

Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik-Anlagen in Entwicklungsländern

Es spricht vieles dafür, daß der notwendige Übergang zu einer solaren Zivilisation in der III. Welt eher vollzogen wird als in den Industriestaaten. Die Entwicklungsländer empfangen im allgemeinen mehr Sonnenenergie als die industrialisierte Welt, und die Sonnenenergie muß dort nicht mit ausgebauten Systemen zur Energieversorgung konkurrieren. Außerdem ist Sonnenenergie für die Bedürfnisse der Entwicklungsländer besonders gut geeignet. Die Verstädterung ist noch nicht so weit fortgeschritten – in Afrika z.B. leben 85 % der Menschen auf dem Lande – so daß zur Energieversorgung für die Masse der Menschen vor allem kleine dezentrale Einheiten benötigt werden, wie sie sich zur Nutzung der Sonnenenergie anbieten. Unter diesen Bedingungen kann Sonnenenergie die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit eher überschreiten als in den Industrieländern.

Besondere Hoffnungen werden auf die Photovoltaik gesetzt. Seit Mitte der 70er Jahre sind in der III. Welt einige Tausend Photovoltaik-Anlagen installiert worden. Sie werden eingesetzt zur Stromversorgung für so verschiedene Zwecke wie Übertragung und Empfang von Nachrichten, Antrieb von Wasserpumpen und Maschinen, Beleuchtung, Betrieb von Kühlschränken. Im Auftrag des Energieministeriums und der Behörde für Internationale Entwicklung (USAID) der USA haben die Sandia Laboratorien nun erstmals die verfügbaren Daten und Erfahrungen von 27000 Projekten in 45 Ländern zusammengetragen und systematisch ausgewertet. Diese Studie dürfte der umfassendste Überblick über den Einsatz der Photovoltaik in Entwicklungsländern sein. Die Untersuchung erstreckte sich auf technische, wirtschaftliche und organisatorische Fragen.

Technik

In technischer Hinsicht haben Photovoltaik-Anlagen ihre Bewährungsprobe bestanden. Die Störanfälligkeit ist gering. Ihre Verfügbarkeit ist inzwischen mindestens so hoch wie die von konventionellen Systemen. Wenn in PV-Anlagen Störungen auftraten, war dies selten auf den Solarteil zurückzuführen, sondern auf den Ausfall von Komponenten im konventionellen Teil. Am Anfang mangelte es noch an Erfahrung, den konventionellen Teil an die besonderen Bedingungen einer solaren schwankenden Stromversorgung anzupassen. Störungen traten auch dann auf, wenn die Komponenten den besonderen Umwelteinflüssen in Entwicklungsländern nicht gewachsen waren (hohe Temperaturen, hohe Luftfeuchtigkeit). Es dür-

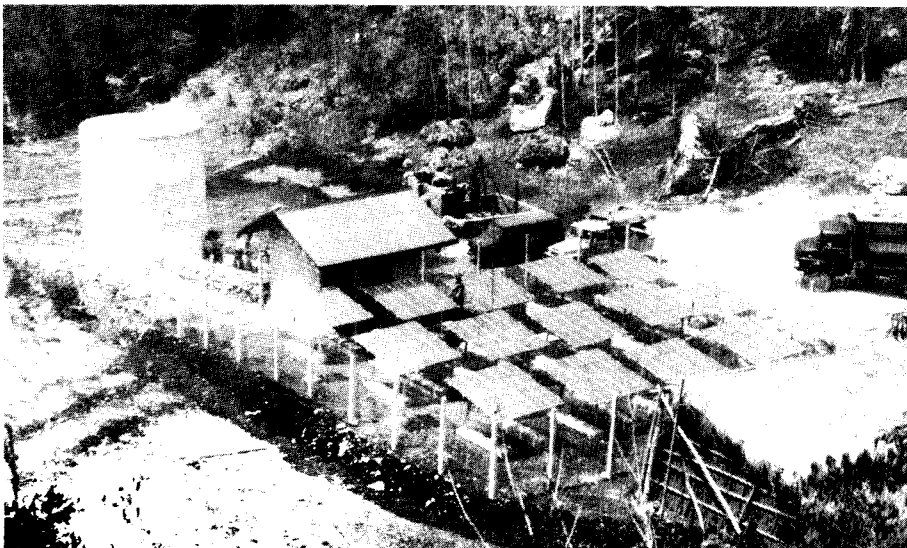
fen deshalb nur Komponenten eingesetzt werden, die für den Einsatz in Entwicklungsländern erprobt sind.

