

PV-Trinkwasserpumpen

Planungsgrundlagen und Auslegungsmethoden

von A. Hahn

In sonnenreichen Gebieten der Erde eröffnen photovoltaisch betriebene Pumpen (PVP) neue Möglichkeiten zur Trinkwasserversorgung. Insbesondere in entlegenen ländlichen Gebieten von Entwicklungsländern sind PVP-Anlagen eine technisch zuverlässige und ökonomisch konkurrenzfähige Alternative zu konventionellen Fördertechniken wie z.B. Dieselpumpen.

Die vergleichsweise hohen leistungsspezifischen Investitionskosten photovoltaischer Pumpsysteme erfordern eine sorgfältige Dimensionierung sämtlicher Systemkomponenten. Im Rahmen eines internationalen Test- und Demonstrationsprogramms von photovoltaisch betriebenen Pumpen (PVP-Programm) wurden die theoretischen Auslegungsergebnisse realisierter Anlagen mit den im Feld gemessenen Betriebsdaten verglichen. Auf den Felddaten basierend gibt der folgende Beitrag praxisorientierte Auslegungshinweise und stellt ein einfaches Verfahren zur Abschätzung der benötigten Solargeneratorleistung eines künftigen PVP-Systems vor. Die Ergebnisse vergleichender Untersuchungen rechnergestützter Auslegungsprogramme und die zur Planung einer PVP-Anlage notwendigen Standortdaten werden vorgestellt.

Trinkwasserversorgung in Entwicklungsländern

Die Versorgung mit sauberem Trinkwasser in ausreichender Menge ist ein Grundbedürfnis. Schätzungen der Weltbank zufolge haben jedoch ca. 1 Milliarde Menschen in entlegenen ländlichen Gebieten von Entwicklungsländern keinen Zugang zu hygienisch einwandfreiem Trinkwasser /1/.

Die Folgen einer unzureichenden Wasserversorgung für den Menschen sind mangelnde Hygiene, Krankheit, lange Wege zur Wasserbeschaffung und im Extremfall Abwanderung der Bevölkerung in die Ballungszentren. In vielen Entwicklungs- und Schwellenländern werden daher staatliche Programme durchgeführt mit dem Ziel die Trinkwasserversorgung im ländlichen Raum langfristig zu verbessern. Die flächendeckende Elektrifizierung ländlicher Gebiete ist in einem überschaubaren Zeitraum nicht finanzierbar. In Gebieten ohne Stromversorgung setzen die nationalen Wasserbehörden in der Regel Handpumpen und wartungsintensive Dieselpumpen ein, die wegen technischer Defekte oder Treibstoffmangel häufig außer Be-

trieb sind. Wegen ihres geringen Wartungsaufwandes und der Unabhängigkeit von der Treibstoffversorgung stellen photovoltaisch betriebene Pumpsysteme oft die einzige verlässliche Lösung zur Trinkwasserförderung dar. Die ressourcenschonende und umweltverträgliche PVP-Technologie wird aber mangels Erfahrung und Finanzierbarkeit bisher nur in geringem Umfang eingesetzt.

In Gebieten, in denen die photovoltaischen Pumpen in Konkurrenz zu Dieselpumpen treten, werden ihre vergleichsweise hohen Investitionskosten durch die eingesparten Treibstoffkosten und die reduzierten Wartungskosten kompensiert. Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von photovoltaisch betriebenen Pumpsystemen bestätigen, daß abhängig von länderspezifischen Gegebenheiten häufig Kostenvorteile von PVP-Systemen gegenüber Dieselpumpen bestehen /2/.

PVP-Programm

Mit dem Ziel, die Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Einsatz von PVP-Anlagen zu klären und die technische Reife dieser Technologie zu demonstrieren, wurden im Rahmen des PVP-Programms 90 ausgewählte Standorte in den Projektländern Argentinien, Brasilien, Indonesien, Jordanien, Philippinen, Tunesien und Simbabwe mit solarbetriebenen Pumpsystemen ausgerüstet.

Sozialwissenschaftliche Maßnahmen begleiten das Programm und geben gleichzeitig Auskunft über die Akzeptanz der neuen Technik in der Bevölkerung.

Um die Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der PVP-Systeme nachzuweisen und die Leistungsdaten der projektierten Anlagen unter realen Bedingungen zu prüfen, erfaßt ein begleitendes Meßprogramm alle notwendigen Daten.

Durchgeführt wird das PVP-Programm von der Deutschen Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH im Auftrag der finanzierenden Bundesministerien für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und Wirtschaftliche Zusammenarbeit und

