Solartracker (Teil 2)

Betriebserfahrungen mit einer Solarpumpe in Niger

von Chr. Hempel

In der letzten Ausgabe dieser Zeitschrift begannen wir mit dem Abdruck einer dreiteiligen Folge über praktische Erfahrungen, welche der Autor mit Solartrackern bei seiner Arbeit in Afrika sammeln konnte. Am Beispiel der Solarpumpe von Mai Jirgui/Niger, die im September 1993 mit einem immobilen Solargenerator in Betrieb ging und im Dezember 1995 in eine mobile Anlage umgerüstet wurde, wurde zunächst anhand von Langzeitergebnissen der Beweis erbracht, daß Solartracker trotz unveränderter installierter Leistung deutliche Zuwachsraten bei der Wasserförderung garantieren.

Im folgenden geht es nun um die Ergebnisse im Tagesvergleich, bei denen einmal mehr die Überlegenheit des mobilen, dem Sonnenstand folgenden Solargenerator gegenüber den auf ein starres Gestell montierten Modulen gleicher Anzahl nachgewiesen wird. Ein dritter Teil des Berichtes wird sich abschließend mit den Vorteilen des Solartrackerbetriebs in einem Solar-Home-System beschäftigen.

Kurzzeitergebnisse des Systemvergleichs

Wenn von Kurzzeitergebnissen beim Vergleich eines starren und eines mobilen Generatorsystems die Rede ist, spielen Tages- und Monatsergebnisse der Globalstrahlung, der Fördermenge und der unterschiedlichen Energieaufnahme beider Systeme keine besondere Rolle. Vielmehr soll das kurzfristige Betriebsverhalten der Solarpumpe in Abhängigkeit von der momentanen Globalstrahlung und deren Auswirkung auf die Wasserförderung im Tagesverlauf untersucht werden. Aus den zahlreichen, von Sonnenaufgang bis -untergang erhobenen Daten lassen sich darüber hinaus Interdependenzen ableiten, Aussagen über Eckdaten beim Pumpenanlauf und -stillstand treffen und Wirkungsgrade für den Solargenerator, den Wechselrichter und das Gesamtsystem berechnen.

Detaillierte Informationen über den Testablauf würden den Rahmen der Arbeit ebenso sprengen, wie die tabellarische Wiedergabe der Meßdaten. An zwei aufeinanderfolgenden Tagen, dem 16. und 17. Mai 1996, wurden - von 6 bis 19 Uhr - in viertelstündigem Abstand Eckdaten erhoben.

Der Testzeitpunkt Mitte Mai wurde ganz bewußt gewählt, da es sich um eine überaus heiße Jahreszeit mit Temperaturen von bis zu 45 °C im Schatten handelt und die Sonne im Zenit der Anlage steht. Folgende Meßergebnisse dienten u.a. als Grundlage aller nachfolgenden graphischen Darstellungen:

- Uhrzeit der Datenerhebung;
- momentane und kumulierte Globalstrahlung, gemessen auf festen und mobilen Panels gleicher Neigung (15°);
- relative Luftfeuchtigkeit;
- Umgebungstemperatur, Temperatur unter und auf den Panels;
- Wasserzählerstand sowie momentane und stündliche Fördermenge;
- dynamisches Niveau der Bohrung;
- vom Solargenerator abgegebene Leistung (V/A/kW);
- vom Wechselrichter abgegebene Leistung (V/A/kW).

Aus diesen Daten wurden u.a. die aufgenommene Generatorleistung, die hydraulische Energie der Anlage, verschiedene Wirkungsgrade, auch der Einfluß der Umgebungs- auf die Paneltemperatur mit der daraus resultierenden Beeinflussung des Modulwirkungsgrades abgeleitet. Aus praktischer Sicht wichtigstes Testergebnis war indessen die graphisch in Abb. 11 skizzierte Auswirkung des Solartrackerbetriebs auf die Wasserförderung in den Wassertank in Abhängigkeit vom Tageszeitverlauf und im Vergleich zu der am zweiten Testtag auf Südposition immobilisierten Anlage mit unverändertem Anstellwinkel von 15°. Ein besonderes Interesse kam darüber hinaus der Frage zu, wann die Solarpumpe anläuft bzw. abschaltet, bei welcher Globalstrahlung dies geschieht und welche Grenzdaten der Generator- bzw. Wechselrichterleistung dabei eine Rolle spielen.

Strahlungsintensität und -energie im Tagesverlauf

An beiden Testtagen wurden mit 861 bzw. 891 W/m² in der Mittagszeit relativ hohe Strahlungsintensitäten gemessen. Dabei erfolgten die momentanen Auswertungen für ein starres System mit Hilfe eines Silizium-Strahlungsempfängers, der auf fixierter Halterung und 15° Neigung mit Südausrichtung auch die aufgenommene Strahlungsenergie im Tagesverlauf registrierte. Ein gleicher Meßfühler wurde auf dem beweglichen Solartracker verschattungsfrei montiert und lieferte Vergleichswerte.

