

Internationaler Sach- und Wissensstand zur PV-Bewässerung 1999

Joachim Müller

1	SUCHMODUS	2
2	STRUKTURIERUNG.....	3
3	LITERATURAUSWERTUNG.....	6
3.1	Publikationen der Kategorie „Theorie“	6
3.2	Publikationen der Kategorie „Praxis“	9
3.2.1	University of Nebraska, U.S.A.....	13
3.2.2	American University Cairo, Catholic Relief Services, Ägypten.....	13
3.2.3	UNDP/Weltbank	14
3.2.3.1	IT Power, Großbritannien/Agricultural Development Bank of Pakistan (ADBP)	14
3.2.3.2	IT Power, Großbritannien/American University Cairo, Ägypten.....	15
3.2.4	California State University, U.S.A.....	16
3.2.5	French Development Agency, Frankreich/SUDENE, Brasilien	16
3.2.6	C.N.R.S., Frankreich/Indien.....	17
3.2.7	University of Sydney, Australien.....	17
3.2.8	ERGO Industries Corporation, U.S.A.....	18
3.2.9	Sondela Garden, Südafrika.....	19
3.2.10	BMFT, Deutschland.....	19
3.2.10.1	Grundlagenuntersuchungen	20
3.2.10.2	Praxiseinsatz	20
3.2.11	ISMA, Italien.....	21
3.2.12	VINCA, Jugoslawien	21
3.2.13	DLR, Deutschland.....	21
3.2.14	KFA Jülich und Universität Hohenheim, Deutschland /AEA Cairo, Ägypten.....	22
3.2.15	GTZ Eschborn, Deutschland.....	22
3.2.15.1	GTZ, Deutschland/Centro de Energias Renovables Universidad da Tarapacá, Chile	22
3.2.15.2	GTZ, Deutschland/Bureau of Agriculture and Natural Resources, Äthiopien.....	23
3.3	Ökonomie	23
3.4	Nutzerakzeptanz.....	24
4	SCHLUßFOLGERUNGEN.....	26
5	FORSCHUNGSBEDARF	26
6	LITERATUR.....	29
6.1	Übersicht	29
6.2	Praxis.....	30
6.3	Theorie	34
6.4	Nennung.....	37

1 SUCHMODUS

Der internationale Wissenstand zur PV-Bewässerung wurde anhand einer On-line-Literaturrecherche in einschlägigen Datenbanken unter der Suchwortkombination

{*solar* OR *photovoltaic* OR *PV* } AND {*irrigation* OR *pump#*}.

ermittelt. Das Suchwort *pump#* wurde aufgenommen, um auch Publikationen zu berücksichtigen, welche sich nur am Rande mit Bewässerung befassen. Die besuchten Datenbanken und das Datum der letzten Aktualisierung sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Tabelle 1: Recherchierte Datenbanken

Datenbank	Aktualisierung
AGRICOLA	09/1999
AGRIS	02/1999
BIOSIS	09/1999
CAB ABSTRACTS	04/1999
CURRENT CONTENTS (Agri, Bio, Environ Science)	10/1999
CURRENT CONTENTS (Life Sciences)	10/1999
CURRENT CONTENTS (Phys,Chem, Earth Science)	10/1999
TROPAG & RURAL	06/1999

Zusätzlich wurde das Themengebiet in Tagungsbänden einschlägiger Kongresse sowie in den Jahrgängen 1998/99 maßgeblicher Fachzeitschriften manuell recherchiert. Die Kongresse sind in **Tabelle 2** aufgeführt. In **Tabelle 3** sind Titel und Datum der letzten berücksichtigten Nummer der Zeitschriften sind aufgelistet.

Tabelle 2: Recherchierte Kongresse

Kongress	Jahr
The ISES African Utility Conference	1998
5th World Renewable Energy Congress WREC 98	1998
ISES Solar World Congress	1997
ISES Solar World Congress	1995
ISES Solar World Congress	1993
Eurosun	1998
Eurosun	1996

Tabelle 3: Recherchierte Fachzeitschriften

Zeitschrift	letztes Heft
Agricultural water mangement	09/1999
Renewable Energy	12/1999
Solar Energy	08/1999
Sonnenenergie	10/1999
Sonenenergie & Wärmetechnik	10/1999

Darüber hinaus wurden durch Rückverfolgung von Literaturverweisen, sowie Kontaktaufnahme zu maßgeblichen Autoren weitere Quellen erschlossen. Nach Bereinigung der Datenbank-Überschneidungen und manueller Auslese der Publikationen, welche sich ausschließlich mit Pumpen befassen, verblieben 187 verwertbare Publikationen.

2 STRUKTURIERUNG

Die insgesamt 187 verwertbaren Publikationen lassen sich entsprechend ihrer Relevanz bezüglich der Bewässerung in vier Kategorien einteilen (**Bild 1, Tabelle 4,**) :

1. **Nennung:** Hierzu zählen 75 Publikationen, in welchen Bewässerung zwar als mögliches Einsatzfeld für PV-Pumpen genannt wird, jedoch keinerlei konkrete Angaben über das Bewässerungssystem getroffen werden. Dabei erscheint der Hinweis auf die Bewässerung meist kurz in der Einleitung oder in der Zusammenfassung, in Einzelfällen jedoch auch exponiert im Titel.
2. **Theorie:** Hierzu zählen 35 Publikationen, in welchen ein Bewässerungssystem als gegeben angenommen wird, jedoch keine tatsächliche Bewässerung erfolgt. Meist wird zur Dimensionierung einer PV-Pumpe der Pflanzenwasserbedarf für eine bestimmte Kultur in einem bestimmten Klima berechnet.
3. **Praxis:** Hierzu zählen 67 Publikationen in welchen ein Bewässerungssystem unter Praxisbedingungen durch eine PV-Pumpe betrieben wird. Da die Autoren mehrfach veröffentlichten, beschränkt sich die Datenbasis auf 15 unterschiedliche Projekte.
4. **Übersicht:** Hierzu zählen 10 Publikationen, in welchen zusammenfassend über unterschiedliche PV-Bewässerungssysteme berichtet wird. Es handelt sich hierbei überwiegend um Berichte oder Bücher.

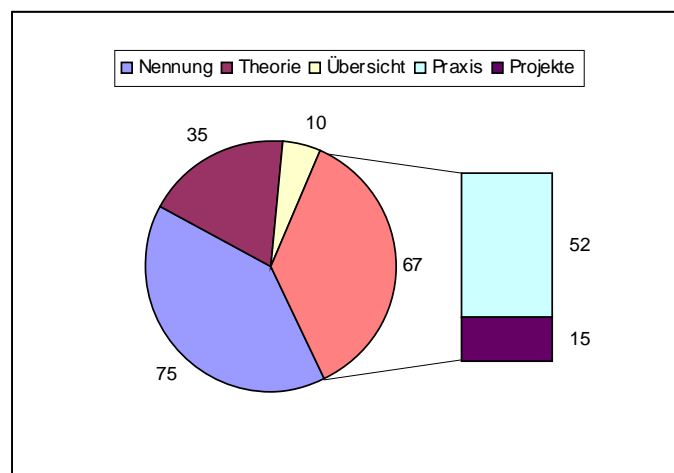


Bild 1: Klassifizierung der recherchierten Publikationen

Tabelle 4: Klassifizierung der Publikationen nach Praxisrelevanz

Kategorie	Beschreibung	Fundstellen	originäre Quellen
Nennung	Möglichkeit der PV-Bewässerung wurde lediglich genannt	75	0
Theorie	Bewässerungssystem wurde theoretisch angenommen	35	29
Praxis	Bewässerungssystem wurde in der Praxis realisiert	67	15
Übersicht	PV-Bewässerungssysteme wurden vergleichend betrachtet	10	0
gesamt		187	44

Zur zeitlichen Strukturierung sind die Publikationen in **Bild 2** geordnet nach deren Praxisrelevanz über dem Erscheinungsjahr aufgetragen. Obwohl die Arbeiten der Kategorie „Nennung“ keinen wesentlichen Beitrag zur Mehrung des Wissenstandes bezüglich der photovoltaischen Bewässerung leisten, wurden sie mitaufgeführt, da sie als Indikator für eine geistige Auseinandersetzung mit der PV-Bewässerung betrachtet werden können. So wurde bereits 1976 in drei Arbeiten (Indien, Frankreich, USSR) auf die Bewässerung als geeignetes Einsatzgebiet für PV-Pumpen hingewiesen. *Mann, H.S. 1976* traf bereits zu dieser frühen Zeit eine Prognose über die relevante Leistungsklasse der PV-Pumpen, deren Richtigkeit durch zahlreiche spätere Arbeiten belegt wurde: *"A high priority should be assigned to the development of a 5 H.P. solar pump. This pump will find ample application in minor irrigation programmes."* Ab 1982 erschienen jährlich ca. 3 Publikationen der Kategorie „Nennung“. Mehrfachveröffentlichungen waren nicht zu verzeichnen. Zwei Autoren trafen eine Aussage zur erwarteten Nutzerakzeptanz, welche in Kapitel 3.4 berücksichtigt wurden.

Arbeiten der Kategorie „Theorie“ erschienen in größerer Häufung ab 1981, induziert durch das UNDP/Weltbank-Projekt „Photovoltaic Pumps for Small-Scale Irrigation in the Developing World“, *Wright, D.E. 1981*. Im Projektverlauf wurden unterschiedliche PV-Pumpensysteme in Mali, Sudan und auf den Philippinen installiert und vermessen. Konkrete Angaben über die Bewässerung - obgleich in der Projektbezeichnung aufgeführt - wurden nicht gemacht, vermutlich weil das Projektziel aufgrund von Mißerfolgen mit mobilen PV-Bewässerungssystemen in Pakistan sehr bald in Richtung Trinkwasserversorgung gelenkt wurde: *„As these projects [UNDP/World Bank] proceeded the emphasis moved from the use of solar pumps for irrigation to their use for water supply duties, where they are more immediately economically viable (Fraenkel, P.L. 1986).“* In der Folgezeit erschienen jährlich ein bis zwei Publikationen unterschiedlicher Autoren mit theoretischen Betrachtungen über PV-Bewässerung, worin häufig die UNDP/Weltbank-Studie zitiert wird. Unter den 35 untersuchten Publikationen befanden sich sechs Mehrfachveröffentlichungen, so daß 29 verwertbare Arbeiten vorliegen (s. Kap. 3.1).

Die erste Publikation der Kategorie „Praxis“ erschien 1977 aus einem Projekt der Universität Nebraska, gefolgt von einem Projekt der American University Cairo 1982. Ebenfalls 1982 erschien die erste einer Reihe von Publikationen aus dem USDA/Weltbankprojekt und zwar über Einatzerfahrungen aus Pakistan. Mehrere Einzelprojekte folgten sporadisch

nach, bis dann ab 1988 mit zunehmender Häufigkeit Ergebnisse aus einem deutschen PV-Demonstrationsprojekt des BMFT veröffentlicht wurden. Ab 1997 liegen Publikationen aus einem Projekt des Forschungszentrums Jülich in Ägypten vor sowie erste Erfahrungen aus dem Projekt „Ressourcenschonende Bewässerung durch photovoltaische Pumpsysteme“ der GTZ.

Bedingt durch die mehrjährige Bearbeitungsdauer von Praxisprojekten und die erhöhte Anzahl beteiligter Wissenschaftler sind in der Kategorie „Praxis“ zahlreiche Mehrfachveröffentlichungen zu finden. Hierzu sind in **Bild 3** nochmals die Publikationen der Kategorien „Theorie“, „Praxis“ und „Übersicht“- bereinigt um die Mehrfachveröffentlichungen - dargestellt. Es zeigt sich, daß sich der derzeitige Wissensstand zur PV-Bewässerung im wesentlichen auf 15 unabhängige Projektansätze stützt (s. Kap. 3.2).

