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: 80 (1989)

Heft: 16: 5

Artikel: Neuer Wechselrichter für dezentrale Solarzellenanlagen im Netzverbund

Autor: Toggweiler, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903706

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: 09.12.2025

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

Neuer Wechselrichter für dezentrale Solarzellenanlagen im Netzverbund

P. Toggweiler

Der Beitrag beschreibt einen neuen, in der Schweiz entwickelten und produzierten kleinen Wechselrichter für Solarzellenanlagen, der sich durch hohe Wirkungsgrade auch im Teillastbereich auszeichnet.

L'article présente un nouveau petit onduleur pour installations photovoltaïques. Développé et fabriqué en Suisse, cet onduleur se distingue par des rendements élevés aussi dans le domaine de charge partielle.

Adresse des Autors
Peter Toggweiler, Alpha Real AG, Feldeggstr. 89, 8008 Zürich.

Einleitung

Über Solarzellenanlagen wird zurzeit sehr viel publiziert. Anlass dazu gaben die verschiedenen Solarzellenanlagen im Netzverbund, welche in den vergangenen zwei Jahren installiert wurden. Der Netzverbund ermöglicht einen rationellen und einfachen Bau und Betrieb solcher Anlagen. Das Funktionsprinzip und das Anlagekonzept wird hier nicht mehr beschrieben. Stattdessen wird im Anhang auf Literaturstellen verwiesen.

Der vorliegende Artikel beschreibt die industrielle Entwicklung eines Solarwechselrichters für die Verbindung der Solarzellen mit dem öffentlichen Netz.

Ausgangslage

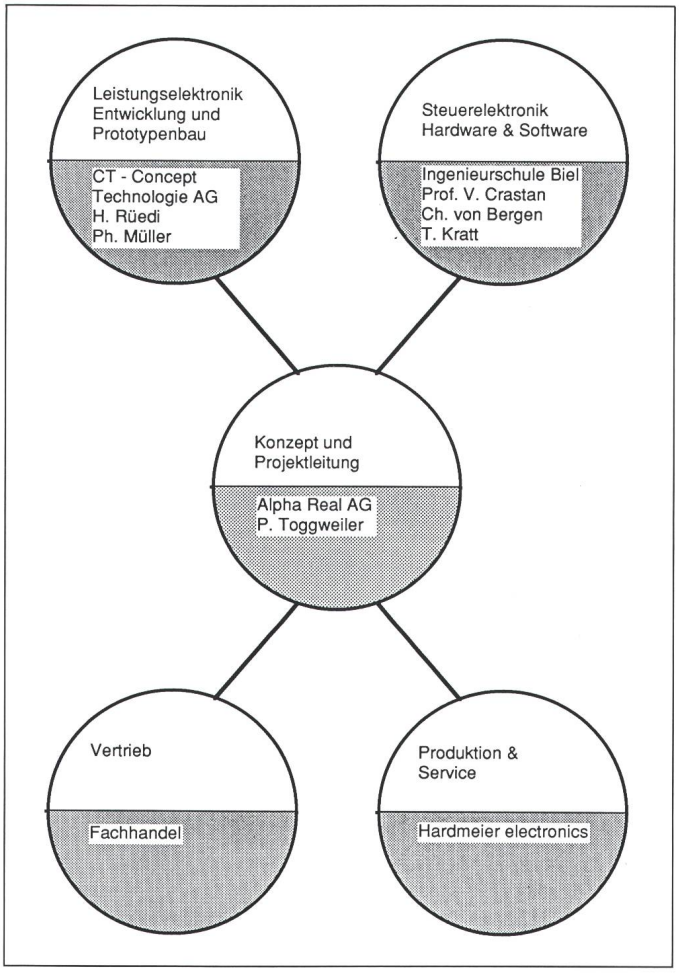
Bei den zahlreichen Solarzellenanlagen, welche heute parallel mit dem Netz betrieben werden, stammen alle Schlüsselkomponenten aus dem Ausland. Dies betrifft Wechselrichter und die Solarzellen. Bei den Solarzellen sind technisch ausgereifte und langlebige Produkte verfügbar. Beim Solarwechselrichter dagegen waren und sind heute noch keine in qualitativer Hinsicht befriedigenden Produkte auf dem Markt. Es war deshalb relativ dringend und naheliegend, angesichts der sinnvollen und zukunftsträchtigen Technologie, eine technische Entwicklung in der Schweiz zu lancieren.