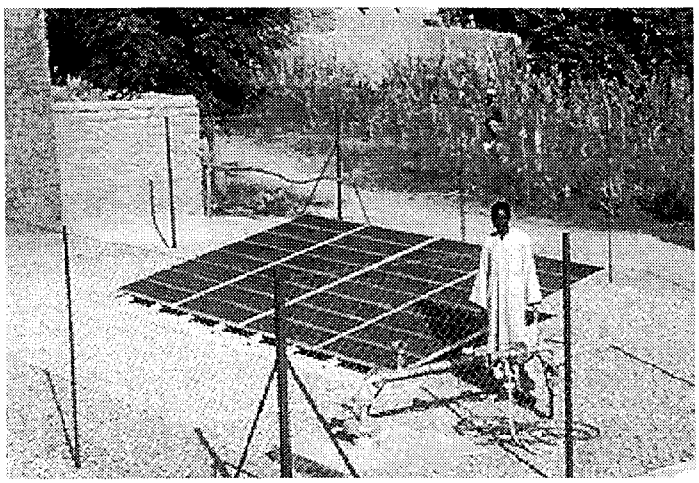

Abb. 1: Der Solargenerator in Mai Jirgui vor dem...

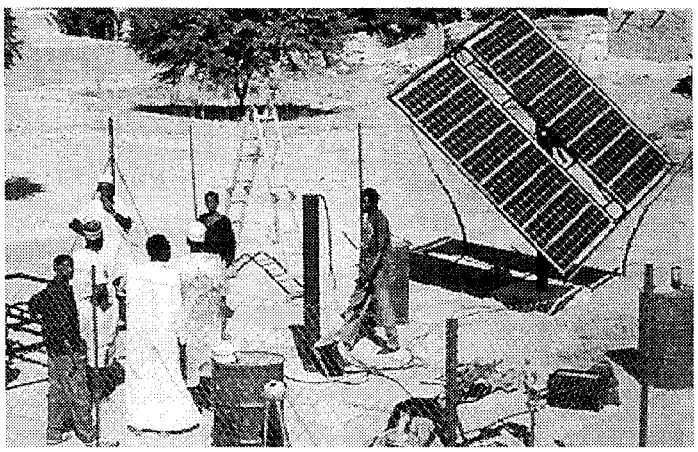

Abb. 2: ...und beim Umbau zum Solartrackersystem

Fotos: Chr. Hempel

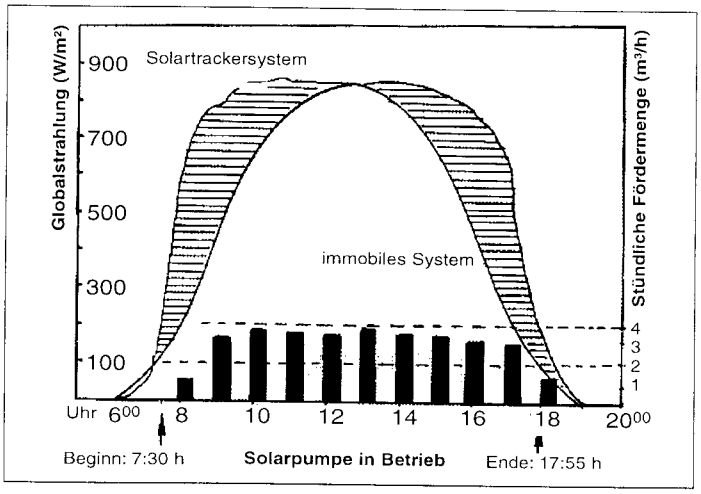

Abb. 3: Tagesgang (16. Mai 1996) der Strahlungsintensität (W/m²) auf Solartracker und - im Vergleich - fixierten Panels sowie Pumpleistung (m³/h)

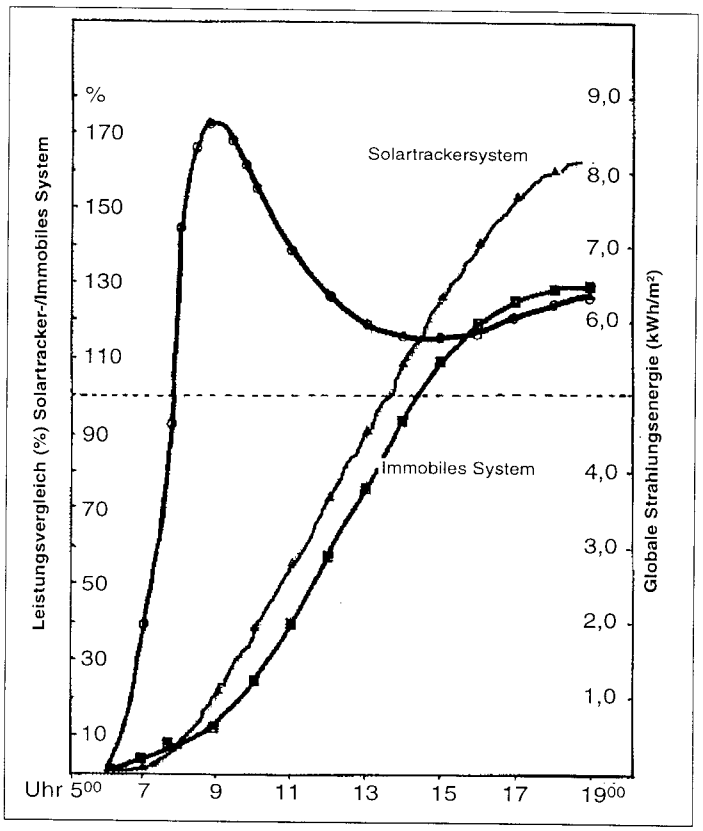

Abb. 4: Vergleich der Tagessummen der globalen Strahlungsenergie (kWh/m²) auf fixierten und mobilen Solarpanels - 16. Mai 1996