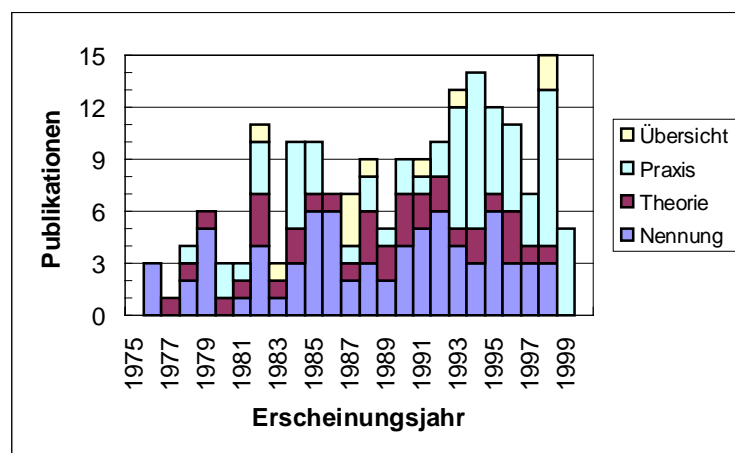


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der publizistischen Aktivität zur PV-Bewässerung

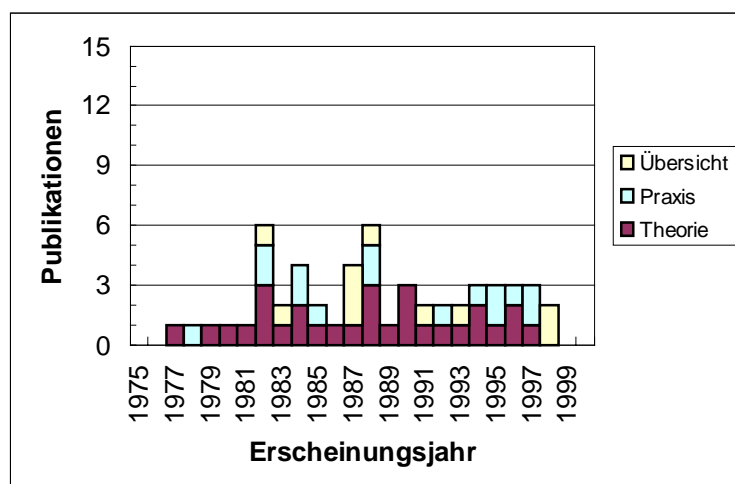


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der publizistischen Aktivität zur PV-Bewässerung, bereinigt um Mehrfachveröffentlichungen

3 LITERATURAUSWERTUNG

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse der Arbeiten aus den Kategorien „Theorie“ und „Praxis“ eingegangen. Während die Praxisergebnisse separat besprochen werden, wurde für die theoretischen Arbeiten eine zusammenfassende Darstellung gewählt, da auf diese Weise Konvergenzen bzw. Lernprozesse bezüglich der gewählten Rahmenbedingungen sichtbar gemacht werden können.

3.1 Publikationen der Kategorie „Theorie“

In **Tabelle 5** sind die Publikationen, welche sich auf ein fiktives Bewässerungssystem stützen, in der Reihenfolge ihres Erscheinungsjahres aufgeführt zusammen mit den gewählten Rahmenbedingungen bezüglich Einsatzland, Bewässerungssystem, Kultur, Farmgröße, Förderhöhe, installierte Leistung und Wasserkosten. Von den 29 relevanten Publikationen beziehen sich 12 Arbeiten auf Afrika und zwar überwiegend auf Länder mit semi-aridem Klima, vor allem Ägypten (6) und Sudan (4). Weitere neun Arbeiten beziehen sich auf Asien mit einem Schwerpunkt auf Indien (4), zwei Arbeiten auf Südamerika - beide Brasilien, zwei Arbeiten auf Australien und eine Arbeit auf die USA (Florida). Die restlichen Arbeiten beziehen sich auf Entwicklungsländer ohne bestimmte Länder zu nennen.

In der Wahl des Bewässerungssystems halten sich die Oberflächenbewässerung und die Tropfbewässerung mit jeweils 12 Nennungen die Waage. Begründet wurde die Auswahl - falls überhaupt - mit dem geringen Energiebedarfs der Oberflächenbewässerung, bzw. mit den geringen Wasserverlusten der Tropfbewässerung. Die Beregnung wurde in keiner der Arbeiten als Bewässerungsverfahren in Betracht gezogen. Sechs der Autoren machen keine Angaben zum gewählten Bewässerungsverfahren, sondern treffen lediglich eine Aussage über die erforderliche Fördermenge und Förderhöhe.

Bezüglich der zu bewässernden Kultur werden etwa mit gleicher Häufigkeit Flächenkulturen (6) wie Reis und Weizen, Reihenkulturen (7) wie Mais, Baumwolle und Gemüse sowie Dauerkulturen (6) wie Zitrus, Aprikosen, Trauben genannt. 13 Autoren machen keine Angaben über die Kultur, somit wird der Pflanzenwasserbedarf in diesen Arbeiten sehr pauschal behandelt.

Bezüglich der Größe der mit PV-Pumpen bewässerten Fläche besteht mit Werten um 1 ha, bzw. Fördermengen um 60 m³/d ein allgemeiner Konsens unter den Autoren. Lediglich *Giuffrida, M. 1984* und *Botros, R. 1991* planten Großanlagen für Anbauflächen über 10 ha.

Die genannten Förderhöhen lagen zwischen 2 und 30 m. Wird die Grenze zwischen Oberflächen- und Grundwasser bei einer Förderhöhe von 10 m gezogen, so wurde in 19 Fällen die Verwendung von Oberflächenwasser eingeplant und in sieben Fällen die Erschließung von Grundwasser. Dabei wird vornehmlich in den neueren Arbeiten von einer Bewässerung mit Grundwasser ausgegangen.

Tabelle 5: Publikationen der Kategorie „Theorie“

Jahr	Autor	Einsatzland	Bewässerungs-system	Kultur	Farmgröße/ Wasserbedarf	Förderhöhe	Leistung	Kosten
1977	Cowell, P.A.	Thailand	Oberflächen-BW	Reis	12,5 m ³ /h	4 m	340 W/ha	-
1979	Matlin, R.W.	Indien Ägypten	Oberflächen-BW	?	9 m ³ /h	5 m	240 Wp/ha	-
1980 1989	Said, S.A.M.	Sudan	Oberflächen-BW	Gemüse Weizen Erbsen	0,5 ha 1 ha 1,5 ha	8 m	2,1 kW Motor	-
1981	Wright, D.E.	Mali, Sudan Philippinen	?	?	1-3 ha	5-10 m	200 -1000 Wp/ha	-
1982	Trehan, S.K.	Indien	Oberflächen-BW	Weizen, Senf	0,3-1 ha	10 m	1 m ² PV-Module	-
1982	Evans, E.P.	E-Länder	Tropf-BW	?	60 m ³ /d	5 m	?	3,4 US\$/kJ _{hyd} d
1982	Fraenkel, P.L.	E-Länder	?	?	0,5-1 ha	7 m	150-500 W _{hyd}	-
1983	Rajput, T.B.S.	Indien	Oberflächen-BW	Reis, Kartoffel, Weizen, Boh- nen, Mais	0,15-2 ha	5 m	150-2000 Wp/ha	53,4 Rs/m ³
1984	Giuffrida, M.	Tansania	Oberflächen-BW	?	2200 m ³ /d	10 m	21000 Wp	-
1984	Hoffmann, G.	Indonesien	Oberflächen-BW	Reis	16 ha	5 m	325Wp/ha	-
1985	Diarra, M.	Mali	?	?	22 m ³ /d 30 m ³ /d 122 m ³ /d	24 m 19 m 20 m	1056 Wp 1300 Wp 3816 Wp	0,35 US\$/m ³ 0,20 US\$/m ³ 0,22 US\$/m ³
1986	Kenna, J.P.	E-Länder	Tropf-BW Oberflächen-BW	Baumwolle, Erdnuß, Mais	1 ha	5 m	?	0,045 £/m ³ 0,075 £/m ³
1987	McGowan, R.	E-Länder	Tropf-BW	?	?	?	?	0,004 US\$/m ⁴
1988	Fraidenraich, N.	Brasilien	Tropf-BW	Trauben	1,6 ha	5 m	280 Wp/ha	-
1988	Mankbadi, R.R.	Ägypten	Tropf-BW	?	0,5-2 ha	5 m	?	-
1988	Behrendorf, M.J.	Australien	UnterflurTropf-BW	Tomaten Salat	1 ha	8-20 m	945 Wp/ha 896 Wp/ha	-
1989	Malhotra, K.S.	Indien	Oberflächen-BW	Reis, Weizen	0,5-3 ha	?	700 Wp/ha	-

Tabelle 5: Fortsetzung

Jahr	Autor	Einsatzland	Bewässerungs-system	Kultur	Farmgröße/ Wasserbedarf	Förderhöhe	Leistung	Kosten
1990	Al-Sagir, B.E.	Irak	Oberflächen-BW	?	1 ha	30 m	3000 Wp/ha	-
1990 1991	Hafner, E.	Tunesien	Tropf-BW	Aprikosen	0,6 ha	?	1000 Wp/ha	-
1990 1992	Helikson, H.J. Whiffen, H.J.H.	Florida	Tropf-BW	Gemüse	1 ha	2,4 m	374 Wp/ha	6000 US\$/ha
1991	Botros, R.	Ägypten	Oberflächen-BW	?	30 ha	5 m	300 Wp/ha	-
1992	Bucher, W.	E-länder	Tropf-BW	Zitrus Gemüse Baumwolle	1 ha	10 m	0,8-1,4 kWp/ha 1,9-4,2 kWp/ha 2,5-4,9 kWp/ha	0,03 DM/m ⁴
1993	Karim, A.N.M.	Bangladesh	?	?	1 ha	20 m	1,4 kWp	13000 US\$/m ⁴ (20 Jahre)
1994	Ahmed, M.A.H.	Sudan	?	Gemüse	1 ha	2-12m	600 Wp/ha	-
1994 1995	Bahaj, A.S.	Ägypten	Tropf-BW	Zitrus	1 ha 250 m ⁴ /d	10 m	?	25000 US\$/ha
1996	Lawrance, W.	Australien	Tropf-BW	Trauben	1 ha 18 m ³ /d	25 m	8xBP164 440 Wp/ha (?)	-
1996	Fedrizzi, M.C.	Brasilien	Oberflächen-BW	?	1 ha	8 m 24 m	650 Wp/ha 1800 Wp/ha	0,15 US\$/m ³ 0,35 US\$/m ³
1996 1998	Mayer, O.	Ägypten	Tropf-BW	Zitrus Mais	1 ha	20 m	1900 Wp/ha 2800 Wp/ha	-
1997	Branscheid, V.	Sudan	?	?	?	8m 3m	750 Wp	0,10 US\$/m ³ 0,03 US\$/m ³

Die zu installierende PV-Leistung berechneten die Autoren entsprechend der gewählten Förderhöhe. Bei Verwendung von Oberflächenwasser, d.h. Förderhöhen bis 10 m, reichen die Angaben von 200 bis 1000 W_p /ha mit einer Häufung im Bereich 300-700 W_p /ha. Bei Förderung von Grundwasser mit größeren Förderhöhen reichen die Angaben bis 4000 W_p /ha.

Nur elf der Autoren machten Angaben zu den Anlagenkosten. *Evans E.P. 1982* gibt als ökonomisches Maß die *Specific Capital Cost (SCC)* an, d.h. die Investitionskosten pro täglich erbrachter hydraulischer Arbeit in US\$/kJ. *Whiffen, H.J.H. 1992* und *Bahaj, A.S. 1995* berechnen die Investitionskosten pro ha bewässerter Fläche. Genauere Angaben unter Berücksichtigung der Annuität finden sich in den verbleibenden Publikationen. Je nach Förderhöhe finden sich hier Wasserbereitstellungskosten von 0,03 bis 0,35 US\$/m³ mit einer Häufung um 0,10 US\$/m³ bei Förderung von Oberflächenwasser. Eine genauere Analyse der Angaben zur Ökonomie findet sich in Kapitel 3.3.

3.2 Publikationen der Kategorie „Praxis“

In **Tabelle 6** sind die 32 Publikationen, in welchen der praktische Betrieb von Bewässerungssystemen mittels PV-Pumpen beschrieben wird, insgesamt 15 unterschiedlichen Projekten zugeordnet, deren wesentliche Inhalte nachfolgend in Kurzform dargestellt werden.