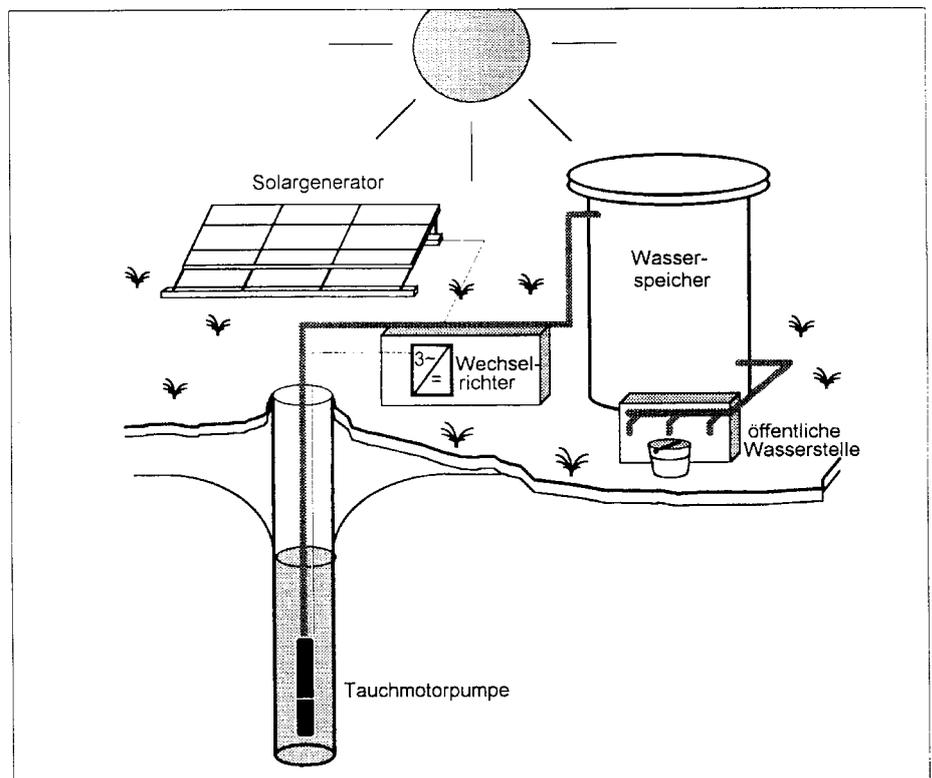


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau des PVP-Standardsystems

Entwicklung (BMZ). In Kooperation mit den nationalen Wasser- bzw. Energiebehörden der Projektländer, den Lieferfirmen Angewandte Solarenergie (ASE) GmbH und der Siemens Solar GmbH konnten PVP-Anlagen mit einer PV-Gesamtleistung von 180 kW_p realisiert werden.

Photovoltaische Pumpsysteme

Im Rahmen des PVP-Programms kommen vorwiegend sogenannte PVP-Standardsysteme zum Einsatz, die sich aus kommerziell gefertigten Anlagenkomponenten zusammensetzen. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Anlage.

Ein Solargenerator liefert die elektrische Energie für eine im Brunnen befindliche Tauchmotorpumpe, die mit einem wartungsarmen Asynchronmotor ausgerüstet ist. Die benötigte Drei-Phasenwechselspannung wird von einem Wechselrichter erzeugt, der gleichzeitig die Regelung des Systems übernimmt.

Der Einsatz von Gleichstrommotoren (DC-Motoren) für PV-Antriebe ist grundsätzlich möglich. Typbedingt besitzen Gleichstrommotoren einen höheren Wirkungsgrad als AC-Motoren gleicher Leistung. Bei der Verwendung von DC-Motoren besteht die Möglichkeit einer direkten Kopplung des Solargenerators mit der Motor/Pumpeneinheit. Zur Leistungsanpassung wird jedoch in fast allen Anwendungsfällen ein DC/DC-Wandler mit integrierten Sicherungseinrichtungen eingesetzt.

Zur Kommutierung konventioneller Gleichstrommotoren werden Kohlebürsten verwendet, die verschleifen und regelmäßig ausgetauscht werden müssen. Dieser Umstand setzt dem

Einsatz von DC-Pumpen mit Bürstenmotoren in ländlichen Gebieten von Entwicklungsländern Grenzen, da die benötigte Wartungsstruktur in der Regel nicht vorhanden ist.

Eine technologische Weiterentwicklung stellt der elektronisch kommutierte Gleichstrommotor dar. Aufgrund der geringeren Stückzahlen und der komplexen Steuerelektronik sind die äquivalenten Stückkosten dieses Motortyps jedoch noch relativ hoch /3/.

Mehrstufige Kreiselpumpen, die sich seit langem in der Praxis bewährt haben, werden in den Standardsystemen eingesetzt. Kreiselpumpen zeichnen sich durch ihr gutes Anlaufverhalten aus und sind für ein breites Anwendungsspektrum bezüglich Fördermenge und Förderhöhe verfügbar.

Die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Solarstrahlung müssen durch ein geeignetes Speichersystem ausgeglichen werden. Konventionelle Batteriespeicher sind in der Regel wartungsintensiv und haben eine auf wenige Jahre begrenzte Lebensdauer.

Die einfachste Möglichkeit ist die Speicherung des geförderten Wassers in Sammelbecken oder Wassertanks (Abb.2). Über ein Verteilungssystem wird das Wasser den Verbrauchern zugeführt und kann dann an Zapfstellen entnommen werden. Eine typische Standardanlage mittlerer Größe mit einer installierten Generatorleistung von 1,6 kW_p kann an sonnigen Tagen etwa 30 m³ Wasser aus 30 m Tiefe fördern. Diese Wassermenge reicht aus, um ein Dorf mit etwa 1200 Einwohnern mit einem Pro-Kopf-Verbrauch von 25 l/Tag mit Trinkwasser zu versorgen.

Das beschriebene Standardsystem hat sich als sehr zuverlässig erwiesen. Trotz der mit der Einführung einer neuen Technologie verbundenen und vorwiegend in der Anfangsphase aufgetretenen technischen Schwierigkeiten konnte für 90 untersuchte PVP-Anlagen eine mittlere Verfügbarkeit von $\approx 99\%$ ermittelt werden /4/. Durch die weitere Optimierung einiger Systemkomponenten und den Aufbau einer funktionsfähigen Servicestruktur und Ersatzteilverhaltung im Einsatzland läßt sich die hohe Verfügbarkeit der Standardsysteme noch weiter steigern. Neben der Verwendung optimierter Systemkomponenten ist eine an die Standortbedingungen angepaßte Dimensionierung eine entscheidende Voraussetzung für den zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb einer PVP-Anlage.