Eine Solarzellenanlage muss eine lange Lebensdauer in der Grössenordnung von 30 Jahren aufweisen. Beim Wechselrichter ist dies nur zu erreichen durch entsprechendes Design und durch entsprechende Herstellung und Servicegarantie. Mit der Entwicklung und Produktion in der Schweiz konnten von Anfang an diese Forderungen berücksichtigt und eingehalten werden.

Entwicklungsprogramm

Die konzeptionellen Arbeiten am Solarwechselrichter Solcon begannen vor rund zwei Jahren. Es wurde damals das bestehende Know-how weltweit gesammelt und die Essenz daraus zu einem eigenen Programm verarbeitet. Begrenzt durch die verfügbaren Mitarbeiter und Institutionen mit dem benötigten Know-how und den finanziellen Mitteln, wurde eine Projektgruppe ins Leben gerufen (siehe Kasten). Damit war die Technologiebasis zur Entwicklung eines leistungsfähigen und marktgerechten Solarwechselrichters gegeben. Alpha Real AG als Initiantin und Projektleiterin koordinierte die Arbeiten zwischen den Markterfordernissen, der technischen Machbarkeit, der Sicherheit und den speziellen Eigenheiten der Solarzellen. Die Firma Concept Technologie AG weist eine langjährige Erfahrung in der Entwicklung von Leistungselektronik, basierend auf FET, auf. Unter der Leitung von Prof. Crastan, Ingenieurschule Biel, Abteilung Elektrotechnik, lief ein Projekt zur Entwicklung einer Mikroprozessorsteuerung für einen Solarwechselrichter. Diese Arbeit wurde unterstützt durch das Bundesamt für Energiewirtschaft. Die Firma Hardmeier electronics ist ein mittelgrosses Elektronikunternehmen, welches die Kombination von Software, Hardware und Elektromechanik beherrscht. Beim heutigen Markt ist zudem die Flexibilität wichtig, kleine und mittlere Serien effizient zu produzieren. Der Kanton Zürich, vertreten durch die Energiefachstelle, hat die Entwicklung von Beginn an finanziell unterstützt und überhaupt erst ermöglicht.

Die technischen Zielsetzungen konnten weitgehend erreicht werden und entsprechen deshalb den technischen Daten in Tabelle I. Einzig bei



Projektorganisation SOLCON

Technische Daten(provisorisch)

Eingang	
Nennspannung	100V (96)
Spannungsbereich Betrieb	80 - 120V
Leerlaufspannung	150V (ev. 160V)
Filter	ja
max. Spannungsrippel	5V peak-peak
Ausgang	
Spannung	220 Vac (eff) +/- 15%
Frequenz	50 Hz +/- 5% (netzsynchron)
Leistung	3 kW
Stromform	Sinus
Klirrfaktor	</= 3% (Spannung)
Transientenschutz	ja
Netzfilter	ja
Allgemeines	
Leerlaufverlust	unter 50 W
Wirkungsgrad	ca. 95% im Optimum ca. 93% bei 15 - 100% Last
Umgebungstemperatur	-20 bis +45 Grad Celsius
max. Innentemperatur	+85 Grad Celsius
Wärmeabfuhr	natürliche Konvektion
Potentialtrennung Eingang/Ausgang	auf HF-Seite
Prüfspannung	4 kV / 50 Hz/ 1 min
Geräuschentwicklung	keine
Gehäuse	IP 54 (oder IP 65)
Masse (Zielwert) l/b/h	0,3 / 0,2 / 0,3m
Relative Luftfeuchtigkeit	0 - 95%, keine Kondensation
Sicherheitsnormen	SEV
Servicekonzept	Testinfo, austauschbare Module
Ueberwachungen	- Abschaltung bei Netzausfall - automatischeSynchronisation
Statusmeldung	ja
Lebensdauer	max. 20 Jahre
Anschlüsse	Klemmen
Technologie	PWM, Power-MOSFET