Tabelle 6: Publikationen der Kategorie „Praxis“ geordnet nach 15 Projekten

Projekt	Land Finanzierung/ Implementierung	Kurzbeschreibung	Autor	Jahr
University of Nebraska	U.S.A./ U.S.A.	Installation eines 24 kW _p -PV-Pumpsystems zur Furchenbewässerung von 32 ha Mais	Fischbach, P.E. Sullivan, N.W. Hopkinson, R.F.	1978 1980 1980
American University Cairo	U.S.A./Ägypten	Demonstration eines mobilen Pv-Pumpsystems zur Oberflächenbewässerung	Nelson, C.	1982
USDA/Weltbank	UK/Pakistan	Installation von mobilen 250 W _p -PV-Pumpsystemen bei 14 Kleinbauern in unterschiedlichen Regionen Pakistans zur Oberflächenbewässerung	Pallett, R.G. Frost, J.C. Howes, M	1982 1982 1984
	UK/Ägypten	kombiniertes 3,1 kW _p PV-Pumpsystem Exzenter-schneckenpumpe/Zentrifugalpumpe	Assabghy, F.	1984
California State University Fresno	U.S.A./U.S.A.	PV-Tropfbewässerung von 2,9ha Trauben in Fresno, Kalifornien	Norum, E.M.	1984/85/85
SUDENE	Frankreich/Brasilien	Installation von neun 420 W _p PV-Pumpsystemen zur Tropfbewässerung, seit 1984 erfolgreich	Soliano-P. O.L.	1994
CNRS	Frankreich/Indien	Soziologische Studie über die Einführung eines PV-Pumpsystems zur gemeinschaftlichen Bewässerung in einem indischen Dorf	Amado, P.	1984
University of Sydney	Australien/Australien	Installation eines 928 W _p PV-Pumpsystems zur Tropfbewässerung von 1 ha Tomaten	Sutton, B.G.	1985

Tabelle 6: Fortsetzung

Projekt	Land Finanzierung/ Implementierung	Kurzbeschreibung	Autor	Jahr
ERGO Industries Corp.	U.S.A./U.S.A.	Installation eines 360 W _p PV-Pumpsystems zur Tropfbewässerung von 0,46 ha Erdbeeren	Girard, K.	1988
DBSA	Südafrika/Südafrika	Installation einer PV-Pumpe in einem von Frauen geführten, 1 ha großen Gemeinschaftsgarten	Gosnell, R.	1992/93
BMFT: „Photovoltaik-Demonstration im bundeseigenen Bereich“	Deutschland/Deutschland	Grundlagenuntersuchungen Versuchsstation Limburger Hof	Fett, F.N. Müller, H.-P. Krukemann, E. Müller, S. Heyland, K.U.	1988/89/90/90/92/94/ 94/95 1991/93 1994 1995 1997
		Praxiseinsatz 12 landwirtschaftliche Betriebe	Sourell, H. Holleman, B. Oheimb, R.v. Sonenberg, H. Strippel, M. Ortmeier, B. Sommer, C.	1993/94/94/94/94/94 1993/93 1993/93/94/96/98 1995 1996 1996 1996
ISMA Rom,	Italien/Italien	Einsatz eines 3kWp PV-Pumpsystems zur Beregnung von Luzerne	Marsili, A.	1995
VINCA Jugoslawien	Jugoslawien/Jugoslawien	Installation eines 504 W _p PV-Pumpsystems zur Tropfbewässerung von 1,8 ha Aprikosen	Stojanovič, M.	1995
DLR Köln	Deutschland/Deutschland	Laborversuche an Tropfern unter PV üblichen Druckverhältnissen	Bucher, W.	1996
FZ Jülich, Universität Hohenheim	Deutschland/Ägypten	Installation eines 530 W _p PV-Pumpsystems für eine 1,7 ha große Zitrus/Dattelpflanzung auf einer Versuchstation in Ägypten	Müller, J. Schubert, M. Rollinger, S.	1997/98/98/98 1998 1999
GTZ Eschborn	Deutschland/Chile	Installation mehrerer PV-Pumpsysteme zur Tropfbewässerung von Gemüse und Obstbäumen	Torres, A. Hahn, A. Schmidt, R. Torres, E. Heitkämper, K. Huerfano-B. C.F.	1997 1998 1998 1998 1998/99 1999
	Deutschland/Äthiopien	Installation mehrerer PV-Pumpsysteme zur Bewässerung in Baumschulen	Hahn, A.	1999

3.2.1 University of Nebraska, U.S.A.

Fischbach, P.E. 1978 und Sullivan, N.W. 1980 beschreiben ein PV-Bewässerungssystem, welches 1977 durch die Universität Nebraska in Zusammenarbeit mit dem Massachusetts Institute of Technology in Mead, Nebraska installiert wurde. Ein Solargenerator mit einer Fläche von 520 m² und einer Leistung von 24 kW_p versorgte via Batteriepuffer und Inverter eine Axialpumpe mit einem 11 kW AC-Motor zur Bewässerung von 32 ha Mais. Das Wasser wurde hierzu einem Vorratsteich entnommen, welcher durch eine netzbetriebene 30 kW Pumpe in den Nachtstunden zu einem verbilligten Stromtarif mit Brunnenwasser befüllt wurde. Die Wasserverteilung erfolgte nach dem Prinzip der Furchenbewässerung mit „gated pipes“ (Rohre mit einstellbarer Ausflußöffnung für jede Furche). Der variierende Förderstrom der PV-Pumpe wurde über 44 zentral betätigte Ventile derart auf unterschiedliche Blocks verteilt, daß in den jeweils geöffneten Furchen eine optimale Zuflußrate erreicht wurde, um Versickerungsverluste zu vermeiden. Bezüglich der Wirtschaftlichkeit bemerken die Autoren: *„The trade-offs ... must be examined in detail before an optimum agricultural photovoltaic system can be designed.“*

Hopkinson, R.F. 1980 beschreibt, wie im gleichen Projekt versucht wurde, den Energieüberschuß des Solargenerators in Zeiten mit geringem Wasserbedarf zur Herstellung von Stickstoffdünger im Lichtbogenverfahren zu nutzen. Das Verfahren funktionierte zwar aus technischer Sicht, erlaubte jedoch keine wirtschaftliche Düngerproduktion.

3.2.2 American University Cairo, Catholic Relief Services, Ägypten

Nelson, C. 1982 berichtet über einen zweiwöchigen Praxiseinsatz eines mobilen PV-Pumpensystems in einem Dorf im Nildelta. Die Dorfbevölkerung war an jeder Phase des Projektes beteiligt, so ging dem Feldeinsatz eine Informationsphase mit Schulungen zur Solarenergienutzung voraus. Der 2 m² große Solargenerator des PV-Systems war auf einem Handwagen montiert und versorgte eine Schwimmpumpe, welche laut Herstellerangaben eine tägliche Fördermenge von 50 bis 150 m³ bei einer Förderhöhe von 2-4 m erbringen sollte. Die Pumpe wurde bei unterschiedlichen Farmern zur traditionellen Beckenbewässerung eingesetzt. Neben technischen Schwierigkeiten aufgrund der zerbrechlichen Bauweise, erwies sich der Förderstrom der Pumpe als zu gering für die Beckenbewässerung: es war nicht möglich, das Wasser rasch genug im Becken zu verteilen und es kam somit zu großen Versickerungsverlusten an der Einleitungsstelle. Anstelle der mobilen Pumpe wünschten sich die Farmer eine leistungsfähigere stationäre Pumpe, um die traditionelle Sakia (Schöpfwerk mit Tieranspannung) zu ersetzen. Die PV-Technik als solche wurde nach Aussage des Autors gut aufgenommen: *„Special mention needs to be made about the exclamations of amazement and joy of most observers. Praises to God were often given for this new hope of the future.“*

3.2.3 UNDP/Weltbank

Ein Team der Weltbank erarbeitete 1978 einen groß angelegten Programmvorschlag zur Einführung kleiner Solarpumpen für die Bewässerung, wobei die Installation von 10 Mio Anlagen bis zum Jahr 2000 angestrebt wurde. Als Grenze der Wirtschaftlichkeit wurde ein Preis für die Solarmodule von 5US\$/W_p veranschlagt – ein Preis der damals vom US Department of Energy für das Jahr 1981 prognostiziert wurde *Barlow, R. 1993*. Daraufhin finanzierte das United Nations Development Programme (UNDP) ab 1979 ein Projekt der Weltbank unter der Bezeichnung „Small-scale solar-powered pumping systems: the technology, its economics and advancement“ (GLO/80/003). Die praktischen Arbeiten wurden von dem Consulting Unternehmen Sir William Halcrow & Partners in Zusammenarbeit mit Intermediate Technology Power Ltd. durchgeführt. Neben Marktstudien und Labortests wurden auch vereinzelt Feldtests durchgeführt, über den tatsächlichen Einsatz von Solarpumpen in Bewässerungssystemen wurde jedoch nur wenig berichtet. Nachfolgend sind zwei publizierte Fallbeispiele zusammenfassend dargestellt.

3.2.3.1 IT Power, Großbritannien/Agricultural Development Bank of Pakistan (ADBP)

Pallett 1982 beschreibt eine Projektaktivität des UNDP/Weltbank-Projektes, in welchem 18 PV-Pumpsysteme (250W_p, 9m³/h, 5m) auf Forschungsstationen und kleinbäuerlichen Betrieben (<1,5 ha) in unterschiedlichen Regionen Pakistans implementiert wurden. Ziel der einjährigen Testphase war die Demonstration dieser Technik sowie die Evaluierung ihrer Eignung für kleinbäuerliche Betriebe.

Neben technischen Mängeln - neun der Pumpsysteme fielen durch Trockenlaufen aus - ergaben sich systembedingte Probleme aufgrund des Einsatzes in der traditionellen Oberflächenbewässerung: durch den geringen Förderstrom der PV-Pumpen kam es zu großen Versickerungsverlusten in den Erdkanälen. Es zeigte sich, daß das Bewässerungssystem technisch an die Charakteristik eines PV-Pumpsystems angepaßt werden muß: *"It was also very evident that the effectiveness of this low flow irrigation system is more dependent, than conventional irrigation water supplies, on the plot layout, channel conveyance system and the farmer's water management technique."* Als Voraussetzung für eine erfolgreiche Verbreitung der PV-Pumpsysteme hält der Autor eine Senkung der Anschaffungskosten auf 1000 US\$ pro System (ausgehend von ca. 6000 US\$) für notwendig.

In einer separaten Veröffentlichung geht *Frost, J.C. 1982* speziell auf jene 14 Anlagen ein, welche in Kooperation mit der Agricultural Development Bank of Pakistan (ADBP) auf Praxisbetrieben eingesetzt wurden. Es handelte sich dabei um mobile Systeme, deren Solargeneratoren 2-3 mal täglich manuell nachzuführen waren. Für die Auswahl der Versuchsfarmen galten folgende Richtlinien:

- die Farmen sollten kleiner als 5 ha sein
- die Farmer sollten bei der ADBP bereits aktenkundig sein

- der Grundwasserspiegel sollte nicht tiefer als 3 m liegen
- die Farm sollte mit Fahrzeugen erreichbar sein
- die Farmer sollten bereits Erfahrungen mit der Oberflächenbewässerung haben
- die Farmer sollten die Verantwortung für die Sicherheit der Pumpe übernehmen

Die 14 PV-Pumpsysteme wurden nach Vorschlag der ADPD in großer Streuung über das Land verteilt, wobei die Anlagen nicht in das Eigentum der Farmer übergingen. Nach 3 Monaten wurden die Anlagen wieder eingeholt und in 4 Regionen konzentriert, um die Datenerhebung praktikabel zu gestalten. Die PV-Pumpsysteme wurden an Standorten gut aufgenommen, an welchen seither mit Persischen Rädern (Schöpfwerk mit Tieranspannung) kleine Flächen bewässert wurden. Im Unterschied zu Pallett erwähnt Frost keine technische Schwierigkeiten, allerdings stellte er fest: *“The universal opinion voiced by the farmers...is that the present 250 W size of unit is undersized, and it was obvious some people tended to regard the solar pump as something of a toy.”*

In einer projektbegleitenden sozio-ökonomische Studie stellt *Howes, M. 1984* einen Zusammenhang zwischen der Art der Wassererschließung und der Anbaumöglichkeit von Hochertragsorten fest: die traditionelle Versorgung über ein Kanalsystem ist während der fraglichen Wintersaison zu unsicher, so daß seit 1950 vermehrt Tiefbrunnen mit Dieselpumpen angelegt wurden. Solche Tiefbrunnen werden jedoch für eine bestimmte Mindestkapazität (ca. 30 l/s) ausgelegt und sind nur für große Farmen (<10 ha) erschwinglich. Für kleine Farmen besteht bestenfalls die Möglichkeit, überschüssiges Wasser bei den Brunnenbesitzern zu kaufen, wodurch der Zugang zu Hochertragsorten mit zusätzlichen Kosten und dem Dürreerisiko belastet wird. Die leistungsmäßig kleiner teilbaren PV-Pumpsysteme stellen somit für kleine Farmen eine verbesserte Zugangsmöglichkeit zu Hochertragsorten dar. Allerdings konnten die PV-Pumpsysteme zum damaligen Preis nicht mit den traditionell eingesetzten Persischen Rädern konkurrieren. Die ADPD entwickelte ein Finanzierungsmodell, wonach nach Abzug der Subventionen eine Anzahlung von 10% zu leisten war mit einer vollständige Abzahlung zu einem Zinssatz von 11% innerhalb von 7 Jahren, beginnend nach dem 2. Jahr. Daraus ergab sich zu den damaligen Bedingungen eine jährliche Belastung von 300US\$. Trotz der Verfügbarkeit von Krediten sah *Howes* ein entscheidendes Hindernis für eine Verbreitung der PV-Technik in den herrschenden Landbesitzverhältnissen: die meisten Farmer sind auf die Zupacht von Land angewiesen, weshalb eine langfristige Investition ein untragbares Risiko darstellt.

3.2.3.2 IT Power, Großbritannien/American University Cairo, Ägypten

Ein weiteres Fallbeispiel aus Ägypten wurde durch *Assabghy, F. 1984* veröffentlicht. Ein ebenerdiger Vorratstank wird durch eine DC-Exzentrerschneckenpumpe mittels 3,1 kW_p-Solargenerator aus einem Brunnen mit 42 m Förderhöhe gespeist. Eine vom gleichen Solargenerator betriebene DC-Zentrifugalpumpe speist das Wasser aus dem Tank in ein

Tropfbewässerungssystem ein, welches ein 3,4 ha großes Versuchsgelände für Wüstenlandwirtschaft versorgt. Genauere Angaben über das Bewässerungssystem werden nicht gemacht. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen noch keine längerfristigen Ergebnisse vor, da technische Probleme mit den Lagern der Schneckenpumpe keinen Dauerbetrieb zuließen.