Auslegungsproblematik photovoltaischer Pumpsysteme

Die Auslegung eines photovoltaischen Pumpsystems gestaltet sich im Vergleich zu konventionellen netzgespeisten Pumpsystemen schwierig, da stochastische Schwankungen im Energieangebot des Energielieferanten „Sonne“ berücksichtigt werden müssen. Konventionelle Systeme werden in der Regel für einen definierten Arbeitspunkt bei annähernd konstanten Betriebsparametern dimensioniert. Der Arbeitspunkt einer PVP-Anlage korreliert mit der fluktuierenden Solarstrahlung, so daß die Systemkomponenten ständig wechselnden elektrischen, mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Kommerziell gefertigte Komponenten, die bei Nennbetrieb zufriedenstellend arbeiten, eignen sich daher nicht notwendigerweise auch für den Solarbetrieb und müssen entsprechend angepaßt werden.

Felderfahrungen haben gezeigt, daß das Betriebsverhalten eines photovoltaischen Pumpsystems in entscheidender Weise vom Konsumverhalten der Nutzer abhängig ist. Neben meteorologischen, hydrodynamischen und technischen Parametern müssen daher auch soziologische Zusammenhänge am künftigen PVP-Standort analysiert und bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden.

Planungsgrundlagen

Zur Projektierung eines photovoltaischen Pumpsystems ist umfangreiches Datenmaterial erforderlich. Die dem technischen Planer zur Verfügung stehenden Daten sind in vielen Fällen jedoch nur unvollständig oder von schlechter Qualität. Dieser Mangel an Daten kann teilweise dadurch ausgeglichen werden, daß



Abb. 2: Photovoltaisches Pumpsystem in El Quebracho, Argentinien mit 1,2 kW_p PV-Leistung
Fotos: Hahn

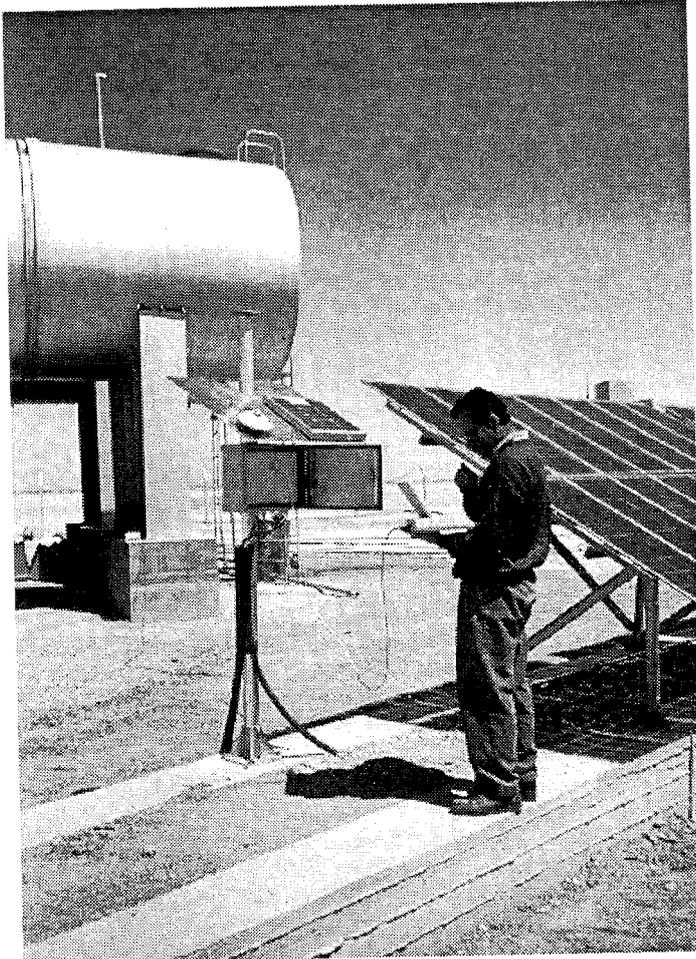


Abb. 3: Automatisches Meßdatenerfassungssystem MODAS 1220 in Jordanien



Abb. 4: Frauen sind in vielen Entwicklungsländern für die Trinkwasserversorgung verantwortlich

man auf normierte Auslegungskriterien (s.u.) zurückgreift oder Felderfahrungen bereits realisierter PVP-Anlagen in den Dimensionierungsprozeß einbezieht. Erfahrungswerte, auf die sich die Systemauslegung stützen könnte, liegen jedoch häufig nur qualitativ und in unstrukturierter Form vor.

Um dieses Informationsdefizit auszugleichen, wurden im Rahmen des PVP-Programms 48 PVP-Systeme mit automatischen Meßdatenerfassungssystemen ausgerüstet (Abb.3), die alle relevanten Betriebsdaten kontinuierlich aufnehmen /5/. Insgesamt werden 27 verschiedene Inverter/Pumpen-Kombinationen vermessen. Für ca. 20 Anlagen liegen bereits über 4 Jahre Betriebserfahrungen vor. Bei künftigen Auslegungen kann somit auf eine solide Datenbasis zurückgegriffen werden.