Der Tagesgang der Globalstrahlung auf beide Systeme ist Abb. 3 zu entnehmen. Abb. 4 vergleicht ergänzend die Tagessummen im Tagesverlauf und die sich ständig verändernden Relationen zwischen beiden Energieflüssen. Der Solartrackerbetrieb etwa erzielt ab 8 Uhr morgens bereits „Vorteile" gegenüber einem konventionellen System, die kontinuierlich auf über 70% anwachsen, um schließlich bei Sonnenuntergang noch rd. 25% zu erhalten. So nahm beispielsweise am ersten Testtag der Solartracker 8,07 kWh/m² auf, das starre System jedoch nur 6,44 kWh/m².

Temperaturen und Wirkungsgrade

Zwischen Strahlungsintensität, Umgebungstemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Paneloberflächentemperatur gibt es insofern klare Zusammenhänge, als mit wachsender Globalstrahlung nicht nur die relative Luftfeuchtigkeit abnimmt, sondern auch die Umgebungstemperatur bereits in den frühen Morgenstunden eines Maitages rasch ansteigt. Zwischen Umgebungs- und Paneltemperatur bauten sich an beiden Meßtagen schon bald Temperaturdifferenzen bis zu 16 °C auf. So erreichte die Paneloberflächentemperatur die 60 °C-Grenze zwischen 12.30 und 14.30 Uhr, was für den Standort aber keineswegs eine Rekordmarke darstellt. Auch konnte nachgewiesen werden, daß bereits schwache Windeinflüsse eine vorübergehende Absenkung der Paneloberflächentemperatur bewirken. Andererseits bestätigte sich aber auch, daß bei Strahlungsleistungen ab etwa 800 bis 850 W/m² und damit einhergehenden Oberflächentemperaturen von > 50 °C der Modulwirkungsgrad (aufgenommene Strahlungsenergie/abgegebene Generatorleistung) um ca. 10% abnahm - nämlich von 13,2% (8.00 Uhr) auf 11,9% (10.40 Uhr) -, um in den Nachmittagsstunden ab 16.00 Uhr den Ausgangswert wieder zu erreichen. In der stabilen Betriebsphase zwischen 8.00 und 16.00 Uhr wurde

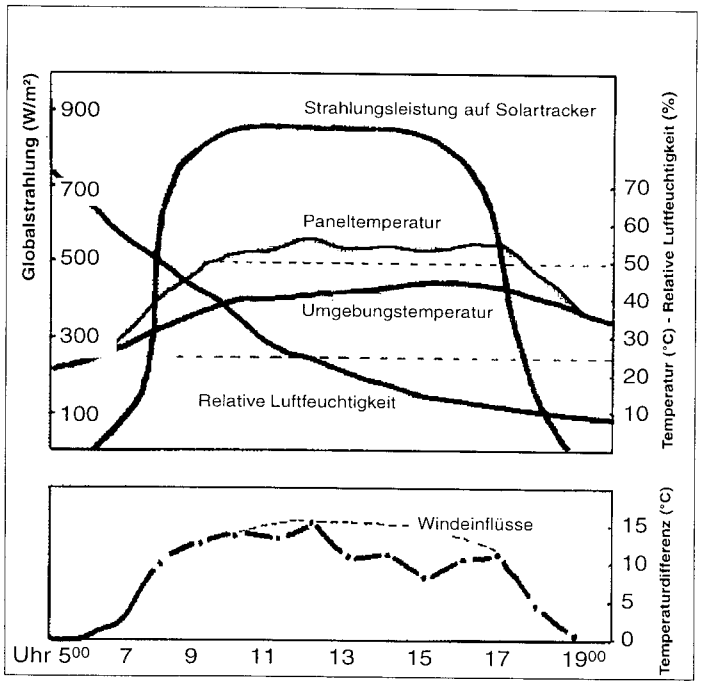

Abb. 5: Tagesverlauf (16. Mai 1996) von rel. Luftfeuchtigkeit (%), Umgebungs- und Oberflächentemperatur (°C) auf der Solartrackeranlage

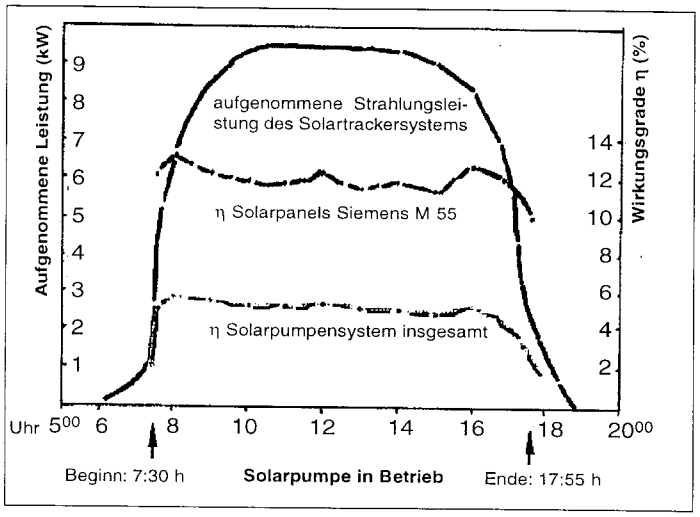

Abb. 6: Strahlungsleistung (kW) sowie Wirkungsgrade (%) der Solarpanels und des Gesamtsystems im Tagesverlauf (16. Mai 1996)