3.2.4 California State University, U.S.A.

Am Center for Irrigation Technology der California State University in Fresno, wurde 1983 ein 2,9 ha großer Weinberg mit einer PV-betriebenen Tropfbewässerungsanlage ausgestattet, welche bei einer Solargeneratorfläche von 23,8 m² eine Nennfördermenge von 30m³/h erbrachte (Norum, E. M. 1984, 1985 a,b). Angaben über die Förderhöhe wurden nicht gemacht. Aufgrund der Direkteinspeisung kamen druckkompensierte Tropfer zum Einsatz welche zuvor bei geringen Drücken auf einem Prüfstand vermessen wurden (0,14-0,55bar). Der Weinberg wurde in vier unterschiedlich große Blocks eingeteilt und die Wasserzuteilung der vier Teilstränge erfolgte computergesteuert entsprechend des variierenden Energieangebots. Vor Phasen mit Spitzenwasserbedarf wurde mit Überschuß bewässert um die Wurzelzone aufzufüllen. Aufgrund der hohen Ausflußrate der Tropfer staute sich gelegentlich Wasser an der Oberfläche. Der Variationkoeffizient der Tropferausflußrate war im Feld mit 40% ungünstiger als im Labortest (VK= 27%) und verschlechterte sich nach einem Einsatzjahr durch Verstopfungen auf 87%. Trotzdem ermittelten die Autoren einen Bewässerungswirkungsgrad von 92% und bezeichneten die aufgetretenen Probleme als gering: „Operational problems were minimal and vine growth was good.“

3.2.5 French Development Agency, Frankreich/SUDENE, Brasilien

1984 installierte die brasilianische Regierung über SUDENE (Superintendence of Development of the North-East) mit Unterstützung Frankreichs neun PV-Pumpsysteme für die Bewässerung im Bundesstaat Bahia. Zur Auswahl der Standorte wurden folgende Kriterien herangezogen:

- das Gebiet neigt nicht zu Überflutungen
- die Farm ist leicht zu erreichen
- die fragliche Wasserquelle hat eine Mindestschüttung von 4-5m³/h
- die Farm ist in Kredit- und Beratungsprogramme eingebunden

Soliano-Pereira, O.L. 1994 beschreibt eines dieser Systeme, welches 10 Jahre nach der Implementierung noch erfolgreich arbeitete, obwohl es in der Zwischenzeit behördlicherseits in Vergessenheit geraten war. Der Solargenerator hat eine installierte Leistung von 420 W_p. Die Pumpe wird mit einem 60 V DC-Motor betrieben und fördert 27 m³/h bei einer Förderhöhe von 15 m. Über ein Tropfbewässerungssystem (poröser Schlauch) wird

1 ha Mischkultur mit Orangen, Kokosnuß und Tomaten bewässert. Die halbjährliche Nachführung des Solargenerators, sowie der Bürstenwechsel des DC-Motors wird vom Betreiber selbständig vorgenommen. Die Farm ist inzwischen mit dem dreifachen Jahreseinkommen und der Beschäftigung von Fremdarbeitskräften deutlich wohlhabender als die Nachbarfarmen, welche die Technik auch gerne übernehmen würden: *“Six proprietors affirmed that they would like to use electrical energy for irrigation, with the object of diversifying and/or increasing their actual production...the preference of these producers falls on the plantation of fruit (oranges and mangos), tomato, onion and garlic“.*

3.2.6 C.N.R.S., Frankreich/Indien

Amado, P. 1984 berichtet ausführlich über die soziologischen Rahmenbedingungen bei der Implementierung eines PV-Pumpsystems zur Bewässerung in einem Dorf in Bihar, Indien. Das Pumpsystem, welches technisch ebensowenig spezifiziert wird wie das Bewässerungssystem, stellt eine Schenkung aus Frankreich dar. Durch Verzögerungen auf unterschiedlichen administrativen Ebenen in Indien erstreckt sich der Bau des Brunnens und die Installation des Pumpsystems über zwei Jahre. Während dieser Zeit brechen im Dorf ethnische Konflikte um den Brunnenstandort auf. Darüber hinaus kommt es zu Spannungen zwischen unterschiedlichen Berufsgruppen: Viehhalter fürchten um ihr Tränkwasser und die Arbeiter einer Ziegelfabrik können das Bewässerungswasser während der Trockenzeit im Unterschied zu den Vollerwerbslandwirten nicht nutzen. Trotz dieser widrigen Umstände geht das System nach Vermittlung durch die Autoren in Betrieb und es kann erstmals in der Trockenzeit eine Ernte eingebracht werden. Dieser Erfolg induzierte weitere Entwicklungen, wie die Gründung eines Wasserkomitees, einer Saatgutbank und einer Gesellschaft zur Dorfentwicklung. Die Autoren schließen aus ihren Erfahrungen: *„The facts prove to us, in any case, that no efficient irrigation plan can be worked out in advance, at least on the scale of a village, without thorough knowledge of its realities and a close cooperation with the villagers.“*

3.2.7 University of Sydney, Australien

Sutton, B.G. 1985 beschreibt den Einsatz von zwei unterschiedlichen PV-Pumpsystemen für die Bewässerung von jeweils ca. 1 ha Tomaten. Das eine System besteht aus einem 928 W_p Solargenerator und einer Zentrifugalpumpe mit einer Nenn-Fördermenge von 7,5 m³/h bei 10 m Förderhöhe, das andere aus 896 W_p Generator und einer Exzenter-schneckenpumpe mit einer Fördermenge von 11,4 m³/h bei der gleichen Förderhöhe. Angaben über die tatsächliche Effizienz der Systeme werden nur indirekt über die maximal bewässerbare Fläche gemacht, welche für die Zentrifugalpumpe 0,975 ha und für die Exzenter-schneckenpumpe 0,888 ha beträgt.

Die Pumpen fördern das Wasser in einen 12 m³ Hochbehälter, 8 m über dem Feldniveau. Die Wasserverteilung erfolgt über unterflur verlegte Tropfschläuche, um jegliche Verdunstungsverluste an der Oberfläche auszuschließen. Zur Anpassung an den Tagesgang der Fördermenge wurden die beiden Felder in Blocks unterteilt. Zur optimalen Auslastung des

PV-Pumpensystemen empfehlen die Autoren den Blattflächenindex (gesamte Blattfläche einer Pflanze bezogen auf ihre Standfläche) auf der Gesamtanbaufläche durch gestaffelte Pflanztermine ganzjährig konstant zu halten. Die Autoren entschieden sich für einen Hochbehälter zur kurzzeitigen Wasserspeicherung, um den Anlagendruck konstant zu halten und um zu vermeiden, daß die Pflanzen im Falle der alternativen Speicherung im Boden ein unnötig großes Wurzelwerk zur Erschließung dieser Wassermenge bilden müssen. Eine Verringerung der Wassergabe auf 60 und 40% der optimalen Menge erbrachte durch die damit verbundene Ertragsminderung keine Verbesserung der Wasserausnutzung durch die Pflanzen.

3.2.8 ERGO Industries Corporation, U.S.A

Die Firma ERGO Industries installierte 1986 auf einer Gemüsefarm in Willow Creek, Kalifornien ein PV-Bewässerungssystem für ein 0,46 ha großes Erdbeerfeld. *Girard, K. 1988*, ein Mitarbeiter der Firma, beschreibt das System in einer bezüglich der Bewässerungstechnik grundlegenden Arbeit. Das PV-Pumpensystem bestand aus einem 360 W_p Solargenerator mit passiver Nachführung, welcher über einen 700 W DC-Motor eine trocken aufgestellte Zentrifugalpumpe antrieb oder alternativ eine Tauchkolbenpumpe mit einem büstenlosen DC-Motor. Durch die Nachführung wurde die Fördermenge der Zentrifugalpumpe von 17,5 auf 30,1 m³/d erhöht, der Systemwirkungsgrad stieg dabei von 1,7 auf 2,1%. Durch elektronische Lastanpassung erreichte die Tauchkolbenpumpe einen maximalen Systemwirkungsgrad von 4,2%.

Oberflächenwasser wurde in einen 3 m hohen Hochtank gepumpt. Aus dem Hochbehälter wurde das Wasser in ein Tropfbewässerungssystem eingespeist, welches zur Vermeidung von Druckverlusten mit großen Rohrquerschnitten ausgelegt war. Zur Erhöhung der Verteilgenauigkeit wurden die Tropfschlauchlängen halbiert, indem diese beidseitig vom zentralen Zuleitungsrohr abzweigten. Die Höhe des Hochbehälters wurde auf der Grundlage von Laborversuchen festgelegt, in welchen der Variationkoeffizient der Tropferausbringungsmenge ab einer Druckhöhe von 2,5 m unter 10% lag. Um auch bei den großen Rohrquerschnitten eine ausreichende Durchflußmenge zu erreichen, wurde der Hochbehälter mit einem selbsttätigen Ventil versehen, welches den gesamten Inhalt von 6 m³ in das Rohrnetz einspeiste, sobald der Behälter vollgepumpt war. Die Entleerung erfolgte etwa alle 25 min und führte zu einem Durchfluß von 240 l/min. Probleme traten mit Sand und Algen auf, welche zu einer Verstopfung der Siebfilter nach einer Laufzeit von 1-2 Tagen führten.

Das PV-Pumpensystem kostete 5000 US\$, das Tropfbewässerungssystem mit dem Hochbehälter 3355 US\$. Bei einer zugrunde gelegten Lebensdauer von 10 Jahren errechnete *Girard* jährliche Kosten von 1200-1500 US\$, welche etwa ein Drittel der gesamten Produktionskosten von Erdbeeren ausmachen. Der Autor hält PV-Bewässerungssysteme technisch als geeignet für den Einsatz in Entwicklungsländern, allerdings erkennt er auch einige Restriktionen:

- the bulk of their entire lifetime cost must be paid at the time of purchase
- their useful life exceeds the planning horizon of most villagers and farmers
- the farms and villages that need the technology the most are characterized by a low level of mechanization and technical sophistication and an inability to secure either capital or credit
- they require changes in irrigation practices

3.2.9 Sondela Garden, Südafrika

Gosnell, R.J. 1992, 1993 berichtet über die Ergebnisse einer fünfjährigen sozio-ökonomischen Studie in Sondela Garden, einem 1ha großen Gemüsegarten am Umgeni River (Südafrika), welcher von 46 Zulu-Frauen gemeinschaftlich betrieben wird. Wasser wurde mit Hilfe einer PV-Pumpe vom Fluß in die höher gelegene Gartenanlage gefördert und vermutlich von einer zentralen Entnahmestelle aus per Gießkanne o.ä. in die einzelnen Parzellen getragen. Eine technische Beschreibung des Systems fehlt. Die Wasserkosten betragen bei guter Auslastung des PV-Systems ca. 0,40 Rand/m³ und damit das Vierfache einer Förderung per Dieselpumpe. Bis zum doppelten Wasserpreis entschieden sich bei einer Umfrage alle Nutzer für eine Solarpumpe. Entscheidend für die Bevorzugung der Solarpumpe war die schwierige Beschaffung von Diesel.

Der Einsatz der PV-Pumpe führte zu einer Reduzierung der erforderlichen Arbeitszeit um 50%. Die eingesparte Zeit kam in den meisten Fällen (64%) dem Haushalt und den Kindern zugute, 43% der Frauen dehnten die Gartenarbeit aus und nur 9% nutzten die Zeit, um ein Einkommen zu erzielen d.h. es wurden keine Rücklagen zur Finanzierung der Pumpe gebildet.

Neben Diebstahl und Vandalismus wurden die hohen Investitionskosten als ein Haupthemmnis bezüglich der Verbreitung von PV-Pumpsystemen identifiziert: „...it is an inherently high risk option as expensive equipment is necessarily placed in the open with little natural protection.“ Es wird deshalb ein Finanzierungsmodell vorgeschlagen, bei welchem das öffentliche Stromversorgungsunternehmen die Anlage finanziert und im Gegenzug Stromgebühren entsprechend eines geeigneten Tarifs erhebt.

3.2.10 BMFT, Deutschland

Im Rahmen des BMFT-Vorhabens „Einsatz der Photovoltaik im bundeseigenen Bereich“ wurden ab 1989 ca. 50 netzferne Photovoltaikanwendungen im Agrarbereich implementiert, darunter auch PV-Pumpsysteme für die Bewässerung. Grundlagenuntersuchungen wurden unter wissenschaftlicher Leitung von Prof. Fett (Universität Siegen) auf der landwirtschaftlichen Versuchstation „Limburgerhof“ der BASF durchgeführt. Der Praxiseinsatz erfolgte an 12 Standorten unter Leitung von Dr. Sourell (FAL Braunschweig).