PV-Anlagen benötigen weniger Wartung und Reparatur als konventionelle Systeme. Beim Ausfall von Modulen oder elektronischen Komponenten können allerdings im allgemeinen keine Reparaturen vor Ort vorgenommen werden, sondern die defekten Teile müssen ausgetauscht werden. Die erfolgreiche Einführung der Photovoltaik in einem Entwicklungsland erfordert deshalb den Aufbau eines Wartungsdienstes, der vor allem die erforderlichen Ersatzteile bereithalten muß.

Die Nutzer müssen in die besonderen Betriebsbedingungen einer PV-Anlage eingewiesen werden. Es sollte nicht angestrebt werden, die Automatisierung der Anlagen möglichst weit zu treiben. Durch einfache Instrumentierung und Kontrollanzeigen, die verständlich in der lokalen Sprache beschriftet sein müssen, sollten die Nutzer in die Lage versetzt werden, fachgerecht mit der Anlage umzugehen. Die Nutzer müssen sich für das Funktionieren der Anlage verantwortlich fühlen.

Wirtschaftlichkeit

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Analyse der Wirtschaftlichkeit. Für fünf Anwendungsbereiche wurden PV-Anlagen im Inselbetrieb mit der gebräuchlichsten konventionellen Alternative verglichen: Dieselgeneratoren für Wasserpumpen, Maschinen wie Kornmühlen, Nachrichtenübermittlung und Petroleum für Absorberkühlschränke und Beleuchtung. Für beide Systeme wurden jeweils über 20 Jahre die jährlichen Kosten berechnet (Betriebs- und Kapitalkosten) und auf den Gegenwartswert diskontiert. Folgende Ansätze gingen in die Berechnungen ein: Modulkosten 8 $\$/W_p$ (Exportpreis aus Industrieland); wirtschaftliche Lebensdauer der Module 20 Jahre, von Regel- und Kontrolleinrichtungen 10 Jahre, von Batterien 5 Jahre; Inflationsrate 5 %. Die Parameter, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen, wurden in weiten Bereichen variiert. In der Tabelle sind die beiden Extremfälle, der ungünstigste und der günstigste Fall für den Einsatz von Solarzellen angegeben.



Energicenter in Indonesien zur Trinkwasserversorgung, auch in der Trockenzeit (Photo AEG)

Einsatzmöglichkeiten der Photovoltaik

Wasserpumpen

Das Modul ist mit einem Gleichstrommotor gekoppelt. Die Pumpe läuft bei einer bestimmten Bestrahlungsstärke selbsttätig an. Es ist keine Batterie vorgesehen, da es einfacher ist, das geförderte Wasser selbst zu speichern. Für PV-Anlage und Dieselgenerator wird eine Verfügbarkeit von 95 % angesetzt.

Die kleinsten Dieselgeneratoren haben eine Leistung von 3 kW. Sie kosten ca. 5500 \$. Generatoren mit Benzinmotor gibt es hinunter bis zu Leistungen von 300 W. Sie sind billiger als Dieselgeneratoren. Aber Benzin ist in Entwicklungsländern im Schnitt doppelt so teuer wie Diesel. Vor allem aber haben Benzingeneratoren mit 3000-5000 Betriebs-

Antrieb von Maschinen

Hier ist vor allem an den Antrieb von Maschinen zur Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte gedacht, wie z.B. Kornmühlen. Eine PV-Anlage, die einen Dieselgenerator von 3 kW Leistung ersetzen könnte, hätte folgende Charakteristika: Spitzenleistung 4 kW, Speicherkapazität 40 kWh. Sie kostet 40 000 \$. Bei diesem Beispiel ergibt sich kein eindeutiger Vorteil für eines der beiden Systeme. Unter 700 W_p ist die Photovoltaik aber in jedem Fall kostengünstiger, über 5,6 kW_p sind Dieselgeneratoren die wirtschaftlichere Alternative.

