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: 77 (1986)

Heft: 6

Artikel: Die netzgekoppelte photovoltaische Anlage TISO 15

Autor: Camani, M. / Ceppi, P. / Iacobussi, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904177

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: 10.12.2025

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

Die netzgekoppelte photovoltaische Anlage TISO 15

M. Camani, P. Ceppi und D. Iacobucci

Seit 1982 ist in Lugano das erste Kollektorenfeld der Anlage TISO 15 mit einer Nennleistung von 10 kW in Betrieb. In rund drei Jahren wurden über 27 000 kWh direkt ins Netz der Industriellen Betriebe der Stadt Lugano eingespeist. Der photovoltaische Generator arbeitete die ganze Zeit ohne Schwierigkeiten.

Le premier champ de collecteurs de l'installation TISO 15 avec une puissance nominale de 10 kW est en service à Lugano depuis 1982. Depuis le début de l'enregistrement systématique des données, c.-à-d. depuis trois ans environ, 27 000 kWh ont été alimenté directement dans le réseau des Services industriels de la ville de Lugano. Le générateur photovoltaique a fonctionné durant toute cette période sans présenter de difficultés.

Adresse der Autoren
Dr. *Mario Camani*, Ing. *Paolo Ceppi* und *Domenico Iacobucci*, Dipartimento dell'ambiente, 6500 Bellinzona

1. Einleitung

Die Abklärung der technischen und wirtschaftlichen Probleme im Zusammenhang mit dem Bau von photovoltaischen Hochleistungskraftwerken und der Einspeisung in das öffentliche Netz des in vielen dezentralen Anlagen produzierten Stromes ist von entscheidender Bedeutung, sowohl im Rahmen der Anstrengungen zur Sicherstellung der nationalen Energieversorgung, als auch im Hinblick auf die einheimische industrielle Produktion von entsprechenden Anlagebestandteilen.

Im Jahre 1981 startete das Umweltdepartement (Dipartimento dell'ambiente) des Kantons Tessin mit der finanziellen Unterstützung des Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) und anderer privater Institutionen ein Projekt, welches Planung, Aufbau und Betrieb eines mittelgrossen experimentellen photovoltaischen Solarkraftwerkes mit Stromeinspeisung in das elektrische Netz zum Ziele hatte. Die Solaranlage, namens TISO 15, soll praktische Erfahrungen, insbesondere über die Wechselwirkung mit dem elektrischen Netz, liefern.

Die Leistung der Anlage TISO stellt eine Erweiterung von etwa einem Faktor zehn gegenüber anderen in der Schweiz gebauten Anlagen dar. Die gewählte Grösse soll auch Vergleiche mit den Ergebnissen des Photovoltaikprogramms der EG erlauben, mit dessen verantwortlichen Stellen ein enger Kontakt und Informationsaustausch besteht.

Zwei Kollektorfelder mit 10 bzw. 3 kW Nennleistung sind direkt an je einen Wechselrichter angeschlossen.

Diese Leistungswandler übertragen die von den Solargeneratoren gelieferte Energie direkt in das öffentliche 220-V/50-Hz-Wechselstromnetz. Die Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom und die Einspeisung ins Versorgungsnetz erfolgt mit hohem Wirkungsgrad und vollständig automatisch.

Die Wechselrichter sorgen für sämtliche Kontroll- und Sicherheitsfunktionen, wie Netzsynchronisation, Ein- und Ausschalten, Kontrolle der vorhandenen Leistung, Abkopplung vom Netz bei Netzunterbrüchen und Optimierung der Leistungsübertragung («Maximum Power Tracking», MPT).

Im Gegensatz zu den meisten photovoltaischen Anlagen besitzt TISO keine lokale Energiespeichervorrichtung. Die an den Klemmen der Solarkollektoren verfügbare Energie wird ohne Zwischenspeicherung unmittelbar ins Netz eingespiesen und steht somit allen angeschlossenen 220-V-Verbrauchern zur Verfügung.

Die Verwendung des öffentlichen Netzes als Speicher bietet die Möglichkeit, die Kosten der Akkumulatoren und der dazugehörenden Überwachungsvorrichtungen einzusparen. Zudem wird die Energie mit einem höheren Gesamtwirkungsgrad verwertet.

Der erste Teil des Kraftwerkes, mit 10 kW Nennleistung, wurde Anfang 1982 auf dem Dach der Kantine der HTL Lugano-Trevano aufgebaut und am 13. Mai 1982 ans elektrische Netz der Aziende Industriali della Città di Lugano angeschlossen. Seither wird der Strom der Photozellen ohne nennenswerte Probleme ins Netz eingespiesen.

Die systematische Datenerfassung begann am 8. November 1982. Im vorliegenden Beitrag wird die 10-kW-Anlage kurz beschrieben und die Resultate von 3 Jahren Betriebserfahrung vorgestellt. Über die 3-kW-Anlage mit flachkonzentrierenden thermophotovoltaischen Generatoren zur Erzeugung von Strom und Wärme, welche im Juni 1983 den Betrieb aufnahm, wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet.

Weitere Angaben über das Projekt TISO sind in anderen Publikationen

zu finden ([1]...[8]). T. Celio, Ufficio d'ingegneria per l'elettronica, l'ottica e la luce, Ambri, und C. Giovannini, Invertomatic SA, Riazzino, haben bei der Planung und am Aufbau der Anlage massgebend mitgewirkt. Das Projekt wurde vom Nationalen Energie-Forschungs-Fonds, von der Società Elettrica Sopracenerina, vom Migros-Genossenschaftsbund und von weiteren privaten Institutionen finanziell unterstützt.

2. Aufbau der Anlage

Die Hauptmerkmale des Systems sind in der Tabelle I zusammengefasst. Figur 1 zeigt ein Blockschema der 10-kW-Anlage.

2.1 Solargeneratoren

Das Kollektorfeld besteht aus 288 Flachgeneratoren der Firma ARCO (Modell ASI-2300) mit einer Nennleistung von je 37 W. Sie sind in drei Reihen zu je 12 (waagrecht) mal 8 (senkrecht) Generatoren aufgestellt.

Die Neigung der Generatoren wurde auf 65 °C festgelegt, um die winterliche Stromproduktion zu optimieren. (Im Tessin fällt ein bedeutender Anteil der Sonnenenergie im Winterhalbjahr an, also gleichzeitig mit der höchsten Stromnachfrage.) Der Abstand zwischen den Reihen beträgt 10 m, damit selbst im ungünstigsten Fall nur die untersten Generatoren für kurze Zeit beschattet werden (Fig. 2).