3.2.10.1 Grundlagenuntersuchungen

Als Grundlage zur Auslegung von solaren Bewässerungsanlagen wurde das Gesamtsystem Solargenerator/Inverter/Motor/Pumpe/Bewässerungsanlage/Pflanze in ein mathematisches Modell gefaßt und anhand von Labor- und Freilandversuchen verifiziert. Hierzu liegen drei Dissertationen (Müller, H.-P. 1992; Krukelmann, E. 1994; Müller, S. 1995) und zahlreiche Publikationen vor (s. Tab. 4). Im dreijährigen Freilandversuchen wurden Parzellen mit einer Gesamtfläche von 2,5 ha bewässert (580W_p, Aquasol 50, 10m). Untersucht wurden die Kulturen Mais, Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrüben und Gemüse. Im Lauf der Versuchsjahre wurden Möglichkeiten zur Energie- und Kosteneinsparung identifiziert und umgesetzt. Hierzu zählt der Ersatz eines Hochbehälters durch Direkteinspeisung des Wassers unter Nutzung der Wasserspeicherkapazität des Bodens. Während der Sommermonate arbeitete das System durch die Übereinstimmung von Pflanzenwasserbedarf und Pumpenleistung quasi selbstregelnd. Ganzjährig betrachtet wurde eine Anlagenauslastung von 50% erreicht. Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ergab Wasserkosten von 0,40DM/m³. Es wird deshalb der Anbau von Kulturen mit hoher Wertschöpfung empfohlen. (Fett, F.N. 1994, 1995; Heyland 1997)

3.2.10.2 Praxiseinsatz

Zur Sammlung von Praxiserfahrungen wurden PV-Pumpsysteme als Demonstrationsanlagen mit meßtechnischer Begleitung bei insgesamt 12 landwirtschaftlichen und gärtnerischen Betrieben im Raum Braunschweig, Darmstadt und Freising in einem Leistungsbereich zwischen 50 und 1500 W_p installiert (**Tabelle 7**). Ziel der Untersuchungen war die „...Erarbeitung von Auswahlkriterien für den Einsatz in Bewässerungsanlagen sowie die Funktionssicherheit und Leistung der Einzelkomponenten“.

Tabelle 7: Kennwerte der BMFT Demonstrationsanlagen

Projekt	Fläche ha	PV-Leistung W _p	Wasserkosten DM/m ³
Gemüse	0,25	2 x100	15
Gemüse	2,5	1400	29
Gemüse	1,2	1040	4
Baumschule	2,0	1440	2
Baumschule	1,5	1484	0,4
Himbeeren	1	530	28
Erdbeeren	1	742	1
Erdbeeren	2,5	910	1
Obst	1	312	?
Kleingarten	0,048	100	?
Kleingarten	0,1	90	?
Kleingarten	0,04	53	?

Die Wasserkosten zeigten eine weite Spanne zwischen 0,42 und 29 DM/m³, welche auf die unterschiedliche Auslastung der Anlagen zurückzuführen war. Es mußten Speichersysteme vorgesehen werden, da die Gärtner aus pflanzenbaulichen Gründen nicht während der Mittagszeit bewässern wollten.

Als Problembereiche wurden angegeben: Diebstahlsicherung, Versicherung sowie die Funktionssicherheit von Pumpe und Wechselrichter. Die eingesetzte Bewässerungstechnik wurde wie folgt beurteilt: „...[es] steht zwar mit der Tropfbewässerung ein funktionsfähiges Verfahren zur Wasserverteilung bereit, aber der Kapitalbedarf für kleine Anlagen mit bis zu 10000 DM/ha läßt keinen großflächigen Einsatz erwarten. Ein Übergang zum Kleinregnerinsatz ist zu untersuchen (Sourell, H. 1994).“

3.2.11 ISMA, Italien

Marsili, A. 1995 beschreibt den Einsatz eines PV-Pumpsystems (3kW_p, 4,8-9m³/h, 28-18m) zur Beregnung von Luzerne mittels stationärer Regner auf einer Versuchstation des Istituto Sperimentale per la Meccanizzazione Agricola (ISMA), Rom. Im Vordergrund stand die pflanzenbauliche Fragestellung nach der optimalen Bewässerungsmenge, welche anhand von 10 berechneten Parzellen à 70m² untersucht wurde. Die Ergebnisse zeigen, daß auch unter der instationären Betriebscharakteristik einer PV-Pumpe eine Bewässerung über Regner möglich ist. Allerdings war das System mit einer installierten Generatorleistung von 43kW_p/ha derart überdimensioniert, daß sich eine Übertragung der Ergebnisse auf die Praxis verbietet.

3.2.12 VINCA, Jugoslawien

Stojanovic, M. 1995 beschreibt den Einsatz eines PV-Pumpsystems zur Bewässerung einer 1,8 ha großen Aprikosenplantage in Becej, Jugoslawien. Ein Solargenerator mit einer installierten Leistung von 504 W_p betreibt vier nicht näher beschriebene „flow jet pumps“ zur Förderung einer täglichen Wassermenge von 60 m³ aus einem nahe gelegenen Kanal unter direkter Einspeisung in eine Tropfbewässerungssystem. Die Aprikosenbäume haben einen Standraum von 4 x 6 m. Zur besseren Standraumnutzung werden in den ersten drei Jahren zwischen den Reihen Erdbeeren gepflanzt. Die Anlage ist in fünf Blöcke unterteilt, zwei für Aprikosen und drei für Erdbeeren. Es wurden insgesamt 8784 m Bewässerungsschlauch mit Aufsatztropfern verlegt. Nach kurzer Betriebserfahrung kommen die Autoren zu der Schlußfolgerung: „(PV)... Irrigation systems are very usefull for applications in small crop field (1-10 ha) and for remote areas not connected to the electrical grid.“

3.2.13 DLR, Deutschland

In nicht weiter beschriebenen Feldtests zur PV-Bewässerung identifizierte Bucher, W. 1996 ein Verbesserungspotential bei den Tropfern von Mikrobewässerungsanlagen. In Laborversuchen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurden deshalb unterschiedliche Bauarten auf ihre Druckabhängigkeit - auch im niedrigen Druckbereich unter 1bar - untersucht. Die Ausflußrate wies innerhalb der Tropfer-Chargen teilweise eine erhebliche Varianz auf, so daß eine Klassierung der Tropfer empfohlen wurde, d.h. eine manuelle Auswahl von Tropfern mit gleichem Ausflußverhalten. Darüber hinaus wurde eine Gliederung der Anlage in Teilabschnitte empfohlen, um bei geringer Einstrahlung durch Absperrung von Teilsträngen einen Mindestdruck in der restlichen Anlage aufrecht

zu erhalten sowie bei hoher Einstrahlung den Druck zur Spülung von Teilsträngen kurzfristig zu erhöhen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wurde jedoch nicht in der Praxis evaluiert

3.2.14 KFA Jülich und Universität Hohenheim, Deutschland /AEA Cairo, Ägypten

Müller, J. 1997 beschreibt die Bewässerung einer 1,7ha großen Dattel/Zitrusplantage mit einer PV-betriebenen Tropfbewässerungsanlage ($530W_p$, $50m^3/d$, 8m) auf einer Versuchstation an einem Wüstenstandort in Ägypten. Sämtliche Anlagenkomponenten wurden an die Niederdruck-Charakteristik des PV-Pumpsystems durch folgende Maßnahmen angepaßt: Verzicht auf einen Hochbehälter, großvolumiges Rohrnetz, überdimensionierter Filterquerschnitt und Gleichdruck-Düngereinspeisung. Durch den Einbau von nivellierten Steigrohren bleibt das Rohrnetz ständig unter Wasser, womit Phasen ungleichmäßiger Wasserverteilung durch Flutung und Entleerung entfallen.

Die Auswertung der Lastkennlinie zeigte, daß der Solargenerator seitens der Lieferfirma um mehr als 25% überdimensioniert war (*Müller, J. 1998*). Im praktischen Betrieb zeigten sich standortspezifische Probleme: der Generatorwirkungsgrad sank durch rasche Verstaubung und die Filter mußten aufgrund der hohen Algenfracht des verwendeten Oberflächenwassers häufig rückgespült werden. Es wurden deshalb Versuche unternommen, die Algen mit einem großflächigen Langsamsandbettfilter aus dem Bewässerungswasser zu entfernen (*Rollinger, S. 1999*).

3.2.15 GTZ Eschborn, Deutschland

Im Rahmen des Pilotprojekts *Ressourcenschonende Bewässerung durch photovoltaische Pumpsysteme* erprobt die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) in unterschiedlichen Projektländern PV-Bewässerungssysteme unter Feldbedingungen. 1998 gingen die ersten Anlagen in Äthiopien und Chile in Betrieb (*Hahn, A. 1998*).

3.2.15.1 GTZ, Deutschland/Centro de Energias Renovables Universidad da Tarapacá, Chile

Schmidt, R. 1998 beschreibt die ersten drei im Rahmen des GTZ-Projektes in Chile realisierten PV-Bewässerungssysteme. Die installierten Solargeneratorleistungen liegen zwischen $0,33$ und $1,76 kW_p$ und die Wasserfördermengen zwischen 8 und $35 m^3/d$. Die drei Anlagen arbeiten nach dem gleichen Prinzip: eine Tauchpumpe mit gekapseltem AC-Motor fördert Wasser aus einem Tiefbrunnen in einen Hochbehälter in ca. 2 m Höhe über Feldniveau. Aus dem Hochbehälter wird das Wasser kontinuierlich in ein Tropfbewässerungssystem zur Versorgung von Gemüsekulturen eingespeist. Durch den Hochbehälter wird der Druck im Tropfbewässerungssystem konstant gehalten. Dadurch wird auch bei Verwendung von nicht druckkompensierten Tropfern eine zeitlich gleichmäßige Wassermenge ausgebracht.

Zur Einspeisung von Düngern wurden Versuche mit einer Kolbendosierpumpe unternommen, welche ebenfalls mittels Solarenergie betrieben wurde (*Huerfano-Belisamo, C.F. 1999*). Die PV-Pumpsysteme ersetzen Diesel- bzw. Benzinpumpen, welche in Trockenaufstellung im Brunnenschacht betrieben wurden und vor jeder Inbetriebnahme entlüftet werden mußten. Darüber hinaus stellten die Betriebs- und Schmierstoffe eine erhebliche Verschmutzungsgefahr für die Brunnen dar (*Heitkämper, K. 1999, 1999*).

3.2.15.2 GTZ, Deutschland/Bureau of Agriculture and Natural Resources, Äthiopien

Hahn, A. 1999 beschreibt ein PV-Pumpsysteme (330-420 W_p, 6-10 m, 20-24 m³/d) zur Bewässerung in Baumschulen im Rahmen eines GTZ-Projekts zur Rehabilitation von Forstbaumschulen. Das Wasser wird in einem Hochbehälter zwischengespeichert. Die Wasserverteilung erfolgt aufgrund der geringen Lohnkosten teilweise manuell mit Gießkannen.

3.3 Ökonomie

Werden PV-Pumpsysteme zur Bewässerung eingesetzt, gelten andere ökonomische Maßstäbe, als bei der Trinkwasserversorgung, wo Wasser eine Überlebensfrage darstellt und „um jeden Preis“ gefördert werden muß. Bei der PV-Bewässerung müssen die Wasserbereitstellungskosten durch den landwirtschaftlichen Mehrerlös gedeckt werden: *„...the cost of water delivered must be less than the value of the benefits obtained by the use of the irrigation water, either through improved yields or by enabling a second (or different) crop to be grown...and not simply shown to be comparable with possibly uneconomic diesel engines (Wright, D.E. 1981).“*

Obwohl diese Erkenntnis recht früh gewonnen wurde, werden ökonomische Aspekte erst um Jahre später in den Arbeiten zur PV-Bewässerung berücksichtigt. *Hart, P.R. 1985* verleiht diesem Umstand folgendermaßen Ausdruck: *„...in concentrating the effort of its [PVP] development so almost exclusively in the refinement of system efficiency...[results] that there is now a large number of most virtuous systems available which no enduser can afford.“*

Als Maßstab zur ökonomischen Beurteilung von PV-Pumpsystemen gibt die Mehrzahl der Autoren die spezifischen Wasserbereitstellungskosten an, etwa in US\$/m³. Um die Angaben der verschiedenen Publikationen vergleichen zu können, wurden die Werte unter Berücksichtigung der jeweiligen Förderhöhe auf das hydraulische Äquivalent (m⁴) umgerechnet und in Bild 3 als US\$/m⁴ über der Zeitachse aufgetragen.