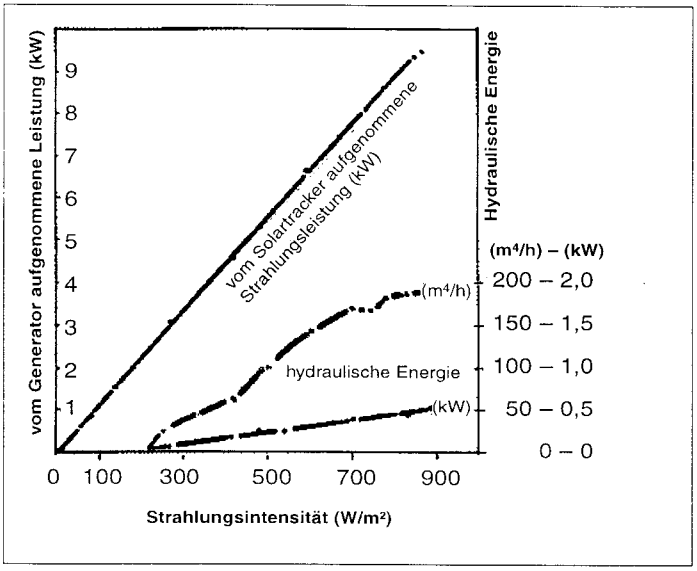

Abb. 7: Vom Solargenerator aufgenommene Energie (kW) sowie hydraulische Energie des Systems als Funktion der Strahlungsintensität (W/m²)

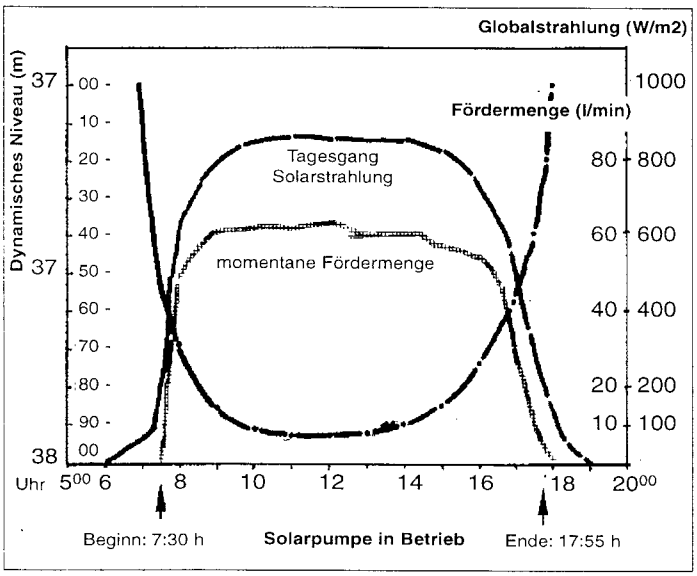

Abb. 8: Entwicklung des dyn. Niveaus (m) der Bohrung von Mai Jirgui in Abhängigkeit von Strahlungsintensität (W/m²) und Fördermenge (l/min)

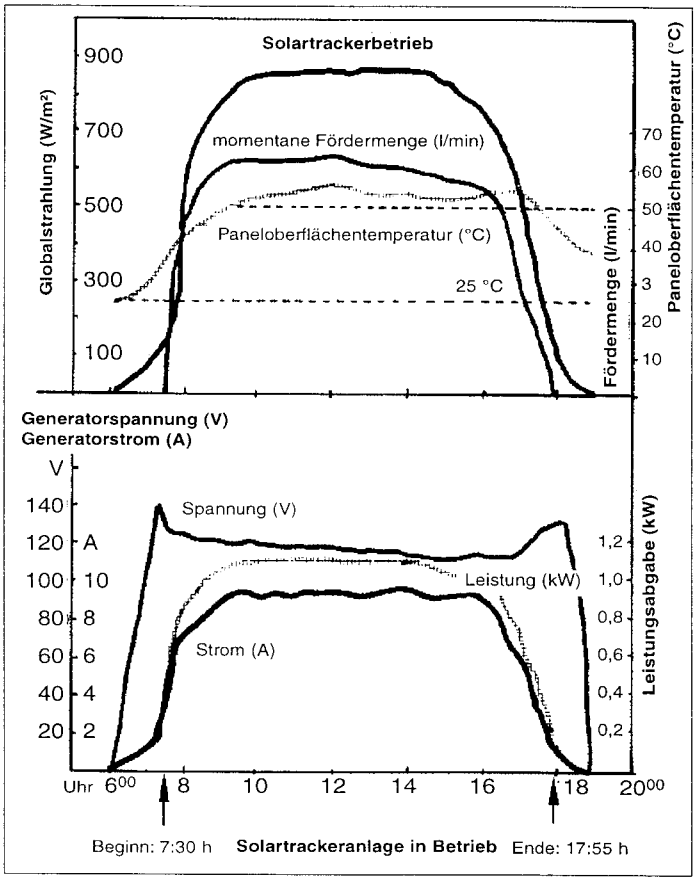

Abb. 9: Zusammenhänge zwischen Strahlungsintensität, Paneltemperatur, Fördermenge sowie Trackerleistung am 16. Mai 1996

beim Solartracker ein durchschnittlicher Modulwirkungsgrad von 12,1%, beim starren System am folgenden Tag ein ähnliches Durchschnittsergebnis (12,25%) erzielt.