Besondere Beachtung wurde der Auslegung des Verdrahtungsschemas geschenkt. Zwölf Generatoren einer waagrechten Reihe sind jeweils in Serie geschaltet (192 V, 2,3 A). Die 24 resultierenden Stränge werden bis zum Kontrollraum getrennt geführt und erst dort parallel geschaltet (siehe Fig. 1).

Dieses Verkabelungsschema bewährt sich besonders gut in Fällen, wo waagrecht ausgedehnte Schattenformen zu erwarten sind; zum Beispiel bei Schneeanhäufung vor den untersten Modulen funktioniert die Anlage auf ihrer optimalen Spannung ungestört weiter. Die beschatteten Modulstränge stören die Energieproduktion nicht.

Im Kontrollraum ist es möglich, jeden Strang separat zu testen. Eingebaute Messinstrumente und Trenn- sowie Kurzschliessschalter erlauben die Messung von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom der photovoltaischen Module. Es ist somit möglich, auf sehr einfache Art das Verhalten jedes Anlageteils zu überprüfen und eventuelle Störungen zu lokalisieren. Die Sammelschiene der Stränge ist am Minuspol geerdet.

Hauptmerkmale der beiden Kollektorfelder von TISO — Tabelle I

SYSTEM	*Geografische Lage*		
	Breite	46,1 °N	
	Länge	8,5 °O	
	Höhe	340 m	
	Mittlere Sonneneinstrahlung		
	(Globalstrahlung auf vertikale Südfläche)	1110 kWh pro Jahr und m²	
	(Globalstrahlung auf eine um 45° geneigte Fläche)	1550 kWh pro Jahr und m²	
	Mittlere Lufttemperatur	11,7 °C	
	Systemmerkmale		
	Ein-/Ausschalten	automatisch	
	Überwachung	Messumformer (Generatoren und Netz)	
	Energiespeicherung	direkte Einspeisung ins Netz	
	Datenerfassung	Solartron 35, PDP 11/34	
GENERATOREN		*Flachgeneratoren*	*Flachkonzentrierende Generatoren*
	Produkt	Arco Solar Inc. (USA)	Atlantis Energie AG, Bern
	Typ	ASI 16-2300	-
	Halbleiter	Si Mono	Si Mono
	Serieستränge	24	1
	Module pro Strang	12	14
	Kollektorfläche	107 m²	114 m²
	Si-Fläche	70 m²	4,9 m²
	Anzahl Spiegel	-	1456
	Tragstruktur	Al-Legierung	Al-Legierung
	Verankerung	Beton	Beton
	Aufstellwinkel	65°	45°
	Elektr. Spitzenleistung	10,6 kW 25 °C, 1000 W/m²	3,1 kW 20 °C, 850 W/m² direkte Strahlung
	Wärmeleistung	-	30 kW
WECHSELRICHTER	Produkt	Abacus Controls Inc. (USA)	MESA SA (CH)
	Typ	714-3-200	-
	Eingang		
	Spannungsbereich	160–250 VDC	40–55 VDC
	Einschaltspannung	190 VDC	40 VDC
	Ausschaltspannung	155 VDC	30 VDC
	Ausgang		
	Nennleistung	10 kVA	3 kVA
	Spannung	220 VAC, 1 Phase	220 VAC, 1 Phase
	Frequenz	50 Hz	50 Hz
	Wirkungsgrad		
	bei 100% Nennleistung	91,5%	-
	bei 60% der Nennleistung	-	> 85%
	bei 10% der Nennleistung	83%	-
	Oberwellen		
	bei Nennleistung	3,5%	-
	Inselbetrieb	möglich	möglich
	Leistungsoptimierung	ja	ja

2.2 Anlage- und Komponentenschutz

- *Blitz- und Überspannungsschutz*

Um die Solargeneratoren vor Blitzeinschlägen zu schützen, wurde oberhalb jeder der drei Generatorflächen ein Blitzfangseil gespannt.

Dieses Seil ist mit dem Traggerüst der photovoltaischen Module elektrisch verbunden und bildet zusammen mit den Erdleitungen und den Erdelektroden das Blitzableitsystem.

Die Verkabelung der photovoltaischen Module wurde derart ausgeführt, dass möglichst keine Leiter-

schleife resultierte. Dies soll die induktive Einkoppelung von Blitzschlägen erschweren.

Sowohl die Molulstränge wie auch die Verbindungskabel zum Kontrollraum und zum Wechselrichter sind durch schnelle Silizium-Avalanchedioden und leistungsstarke, spannungsabhängige ZnO-Widerstände vor Überspannungen geschützt.

Die Leitungen, die zu den Messeinrichtungen führen, sind mit gasgefüllten Überspannungsableitern und Filtern versehen.

● *Schutz der Module*

Das Problem der Beschattung einzelner Solarzellen und Module in einer grösseren Anlage ist in der Literatur eingehend dokumentiert ([9], [11], [12]). In der TISO-Anlage ist jedes Modul mit einer Bypassdiode und jeder Strang mit einer Sperrdiode versehen.

Dadurch kann die Anlage auch unter kritischen Beschattungsbedingungen weiter Energie liefern. Die Bypassdioden schützen die beschatteten Module vor Überhitzung (Energieverbrauch), und die Sperrdioden vermeiden eine allfällige gegenseitige Beeinflussung der parallelgeschalteten Stränge.