Der Zugriff auf normierte Auslegungskriterien wie den Standard-Solar-Day zur Simulation des Tagesgangs der Globalstrahlung /6/ oder die WHO-Richtlinien zur Berechnung des täglichen Wasserbedarfs /7/ erleichtern den Dimensionierungsprozeß. Der Nachteil dieser Verfahrensweise ist jedoch, daß die PVP-Systeme in der Regel nicht mit größtmöglicher Effizienz betrieben werden,

wenn spezifische Standortcharakteristika keine Berücksichtigung finden. Gerade jedoch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit von PVP-Systemen ist ein hoher Optimierungsgrad anzustreben. Sofern die Möglichkeit eines Standortbesuchs besteht, sollten die folgenden Daten im Feld erhoben werden:

- Wasserqualität
- Wasserbedarf des Versorgungsgebietes
- Geografische Besonderheiten (z.B. Tallage)
- Förderhöhe unter Berücksichtigung von Reibungsverlusten und des dynamischen Brunnenverhaltens.

Die Erhebung von meteorologischen und klimatischen Daten am Standort ist wünschenswert, aber in der Regel aus zeitlichen und ökonomischen Gründen nicht möglich. Häufig werden die Daten eines Referenzortes, für den entsprechende Meßwerte vorliegen und der in der Nähe des Einsatzgebietes liegt, zur Anlagenauslegung herangezogen. Die Anforderungen an das klimatologische und technische Datenmaterial sind in /8/ ausführlich beschrieben.

Ergänzend soll an dieser Stelle auf die Notwendigkeit hingewiesen werden, sozio-kulturelle Faktoren in den Planungsprozeß einzubeziehen. Be-

reits bei der Erhebung von Daten am künftigen PVP-Standort muß die Nutzergruppe involviert werden, um deren Gewohnheiten, Riten und Traditionen, welche den Umgang mit Wasser betreffen, zu berücksichtigen.

Die Aufklärung der Nutzergruppe über die Ziele des Projektes, die damit verbundenen Veränderungen und Verbesserungen sind entscheidend für den langfristigen Erfolg der Maßnahme. Insbesondere müssen Frauen intensiv in die Planung einbezogen werden, da sie in der Regel für Hygiene und Wasserversorgung verantwortlich sind (Abb.4). Die Planungsgrundlagen für einen gegebenen Standort sollten also technische und soziologische Aspekte beinhalten.

Auslegungsmethoden

Basierend auf den Ergebnissen der Datenerhebung vor Ort erfolgt die Dimensionierung der PVP-Anlage. Dem technischen Planer stehen dazu eine Reihe von Auslegungsmethoden unterschiedlicher Qualität zur Verfügung. Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht der üblichen Verfahren.

Abschätzung der PV-Generatorleistung im Feld

Um bereits bei der Standortauswahl die Kosten des geplanten PVP-

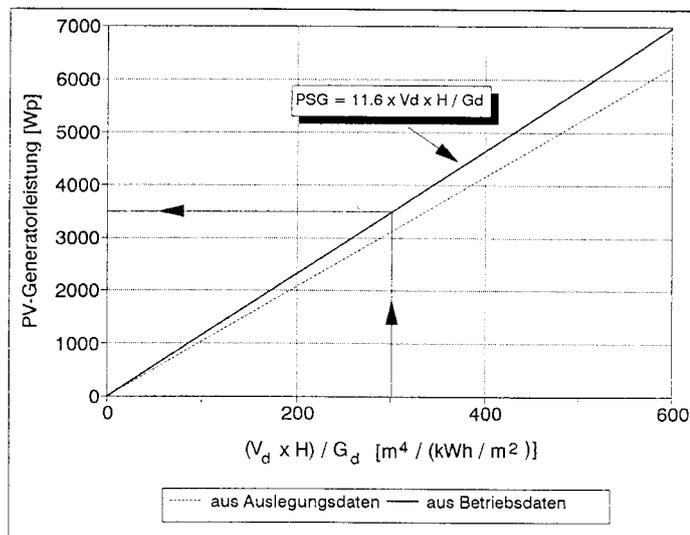


Abb. 5 (oben): PV-Generatorleistung als Funktion der Tagesfördermenge V_d , der Förderhöhe H und der Tagessumme der Globalstrahlung G_d

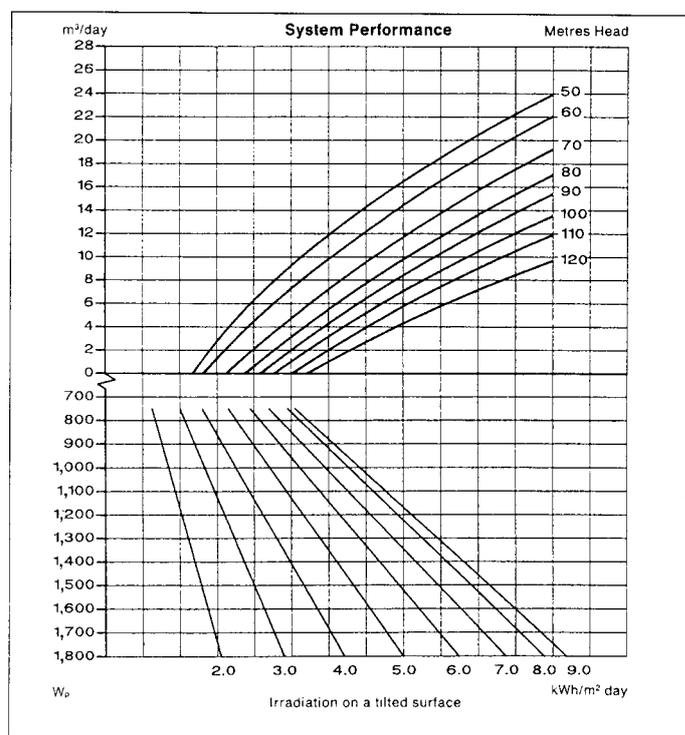


Abb. 6 (rechts): Grafische Dimensionierung eines photovoltaischen Pumpsystems mit GRUNDFOS-Projektierungsdiagramm (SP 2A-15)

Systems abschätzen zu können, ist es sinnvoll, unter Kenntnis der wesentlichen Dimensionierungsdaten eine grobe Abschätzung der Solar-generatorgröße vorzunehmen.