Nachrichtenübermittlung

Gegenwärtig werden jährlich nahezu 10 000 PV-Anlagen für die Stromversorgung von Einrichtungen der Nachrichtenübertragung installiert (Übertragungsstationen für Richtfunkstrecken, Radiotelefone, etc.). Dem Einsatz der Photovoltaik kommt entgegen, daß durch Fortschritte in der Elektronik die benötigten Leistungen für einen bestimmten Zweck bis auf 1/5 reduziert werden konnten. Untersucht wurde die Stromversorgung für die Übertragungsstation einer Richtfunkstrecke. Für diesen Zweck wird hohe Verfügbarkeit gefordert. Deshalb werden bei der konventionellen Alternative 2 Diesel eingesetzt, die zusammen mit einer Batterie, die einen Tag überbrücken kann, eine Verfügbarkeit des Systems von 99,9 % ermöglichen. Die PV-Anlage wird mit einer Batterie für 7 Tage ausgelegt und kommt damit auf eine gleich hohe Verfügbarkeit. Im Leistungsbereich bis 1,6 kW_p, entsprechend einem Energiebedarf bis zu 5 kWh/Tag, ist die PV-Anlage auch unter ungünstigen Rahmenbedingungen am wirtschaftlichsten, zwischen 1,6 kW_p und 7,5 kW_p (25 kWh/Tag) hängt es von den speziellen Rahmenbedingungen ab, ob ein Dieselgenerator oder eine PV-Anlage wirtschaftlicher ist. In Leistungsbereichen darüber ist der Dieselgenerator stets kostengünstiger.

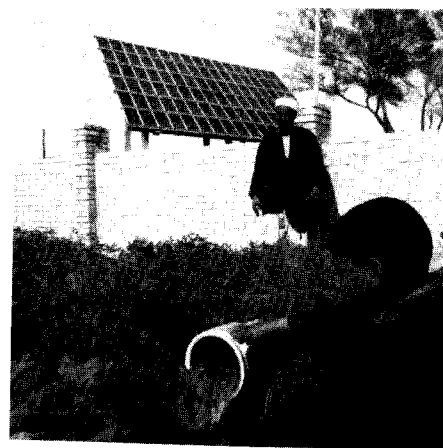


stunden eine wesentlich kürzere Lebensdauer als Dieselgeneratoren mit 20 000 Stunden, so daß sie letztlich unwirtschaftlicher sind als Dieselgeneratoren. Deshalb wurde die PV-Anlage nur mit Dieselgeneratoren verglichen.

Die Systemkosten (installiert) von Photovoltaik-Wasserpumpen liegen gegenwärtig zwischen 11 und 14 \$/W_p (W_p = Spitzenleistung). Im Leistungsbereich unter 1,1 kW_p, damit können z.B. 25 m³ Wasser pro Tag über eine Höhe von 25 m gefördert werden, ist eine PV-Anlage selbst unter ungünstigsten Bedingungen wirtschaftlicher als ein Dieselgenerator. Im Bereich zwischen 1,1 kW_p und 22 kW_p hängt es von den speziellen Umständen ab, welcher Antrieb günstiger ist, über 22 kW_p ist ein Dieselgenerator einer PV-Anlage überlegen.

oben:
Photovoltaik-Pumpstation in Ägypten

rechts:
Bewässerung eines Feldes (Photo AEG)



	ungünstigste	günstigste	
Einstrahlung	4	6	kWh/m ² Tag
Dieselskosten	0,25	0,75	\$/l
Petroleumkosten	0,50	1,00	\$/l
Zinsen für Kapital	20	5	%
Lebensdauer des Dieselgenerators	9	3	Jahre
Verfügbarkeit des Absorberkühlschranks	80	20	%