Tabelle I Technische Daten

den Gehäuseabmessungen und dem Terminplan konnten die Zielwerte nicht ganz erreicht werden.

Lösungsansätze

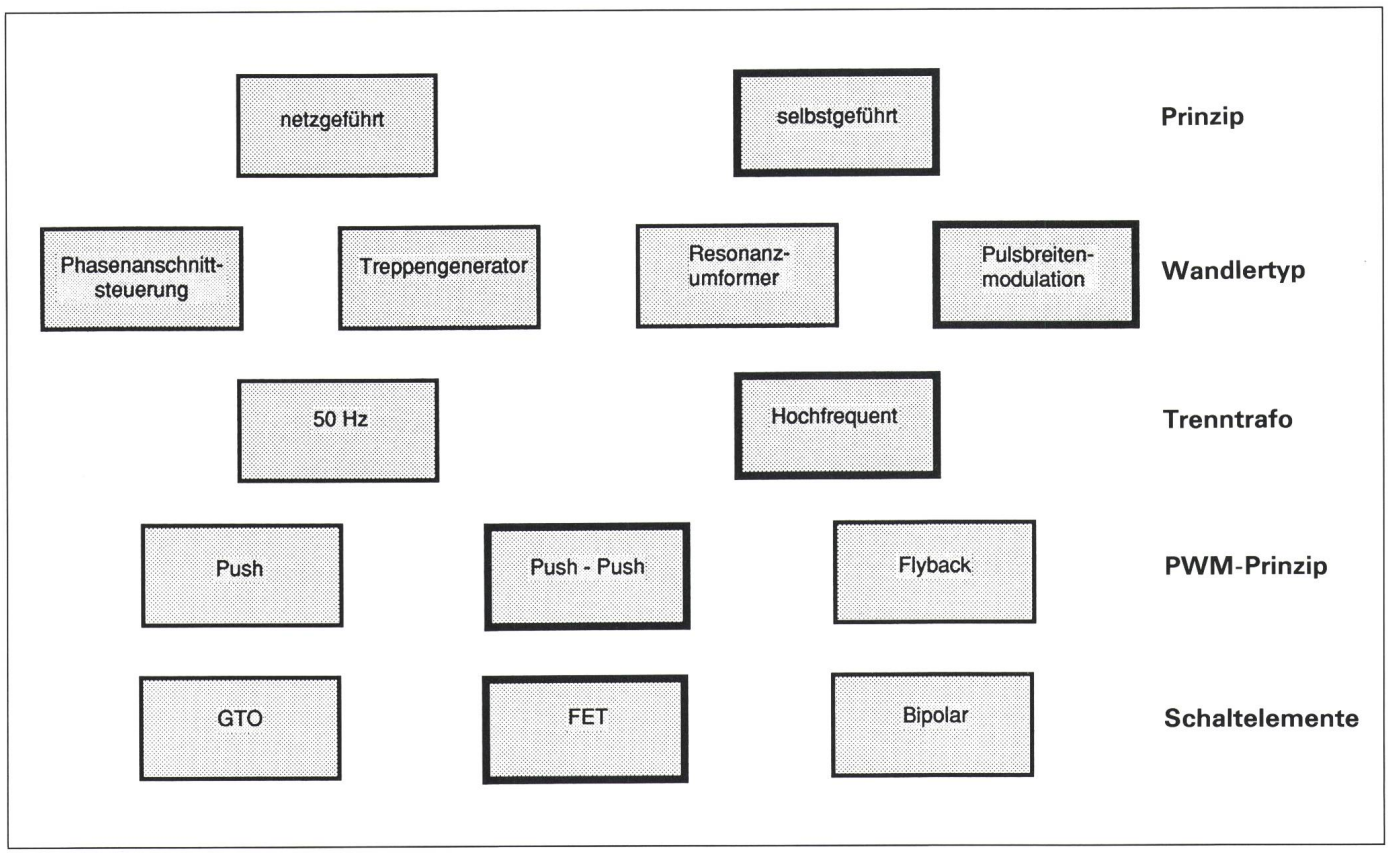
Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten wurden verschiedene Technologien auf deren Eignung untersucht. Nachstehend ist eine nicht abschliessende Liste der möglichen Umrichterprinzipien in Form eines Entscheidungsbaumes angegeben (Fig. 1). Die gewählte Lösung ist fett gedruckt.