Anlagenwirkungsgrade

Im Laufe der Versuchsreihe wurde auch der Frage nach dem Gesamtwirkungsgrad beider Systeme eine besondere Bedeutung beigemessen. Da sie über die gleiche Anzahl von Panels und somit über eine identische aktive Generatoroberfläche verfügten (11 m²), war auch die aufgenommene Strahlungsleistung (kW) beider Systeme bei gleicher augenblicklicher Strahlungsintensität (W/m²) identisch. Theoretisch hätte also der Gesamtwirkungsgrad beider Anlagen in Abhängigkeit von gleicher Globalstrahlung stets identisch sein müssen. Rechnerische Tagesdurchschnittswerte ergaben jedoch gewisse Unterschiede. So erreichte z.B. das Solartrackersystem im mobilen Zustand zwischen 8.00 und 16.40 Uhr durchschnittlich 5,33%, im fixierten Zustand aber nur 4,75%, bei relativ geringfügigen Schwankungen im Tagesverlauf.

Der Grund für diesen Unterschied resultiert - abgesehen von Verlusten im Wechselrichter und den Elektrokabeln - überwiegend aus solchen im hydraulischen Bereich, da der Tagesgang der Globalstrahlung an beiden Meßtagen nicht identisch war. Geringfügige Unterschiede im Tageswirkungsgrad beider Systeme ergaben sich auch beim Vergleich der von beiden Systemen aufgewendeten elektrischen Energie und der damit geförderten Wassermenge: am 16. Mai 1996 etwa nahm der mobile Solargenerator insgesamt 8,07 kWh/m² Strahlungsenergie auf, identisch mit einer Gesamtenergie von 88,8 kWh. Sie lag um rd. 21,4% höher als bei dem zu Vergleichszwecken vermessenen starren System. Gefördert wurden 33,7 m³, also 0,38 m³/kWh.

Die Vergleichsergebnisse des am 17. Mai 1996 vermessenen, unbeweglichen Generators kamen auf 6,64 kWh/m² oder 77,04 kWh Gesamtenergie für eine Fördermenge von 24,9 m³, also 0,32 m³/kWh und somit nur 84,2 % der entsprechenden Solartrackerkennzahl. Bei Berücksichtigung der in hydraulische Energie umgesetzten Globalstrahlung beider Systeme (Q x H = m⁴/Tag), nämlich 1.685 m⁴ bzw. 1.245 m⁴ lauteten die entsprechenden Kennziffern 19,0 m⁴/kWh bzw. 16,2 m⁴/kWh.

Fördermenge und dynamisches Niveau

Die Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades einer Solarpumpenanlage läßt sich nur bei Kenntnis der Globalstrahlung, der Generatoroberfläche, der geförderten Wassermenge und der manometrischen Förderhöhe ermitteln.

Nachdem Paneloberfläche und Gesamtförderhöhe des Solarpumpensystems feste Daten sind und die Globalstrahlung zur Testzeit regelmäßig vermessen wurde, interessieren nun noch

- die Auswirkung der Globalstrahlung auf die Entwicklung der Fördermenge bei Solartracker- bzw. immobilem Betrieb des Generators;

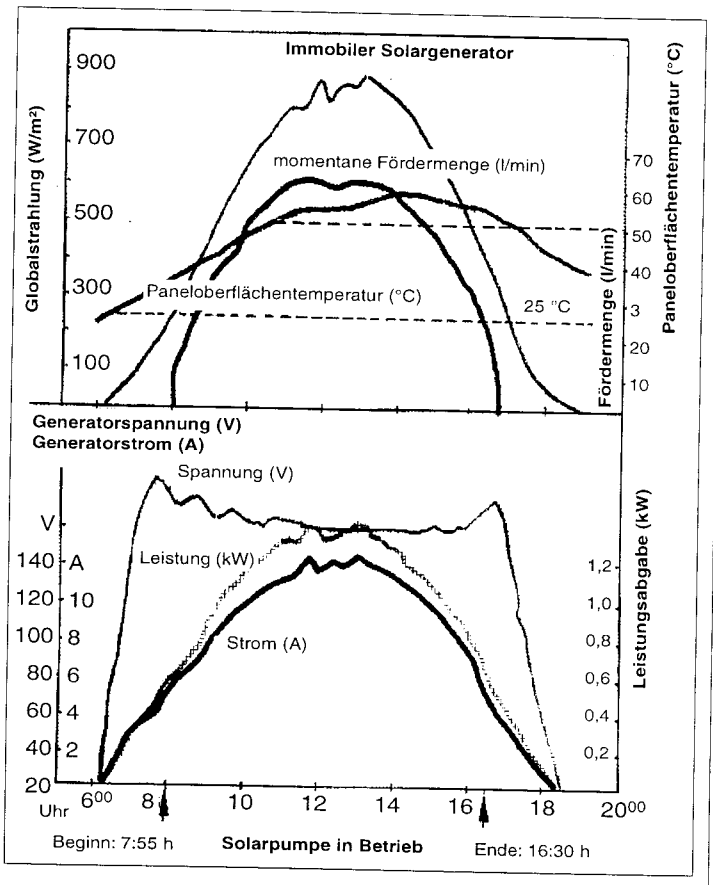

Abb. 10: Zusammenhänge zwischen Strahlungsintensität, Paneltemperatur, Fördermenge sowie der Generatorleistung am 17. Mai 1996