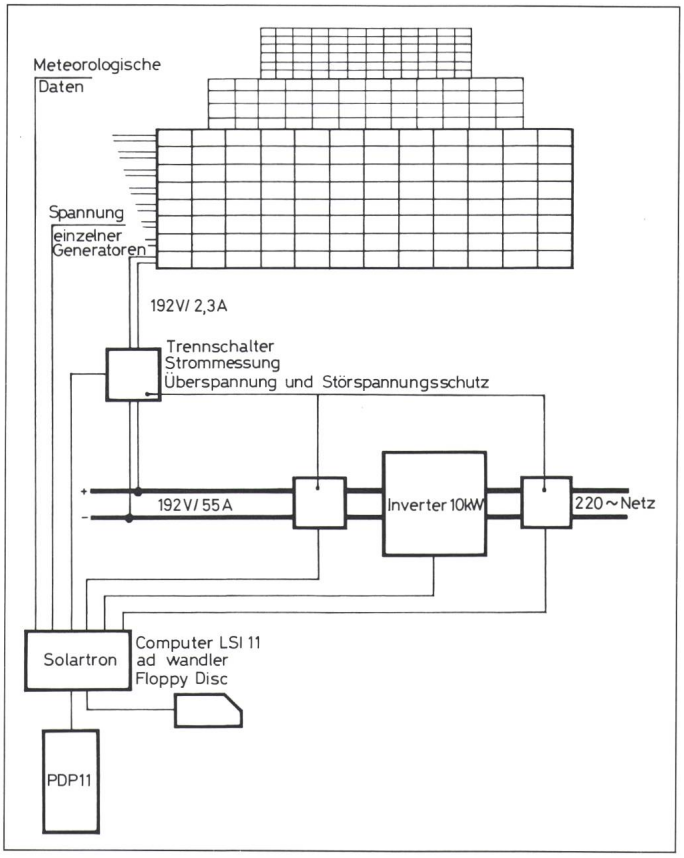


Fig. 1
Schematische Darstellung des Flachkollektorenfeldes (3 Reihen mit 12 mal 8 Solargeneratoren, jeweils 12 Generatoren seriell verdrahtet) mit Wechselrichter und Datenerfassungssystem. Die 24 Kabel aus den seriell verdrahteten Generatoren (nur eines ist auf dem Bild dargestellt) werden getrennt bis zum Invertereingang geführt und erst dort parallelgeschaltet.

2.3 Wechselrichter

Ein Wechselrichter der Firma Abacus Control, Inc., USA (Modell 714-3-200), (Fig. 3) sorgt für die Umwandlung des von den Solarmodulen gelieferten Gleichstromes in Wechselstrom (220 V/50 Hz) und für dessen Rückspeisung ins Versorgungsnetz.

Die Daten des Gerätes sind in Tabelle I zusammengefasst.

Figur 4 zeigt ein vereinfachtes Schema des Wechselrichters.

Zwei Transistor-Vollbrücken (Br1, Br2) werden mit vorprogrammierten (PLA)Impulssequenzen gesteuert.

Die sekundärseitig seriegeschalteten Transformatoren T1 und T2 kombinieren die Leistungsimpulse so, dass die resultierende Spannung V2 unterhalb der neunzehnten keine wesentliche Komponente enthält [14] (Fig. 5a, 5b).

Figur 6 zeigt die Ausgangsspannung V3 (s. Fig. 4) bei ausgekoppeltem Netz und bei einer Ausgangsleistung von 6,3 kW.

Der Wechselrichter arbeitet mit $\cos\varphi = 0{,}98$, d.h. kapazitiv. So ist es möglich, auch bei niedrigerer Kollektorenspannung das Netz weiter zu speisen. Bei der Dimensionierung des

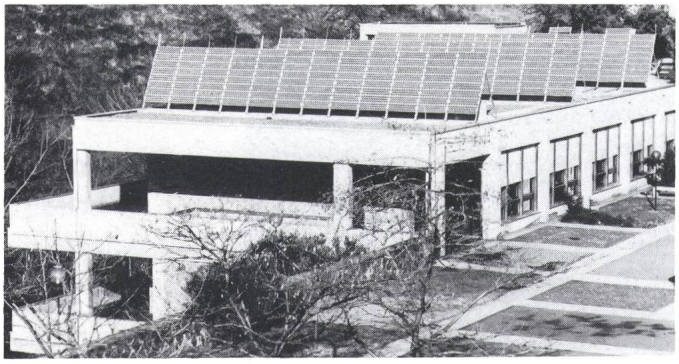


Fig. 2
10-kW-Kollektorfeld

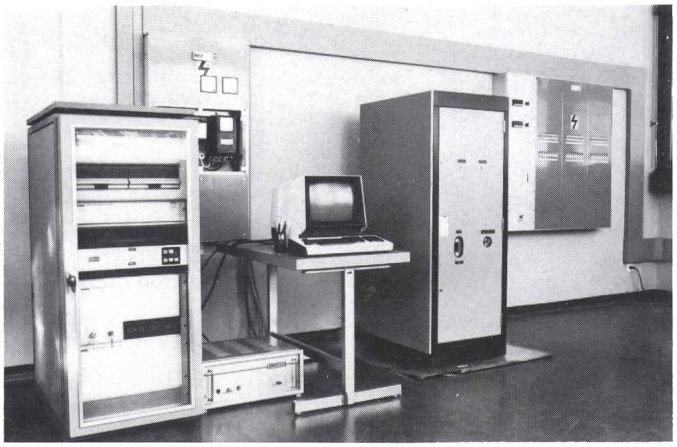


Fig. 3
10-kW-Inverter und Datenerfassungssystem

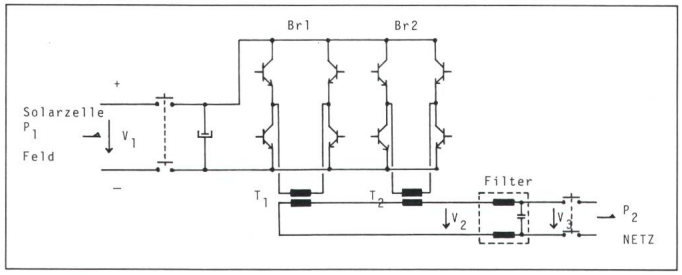


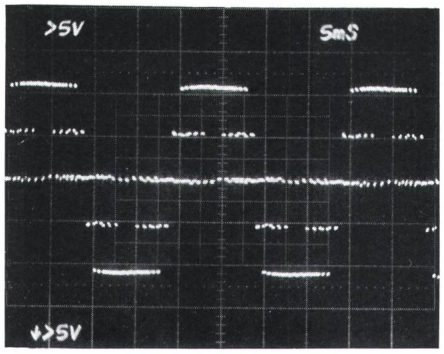
Fig. 4 Vereinfachtes Schema des 10-kW-Wechselrichters

Wechselrichters müssen dann aber die zusätzlichen Blindstromverluste berücksichtigt werden.

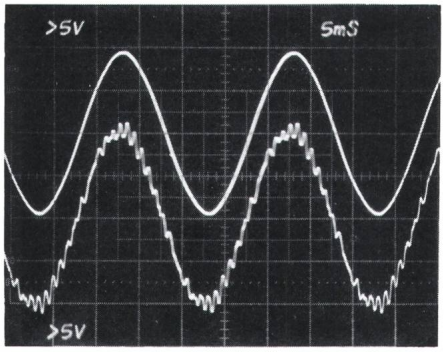
Die Eingangsimpedanz des Wechselrichters wird so geregelt, dass die Leistungsabgabe der Solarmodule ans Netz maximal wird [13]. Als Referenzgrösse dient für diesen Zweck die Leerlaufspannung eines Referenzmodules, das den gleichen Umweltbedingungen (Bestrahlung und Temperatur) wie das Kollektorfeld ausgesetzt ist. Die Arbeitsspannung des Kollektorfeldes wird proportional zur Leerlaufspannung des Referenzmodules eingestellt. Bei der Anlage TISO erlaubt diese simple Methode die Einhaltung des Punktes maximaler Leistung mit einer Genauigkeit von 2%.