Hierzu werden der tägliche Wasserbedarf des Versorgungsgebietes V_d , die von der Pumpe zu überwindende Förderhöhe H sowie die mittlere Tagessumme der Globalstrahlung G_d für den Auslegungsmonat benötigt.

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der einzelnen Systemkomponenten läßt sich eine einfache mathematische Beziehung zur Berechnung der zu installierenden Solargeneratorleistung P_{SG} ableiten /9/. Unter Verwendung gemessener Betriebsdaten konnte dieses bereits in der Literatur bekannte Verfahren an die praktischen Verhältnisse angepaßt werden. Die Beziehung lautet:

$$P_{SG} = K \frac{H \cdot V_d}{\bar{G}_d} \quad \text{Gl. 1}$$

Um verschiedene Anlagen vergleichen zu können, die in der Regel für unterschiedliche Werte der Globalstrahlung ausgelegt wurden, ist es notwendig, das hydraulische Leistungsäquivalent ($H \cdot V_d$) auf die entsprechende Tagessumme der Globalstrahlung G_d zu beziehen. Trägt man nun die PV-Generatorleistung entsprechend Gleichung 1 als Funktion dieses Terms auf, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang, der sich durch eine Regressionsgerade mit der Steigung K beschreiben läßt.

Abb. 5 zeigt die Regressionsgeraden durch die theoretischen Auslegungspunkte ($K = 10,4$) und die auf den Auslegungstag bezogenen Be-

triebsdaten ($K = 11,6$). Im Abschnitt „Auslegungsergebnisse“ wird ein Verfahren vorgestellt, welches diesen direkten Vergleich von Theorie und Praxis ermöglicht. Wie das Ergebnis der vergleichenden Untersuchungen an 25 PVP-Anlagen zeigt, weichen die Betriebsdaten von den theoretischen Erwartungen ab. Dies wird durch die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsfunktionen deutlich. Mit der Funktion

$$P_{SG} = 11,6 \frac{H \cdot V_d}{\bar{G}_d} \quad \text{Gl. 2}$$

läßt sich die realistische Solargeneratorleistung abschätzen, die notwendig ist, um die gewünschte Tagesfördermenge bei vorgegebener Förderhöhe und täglicher Globalstrahlung zu liefern. Gemäß Gleichung 2 ist ein PV-Generator mit einer installierten Leistung von $3,5 \text{ kW}_p$ erforderlich, wenn pro Tag 30 m^3 Wasser bei einer Förderhöhe von 50 m und einer Tagessumme der Globalstrahlung von $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ gefördert werden sollen (vergl. Abb.5).

Legt man die Funktion entsprechend den Auslegungsdaten der Hersteller zu Grunde, so würde ein Solargenerator mit einer PV-Leistung von ca. $3,1 \text{ kW}_p$ installiert. Die Felderfahrungen zeigen jedoch, daß ein Solargenerator dieser Größe nicht den Leistungsanforderungen in der Praxis entsprechen würde.

Dem Planer steht mit der Gleichung 2 ein Instrument zur Verfügung, bereits bei der Standortauswahl im Feld die Größe des Solargenerators und damit die Kosten der geplanten Anlage in 1. Näherung abzuschätzen.

Grafische Dimensionierung

Zur Vereinfachung der Auslegungsmethodik bieten verschiedene PVP-Lieferanten produktspezifische Projektierungsdiagramme an, die eine schnelle und einfache Anlagendimensionierung ermöglichen (Abb.6). Eine exakt an die Standortbedingungen angepaßte Auslegung ist mit Hilfe solcher Diagramme jedoch nicht möglich, da tageszeitlich variierende Temperatur-, Wind- und Einstrahlungsverhältnisse unberücksichtigt bleiben. Der Einfluß dieser Parametervariation auf das Auslegungsergebnis wird zur Zeit untersucht.

Besser sind Anlagenauslegungen, die die standortspezifische Systemdynamik im Tagesverlauf berücksichtigen (Abb.7). Unter Verwendung von berechneten und gemessenen Systemkennlinien läßt sich auf diese Weise die zu erwartende Tagesfördermenge mit guter Genauigkeit bestimmen. Diese Verfahren sind jedoch zu einem Großteil Handarbeit und damit sehr zeitintensiv.