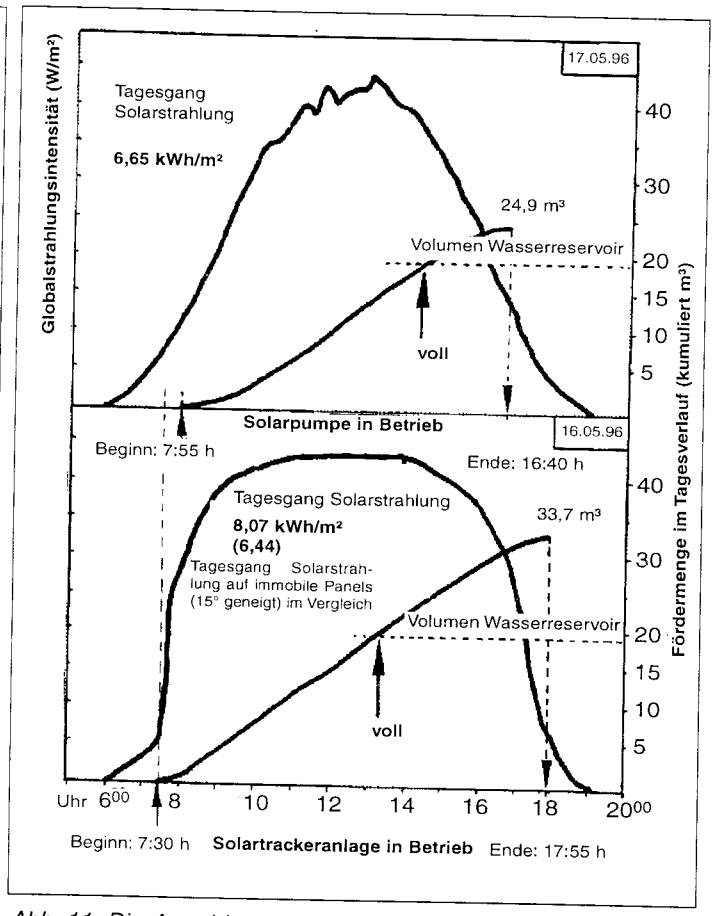

Abb. 11: Die Auswirkung des Solartrackerbetriebs auf die Wasserförderung - ein Systemvergleich

- die Auswirkung der Fördermenge auf die Entwicklung des dynamischen Niveaus der Bohrung;
- die Zusammenhänge zwischen der Strahlungsintensität und den elektrischen Meßwerten im Vergleich beider Systeme;
- die bei Pumpenanlauf und -stillstand gemessenen Eckdaten.

Abb. 8 bestätigt eindeutig, daß ein direkter Zusammenhang zwischen dem Tagesgang der Globalstrahlung und der momentanen Fördermenge besteht. Je intensiver die Strahlung, umso größer auch die augenblickliche Fördermenge der Pumpe. Der Vorteil der dem Sonnenstand folgenden Anlage im Vergleich zum starren System kommt in der Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen, großen Fördermenge von 9.00 bis 16.00 Uhr zum Ausdruck. Diesem Tatbestand tragen die Abb. 3, 8 und 9 Rechnung.

Wie sehr sich das Bild beim immobilisierten Solartracker ändert, zeigt auffällig Abb. 10. Hier nähert sich der Tagesgang der Globalstrahlung der Charakteristik einer logistischen Häufigkeitsverteilung mit kurzzeitigem Strahlungsmaximum in der Mittagszeit bei einer gleichartigen Entwicklung der jeweiligen momentanen Fördermenge.

Daß eine unter zunehmender Strahlungsintensität deutlich ansteigende Fördermenge das dynamische Niveau des Brunnens in Bewegung bringt, wurde bereits aus Abb. 4 (SE 6/96, Seite 32, Anlagenbeschreibung) deutlich. Die Ergebnisse des Pumpentests bewiesen, daß sich das dynamische Niveau der Bohrung auch bei 4 m³ stündlicher Fördermenge kurzfristig stabilisiert. Diese Feststellung bestätigte sich einmal mehr beim Testversuch: trotz raschen Anstiegs der Fördermenge auf rd. 60 l/min. unterschritt das dynamische Niveau niemals die 38 m-Marke, was einer Absenkung des Wasserspiegels um etwa 1 m entsprach.