Bei der Auswahl der optimalen Technologiegrundlage stellte sich vorab die Frage, ob ein Trenntransformator zur Potentialtrennung zwischen DC und AC während des Betriebes der Anlage notwendig ist. Rein funktionell gesehen ist dies nicht notwendig. Es gibt aber einige sicherheitstechnische Aspekte, welche eine Isolation fordern. Dabei ist die Gefahr der möglichen DC-Einspeisung ins Netz am bedeutendsten. Bei einem Störungsfall in der Leistungselektronik oder der Überwachungselektronik ist ohne Trenntrafo die Sicherheit nicht immer gewährleistet, es sei denn, man stützt sich auf eine relativ aufwendige DC-Überwachung auf der AC-Seite, die im Notfall auch die volle DC-Leistung abschalten könnte. Nebenbei sei erwähnt, dass jedes Batterieladesystem einen ähnlichen Fall darstellt, obwohl der Energiefluss normalerweise in die andere Richtung stattfindet. Bei Solcon wurde die Lösung mit Trenntrafo angewendet. Mit der Forderung nach einem sehr hohen Wirkungsgrad sind die übrigen Technologieentscheide relativ klar. Ein 50-Hz-Trafo im Kleinleistungsbereich hat normalerweise einen ungenügenden Wirkungsgrad, dies besonders im Teillastbereich. Besonders wegen dieses Aspektes fiel die Wahl auf die FET-Technologie. Diese ermöglicht das Schalten bei hohen Frequenzen mit geringen Ansteuerleistungen. Bei Solcon sind alle gesteuerten Leistungshalbleiter mit FET ausgeführt.

Leistungsteil

Wie zuvor bereits erwähnt wurde, besteht der Leistungsteil aus Feldeffekttransistoren und einem Hochfrequenz-Isolationstransformator. Im Blockschaltbild in Figur 2 ist das Prinzip aufgezeigt, zusammen mit der Steuerelektronik. Im Leistungsteil wird die Solarenergie zuerst in einen hochfrequenten Wechselstrom umgewandelt, mit einer Taktfrequenz von 50 kHz. Nach dem Transformator wird die Wechselspannung gleichgerichtet, und man erhält eine pulsierende Wechselspannung mit 100 Hz. Aus diesen 100-Hz-Halbwellen wird mittels eines 50-Hz-Umklappers die gewohnte Netzspannung erzeugt.

Der Leistungsteil ist mit Reserven aufgebaut, d.h. eine kurzzeitige Überlastung schadet nichts. Daneben ist z.B. die Elektronik gegen einen Kurzschluss geschützt. Ebenso sind alle Schaltelemente gegen interne und externe Überspannungen geschützt.