Dimensionierungsprogramme

Rechnergestützte Systemsimulationen erleichtern den aufwendigen Dimensionierungsprozeß. Das Spektrum der verfügbaren Software reicht von einfachen Demonstrationsprogrammen bis hin zu frei gestaltbaren Programmen mit hoher Flexibilität. Die Qualität und Anwendbarkeit eines Auslegungsprogramms hängt davon ab, wie gut die Simulationsergebnisse mit der Realität übereinstimmen. Im Rahmen des PVP-Programms wurden die Auslegungsergebnisse ausgewählter Computerprogramme gegenübergestellt und

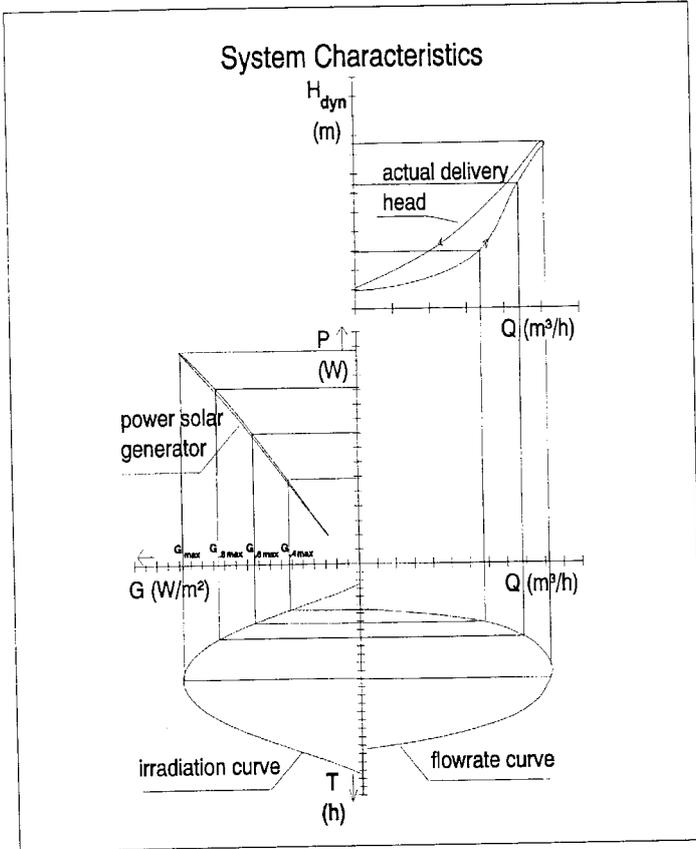


Abb. 7: Ermittlung der Tagesfördermenge unter Berücksichtigung der Förderhöhdynamik (Siemens Solar GmbH)

mit im Feld gemessenen Daten verglichen /10/. Gute Übereinstimmungen zwischen Rechnersimulation und realen Betriebsdaten wurden mit dem Simulations- und Auslegungsprogramm DASTPVPS der Universität der Bundeswehr München erreicht.

Dem technischen Planer steht damit ein geeignetes Instrument zur Anlagendimensionierung und zur Überprüfung des Leistungsverhaltens eines PVP-Systems zur Verfügung.

Eine Vielzahl der im Rahmen des PVP-Programms installierten Anlagen wurden nach betriebsinternen Methoden der jeweiligen Lieferfirmen ausgelegt. Die Ergebnisse der Auslegungsrechnungen und die möglichen Ursachen für Abweichungen von Praxis und theoretischen Erwartungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

Auslegungsergebnisse

Mit dem Ziel, die Auslegungsmethodik zu verbessern und mögliche Optimierungspotentiale aufzuzeigen, wurden die theoretischen Auslegungsergebnisse realisierter Anlagen mit den im Feld gemessenen Betriebsdaten verglichen. Untersucht wurden 25 verschiedene PVP-Systeme, die mit automatischen Meßdatenerfassungssystemen ausgerüstet sind. Um einen direkten Vergleich von Theorie und Praxis zu ermöglichen, mußten die gemessenen Betriebsdaten zunächst auf den Ausle-

