funktion von  $R_L$  gemessen, Fig. 13. Dann wurde die



**Fig. 13 Gemessener Leistungsfluss aus einem Kleinpanel in einen variablen ohmschen Lastwiderstand mit und ohne die Optimierungsschaltung der Fig. 11 zwischen Panel und Last**  
Man beachte die starke Zunahme des Leistungsflusses dank der elektronischen Optimierungsschaltung



Optimierungsschaltung zwischen Zelle und  $R_L$  geschaltet und die Messung nochmals durchgeführt. Wie Fig. 13 zeigt, erreicht man durch die Optimierung eine hohe Zunahme der Leistung in  $R_L$  über weite Grenzen von  $R_L$ . Ähnliche Kurven ergeben sich auch für andere Bestrahlungsstärken. Der kleine Leistungsverlust, der entsteht, wenn  $R_L = R_{opt}$  wird, setzt sich aus den Verlusten im Wandler und in der Steuerungselektronik zusammen. Der relative Anteil dieser Verluste nimmt mit zunehmender Leistung ab. Zudem ist in der Praxis der Fall der Belastung mit  $R_{opt}$  wegen der sich ändernden Beleuchtungsverhältnisse wenig interessant. Bei sorgfältiger Ausführung der Optimierungsschaltung resultiert somit für Belastungen mit konstantem oder variablem ohmschem Widerstand, wie unser Beispiel zeigt, eine Erhöhung der Energieentnahme aus dem Panel.

## 6. Schlussfolgerung

Der Energietransfer aus einem Solarzellen-Generator in den Verbraucher kann in der Praxis mit Hilfe von elektronischen Optimierungsschaltungen erheblich verbessert werden. Da die Kennlinie der Solarzelle stark von Bestrahlungsstärke, Temperatur und Alterung abhängt, muss die Optimierungsschaltung eine dauernde Anpassung der Lastimpedanz an den dynamischen Widerstand des Solarzellen-Generators bewerkstelligen. Dadurch wird erreicht, dass der Generator praktisch jederzeit seine maximale Leistung an den Verbraucher abgibt. Die Optimierung ist in der Praxis vor allem für variable Lasten (z. B. Antriebsmotoren) und für Verbraucherkonfigurationen mit konstanter Strom- oder Spannungseinspeisung (z. B. Rückspeisung in das Wechselstromnetz) interessant.

Die Optimierungsschaltung besteht grundsätzlich aus einem Wandler, dessen Impedanz von einer Steuerungseinheit geregelt wird. An den Wirkungsgrad des Wandlers werden ausserordentlich hohe Anforderungen gestellt.

Ein Teil der transferierten Leistung wird von der Optimierungsschaltung aufgenommen. Die benötigte Speiseenergie für die Steuerung erscheint in der Gesamtleistungsbilanz. Deshalb ist es von Vorteil, für die Steuerschaltung leistungsarme Elektronik zu verwenden. Nichtidealitäten der Schalter (Schwellspannungen) können bei ungünstiger Dimensionierung das Resultat negativ beeinflussen. Aus diesem Grunde ist es angebracht, die Nennspannung der Solarzellenanlage auf einem relativ hohen Niveau zu halten. Die Leerlauf-Spannung der einzelnen Solar-

zellen ist physikalisch bedingt und liegt unter 1 V (Silizium-Diode). So müssen also eine stattliche Anzahl Zellen in Serie geschaltet werden, um die geforderte Nennspannung zu erhalten.

Die Herstellung von Solarzellenzubehör dürfte für die Schweizer Industrie interessant werden, wenn in Zukunft tatsächlich billige Solarzellen auf dem Markt erscheinen werden. Optimierungsschaltungen sind ein Bestandteil dieses Zubehörs. Die Fortsetzung der Arbeiten in diesem Gebiet erscheinen uns deshalb als sehr sinnvoll.

## Literatur

- [1] *A. Meinel and M. Meinel*: Applied solar energy. Addison Wesley Publishing Company, Reading/Massachusetts, 1976.
- [2] *R. Williams*: Toward a solar civilisation. Cambridge/Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology Press, 1978.
- [3] *D. Chapin, C. Fuller and G. Pearson*: A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. J. Applied Physics 25, (1954), p. 676...677.
- [4] *J. A. Castle*: Design criteria for high efficiency silicon solar cells with concentration. Conference record of the 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge La., November 1976, p. 751.
- [5] *Ch. E. Backus*: Solar cells. New York, IEEE Press, 1976.
- [6] *H. J. Hovel*: Solar cells. Semiconductors and semimetals, vol. 11, ed. R. K. Willardson and A. C. Beer, New York, Academic Press, 1975.
- [7] *C. Cuk and R. D. Middlebrook*: A new optimum topology switching DC-to-DC converter. IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC-77, 1977, p. 160...179.
- [8] *D. M. Divan and M. M. Hasan*: Maximisation of operating efficiency of solar cells. Energy Conversion 17(1977)4, p. 183...188.
- [9] *E. E. Landsmann*: Maximum power trackers for photovoltaic arrays. IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC-78, 1978, p. 996...1000.
- [10] *A. F. Boehringer*: Self-adapting dc converter for solar spacecraft power supply. IEEE Trans. AES 4(1968)1, p. 102...111.
- [11] *R. L. Pickrell, G. O'Sullivan and W. C. Merrill*: An inverter/controller subsystem optimized for photovoltaic applications. Conference record of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington D.C., 1978, p. 984...991.
- [12] *E. Feller and E. Möhl*: DC-DC-Wandler für Solarzellen. Studienarbeit, Institut für Elektronik ETH, Zürich, 1977.
- [13] *U. Hediger and G. von Tobel*: Lastoptimierung bei Solarzellen. Studienarbeit, Institut für Elektronik ETH, Zürich, 1977.
- [14] *R. Apfel and D. Jones*: Universal switching regulator diversifies power subsystem applications. Computer Design 17(1978)3, p. 103...112.
- [15] *D. Baert, A. de Vos and G. von Hoogenbeust*: Influence of meteorological condition on the design of solar energy dc-ac inverters. 2nd European Communities Photovoltaic Solar Energy Conference, Berlin, 23.-26. April 1979, p. 1065...1073.

## Adresse der Autoren

PD Dr. *G. Guekos*, dipl. Ing. *G. Tenchio*, Dr. sc. techn. *A. Descombes*, dipl. Ing. *P. Ceppi*, Prof. Dr. *H. Melchior*, Institut für Elektronik, ETH Zentrum, 8092 Zürich.