Figur 1 Auswahl von Konzeptvarianten für einen Solarwechselrichter (Lösungsansatz SOLCON fett)

Steuerelektronik

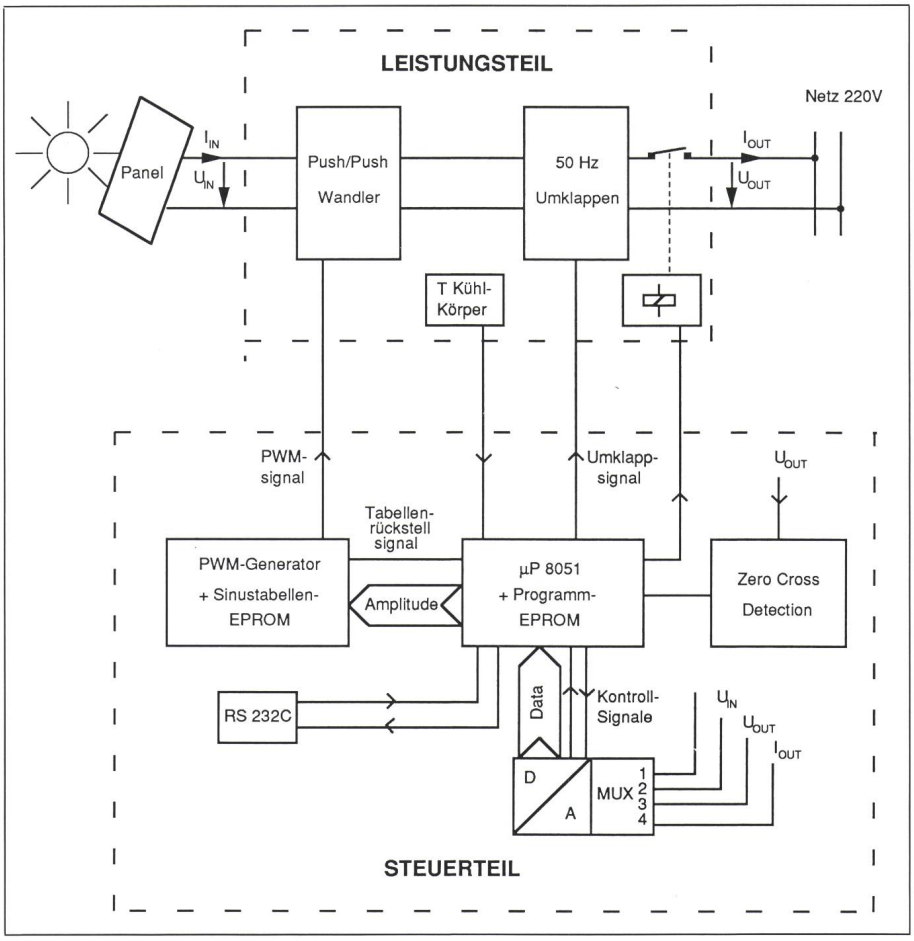
Solcon wird mit einer Mikroprozessor-gestützten Steuerelektronik betrieben. Neben dem Mikroprozessor ist das Interface zum Leistungsteil und zur Kommunikation mit der Aussenwelt von Bedeutung. Die Steuerelektronik umfasst folgende Funktionen:

- *MPT-Regelung*

Die Maximum-Power-Tracking (MPT)-Regelung hat die Aufgabe, den Leistungsfluss von den Solarzellen in den Wechselrichter und damit auch ins Netz zu optimieren. Dies geschieht durch die Maximierung der Einspeiseleistung ins Netz. Damit sind auch die wechselnden Bedingungen der Sonneneinstrahlung, der Solarzellentemperatur, allfälliger Teilbeschattung usw. berücksichtigt.

- *Netzsynchronisation*

Die Regelung des Wechselrichters basiert auf einer vorgegebenen Sinustabelle, welche in einem EPROM gespeichert ist. Die entsprechende Synchronisation mit dem Netz geschieht automatisch und wird bei jedem Nulldurchgang angepasst. Somit arbeitet der Wechselrichter bei sinusförmigem Strom mit Cosinus Phi = 1.