Es wurden jeweils die Tief- und Hochpreis-Szenarien aufgenommen, getrennt nach den Kategorien „Theorie“ und „Praxis“. Obwohl dem Vergleich verschiedener Projektergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Datenbasis und Berechnungsweise mit großer Vorsicht zu begegnen ist, lassen sich bestimmte Tendenzen aufzeigen. Bei den theoretischen Arbeiten sind die Wasserkosten innerhalb der letzten 10 Jahre mit Werten um 1,5 US\$/m⁴ mehr oder weniger konstant geblieben. Das kann bedeuten, daß die Inflationsrate durch

sinkende Solarzellenpreise kompensiert wurden. Auffallend ist der Unterschied zwischen theoretischen und praktischen Arbeiten. Während die Tiefpreis-Szenarien mit 0,6 bis 5,6 US¢/m⁴ noch in der gleichen Größenordnung liegen, reichen die Hochpreise bedingt durch schlechte Auslastung bis zu 64,5 US¢/m⁴ (Sourell, H. 1994). Eine ökonomische Analyse der PVP-Trinkwasserversorgung (Posorski, R. 1994) zeigt, daß auch bei guter Anlagenauslastung und gleicher Berechnungsweise, große regionale Unterschiede in den Wasserbereitstellungskosten bestehen - verursacht durch unterschiedliche wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Als Beispiel wurden die Wasserbereitstellungskosten eines 2 kWp PV-Pumpsystems in Jordanien und Argentinien mit 1,5 bzw. 0,6 US¢/m⁴ in **Bild 4** aufgenommen. Während Posorski selbst für Hochpreisbedingungen in Argentinien die Wirtschaftlichkeit des PV-Systems gegenüber einem Dieselpumpbetrieb nachweisen konnte, hält Branscheid, V. 1997 den Einsatz im Sudan aufgrund einer theoretischen Betrachtung in einer Studie der FAO für unwirtschaftlich: "Solar energy for pumping water in northern Sudan is financially uncompetitive to diesel or hand powered pumps, even though it is financially attractive on its own when considering very low lifts (<3m)."

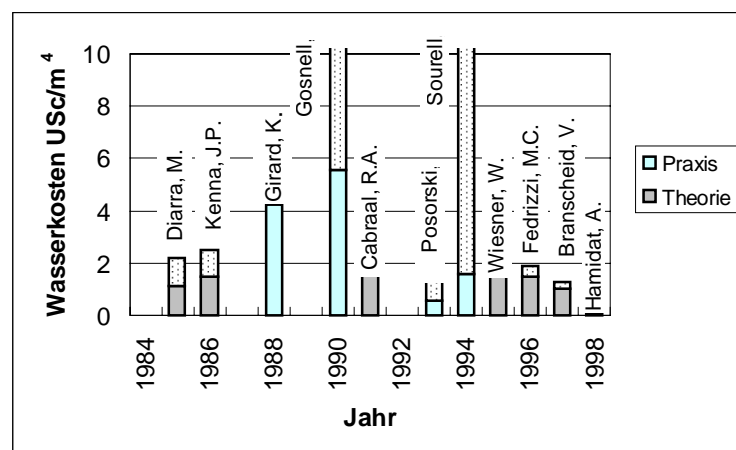


Bild 4: Wasserbereitstellungskosten

Offensichtlich besteht bezüglich der ökonomischen Bewertung der PV-Bewässerung heute noch eine ähnliche Diskrepanz wie fünf Jahre zuvor, als die beiden folgenden Zitate veröffentlicht wurden: "Kleine photovoltaischen Anlagen haben ihre prinzipielle Eignung als Basisstromversorgung für...Bewässerung nachgewiesen (BMFT-Journal 1992)" und "These systems [PVP] were considered only for rural water supply applications as they are not considered suitable for community irrigation on account of their limited capacity (Chaurey, A. 1993)."

3.4 Nutzerakzeptanz

Als einziger Autor befaßte sich Gosnell, R.J. 1992/93 in wissenschaftlicher Weise mit den sozio-ökonomischen Auswirkungen der Einführung eines PV-Bewässerungssystems. Da

die Datenbasis somit recht dürftig ist, werden im folgenden sämtlichen Hinweise welche zur Nutzerakzeptanz zu finden waren, als Zitat aufgeführt.

Die Bedeutung der Akzeptanz bei den Nutzern oder gar deren Verhaltensänderung wurde bereits bei den ersten Felderprobungen von PV-Pumpsystemen erkannt: *"In some communities, certain traditions are associated with water. Scientists must respect these traditions...(Roger, J.A. 1982)"* oder *„[Farmers have to be] willing to adapt agricultural techniques to solar pump outputs (Fraenkel,P.L. 1982).“*

Auch Jahre später ist der Wissensstand über soziale Aspekte noch gering: *"It is rather difficult to say something on the social and cultural acceptability of solar pumps, as until now very little experience is available on this aspect...Obviously, solar pumps are alien elements in rural areas, representing a very high imported technology. The best chance to succeed is given in situations, where irrigation is a familiar technique and a certain industrial infrastructure is already existing. (Rentsch, U. 1987)*

Höhere Anforderungen an die Fähigkeiten der Systemplaner sowie die Management-Qualitäten der Farmer werden durch die PV-Bewässerungssysteme gestellt: *"... bedarf es eines angepaßten Entwurfs der verschiedenen Systemkomponenten, beginnend beim Solar-generator über Stromumformung (AC/DC), Elektromotor, Pump- und Rohrleitungssystem, Bewässerungsanlagen bis hin zu den pflanzenbaulichen Anbaumaßnahmen (Fett, F.N. 1990)"* oder *"...daß ein bestimmter Mindestaufwand für die Betreuung der Anlage unverzichtbar ist. Dies fordert eine sonst nicht üblich Mitarbeit und Identifikation der Benutzer. Felderfahrungen zeigen, daß auf diesen Umstand frühzeitig Rücksicht genommen werden muß (Bucher, W. 1996).“*

Einige Aussagen aus Praxisprojekten belegen die stellenweise bereits erfolgte Nutzerakzeptanz: *"The...design was well received by the farmers who in general encountered little difficulty in using this systems (Pallett, R.G. 1982)."* oder *"According to the owner of the nursery, the solar pumping system runs satisfactorily. The solar irrigation system could be handled by the farmer after a short introduction (Holleman, B. 1993)."* oder *"Der Betriebsleiter beurteilte die Anlage als funktions- und betriebssicher sowie ausreichend dimensioniert (Sourell, H. 1993)."* oder *"Die Gärtner akzeptierten die Anlagen und unterstützten die Arbeiten sehr (Sourell, H. 1994)."*

Hoffman, S. 1991 sieht in einer Studie über eine PV-Trinkwasserversorgung gar politische Einflüsse von größerem Ausmaß voraus: *"It is argued that PV technology can allow the hemisphere to reduce its technological dependence on the West and can be better adapted over time to Southern socio-technical needs...PV technology represents an alternative to the inherent tendencies toward social centralization of conventional systems of electrical support. The technology is capable of modification in scale and interconnection can be scaled to fit social needs, and thereby deployed to preserve rather than disrupt modes of social organization."*

4 SCHLUßFOLGERUNGEN

Aus den ausgewerteten Publikationen lassen sich unter Wichtung ihrer Praxisrelevanz folgende Schlußfolgerungen für die Gestaltung von PV-Bewässerungssystemen ableiten:

- Im Unterschied zur Trinkwasserversorgung mißt sich die Wirtschaftlichkeit der PV-Bewässerung am erwirtschafteten landwirtschaftlichen Mehrerlös.
- Der Einsatz der PV-Bewässerung sollte sich auf Dauerkulturen oder durchgängige Fruchtfolgen in ariden Klimaten beschränken, um eine hohe Anlagenauslastung und damit geringe Wasserbereitstellungskosten zu erreichen.
- Kulturen mit hoher Wertschöpfung sind zu bevorzugen (Obst, Gemüse, Gewürze etc.).
- Die Plantagengröße sollte 1-3 ha nicht übersteigen, um im kleinen Leistungsbereich bis 4 kWp konkurrenzfähig gegenüber Dieselantrieben zu bleiben. Aus dem gleichen Grund ist die Verwendung von Oberflächenwasser mit geringer Förderhöhe zu bevorzugen.
- Aufgrund ihres geringen Wasserbedarfs und relativ geringen Betriebsdruckes sollten Tropfbewässerungssysteme zum Einsatz kommen. Beregnung und Oberflächenbewässerung scheiden aus, da verlustarme Systeme im ersten Fall einen konstanten Betriebsdruck und im zweiten Fall eine konstante Fördermenge voraussetzen.
- Zur Einsparung von Investitionskosten und Verlängerung der effektiven täglichen Pumpenlaufzeit sollte direkt, d.h. ohne Hochbehälter, in das Tropfbewässerungssystem eingespeist werden.
- Sämtliche Komponenten des Tropfbewässerungssystems sind unter dem Aspekt der Senkung des Betriebsdrucks auszulegen. Die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung muß auch bei wechselnden Druckverhältnissen gewährleistet sein.
- PV-Bewässerung stellt erhöhte Anforderungen an Kenntnisse und Fähigkeiten der Nutzer.
- Die potentielle Nutzergruppe findet sich im kleinbäuerlichen Bereich. Es sind Kreditprogramme zur Finanzierung der Anlagen erforderlich. Die Frage der Diebstahlsicherung bzw. Versicherung ist zu klären.

5 FORSCHUNGSBEDARF

Die Datenbasis zur photovoltaischen Bewässerung ist relativ gering. Obwohl die PV-Bewässerung relativ häufig in der Fachliteratur erwähnt wird, wurden bislang lediglich aus 15 unabhängigen Projekten Ergebnisse aus der Praxis veröffentlicht. Folglich besteht noch

ein großer Forschungsbedarf zur nachhaltigen Einführung von PV-Bewässerungssystemen in die landwirtschaftliche Praxis. Nachfolgend werden einige Problembereiche aufgeführt:

- Die bekannten Praxisprojekte sind bis auf wenige Ausnahmen inzwischen abgeschlossen. Durch eine Nachevaluierung sollte die Nachhaltigkeit dieser Projekte, bzw. die Gründe ihres Scheiterns untersucht werden.
- Durch die Kontaktaufnahme zu geeigneten nationalen und internationalen Organisationen und Forschungseinrichtungen sollte nach weiteren PV-Bewässerungsprojekten recherchiert werden, deren Ergebnisse bislang nicht in der wissenschaftlichen Fachliteratur veröffentlicht wurden („graue Literatur“).

Wurden bislang zumindest die technischen Aspekte der solaren Bewässerung als genügend bearbeitet betrachtet, ergibt sich bei genauerer Analyse selbst hier noch Forschungsbedarf auf Labor- und Versuchstationsebene :

- Im Zuge der PV-Trinkwasserversorgung lag bislang der Schwerpunkt der Entwicklung auf Tiefbrunnensystemen mit relativ großer Förderhöhe. Für die PV-Bewässerung werden überwiegend low-lift Pumpen zur Förderung von Oberflächenwasser benötigt. Solche Pumpen müssen für den PV-Antrieb entwickelt bzw. optimiert werden.
- Bislang wurden konventionelle Tropfbewässerungsanlagen mit PV-Pumpen kombiniert. Die instationäre Betriebscharakteristik eines PV-Pumpensystems erfordert jedoch die Entwicklung von speziellen Niederdruck-Tropfbewässerungssystemen einschließlich geeigneter Filter und Düngereinspeisungsvorrichtungen.
- Da Tropfbewässerungssysteme nicht in allen potentiellen Einsatzländern lokal zur Verfügung stehen, sollte die Eignung alternativer Niederdruck-Bewässerungssysteme (z.B. Tonrohr-Unterflurbewässerung, Bubbler, Gefäßbewässerung) untersucht werden.

Weitere Fragen bezüglich der Ökonomie, der Wasser- und Energieeinsparung sowie des Nutzerverhaltens lassen sich nur im Einsatz unter Praxisbedingungen klären:

- PV-Systeme sind nur energiesparend, wenn sie ausgelastet werden. Tropfbewässerungssysteme sind nur wassersparend, wenn die Wasserverteilung auf dem Feld gleichmäßig und zur rechten Zeit erfolgt. PV-Bewässerungssystemen sind deshalb nicht a priori „ökologisch“. Durch Ökobilanzen sollte die ökologische Wertigkeit im praktischen Einsatz untersucht werden.
- Ökonomische Gesamtbetrachtungen vom Brunnenbau bis zum vermarkteten landwirtschaftlichen Produkt sollten die Konkurrenzfähigkeit der PV-Bewässerung gegenüber anderen relevanten Produktionsmethoden klären.
- Die Wasserbeschaffung sowie die Unterhaltung bewässerter Hausgärten ist in vielen potentiellen Einsatzländern eine Frauendomäne. In soziologischen Studien ist des-

halb die Auswirkungen von PV-Bewässerungssystemen auf das Sozialgefüge unterschiedlicher Gesellschaftsformen zu klären.