Elektrische Meßwerte und Betriebszeiten

Im Rahmen der Meßreihen wurden ebenfalls die elektrischen Ströme und Spannungen am Solargenerator und am Wechselrichterausgang gemessen, um Aussagen über die Wirkungsgrade beider Komponenten zu ermöglichen. Während die Leerlaufspannung des Generators mit seinen 4 parallel geschalteten Modulfeldern kurzfristig nach Meßbeginn (7.00 Uhr) Spitzenwerte von 140 V erreichte und sich diesem Wert erst nach dem Abschalten der Anlage wieder näherte, traten die auf zunehmende Erwärmung der Paneloberfläche zurückzuführenden Spannungsverluste beim Solartracker bereits ab 8 Uhr morgens auf (Oberflächentemperatur 42,4 °C). Sie setzten sich kontinuierlich bis etwa 16 Uhr fort (Oberflächentemperatur 54,7 °C).

Hingegen zeigten die Strommessungen zunächst über zwei Stunden lang einen kontinuierlichen Anstieg auf 9 bis 9,5 A; ein Niveau, welches ziemlich konstant bis 16 Uhr anhielt und dies auch noch bei Globalstrahlungswerten bis 530 W/m².

Bei immobilem Generator waren am 17. Mai 1996 ebenfalls frühmorgens vor dem Anlaufen der Pumpe 140 V Spitzenspannung meßbar, die sich unter dem Einfluß der sich später erwärmenden Paneloberfläche erst zur Mittagszeit auf Werte um 117 V reduzierte. Im Gegensatz zum Solartracker wurden Spitzenströme von 9 bis 10 A hingegen erst ab 11 Uhr vormittags erzielt, bildeten sich jedoch bereits nach 2 Stunden kontinuierlich auf 5 A (16 Uhr) zurück und führten um 16.30 Uhr zum Pumpenstillstand, also fast 90 Minuten früher als beim Solartrackerbetrieb.

Mit max. 1,17 kW abgegebener Generatorleistung gegenüber 1,20 kW wiesen beide Systeme in etwa die gleichen Spitzenwerte im Tagesverlauf auf. Der im Vergleich zur Generatorausgangsspannung am Wechselrichter beobachtete Spannungsabfall betrug in der optimalen

Betriebszeit bis 13.30 Uhr etwa 30%, anschließend mit zunehmender Tendenz bis zu 50%. In beiden Fällen schwankte der Wirkungsgrad des Wechselrichters zwischen 95 und 90% im Tagesverlauf.

Entsprechend der von beiden Systemen an den Meßtagen aufgenommenen Solarstrahlung waren unterschiedliche Pumpenlaufzeiten zu beobachten. Im Falle des Solartrackersystems begann die Wasserförderung um 7.30 Uhr bei einer Globalstrahlung von 286 W/m², einer Generatorspannung von 137 V und einem Strom von 3,5 A. Am Wechselrichterausgang wurden 67,1 V und 4,57 A gemessen. Die Pumpe kam nach rd. 10 ¼ Stunden um 17.50 Uhr bei einer Globalstrahlung von 207 W/m² zum Stillstand. Die Strahlungsintensitäten bei starrer Meßfühlerposition betrugen zum Vergleichszeitpunkt nur 161 bzw. 88 W/m² und hätten damit jegliches Funktionieren der Anlage bereits verhindert. Am Wechselrichterausgang wurden bei Förderende 127,8 V und 1,61 A gemessen.

Im Falle der immobilisierten Solartrackeranlage begann die Wasserförderung am 17. Mai 1996 erst um 7.55 Uhr bei 247 W/m² Globalstrahlung und einer Generatorausgangsspannung von 140,1 V (1,92 A). Am Wechselrichterausgang wurden 55,1 V und 4,88 A gemessen. Zum Stillstand kam die Pumpe nach 8 ¾ Stunden um 16.40 Uhr bei einer Strahlungsintensität von 314 W/m², einer Generatorausgangsspannung von 135,9 V und einem Strom von 2,09 A. Am Wechselrichterausgang wurden zu diesem Zeitpunkt noch 53 V und 4,71 A gemessen.

Zusammenfassend bleibt also festzustellen, daß bei nahezu identischer Strahlungsintensität ein Solartracker-Pumpensystem

- rd. 25% mehr Energie aufnimmt,
- rd. 20% länger in Betrieb ist,
- ein 20 m³ Wasserreservoir etwa eine Stunde schneller/früher füllt,
- insgesamt bis zu 35% mehr Wasser im Tagesverlauf fördert

als dies von einem vergleichbaren Pumpensystem mit starrem Generator erbracht wird. Abb. 11 stellt diese wichtigen Testergebnisse abschließend nochmals zusammen.