Figur 2 Blockschaltbild SOLCON

● *Überwachungsfunktion*

Die Steuerelektronik überwacht sämtliche für den Betrieb notwendigen Funktionen und Kriterien. Dazu lassen sich folgende Punkte aufzählen:
- Ein- und Ausschaltung des Wechselrichters im Übergang von Tag und Nacht,
- Überwachung von irgendwelchen Störungen im Betrieb und entsprechende Anzeigen und Informationen zur Problembehebung,
- Netzüberwachung bezüglich Spannung und Frequenz,
- Abschaltung des Gerätes bei gestörtem oder ausgeschaltetem Netz und bei anderen unvorhergesehenen Störungen,
- Kommunikation nach aussen über eine RS-232-Schnittstelle.

333 Solarkraftwerkbesitzer gesucht . . .

Im Rahmen des Projektes «Megawatt - Solarkraftwerke für unsere Umwelt» möchte die Firma Alpha Real versuchen, durch Standardisierung und Sammelbestellung einer grösseren Zahl von Solarzellenanlagen Preisreduktionen zu ermöglichen. Es sollen insgesamt 333 3-kW-Anlagen (Gesamtleistung: 1 Megawatt) realisiert werden. Die Systemeinheit besteht aus den Komponenten Solarzellen (etwa 25 m²), Wechselrichter und Klemmenkasten. Die Anlagen sind prinzipiell identisch und unterscheiden sich lediglich in einigen objektspezifischen Randbedingungen wie Dachaufbau oder elektrische Verdrahtung. Der in den Solarzellen erzeugte Strom fliesst über den Wechselrichter direkt ins elektrische Netz. Hier kann er zuerst für die internen Verbraucher im Haushalt, Fabrikations- oder Dienstleistungsbetrieb verwendet werden. Momentan nicht benötigte Solarenergie wird ins öffentliche Netz abgegeben. Die Regelung erfolgt automatisch. Die mittlere Elektrizitätsproduktion der 3-kW-Solarzellenanlage beträgt im Mittelland etwa 3400 kWh pro Jahr, im Berggebiet oder Tessin etwa 4400 kWh pro Jahr. Die Kosten betragen Fr. 40 000.– für eine betriebsbereite 3-kW-Anlage bzw. Fr. 29 000.– für den Bausatz.

Erfahrungen

Die praktischen Erfahrungen mit Solcon verliefen sehr positiv. Gegen Ende 1988 konnte der erste Labor-Prototyp getestet werden. Dies geschah an einer 6-kW-Anlage und an der Anlage im Tessin (TISO). Es zeigte sich, dass das Konzept des Wechselrichters richtig war. Das Gerät arbeitet auch unter Teillast bei einem sehr hohen Wirkungsgrad von über 90%. Hinzu kommt, dass auch bei einer tiefen Einstrahlung, wie z.B. bei bewölktem Himmel, das Gerät noch Energie ins Netz einspeisen kann. Hier wurden Werte in der Grössenordnung von 30 bis 50 Watt ins Netz abgegebene Leistung gemessen.

Interessant ist die Beobachtung der Stromform ins Netz: Der Wechselrichter generiert vom Prinzip her eine ideal sinusförmige Spannung. Bei der Anlegung dieser Spannung ans Netz fliesst jedoch infolge der Systemnichtlinearität ein nicht mehr sinusförmiger Strom ins Netz. Die Abweichung von der Sinusform, generiert durch den Wechselrichter, kann in der EPROM-Tabelle kompensiert werden. Hingegen können Abweichungen von der Sinusform, welche auf der Netzspannung vorhanden sind, nicht kompensiert werden. Diese verursachen einen nicht sinusförmigen Strom ins Netz, welcher jedoch so gestaltet ist, dass die auf dem Netz vorhandenen Oberwellen kompensiert werden. Bei einer Netzspannung, welche die typische Abflachung im oberen Bereich aufweist, liefert der Wechselrichter in diesem Bereich einen erhöhten Strom. Damit wird der Spannungsabflachung entgegengewirkt. Das Fazit ist, dass der Wechselrichter bei einem derartigen Netz den Oberwellengehalt reduziert. Das Resultat muss durch Messungen an verschiedenen Orten noch bestätigt und eindeutig nachgewiesen werden.