Die Ein- und Ausschaltlogik des Wechselrichters wird ebenfalls vom Referenzmodul gesteuert. Die Überwachungselektronik wird bei Tagesanbruch, wenn die Spannung der Solargeneratoren 30% des Nennwertes erreicht, wieder aktiviert. Die Netzsynchronisation und Stromeinspeisung erfolgt dann, wenn 75% der Generatorennennspannung und gleichzeitig 7% der Nennleistung erreicht werden. Die letztere wird aus der Messung des Kurzschlussstromes des Referenzmodules ermittelt.

Während des Betriebes werden Ströme und Spannungen sowie die Netzsynchronisation dauernd überwacht. Der Wechselrichter schaltet bei fehlerhaften Arbeitszuständen sowie bei werkseitig abgetrenntem Netzabschnitt automatisch ab. Wenn die Leistungsabgabe der Solargeneratoren auf 2,5% des Nominalwertes sinkt, z.B. am Abend, wird der Inverter ausgeschaltet. Nach Sonnenuntergang wird die Leistungsstufe des Inverters vom Netz getrennt. Die Kontrollampen verbrauchen dann nur noch etwa 20 W.



5a



5b

Fig. 5 50-Hz-Ausgangsspannung im Leerlauf vor (5a) und nach der Filterung (5b), entsprechend V_2 und V_3 von Figur 4

3. Resultate und Erfahrungen

● *Solargeneratoren*

Der 10-kW-Solargenerator der TSIO-Anlage hat seit der Inbetriebnahme sehr zuverlässig und wartungsfrei gearbeitet. In den folgenden Abschnitten werden einige Daten und Beobachtungen über den aktuellen Zustand der Generatoren beschrieben.

● *Verhalten der Zellen*

Bei der optischen Kontrolle des Solargenerators wurden bei etwa 20% der Module Zellen mit Rissen beobachtet. Die Kontaktelektroden sind dennoch nicht beschädigt, obwohl einige Zellen in zwei Teile gebrochen sind. Der Wirkungsgrad des Kollektorfeldes wird durch diese Risse nicht beeinträchtigt.

● *Degradierung der Zellenabdeckung*

In den letzten 12 Monaten ist die hintere Oberfläche von rund der Hälfte aller Module fortlaufend vergilbt. Diese Verfärbung entsteht offensichtlich unterhalb der Zellen und scheint, im aktuellen Zustand, die Durchsichtigkeit der Zellenabdeckung nicht zu beeinträchtigen.

Bei 20% der Module wurde eine Diffusion des schwarzen Dichtungsmittels vom Rahmen ins Modul hinein festgestellt. Die Zellen selber werden vorläufig von diesem Kitt nicht berührt. Rund 22% der Module zeigen eine rötliche Verfärbung der Abdekkung vor den Kontaktelektroden der Zelle, die sich unmittelbar vor dem Klemmenkasten mit den elektrischen Anschlüssen befinden.

● *Elektrische Ausfälle*

Kein einziges Modul ist elektrisch ausgefallen. Das erlaubt, eine obere Grenze für elektrische Zellenausfälle von $3 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr festzusetzen. Dieser Wert entspricht recht gut dem Zielwert für hoch zuverlässige Module [9].

Bei den installierten Modulen (Arco Solar ASI 16-2300) scheinen die elektrischen Klemmen der Schwachpunkt zu sein. Im Klemmenkasten jedes Moduls sind die Plus- und Minus-Pole sicherheitshalber zweifach ausgeführt. Im Sommer 1985 musste bei einem Modul auf die zweite Ausführung des Plus-Poles zurückgegriffen werden. Die erste Klemme wies nämlich ein temperaturabhängiges Wackelkontaktverhalten auf.

● *Nennleistung*

6 Monate nach Inbetriebnahme der Anlage war die gemessene und auf Standardbedingungen (1000 W/m², AM 1,5, 25 °C) umgerechnete Leistung des photovoltaischen Kollektorfeldes 9,5 ±0,5 kW. Die arithmetische Summe der Modul-Nennleistung ist 10,6 kW.

Der auf die Nichtidentität der Module zurückzuführende Leistungsverlust wird auf 1–2% der Gesamtleistung

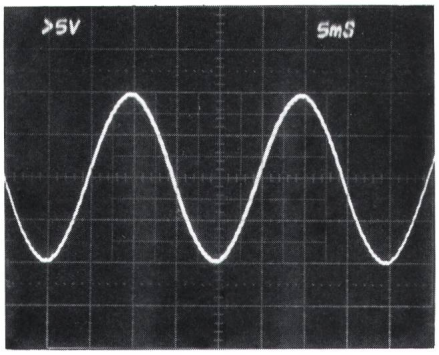


Fig. 6 Wechselrichter-Ausgangsspannung bei angekoppeltem Netz

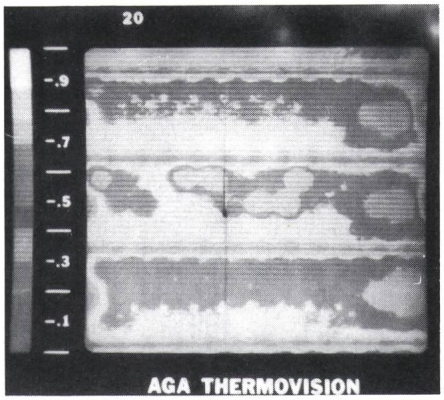


Fig. 7a Thermographie eines Teils des kurzgeschlossenen Kollektorfeldes mit «heissen Zellen»

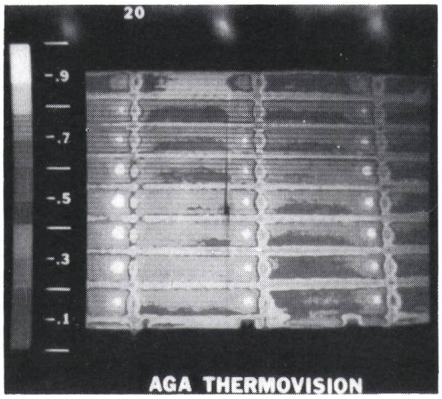


Fig. 7b Thermographie eines Teils des Kollektorfeldes mit warmen Zellen vor dem Anschlusskasten

geschätzt. Die ohmschen Verluste der Verdrahtung und der Sperrdioden betragen ebenfalls 1,5–2%.