Variation der Parameter für Wirtschaftlichkeitsrechnung

Kühlung von Impfstoffen

Kühlung von Impfstoffen ist ein wesentlicher Bestandteil der Gesundheitsfürsorge in Entwicklungsländern. Eine ländliche Gesundheitsstation mit einem großen Einzugsbereich, die im Monat 150 Geburten zu betreuen hat, benötigt 4 Liter Kühlraum für Impfstoffe, um den Neugeborenen und ihren Müttern Impfschutz geben zu können. In abgelegenen Regionen ist selten Elektrizität vorhanden. Deshalb werden Absorberkühlschränke eingesetzt, die mit Petroleum oder Flaschengas betrieben werden. Die Versorgung mit den Treibstoffen ist häufig nicht gesichert. Es treten auch Betriebsprobleme auf, weil Petroleum in Entwicklungsländern oft von schlechter Qualität ist. Die Verfügbarkeit von Absorberkühlschränken liegt deshalb nur zwischen 20 % und 80 %.

Bis jetzt wurden in Entwicklungsländern 800 PV-Kühlschränke eingesetzt. Ihr entscheidender Vorteil gegenüber Absorberkühlschränken ist ihre höhere Verfügbarkeit, die jetzt bei 95 % – 99 % liegt. Der kleinste angebotene Kühlschrank hat ein Kühlvolumen von 24 l und kostet 4000 \$. AEG bietet einem Kühlschrank mit 90 l zu einem Preis von 5500 \$ an (Angaben der WHO – Welt-Gesundheits-Organisation). Eine besondere Anforderung an diese Kühlschränke ist, daß sie Eis herstellen können, um Impfstoffe von der Gesundheitsstation in die Umgebung transportieren zu können.

In einer rein betriebswirtschaftlichen Analyse gibt sich kein entscheidender Vorteil für PV-Kühlschränke. Dabei wird aber der Verlust von Impfstoffen wegen der geringen Verfügbarkeit von Absorberkühlschränken nur mit den Kosten der Impfstoffe bewertet. Berücksichtigt man allerdings, daß die Kosten durch Krankheiten und Todesfälle weit höher sind, wenn Impfstoffe im Bedarfsfall nicht vorhanden sind, ergibt sich ein eindeutiger Vorteil für PV-Kühlschränke.

Beleuchtung und Minimal-elektrifizierung

In ländlichen Gegenden werden für die Beleuchtung im Haus im allgemeinen Petroleumlampen verwendet. Sie sind wartungsintensiv und die Beleuchtungsqualität ist schlechter als bei elektrischem Licht. Eine typische Petroleumlampe hat eine Beleuchtungsstärke von 12 Lux, während eine 20-Watt-Fluoreszenzlampe auf 100 Lux kommt. Die kleinste PV-Anlage hat eine Leistung von 40 W_p mit einer Batterie von 0,3 kWh Speicherkapazität. Damit kann man eine 10-Watt Fluoreszenzlampe 12 Stunden am Tag betreiben. Die Investitionskosten betragen 420 \$. Mit einem größeren System von z.B. 130 W_p und einer Batterie mit einer Kapazität von 1 kWh kann man 10 Stunden täglich eine 10- und 20-Watt-Lampe und eine weitere elektrische Last von 12 W betreiben, wie z.B. ein Radio oder einen Ventilator. Ein solches PV-System kostet 1300 \$.

Obwohl die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, daß die PV-Anlagen günstiger abschneiden als die konventionellen Systeme (Petroleumlampe und aufladbare Batterien), verhindern die hohen Investitionskosten, daß sich eine Familie ein solches System anschafft. Günstige Finanzierungsmöglichkeiten könnten diese Hürde überwinden.