Im Juni 1989 ging das erste Seriengerät ans Netz. Inbetriebnahme und der Betrieb seit rund zwei Monaten verliefen absolut problemlos. Das Gerät ist in einem Unterwerk der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) montiert. Auch Netzoberwellen und Rundsteuersignale haben bisher zu keinen Sörungen geführt. Dies ist nicht ganz selbstverständlich, da mit verschiedenen bisherigen Geräten erhebliche Schwierigkeiten aufgetreten sind. Bei Solcon wurde diesem Punkt von Beginn an grosse Bedeutung beigemessen. So ist der Eingang von der Solarzellenseite her und der Ausgang auf der AC-Seite auch gegen sehr schnelle Anstiegsflanken von Überspannungen geschützt.

Rückblick und Zukunft

Nach der nun rund zweijährigen Entwicklungszeit kann man mit Ausnahme der verschiedenen Terminprobleme auf ein relativ erfolgreiches Entwicklungsprojekt zurückschauen.

Das Zusammenfliessen von Forschungsunterstützung seitens des Bundes und des Kantons Zürich mit den Arbeiten der Ingenieurschule und spezialsierten Firmen ergab eine sinnvolle und effiziente Forschungsgrundlage. Es ist ein Produkt entstanden, welches dem Industriestandort Schweiz langfristig sinnvolle Arbeit sichern und eine technologisch gute Position für die Zukunft setzen kann.

Der Fabrikant kann nun ein Produkt herstellen, welches einen langfristigen Markt besitzt. In diesem Jahr werden bis zum Herbst 20 Geräte produziert und bis Ende Jahr eine zusätzliche Serie von voraussichtlich 10 Geräten. Über den Markt im kommenden Jahr sind wir sehr optimistisch. Zur Reduktion der Anlagekosten von Solaranlagen wurde das Projekt «Megawatt» gestartet (siehe Kasten). Das heisst, eine 3-kW-Solarzellenanlage, bestehend aus Solarzellen und einem solchen Wechselrichter (Solcon), soll nicht mehr nur in Einzelanfertigung geliefert und montiert werden, sondern in einer mittleren Serie hergestellt, vertrieben und gebaut werden. Damit können die Kosten um etwa einen Drittel gesenkt werden. Bezogen auf den Wechselrichter heisst das, dass im Jahr 1990 voraussichtlich eine Serie von etwa 350 Geräten produziert wird. Für die weitere Zukunft ist selbstverständlich zu hoffen, dass die Solarzellen sich weiter verbilligen. Solcon muss und kann sich bei entsprechenden Serien ebenfalls weiter verbilligen, womit auch das Marktvolumen ansteigen wird. Die technischen Verbesserungen seitens des Wechselrichters beziehen sich vorwiegend auf die Verbilligung während der Herstellung des Gerätes. Dies geschieht durch weitere Integration und Vorfabrikation.

Literaturverzeichnis

M. Real: Spezifikationen von Solarwechselrichtern für verschiedene Leistungsklassen für netzparallelen Betrieb von Solaranlagen. Bundesamt für Energiewirtschaft.

EPRI, USA: Protecting Interconnections between PV Generators and Utility Distribution Lines, 1985.

IEEE Std. 929: Recommended Practice for Utility Interface of Residential PV Systems.

SEV/SN: Norm 3600-1 und 3600-2.