Die Nennleistung der TISO-Anlage wurde von der Forschungsgruppe der EG (European Solar Test Installation, ESTI) von Ispra gemessen.

● *Leistungsverluste*

20 ausgewählte Module wurden im August 1982, September 1983 und Januar 1985 unter Standardbedingungen an der «European Solar Test Installation» in Ispra getestet. Die Wirkungsgradänderung innerhalb dieser Periode war kleiner als 1%.

● *Temperatur der Module*

Die Oberflächentemperatur der hinteren Seite der Module wird fortlaufend mit einem temperaturabhängigen Widerstand gemessen. Der höchste registrierte Wert ist 55 °C (19. Juli 1983). Die Lufttemperatur war zu jenem Zeitpunkt 33 °C. Im Winter liegt die Modultemperatur zwischen 10 und 40 °C.

Die Temperaturverteilung im Kollektorfeld wurde mit der thermographischen Apparatur der EG geprüft. Unter normalen Bedingungen wurden keine «heissen Zellen» beobachtet. Schliesst man die Stränge kurz, so werden einzelne Zellen wärmer (Fig. 7a). Der Anschlusskasten für die elektrischen Kontakte unterdrückt die konvektive Kühlung der Oberfläche, auf der er befestigt ist. Die entsprechende Zelle auf der Vorderseite ist deshalb immer die wärmste des Modules und begrenzt daher die Modulleistung (Fig. 7b).

● *Schnee*

Die Anlage wurde mehrmals, ohne negative Folgen, mit etwa 1 Meter Schnee bedeckt. Der Betrieb konnte, sobald die Strahlungsintensität den Minimalwert erreicht hatte, wieder aufgenommen werden.

Bei grossen Schneemengen bedingte die Position des Referenzmoduls (oberhalb der Leistungsmodule) einige Ein-/Aus-Zyklen des Wechselrichters.

● *Effekte von Teilbeschattungen*

Die Figuren 8a und 8b zeigen den Strom der 24 Modulstränge als Funktion der Tageszeit an zwei verschiedenen Tagen (19. September 1983 und 18. Januar 1984).

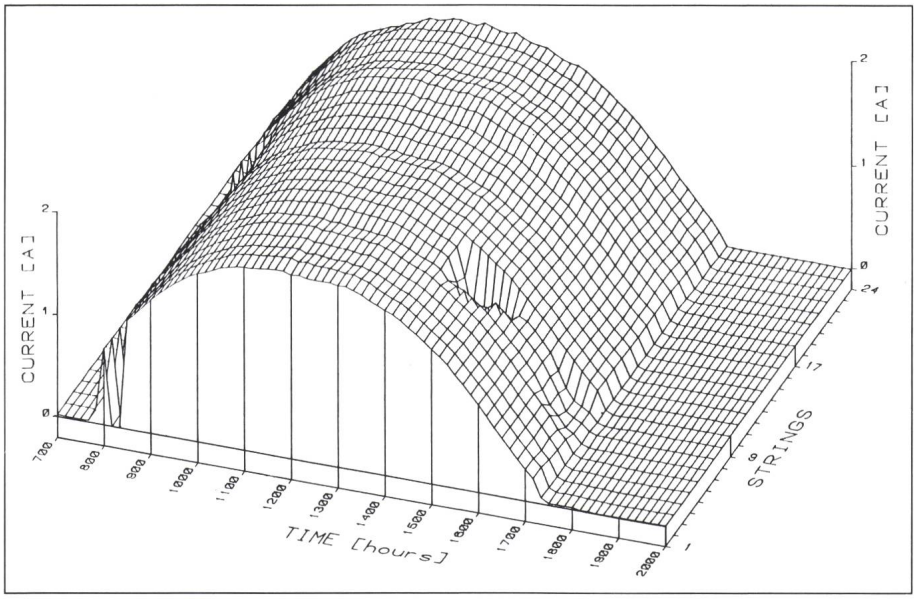


Fig. 8a Strom der 24 Modulstränge in Funktion der Tageszeit (19. 9. 1983)

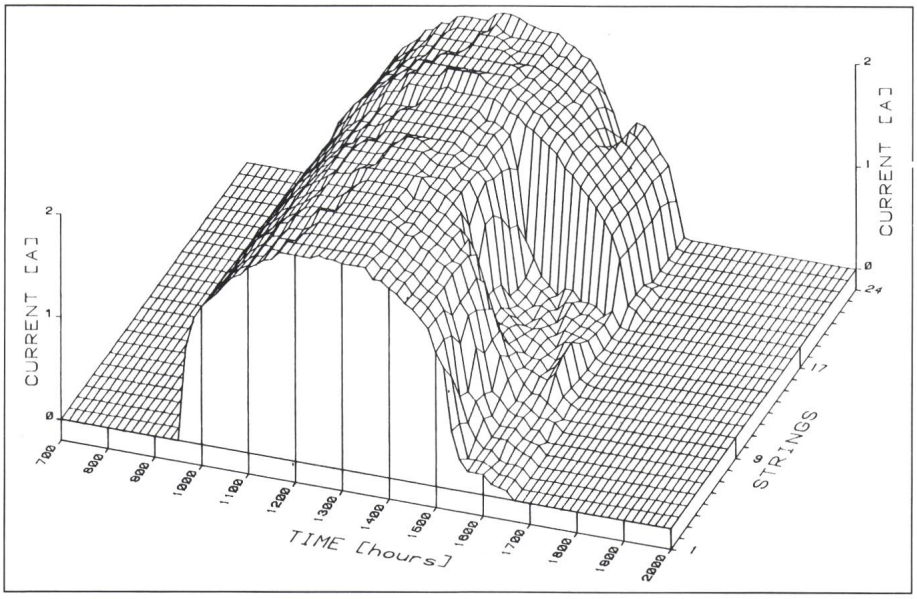


Fig. 8b Strom der 24 Modulstränge in Funktion der Tageszeit (18. 1. 1984)

Die Stromabnahme in einigen Strängen während einiger Stunden des Nachmittags ist auf die Teilbeschattung einiger Module zurückzuführen. Im Rahmen der nächsten Forschungsarbeiten wird ein Simulationsmodell vorbereitet, welches das elektrische Verhalten des Kollektorfeldes bei Teilbeschattungen (bzw. bei Modulausfällen) beschreiben soll. Es soll erlauben, diejenige optimale Konfiguration der Serien-/Parallelschaltung der Module zu berechnen, welche bei Teilbeschattung bzw. Teilausfall der Module zu minimalen Energieverlusten führt.