- PV-Bewässerungssysteme stellen erhöhte Anforderungen an die Betreiber. Dieses Anforderungsprofil ist zu spezifizieren, als Grundlage für Ausbildungsmaßnahmen.
- Potentielle Zielgruppe für PV-Bewässerung sind in der Regel kapitalschwache Kleinbauern. Trotz zukünftig fallender Modulpreise und steigender Erdölpreise ist die PV-Technik für diese Zielgruppe nicht aus eigener Kraft finanzierbar. Es müssen deshalb innovative Finanzierungs- bzw. Betreibermodelle entwickelt werden.

Abschließend kann festgestellt werden, daß sämtliche Publikationen unter einer spezifischen fachlichen Ausrichtung erstellt wurden, wobei die vielfältigen Fragestellungen der jeweils benachbarten Fachgebiete vernachlässigt wurden. Einzelprojekte stellen zwar wertvolle Fallstudien dar, ihre Aussagefähigkeit ist jedoch sehr stark lokal begrenzt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der PV-Bewässerung ist die Verstärkung interdisziplinäre Forschungsaktivitäten zur simultanen Untersuchung technischen, hydrologischen, pflanzenbaulichen, bodenkundlichen, ökonomischen, ökologischen, soziologischen und politischen Aspekte an unterschiedlichen Standorttypen.

6 LITERATUR

Die Publikationen zur PV-Bewässerung werden im folgenden entsprechend der Kategorien „Übersicht“, „Praxis“, „Theorie“ und „Nennung“ aufgeführt.

6.1 Übersicht

- [1] ANONYM: Small-scale solar-powered pumping systems: the technology, its economics and advancement - main report. UNDP Project Report Nr. GLO/80/003, Halcrow & Partners/Intermediate Technology Publications, London (UK), 1983.
- [2] BARLOW, R., B. MCNELIS u. A. DERRICK: Status and experience of solar PV pumping in developing countries. 10th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Lissabon (POR), 1991, S. 1143-1146.
- [3] FRIEDEL, W. u. K. HAARS: Technologien zur Nutzung regenerativer Energien in Entwicklungsländern - Einzelgutachten photovoltaische Pumpsysteme. Interdisziplinäre Projekt Consult GmbH (IPC), 1987.
- [4] KONER, P.K.: A review of the diversity of photovoltaic water pumping systems. RERIC International Energy Journal 15 (1993) Nr. 2.
- [5] KRÖMEKE, J.: Bewässerung durch photovoltaisch betriebene Pumpsysteme - eine Evaluierung verschiedener Forschungsvorhaben. Diplomarbeit Universität Paderborn, Abteilung Höxter, 1998.
- [6] MCGOWAN, R. u. G. BURRILL: Current developments in photovoltaic irrigation in the developing world. International Conference on Water and Water Policy in World Food Supplies, College Station (USA), 1987, S. 297-302.
- [7] MCNELIS, B.: Solar refrigeration and water pumping for developing countries: an introduction. UK-ISES Conference 28, London (UK), 1982, S. 1-13.
- [8] MÜLLER, J.: Internationaler Sach- und Wissensstand zum Thema Photovoltaische Bewässerung. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn, 1998.
- [9] RENTSCH, U.: Solar photovoltaics for water pumping in the Third World. African Environment 5/6 (1987) Nr. 20-22, S. 68-86.
- [10] STEVENS, Y.: Photovoltaic applications in rural areas of developing countries: a survey of evidence. In: New technologies and development: experiences in "technology blending". Rienner Publishers, Boulder (USA), 1988, S. 151-170.

6.2 Praxis

- [1] ANONYM: Solar pumps raise the level of agriculture in Pakistan. *New Scientist* 90 (1981) Nr. 1257, S. 693.
- [2] AMADO, P. u. D. BLAMONT: Implementation of a solar pump in a remote village in India: economical and socio-cultural consequences. Three years of working experience. 3rd International Conference Energy for Rural and Island Communities, Inverness (UK), 1984, S. 63-69.
- [3] ANONYM: Wasser pumpen mit Sonnenkraft. *sbz-monteur* (1998).
- [4] ASSABGHY, F. u. A. DERRICK: Experiences with a deep well solar powered irrigation system for desert development. 3rd International Conference Energy for Rural and Island Communities, Inverness (UK), 1984, S. 247-254.
- [5] BUCHER, W., O. MAYER u. M. KLEMT: Bewässerungsverfahren für den Einsatz in PV-Pumpensystemen - Messungen an Tropfer- und Minisprinkleranlagen. 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1996, S. 574-578.
- [6] FENTON, D.L., G.H. ABERNATHY, G.A. KRIVOKAPICH u. J.V. OTTS: Operation and evaluation of the Willard solar thermal power irrigation system. *Solar Energy* 32 (1984) Nr. 6, S. 735-751.
- [7] FETT, F.N., H. PFEIFER u. H.P. MÜLLER: Operation of photovoltaic driven water-pumps for field-irrigation in Turkey. International Mediterranean Congress on Solar and other New-Renewable Energy Resources, Antalya (TUR), 1988, S. 1-15.
- [8] FETT, F.N., H. PFEIFER, S. MÜLLER u. H.P. MÜLLER: Operation of photovoltaic driven water-pumps for field irrigation in semiarid zones. 9th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Freiburg (GER), 1989, S. 1-8.
- [9] FETT, F.N., P. MÜLLER u. S. MÜLLER: Einsatz photovoltaisch betriebener Pumpsysteme zur Feldbewässerung. 7. Internationales Sonnenforum, Frankfurt/Main (GER), 1990, S. 827-834.
- [10] FETT, F.N., P. MÜLLER u. S. MÜLLER: Theoretische und experimentelle Untersuchung über Einsatzmöglichkeiten von Solarzellen zur Bewässerung. Statusseminar Photovoltaik, Bad Neuenahr (GER), 1990, S. 50-1-50/23.
- [11] FETT, F.N., K.U. HEYLAND, E. KRUKELMANN u. H. LANG: Umsetzung pflanzenbaulicher Regeln zur Steuerung eines photovoltaisch betriebenen Bewässerungssystems in ein Pflanzenwachstumsmodell. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 5 (1992), S. 193-196.
- [12] FETT, F.N., E. KRUKELMANN, H.P. MÜLLER u. E. TAFFNER: Auslegung von solaren Bewässerungsanlagen. BMFT/BML-Statusseminar, Darmstadt (GER), 1994, S. 117-133.
- [13] FETT, F.N. u. E. TAFFNER: Eine wirtschaftliche Anwendung der Photovoltaik für aride und halbaride Zonen. 9. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1994, S. 572-574.
- [14] FETT, F.N. u. F. LANG: Photovoltaik zur Bewässerung - eine wirtschaftliche Nutzung von Solarzellen im Kilowattbereich. *Spektrum der Wissenschaft* 18 (1995) Nr. 1, S. 16-17, 21.
- [15] FISCHBACH, P.E. u. R.W. MATLIN: Solar cell irrigation. Irrigation Association Annual Technical Conference, Silver Spring (USA), 1978, S. 213-217.
- [16] FROST, J.C.: Field trials of solar water pumps. UK-ISES Conference 28, London (UK), 1982, S. 67-76.

- [17] GIRARD, K.: Photovoltaic drip irrigation. Solar 88: ASES Annual Meeting, Cambridge (USA), 1988, S. 165-170.
- [18] GOSNELL, R.J.: Turning sunshine into water: PV water pumping in South Africa. Waterlines 10 (1992) Nr. 4, S. 22-24.
- [19] GOSNELL, R.J. u. A.A. EBERHARD: Photovoltaic water pumping in developing areas - a case study. Development Southern Africa 10 (1993) Nr. 1, S. 85-100.
- [20] HAHN, A. u. R. SCHMIDT: Photovoltaic water pumps - lessons learned from demonstration and field testing projects supported by GTZ. International Workshop on PV-Water Supply, Marrakesch (MAR), 1998,
- [21] HAHN, A.: Solarpumpen in der Forstwirtschaft. AFZ/Der Wald 22 (1999), S. 1193-1194.
- [22] HEITKÄMPER, K.: Requirements on the management of photovoltaic operated pumping systems for irrigation in the arid North of Chile. Diplomarbeit Universität Hohenheim, 1999.
- [23] HEITKÄMPER, K.: Betriebsmanagement von photovoltaischen Bewässerungssystemen in der chilenischen Atacama-Wüste. Hospitationsbericht GTZ, Eschborn, 1999.
- [24] HEYLAND, K.U., F.N. FETT, H. LANG u. E. KRUKELMANN: Optimierte Verteilung photovoltaisch geförderten Wassers mit Hilfe eines Wachstumsmodells. Pflanzenbauwissenschaften 1 (1997) Nr. 1, S. 1-7.
- [25] HOLLEMANN, B. u. H. SOURELL: Water supply with solar power - photovoltaic pumping system in agriculture. Siphon (1993) Nr. 14, S. 6-12.
- [26] HOLLEMANN, B., H. SOURELL u. C. SOMMER: Photovoltaik in der Landwirtschaft - Nutzung der Sonnenenergie an netz- und hoffernen Standorten. Forschungsreport Ernährung-Landwirtschaft-Forsten 8 (1993), S. 6-8.
- [27] HOPKINSON, R.F.: A photovoltaic powered 20-HP DC/AC irrigation system and a 3-kw nitrogen generator. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego (USA), 1980, S. 115-120.
- [28] HOWES, M.: The potential for groundwater exploitation by solar-powered pumps in Pakistan. Agricultural Administration 16 (1984) Nr. 4, S. 229-248.
- [29] HUERFANO-BELISAMO, C.F.: Optimierung eines photovoltaisch betriebenen Bewässerungssystems in Chile. Diplomarbeit Universität Hohenheim, 1999.
- [30] MARSILI, A. u. P. SERVADIO: Valutazioni sull' irrigazione di soccorso su erba medica effettuata mediante conversione fotovoltaica dell' energia solare. Rivista di Irrigazione e Drenaggio 42 (1995) Nr. 3, S. 35-42.
- [31] MÜLLER, H.P., E. KRUKELMANN u. F.N. FETT: Betriebserfahrungen und Messergebnisse in der Vegetationsperiode 1991 mit der photovoltaisch betriebenen Bewässerungsanlage der Pfalzwerke AG, Ludwigshafen auf der Landwirtschaftlichen Versuchsstation der BASF AG in Limburgerhof. Mud-Workshop (Messen und Demonstrieren), Saarbrücken (GER), 1991, S. 1-181.
- [32] MÜLLER, H.P.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von photovoltaisch betriebenen Pumpsystemen zur Feldbewässerung. Dissertation, Universität-GH Siegen, 1993.
- [33] MÜLLER, J., M. SCHUBERT, S. ALGOHARY, A. HEGAZI u. K. KÖLLER: Solarbetriebenes Tropfbewässerungssystem für Obstplantagen in ariden Regionen. Tropentag Universität Hohenheim, Stuttgart (GER), 1997, S. 19-24.
- [34] MÜLLER, J., K. KÖLLER, S. ALGOHARY u. A. HEGAZI: Solarbetriebene Tropfbewässerung in Ägypten. Landtechnik 53 (1998) Nr. 3, S. 138-139.