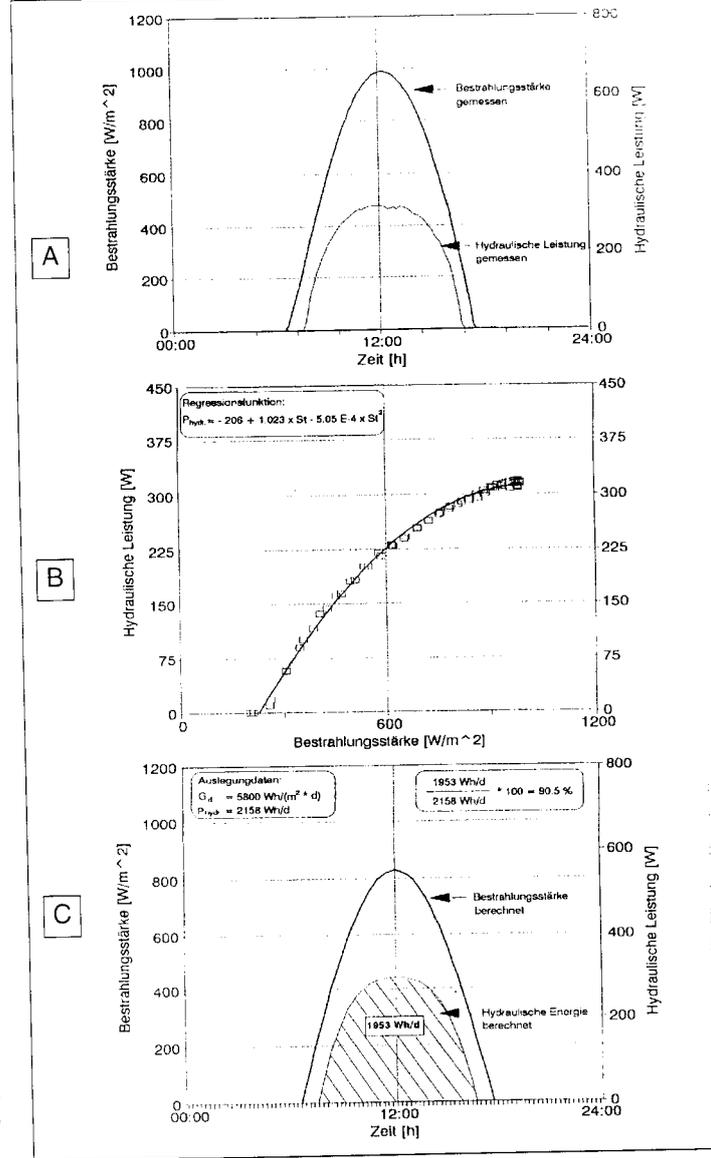


Abb. 8: Verfahren zur Umrechnung gemessener Betriebsdaten auf den Auslegungstag

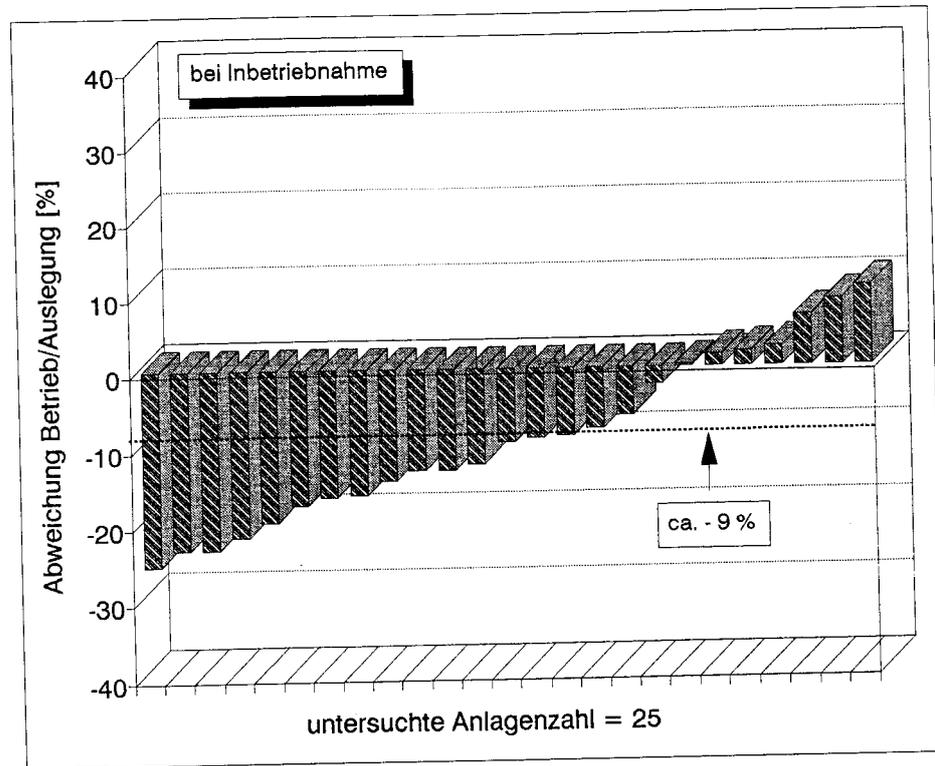


Abb. 9: Ergebnis der Dimensionierungskontrolle von 25 PVP-Anlagen

gungstag bezogen werden. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf dem täglichen Verlauf der Sonneneinstrahlung und der vom Pumpsystem erbrachten hydraulischen Leistung basiert.

Abb. 8 A-C zeigt die einzelnen Verfahrensschritte am Beispiel des Standortes Chinyabako in Simbabwe.

A Zur Überprüfung der technischen Leistungsfähigkeit eines PVP-Systems wird ein möglichst ungestörter sinusförmiger Verlauf der Einstrahlungsleistung und der korrespondierenden hydraulischen Leistung des Pumpsystems benötigt. Sofern solch ideale Einstrahlungsdaten nicht vorliegen, besteht auch die Möglichkeit der Kombination mehrerer Teilstücke verschiedener Tage mit annähernd gleichen Temperaturverhältnissen.

B Trägt man die hydraulische Leistung als Funktion der Einstrahlungsleistung auf, so erhält man die Kennlinie des Pumpsystems, welche sich durch eine mathematische Funktion der Form

$$P_{\text{hydr.}} = a \cdot S_t^2 + b \cdot S_t + c$$

beschreiben läßt. Diese Funktion wird iterativ nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate so bestimmt, daß die Abweichung der nach der Funktion berechneten Werte der hydraulischen Leistung von den gemessenen Werten minimal wird. Mit der systemspezifischen Regressionsfunktion kann die hydraulische Leistung für jeden beliebigen Einstrahlungswert berechnet werden.

C Berechnet man mit Hilfe der Funktion die hydraulische Leistung für den Auslegungstag, so erhält man den in Abb. 8 C dargestellten Kurvenverlauf. Durch numerische Integration wird dann die Fläche unter der Kurve bestimmt, welche der hydraulischen Energie für den Auslegungstag bei störungsfreiem Betrieb des Systems entspricht. Der ermittelte Wert läßt sich mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ mit dem Auslegungspunkt des PVP-Lieferanten vergleichen. Im Fall des Standortes Chinyabako weicht die resultierende hydraulische Energie um ca. 10 % vom Auslegungspunkt ab.