● *Wirkungsgrad des Kollektorfeldes*

Figur 9a zeigt den Wirkungsgrad des Kollektorfeldes (Ausgangsleistung dividiert durch die Strahlungsintensität auf die Kollektorebene) als Funktion der Strahlungsintensität auf die Kollektorebene. Die Messwerte von 5 Wintertagen sind mit Kreuzen dargestellt und diejenigen von 6 Sommertagen mit Punkten.

Wegen der tieferen Temperatur ist der Wirkungsgrad im Winter eindeutig höher als im Sommer.

Figur 9b zeigt ebenfalls den Wirkungsgrad des Kollektorfeldes in Funktion der Strahlungsintensität bei verschiedenen Temperaturen. Die Oberflächentemperatur der hinteren Modulseite wurde als Parameter gewählt, und anschliessend wurden den Messwerten die dargestellten Funktionen angepasst.

Bei einer Sonneneinstrahlung stärker 600 W/m² beträgt der mittlere Konversions-Wirkungsgrad des photovoltaischen Feldes ungefähr 8,5%.

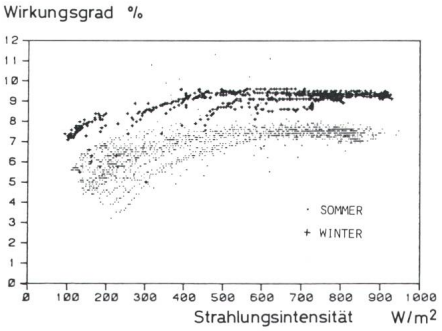


Fig. 9a Wirkungsgrad des Kollektorfeldes

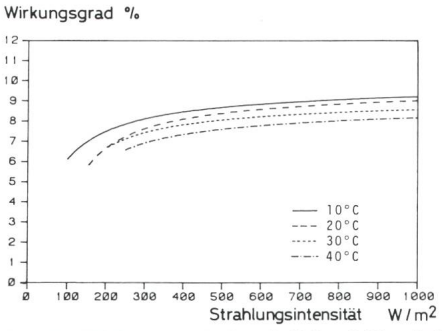
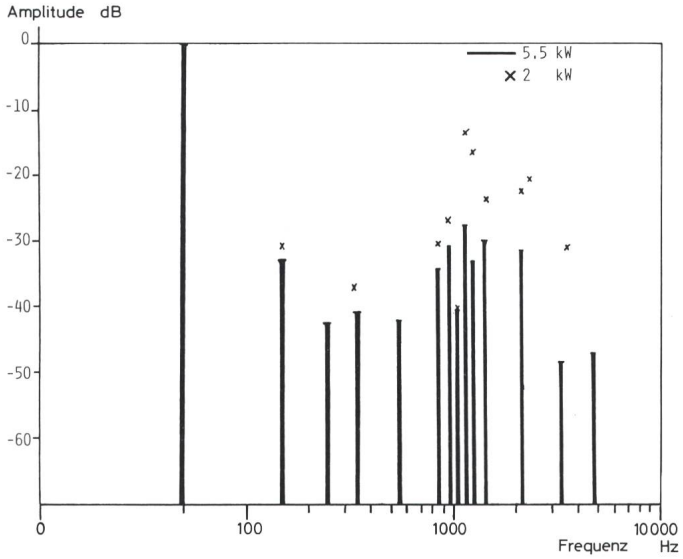


Fig. 9b Wirkungsgrad des Kollektorfeldes bei verschiedenen Temperaturen

Fig. 10 Amplitude der Stromoberwellen



3.2 Anlage- und Komponentenschutz

Seit Inbetriebnahme der Anlage (Frühling 1982) haben sich mehrere heftige Gewitter mit Blitzschlägen ereignet. In keinem Fall hat die Anlage Schaden erlitten.

Im Sommer 1985 wurden an zwei ausgewählten Stellen des Blitzableitsystems Blitzzähler (Stromstosszähler) eingebaut.

Die anfänglich zum Schutz der Verbindungsleiter der Solarmodule eingebauten gasgefüllten Überspannungsableiter haben sich als ungeeignet erwiesen: Einmal gezündet, konnten sie nicht mehr gelöscht werden. Diese Elemente wurden durch spannungsabhängige Widerstände (VDR) und Avalanche-Dioden erfolgreich ersetzt.

3.3 Der Wechselrichter

● *Oberwellen*

Figur 10 zeigt die Amplitude der ins Netz eingespiesenen Stromoberwellen bei 5,5 und 2 kW. Das Verhältnis der Oberwellen zur Leistung bei 50 Hz nimmt bei zunehmender Leistung des Wechselrichters ab.

Bei 60% der Nominalleistung sind die Stromoberwellen kleiner als 5% der Grundamplitude. Es sind keine von der Anlage verursachten Spannungsoberwellen messbar (kleiner als das Netzrauschen). Insbesondere bei den von den EW zur Signalübertragung verwendeten Frequenzen konnte kein Effekt der TISO-Anlage festgestellt werden. Bei 187 Hz (Fernkommando der AIL-Lugano) und bei 283 Hz (Fernkommando der AEC-Mendrisio) ist die Amplitude der Oberwellen kleiner als -71,3 dB.

● *Wirkungsgrad der DC-AC-Konversion*

Figur 11 zeigt den Wirkungsgrad des Wechselrichters als Funktion der Eingangsleistung. Jeder Punkt entspricht einer Messperiode von 2 Minuten. Die Zeichnung stellt die Daten dar, welche in 7 Tagen gemessen wurden.

Für Eingangsleistungen zwischen 40 und 100% der Nominalleistung ist der Konversionswirkungsgrad höher als 92%.

Für einen Tag mit mässigem Sonnenschein (etwa 5,3 kWh/m² auf der

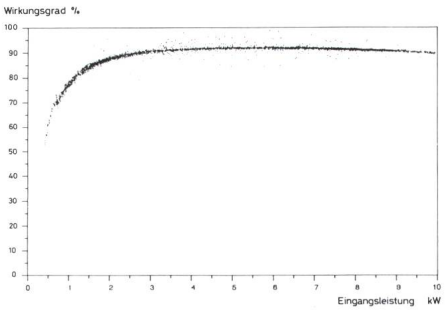


Fig. 11 Wirkungsgrad des Wechselrichters

Kollektorebene) ist der mittlere DC-AC-Konversionswirkungsgrad ungefähr 90%.