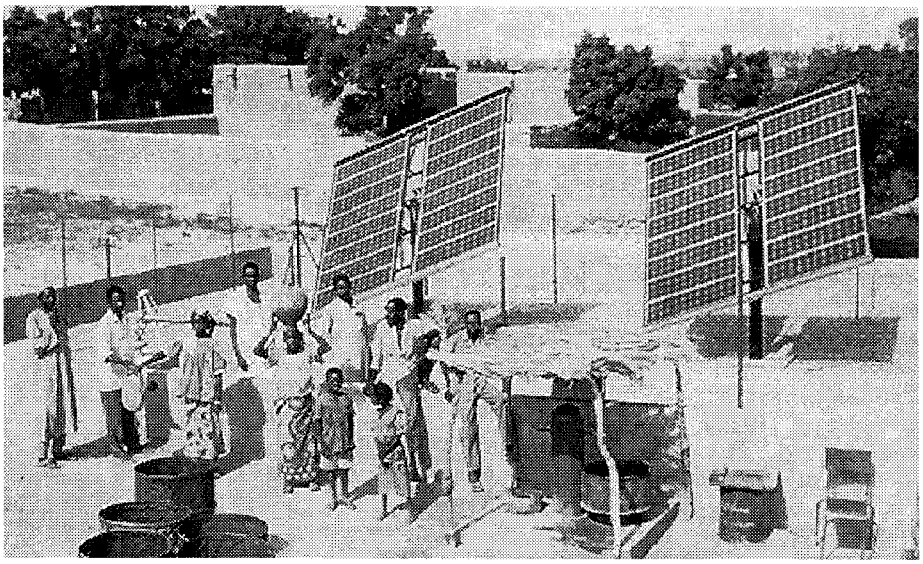

Abb. 12: Die Solartrackeranlage nach dem Umbau...

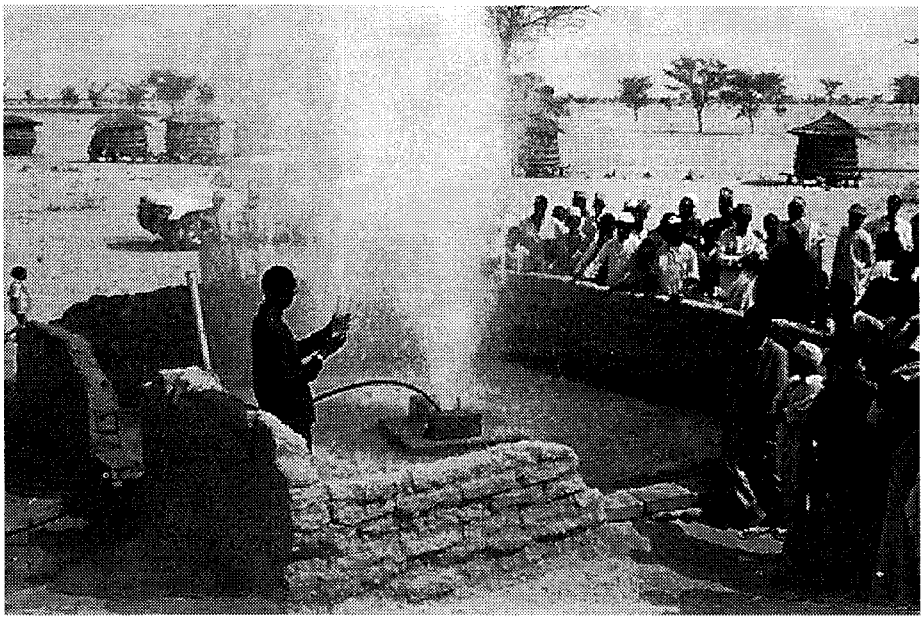

Abb. 13: ...läßt das Wasser noch höher spritzen!

Wann rechnet sich eine Solartrackeranlage?

Im Falle des unter Trinkwassermangel leidenden Dorfes Mai Jirgui hat der Aufbau eines mobilen Solargenerators unverzüglich für eine deutliche Verbesserung des Wasserangebots gesorgt. Dennoch sollte man wirtschaftliche Überlegungen nicht ganz außer acht lassen: die ursprünglich im Rahmen des Solarenergieprojektes finanzierte Solarpumpe war anfangs mit vier starren Modulgestellen zum Preis von jeweils 750,– DM ausgestattet. Der Austausch der Gestelle durch zwei Track Racks für jeweils 16 Siemens M55-Panels inklusive Haltemasten, Betonsockelguß und Umgestaltung der Anlage inklusive Schutzzaun belief sich auf rd. 12.000,– DM.

Wäre anfangs bereits die Wahl auf einen mobilen Solargenerator gefallen, so hätten etwa 9.000 bis 10.000,– DM gegenüber 3.000,– DM für die Modulgestelle aufgewendet werden müssen, also 6.000 bis 7.000,– DM mehr. Die Ermittlung der Pay-off-period für diesen Betrag basiert auf einem Wasserpreis von 5 FCFA (= 1,5 Pf/20 ltr.) oder 0,75 DM/m³. Die Betriebskosten der Pumpe von etwa 33% der Wassergeldeinnahmen (davon 20% für das Komitee) reduzieren den verfügbaren Nettobetrag auf 0,50 DM/m³. Dieser Betrag kann für die Alternativfinanzierung einer Mobilanlage angesetzt werden.

Steigt z.B. die Fördermenge von herkömmlichen 8.500 m³/Jahr mit Solartrackerbetrieb um 25% an, so können jährlich etwa 1.200,– DM zusätzlich erzielt werden, was einer Amortisierung der Zusatzkosten von 6.000 bis 7.000,– DM in etwa fünf Jahren entspricht.

Die Pay-off-period verringert sich auf ca. vier Jahre, wenn die mobile Anlage 35% mehr Wasser fördert als ein starres System. Es liegt auf der Hand, die Rückzahlungszeit für die zusätzlichen Ausgaben durch ein Anheben des Wasserpreises (beispielsweise Verdoppelung auf 1,50 DM/m³) nochmals deutlich zu reduzieren.

Dr. Christian Hempel ist Projektleiter des SEP Niger der GTZ.