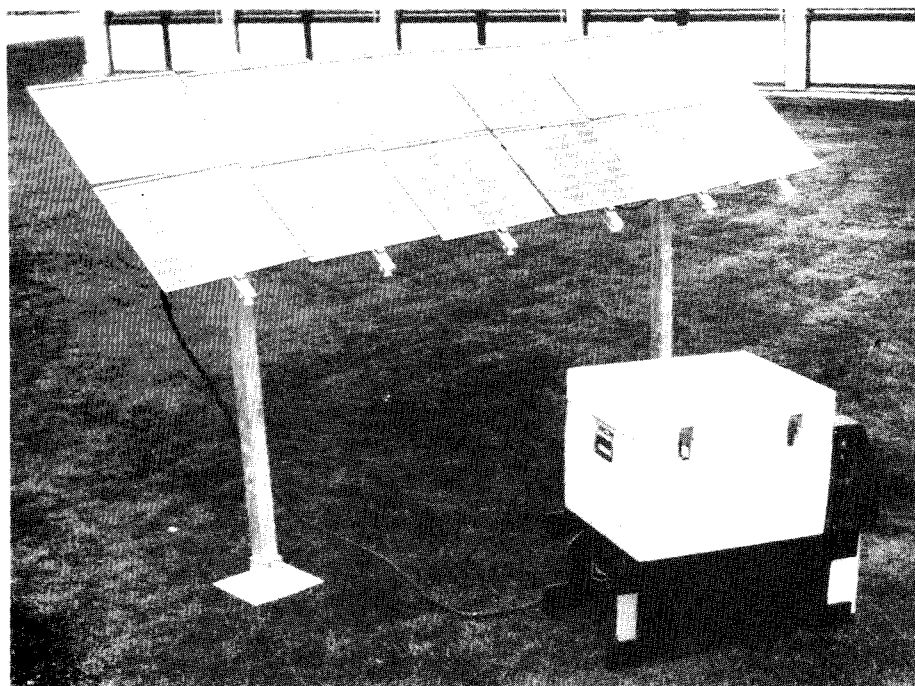
Die Alternative zur Inselektifizierung einzelner Haushalte wäre die Stromversorgung eines Dorfes von einer zentralen PV-Anlage aus. Dieses Vorgehen wird traditionell von Institutionen bevorzugt. Aber die Organisation eines solchen Projektes wirft erhebliche Probleme auf, weil die widerstreitenden Interessen eines ganzen Dorfes ausgeglichen werden müssen. Zur Abrechnung muß ein Verwaltungsapparat geschaffen werden. Auch in technischer Hinsicht ist ein solches System wesentlich komplizierter. Es müßte mit Wechselstrom betrieben werden, da die Übertragung von Gleichstrom zu verlustreich ist. Die notwendigen Umwandler machen das System wieder störanfälliger. Aus diesen Gründen werden zentrale PV-Anlagen zur Stromversorgung von Dörfern derzeit als nicht erfolgversprechend angesehen.

Bewertung

Die Analyse für die einzelnen Anwendungen hat gezeigt, daß im Leistungsbereich um 1 kW und darunter PV-Anlagen im Inselbetrieb wirtschaftlicher sind als die konventionellen Alternativen. Der entscheidende Vorteil der Photovoltaik ist ihre Modularität, die es erlaubt, bis in kleine Lastbereiche die Leistung des Energieerzeugungssystems genau anzupassen. Eine Untersuchung in Indien hat zum Beispiel gezeigt, daß Kleinbauern, die eine Fläche von 2 ha bewirtschaften, für Bewässerung, die ihnen eine zweite Ernte ermöglichen würde, nur eine PV-Wasserpumpe mit einer Spitzenleistung von 300 – 400 Watt benötigten. Eine Dieselpumpe ist entschieden zu groß für ihre Bedürfnisse. Bis jetzt kaufen sie Wasser von größeren Bauern zu. Wenn Schwierigkeiten auftreten, daß z.B. Dieseltreibstoff knapp ist, müssen ihre Interessen hinter denen des Pumpenbesitzers zurücktreten. Diese Unsicherheit der Wasserversorgung führt zu deutlich geringeren Erträgen pro Hektar /2/.

Die Photovoltaik könnte in Entwicklungsländern die Energiequelle des kleinen Mannes werden. Die hohen Anschaffungskosten, die sich nur über die hohe Lebensdauer amortisieren, verhindern aber, daß der kleine Mann diese Energiequelle erwerben kann. Trotz weiterer Kostensenkungen für Solarzellen werden Investitionskosten bis auf weiteres eine zu hohe Hürde für viele potentielle Anwender sein. Mit günstigen Finanzierungsmöglichkeiten ließe sich allerdings in den Bereichen, in denen die Photovoltaik eindeutig die wirtschaftlichere Alternative ist, ihre Anwendung erheblich ausweiten.

Hans Dieter Sauer



Mit Photovoltaik betriebene Kühlbox (Photo AEG)