Über die ganze Arbeitszeit gemittelt, ist die mittlere ins Netz eingespiesene Leistung 3,6 kW und die tägliche Arbeitszeit 6,7 Stunden/Tag.

Figur 12a zeigt in % die Wahrscheinlichkeit, dass während der Messperiode die angegebene Leistung ins Netz eingespiesen wird (Häufigkeitsverteilung).

Figur 12b zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass während der Messperiode die ins Netz eingespiesene Leistung gleich oder grösser als der angegebene Wert ist (kumulierte Häufigkeit).

Der Einfluss des für den Winter optimierten Neigungswinkels des Kollektorfeldes (65°) ist auf den Figuren 12a und 12b eindeutig sichtbar. Die Ausgangsleistung ist im Winter am grössten.

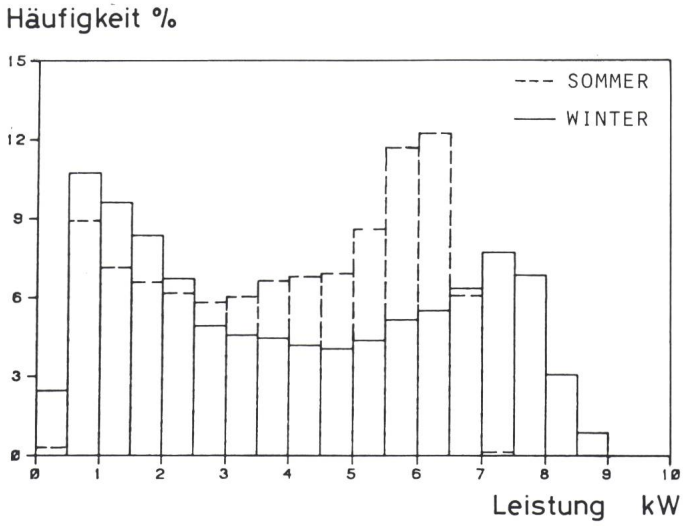


Fig. 12a
Häufigkeitsverteilung der Leistung am Wechselrichterausgang

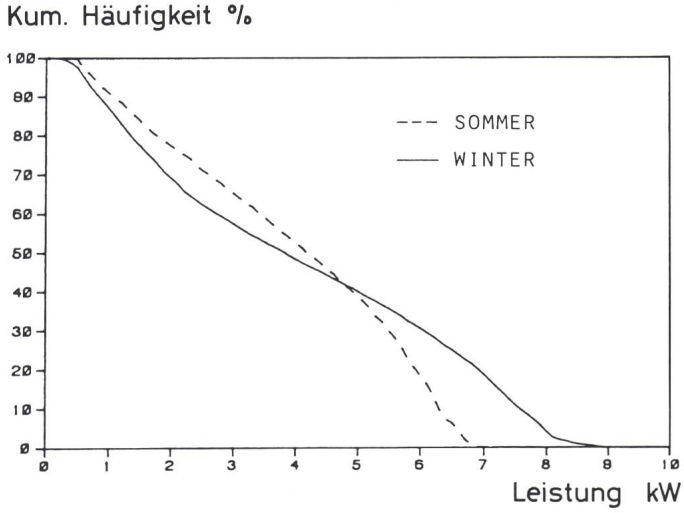


Fig. 12b
Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Leistung am Wechselrichterausgang

● *Betriebssicherheit*

Die Kontroll- und Sicherheitsfunktionen des Wechselrichters haben einwandfrei und völlig automatisch funktioniert. Die mittlere Arbeitsperiode ohne Ausfälle war 2500 Stunden. Drei kurze Ausfälle in den ersten drei Betriebsjahren waren auf eine schlecht ausgeführte Isolierung in der Leistungsbrücke, auf die Degradierung der (nicht vergoldeten) Kontakte der gedruckten Schaltungen und auf den zu hohen Leistungsverbrauch eines Widerstandes der Speisung des Wechselrichters zurückzuführen.

Vom November 1982 bis Ende Januar 1986 war der Wechselrichter während 6772 Stunden in Betrieb.

● *Optimierung des Leistungstransfers*

Die automatische Optimierung des Arbeitspunktes des photovoltaischen Generators arbeitete seit Inbetriebnahme auf 2% genau.

Da diese Optimierung mit Hilfe eines Referenzmodules erfolgt, muss dafür gesorgt werden, dass Generator und Modul unter genau gleichen Bedingungen arbeiten und gleich altern. Besonders die ungleiche Alterung von Referenzmodul (dauernd im Leerlauf) und der Generatoren (unter Last) zwingt dazu, den Proportionalitätsfaktor des Regelkreises periodisch zu überprüfen.

Dieses Problem wurde im zweiten Wechselrichter (3 kW) der Anlage TISO durch eine selbstanpassende Regelung (siehe z.B. [15], [16]) gelöst.

4. Energieproduktion

Seit Beginn der systematischen Datenerfassung am 8. November 1982 bis zum 28. Januar 1986 hat die TISO-Anlage 27 366 kWh ins öffentliche Netz eingespiesen. In dieser Periode war die Anlage während 92 Tagen wegen Forschungs- und Wartungsarbeiten ausgeschaltet. Die mittlere Energieproduktion der Jahre 1983–1984 beträgt 9130 kWh (1. Januar bis 31. Dezember).

Bezogen auf die gesamte Kollektorfläche entspricht dieser Wert 85 kWh/m² und bezogen auf die aktive Si-Fläche 116 kWh/m². Zu beachten ist, dass die Strahlungsintensität in dieser Periode etwa 16,5% tiefer war als der langzeitige Mittelwert.

Figur 13a zeigt für jeden Monat die mittlere und maximale tägliche Energieproduktion und Figur 13b die tägliche Betriebsdauer.

46,5% der Jahresenergie wird in der Winterperiode geliefert (1. Oktober bis 31. März). Ein wesentlicher Teil der Energie steht also in der Periode mit hoher Stromnachfrage zur Verfügung.

Den Figuren 8a und 8b kann auch das unterschiedliche Tagesprofil der Produktion im Sommer und im Winter für die gewählte Kollektorneigung entnommen werden.

5. Kosten der Anlage

Tabelle II zeigt die auf die Einheit der Nominalleistung bezogenen Kosten der TISO-Anlage. Im Vergleich zu anderen, für Anlagen ähnlicher Grösse publizierten Werten schneiden diese Kosten gut ab [10].