Wiederholt man dieses Verfahren im Jahresrhythmus, so sind Aussagen zur Langzeitstabilität des PVP-Systems möglich. Erste Ergebnisse zur Untersuchung der Langzeitstabilität von PVP-Anlagen sind in /3/ aufgeführt.

Abb. 9 zeigt das Ergebnis der Dimensionierungskontrolle von 25 PVP-Anlagen gemäß dem oben beschriebenen Verfahren. Unter realen Betriebsbedingungen fördert der

überwiegende Teil der Systeme nach der Inbetriebnahme weniger Wasser als in den Auslegungsrechnungen angenommen. Wie bereits aus der Differenz der K-Werte (vergl. Gl.1) hervorgeht, weichen die Betriebsdaten im Durchschnitt um ca. -9 % von den theoretischen Erwartungen ab.

Die Gründe für den Leistungsverlust sind vielfältig. Im Rahmen des PVP-Programms konnten die folgenden Ursachen, die zu einer Leistungsreduzierung geführt haben, identifiziert werden:

Standortspezifische Ursachen

- Unzureichende Planungsdaten (z.B. Förderhöhe)
- Verstopfung von Pumpe, Rohrleitung und Armaturen durch Schmutzpartikel
- Verschmutzung des PV-Generators
- Unterschätzte Temperatureffekte
- Frühzeitiger Verschleiß von Anlagenteilen durch korrosive Bestandteile im Wasser.

Systemspezifische Ursachen

- Leistungsbegrenzung durch Inverter bei Überdimensionierung des PV-Generators
 - Anpassungsverluste des Inverters (z.B. ungenaue MPP-Regelung)
 - Parametrierung des Inverters nicht an Standortbedingungen angepaßt
 - Anpassungsverluste des PV-Generators (z.B. falsche Modulkombination).
- Standortspezifische Ursachen sind nur schwer kalkulierbar, wenn entsprechende Standortkenntnisse fehlen. Systemspezifische Ursachen können bei sorgfältiger Dimensionierung vermieden werden. Dies setzt jedoch voraus, daß dem technischen Planer ausreichend optimierte und an die klimatischen Verhältnisse angepaßte Systemkomponenten zur Verfügung stehen. Die Felderfahrungen haben jedoch gezeigt, daß trotz der Fortschritte der letzten Jahre insbesondere bei der Invertertechnologie zusätzlicher Optimierungsbedarf besteht /4,11/.

Zusammenfassung

Photovoltaische Pumpsysteme stellen eine attraktive Lösung zur Trinkwasserförderung in Entwicklungsländern dar. Die vergleichsweise hohen leistungsspezifischen Investitionskosten solcher Systeme erfordern eine sorgfältige Dimensionierung unter Einbeziehung technischer und sozio-kultureller Aspekte. Zur Anlagenauslegung stehen eine Reihe von Verfahren unterschiedlicher Qualität zur Verfügung. Rechnergestützte Auslegungsverfahren wurden anhand von gemessenen Betriebsdaten verifiziert und ein einfaches Verfahren zur Abschätzung der zu in-

stallierenden PV-Generatorleistung vorgestellt. Vergleichende Untersuchungen an 25 PVP-Anlagen haben gezeigt, daß unter realen Betriebsbedingungen weniger Wasser gefördert wird als in den Auslegungsrechnungen angenommen. Standort- und systemspezifische Ursachen, die zu dieser Leistungsreduzierung geführt haben, wurden identifiziert und mögliche Optimierungspotentiale aufgezeigt. Fundierte Planungsgrundlagen, angepaßte Systemkomponenten und Auslegungsverfahren sind demnach entscheidend, um künftige PVP-Anlagen bei gegebenen Standortbedingungen mit größtmöglicher Effizienz zu betreiben.

Literatur

- /1/ The World Bank, (1994), World Development Report 1994, Oxford University Press
- /2/ Posorski R., Haars K., (1994), Ökonomische Querschnittsanalyse photovoltaischer Pumpsysteme, GTZ, Eschborn
- /3/ Tagungsband zur PVP-Fachtagung, (1995), Erfahrungen des PVP-Programms mit der Projektierung und dem Betrieb photovoltaischer Pumpsysteme unter Einbeziehung wirtschaftlicher und soziokultureller Aspekte, GTZ, Eschborn
- /4/ Hahn A., (1995), Technical Maturity and Reliability of Photovoltaic Pumping Systems, Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (1995)
- /5/ Auer F., (1993), PV-Trinkwasserpumpen (2), Meßtechnikkonzept und Auswertbeispiele, SONNENENERGIE 06/93, S.17
- /6/ Weltbankstudie
- /7/ WHO, (1971), International Standards for Drinking Water, 3. Aufl., Genf 1971
- /8/ GTZ, TÜV-Rheinland, (1988), Grundlagen zur Erstellung eines Lastenheftes für photovoltaische Pumpen, Köln
- /9/ Heinen K-U., (1992), Institut für Tropentechnologie, Lehrgebiet Energietechnik, Betriebsanleitung „Simulationsprogramm für photovoltaische Pumpsysteme“
- /10/ Fahlenbock B., Falk H., (1994), Vergleich von PVP-Auslegungsprogrammen, GTZ-Bericht, Eschborn
- /11/ Posorski R., Schmidt R., (1993), Nutzung photovoltaisch betriebener Trinkwasserpumpen in Entwicklungsländern – Projekterfahrungen des PVP-Programms und Perspektiven – Achetes Nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Staffelstein (1993)