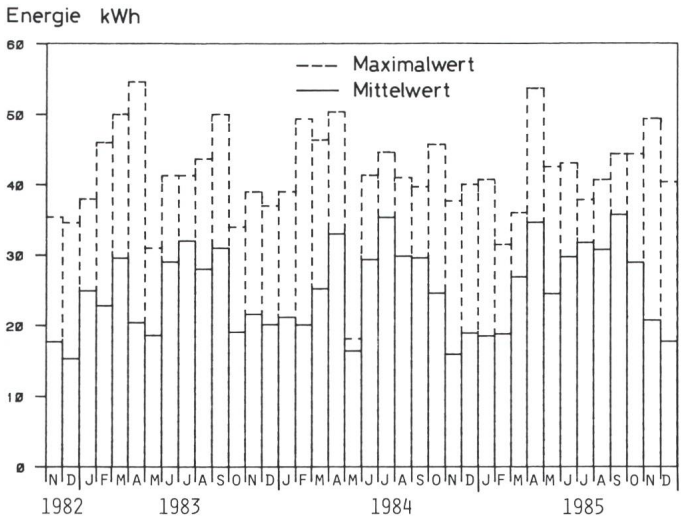


Fig. 13a
Mittlere und maximale tägliche Energieproduktion für jeden Monat

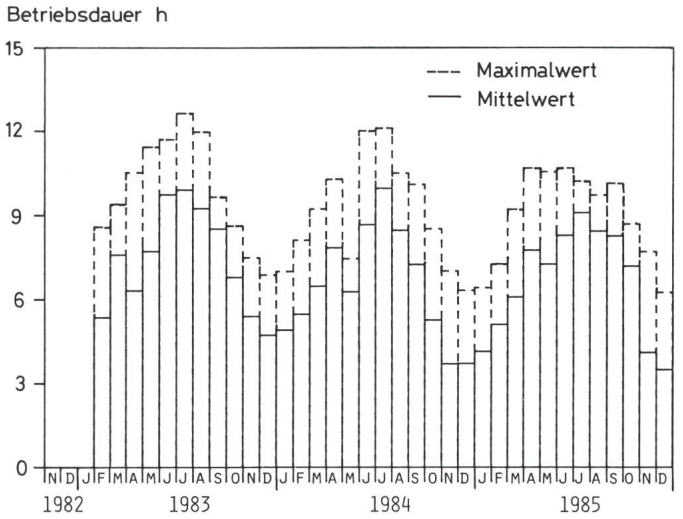


Fig. 13b
Mittlere und tägliche Betriebsdauer für jeden Monat

Kosten der Komponenten Tabelle II

	Fr./Wp
Module	21.–
Wechselrichter	3,4
Mechanische Struktur	1,4
Betonsockel	1,0
Verdrahtung der Module	0,3
Elektrische Kabel	0,3
Projektierung	0,5
Aufbau	0,3
Kontrollsystem	0,1
Blitzschutz	0,08
Versicherung	0,09
Total	28,5

6. Schlussbemerkungen

Die TISO-Anlage ist seit bald vier Jahren ans Stromnetz angeschlossen.

Der photovoltaische Generator arbeitete die ganze Zeit ohne Schwierigkeiten und bedurfte bis jetzt keinerlei Wartung. Der Wirkungsgradverlust ist kleiner als 1%. Die Zellenabdeckung zeigte nach zweieinhalb Jahren eine gewisse Verfärbung. Der Wechselrichter hat zuverlässig, vollständig automatisch und mit hohem Wirkungsgrad funktioniert.

Der Oberwellengehalt des Ausgangsstromes ist klein.

Die mittlere Arbeitsperiode ohne Ausfälle beträgt 2500 Stunden. Verglichen mit den Baukosten ähnlicher Anlagen schneidet die TISO-Anlage günstig ab.

Die mittlere jährliche Energieproduktion ist 9130 kWh. Die weiteren Forschungsarbeiten werden Informationen über das langfristige Verhalten, die Energieproduktion und die Zuverlässigkeit der Komponenten liefern.

Literatur

[1] *M. Camani* et al.: TISO 15, 15 kW Experimental Photovoltaic Solar Power Plant, Proc. of the Fourth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Stresa, May 1982.

[2] *P. Ceppi* et al.: Initial Performance of the Grid Connected Photovoltaic Plant TISO 15, Proc. of the IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Athens, May 1983.

[3] *P. Ceppi* et al.: Analysis of the First Year of Operation of the Photovoltaic Utility Interactive Plant TISO. Proc. of the Fifth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Athens, October 1983.

[4] *M. Camani* et al.: Integration of New Hybrid Flat Concentrating Solar Modules into the Experimental Photovoltaic Power Plant TISO. Proc. of the Fifth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Athens, October 1983.

[5] *M. Camani* und *P. Ceppi:* Erste Erfahrungen mit der experimentellen photovoltaischen Anlage TISO 15, 4. Symposium Forschung und Entwicklung in der Schweiz, EPF - Lausanne, Oktober 1983.

[6] *M. Camani* et al.: Performances of the grid connected photovoltaic plant TISO 15. Proc. of the Sixth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, London, April 1985.

[7] *M. Camani* et al.: Operational Characteristics of the grid connected photovoltaic Plant TISO. Proc. of the Mediterranean electrotechnical conference IEEE, Madrid, October 1985.

[8] *M. Camani* et al.: Die Netzgekoppelte Photovoltaische Anlage TISO 15: Resultate und Erfahrungen, 5. Symposium Forschung und Entwicklung in der Schweiz, EPF - Lausanne, Oktober 1985.

[9] *R.G. Ross:* Reliability and performance experience with flate-plate photovoltaic modules, Proc. of the Fourth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Stresa 1982.

[10] *E.L. Burgess* et al.: Subsystem engineering and development of grid-connected photovoltaic systems, Proc. of the Fourth EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Stresa 1982.

[11] *C. Gonzales* and *R. Wearer:* Circuit Design Considerations for Photovoltaic Modules and System, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1980.

[12] *A. Gupta* and *A.G. Milnes:* Effects of Shading and Defects in Solar Cell Arrays: a Simple Approach, 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1981.

[13] *G. Guekos* et al.: Energietransfer aus Solarzellen, Bulletin SEV 71(1980)13, 5. Juli, S. 665-672.

[14] *R.J. Pickrell* et al.: An Inverter / Controller Subsystem Optimized for Photovoltaic Application (von den Autoren, ohne Angabe der Druckquelle erhalten).

[15] *D.A. Fox* et al.: Peak Power Tracking Technique for Photovoltaic Arrays, IEEE PESC, 1979.

[16] *M.F. Schbecht:* A Line Interfaced Inverter with Active Control of the Output Current Waveform, IEEE, PESC, 1980.