- [35] MÜLLER, J., S. ALGOHARY, A. HEGAZI u. K. KÖLLER: Solar powered drip irrigation for orchards in remote areas. 8th International Congress on Agricultural Engineering, Rabat (MAR), 1998, S. 279-287.
- [36] MÜLLER, J., S. ALGOHARY, A. HEGAZI u. K. KÖLLER: Einsatz eines photovoltaisch betriebenen Tropfbewässerungssystems in Ägypten. Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft 33 (1998) Nr. 1, S. 5-20.
- [37] MÜLLER, S.: Einsatzmöglichkeiten von Simulationsmodellen bei der Planung und Steuerung photovoltaisch betriebener Tropfbewässerungsanlagen für die Beispiele Winterweizen und Mais. Dissertation, Universität Bonn, 1995.
- [38] NELSON, C., S. ARAFA u. R. PEARSON: Field test of solar-powered micro-irrigation pump in the village of Basaisa, Egypt. 2nd International Conference Energy for Rural and Island Communities, Inverness (UK), 1982, S. 359-365.
- [39] NORUM, E.M.: Design of a solar powered (photo-voltaic) drip irrigation system. ASES Annual Meeting, Anaheim (USA), 1984, S. 15-17.
- [40] NORUM, E.M. u. D.F. ZOLDOSKE: Design and operation of solar-powered (PV) drip irrigation systems. Arid Lands Today and Tomorrow: International Research and Development Conference, Tucson (USA), 1985, S. 183-187.
- [41] NORUM, E.M. u. D.F. ZOLDOSKE: Adapting irrigation systems to solar based (PV) water supplies. 3rd International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno (USA), 1985, S. 459-464.
- [42] OHEIMB V., R. u. M. STRIPPEL: Die Sonne als Stromquelle. Netzferne Photovoltaikanwendungen in der Landwirtschaft. Landtechnik 48 (1993) Nr. 8/9, S. 416-419.
- [43] OHEIMB V., R., M. STRIPPEL u. M. KALTSCHMITT: Netzferne Photovoltaikanwendungen im Agrarbereich - Einsatzmöglichkeiten, Betriebserfahrungen und Wirtschaftlichkeit. 8. Nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1993, S. 67-81.
- [44] OHEIMB V., R. u. M. STRIPPEL: Photovoltaik-Bewässerung von Feld- und Obstkulturen. Landtechnik 49 (1994) Nr. 3, S. 152-152.
- [45] OHEIMB V., R. u. M. STRIPPEL: Photovoltaikanwendungen im Gartenbau. ZVG-Gartenbau-Report 22 (1996) Nr. 6, S. 26-27.
- [46] OHEIMB V., R. u. M. STRIPPEL: Betriebserfahrungen mit landwirtschaftlichen Photovoltaikanwendungen. Sonnenenergie 23 (1998) Nr. 5, S. 30-35.
- [47] ORTMEIER, B., H. SOURELL u. W. DIRKSMEYER: Eine PV-Anwendung in der Landwirtschaft - Bewässerung einer Baumschulfläche. In: Sonnenenergienutzung in der Hannover Region. Kommunalverband Grossraum Hannover, 1996, S. 92-95.
- [48] ORUM, T. u. F. FRIGGIT: Etude de faisabilité technique et socio-économique de l'insertion d'unités de pompage photovoltaïque de faible puissance destinées à la petite irrigation à partir des eaux de surface au Burkina Faso, Mali, Niger et Sénégal. Ecole Nationale du Genie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF), Ouagadougou (BFA), 1987.
- [49] PALLETT, R.G. u. T.E. BRABBEN: Application and experience of photovoltaic pumps for irrigation in Pakistan. 4th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Stresa (ITA), 1982, S. 125-129.
- [50] ROLLINGER, S.: Optimierung einer solarbetriebenen Tropfbewässerungsanlage für Dauerkulturen in Ägypten. Diplomarbeit Universität Hohenheim, 1999.
- [51] SCHMIDT, R., R. SAPIAIN, C. FLORES, A. TORRES u. A. DIAZ: Sistema de medición y puesta en marcha de sistemas de bombeo fotovoltaico. Congreso Internacional de Energias Sustentables SENESE X, Punta Arenas, 1998, S. 1-8.

- [52] SCHUBERT, M.: Konzeptionierung einer solarbetriebenen Tropfbewässerungsanlage für Dauerkulturen in Ägypten. Diplomarbeit Universität Hohenheim, 1998.
- [53] SOLIANO-PEREIRA, O.L., T.V.M. REIS, M.G.P. FIGUEREDO u. M.A.C. MENDES: A ten-year experience in the use of PV for irrigation, in Brazil. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam (NED), 1994, S. 1961-1964.
- [54] SOMMER, C. u. H. SOURELL: Bewässerung mittels photovoltaischer Wasserbereitstellung. Wissenschaftliches Symposium: Solarenergieforschung in Niedersachsen: Forschungsstand und Perspektiven, Hameln (GER), 1996, S. 1-2.
- [55] SONNENBERG, H. u. H. SOURELL: Anwendung regenerativer Energien in der Landwirtschaft mit Beispielen photovoltaischer Bewässerungssysteme. Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung, Essen (GER), 1995, S. 695-709.
- [56] SOURELL, H., B. ORTMEIER u. F.J. SAUTMANN: Gemüse bewässern mit Solarenergie. Bio-Land (1993) Nr. 5, S. 6-7.
- [57] SOURELL, H. u. B. ORTMEIER: Bewässerung von Gemüse und Sonderkulturen mit Hilfe der Photovoltaik. BMFT/BML-Statusseminar, Darmstadt (GER), 1994, S. 134-148.
- [58] SOURELL, H.: Photovoltaik in der Landwirtschaft. Gemüse 30 (1994) Nr. 7, S. 392-395.
- [59] SOURELL, H., B. ORTMEIER u. B. HOLLEMANN: Photovoltaik-Einsatz in Gartenbau und Landwirtschaft. Report Nr. 217/1994, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig (GER), 1994.
- [60] SOURELL, H. u. B. ORTMEIER: Irrigation of vegetables and special cultures using photovoltaics. Natural Resources and Development 40 (1994), S. 25-41.
- [61] SOURELL, H., B. ORTMEIER u. C. SOMMER: Photovoltaische Pumpsysteme für Bewässerungsanlagen und Weidetränken. 9. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1994, S. 277-282.
- [62] STOJANOVIC, M., L.J. STAMENIC, S. STANKOVIC u. E. MOLNAR: Development of solar mini systems for irrigation in Yugoslavia. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (FRA), 1995, S. 947-949.
- [63] STRIPPEL, M. u. R. OHEIMB V.: Kosten und Nutzung landwirtschaftlicher PV-Anlagen im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsarten. 11. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1996, S. 605-609.
- [64] SULLIVAN, N.W., T.L. THOMPSON, P.E. FISCHBACH u. R.F. HOPKINSON: Management of solar cell power for irrigation. Transactions of the ASAE 23 (1980) Nr. 4, S. 919-923.
- [65] SUTTON, B.G., R.J. STIRZAKER, C.J. DONEY u. S.D. ENGLISH: Solar powered drip irrigation for vegetables. 3rd International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno (USA), 1985, S. 589-593.
- [66] TORRES, A., R. SAPIAIN, R. SCHMIDT, R. OVALLE, G. AYALA u. V. HIDALGO: Bombeo solar para nuevas aplicaciones de riego por goteo. Universidad de Tarapacá, Arica, 1997.
- [67] TORRES, E., R. SCHMIDT, R. OVALLE, C. FLORES, A. TORRES u. A. HUGO ESCOBAR: Implementación de un programa piloto para nuevas aplicaciones de riego tecnificado utilizando bombas solares fotovoltaicas. Congreso Internacional de Energías Sustentables SENESE X, Punta Arenas, 1998.

6.3 Theorie

- [1] AHMED, M.A.H.: Experience with a surface floating PV pumping system: a case study in Khartoum. *Renewable Energy* 4 (1994) Nr. 8, S. 907-910.
- [2] AL-SAGIR, B.E. u. A.M. HASSON: A procedure for minimizing the photovoltaic pumping system in irrigation and leaching applications in the Baghdad area. *Solar & Wind Technology* 7 (1990) Nr. 2/3, S. 139-145.
- [3] BAHAJ, A.S. u. A.S. MOHAMED: Sizing of a photovoltaic pumping system and its storage capacity to meet crop water requirements in remote areas. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam (NED), 1994, S. 1969-1972.
- [4] BAHAJ, A.S., P.A.B. JAMES u. A.S. MOHAMED: An economic feasibility study of achieving cash crops water requirements by PV water pumping in Egypt. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (FRA), 1995, S. 1067-1070.
- [5] BEHRENDORF, M.J. u. B.G. SUTTON: Photovoltaics can power certain pumps for drip irrigation of vegetables. Conference on Agricultural Engineering, Hawkesbury (AUS), 1988, S. 260-263.
- [6] BOTROS, R. u. P. BORGO: Demonstration and field testing of photovoltaic technologies in some applications having potential for use in Egypt. In: *Advances in desert and arid land technology and development*. Harwood Academic Publishers, Chur (CH), 1991, S. 273-287.
- [7] BRANSCHIED, V.: Cost of solar pumping in the Sahel. In: *Irrigation Investment Papers*. Food and Agriculture Organization (FAO), Rom (ITA), 1997, S. 102-107.
- [8] BUCHER, W.: PV-Bewässerungssysteme als technische Herausforderung. 8. Internationales Sonnenforum, Berlin (GER), 1992, S. 759-764.
- [9] COWELL, P.A. u. J.K. AGARWALLA: On the use of solar energy for water pumping. International Conference on Rural Development Technology: an Integrated Approach, Bangkok (THA), 1977, S. 287-300.
- [10] DIARRA, M., N. DIARRA, J.P. KENNA, B. MCNELIS u. C. TRAORE: Development and application of an evaluation methodology for photovoltaic pumps: proposal for a global standard. 6th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, London (UK), 1985, S. 585-589.
- [11] EVANS, E.P., P.L. FRAENKEL, E.M. MITWALLY u. M.W. DUFFY: The development of a practical mathematical simulation model for the evaluation of small scale solar photovoltaic pumping systems. 7th International Solar Energy Society Congress, Brighton (UK), 1982, S. 1140-1145.
- [12] FEDRIZZI, M.C., I.L. SAUER u. R. ZILLES: Economic analysis of photovoltaic and gasoline pumping systems. *Renewable Energy* 8 (1996) Nr. 1/4, S. 424-427.
- [13] FRAENKEL, P.L., M.A.S. MALIK u. D.E. WRIGHT: The UNDP World Bank solar pump project - preparing for phase II. 4th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Stresa (ITA), 1982, S. 74-80.
- [14] FRAIDENRAICH, N. u. H.S. COSTA: Procedure for the determination of the maximum surface which can be irrigated by a photovoltaic pumping system. *Solar & Wind Technology* 5 (1988) Nr. 2, S. 121-126.
- [15] GIUFFRIDA, M. u. G. PARODI: Solar photovoltaic pumping system for irrigation in a developing country. 8th Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Perth (AUS), 1984, S. 1681-1685.

-
- [16] HAFNER, E. u. G. MAROTZ: Bewässerung mit Solarenergie, Kopplung von Tropfbewässerung und Photovoltaik. *Wasserwirtschaft* 80 (1990) Nr. 5, S. 217-226.
- [17] HAFNER, E. u. G. MAROTZ: Irrigation using solar energy, combination of drip irrigation and photovoltaic pump systems. *Natural Resources and Development* 34 (1991), S. 108-126.
- [18] HELIKSON, H.J., D.Z. HAMAN u. C.D. BAIRD: Pumping water for irrigation using solar energy. *Florida Energy Extension Service* (1990) Nr. 63, S. 1-9.
- [19] HOFFMANN, G., H. NÖTZOLD, U. OHRT, H. DRIESEN u. S.H. NASUTION: Photovoltaic power systems and their use within the project Solar Village Indonesia. 5th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Athens (GRE), 1984, S. 294-297.
- [20] KARIM, A.N.M. u. M.M. RAHMAN: Cost-effective analysis on the suitability of photovoltaic pumping systems in Bangladesh. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 30 (1993) Nr. 2, S. 177-188.
- [21] KATZMAN, M.T. u. R.W. MATLIN: The economics of adopting solar energy systems for crop irrigation. *American Journal of Agricultural Economics* 60 (1978) Nr. 4, S. 648-654.
- [22] KENNA, J.P. u. B. MCNELIS: Solare Bewässerungspumpen: Wirtschaftlichkeit und Anwendungspotential. In: *Photovoltaik - Strom aus der Sonne*. Verlag C.F.Müller, Karlsruhe (GER), 1986, S. 121-134.
- [23] LAWRENCE, W., B. WICHERT u. D. LANGRIDGE: Design of photovoltaic pumping systems for small scale irrigation. *EuroSun 96 - 10. Internationales Sonnenforum*, Freiburg (GER), 1996, S. 766-769.
- [24] MALHOTRA, K.S. u. M. KAUR: Selection of appropriate solar pump for agricultural applications. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America (AMA)* 20 (1989) Nr. 1, S. 45-48.
- [25] MANKBADI, R.R. u. S.S. AYAD: Small-scale solar pumping: the technology. *Energy Conversion and Management* 28 (1988) Nr. 2, S. 171-184.
- [26] MATLIN, R.W.: PV-powered microirrigation systems. *Sun II - International Solar Energy Society (ISES) Silver Jubilee Congress*, Atlanta (USA), 1979, S. 1754-1758.
- [27] MAYER, O. u. J. MÜLLER: Photovoltaik-Pumpen und ihre Anwendung in Bewässerungssystemen. *Wasserwirtschaft* 86 (1996) Nr. 4, S. 190-193.
- [28] MAYER, O. u. J. MÜLLER: Alternative sources of energy - solar energy pumps and their use in irrigation systems. *Natural Resources and Development* 47 (1998), S. 44-53.
- [29] MCGOWAN, R. u. G. BURRILL: Current developments in photovoltaic irrigation in the developing world. *International Conference on Water and Water Policy in World Food Supplies*, College Station (USA), 1987, S. 297-302.
- [30] RAJPUT, T.B.S. u. A.L.N. KUMAR: Renewable and non-renewable resources in irrigation pumping. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America (AMA)* 14 (1983) Nr. 3, S. 41-44.
- [31] SAID, S.A.M.: Preliminary assessment of small-scale solar powered water pumping systems application in the Sudan. *Energy Conservation and Use of Renewable Energies in the Bio-Industries*, London, 1980, S. 449-454.
- [32] SAID, S.A.M.: A case study of solar photovoltaic powered irrigation in the northern Sudan. *Sun-world* 13 (1989) Nr. 2, S. 51-55.

-
- [33] TREHAN, S.K. u. H. Y. MOHAN RAM: Prospects of solar energy utilisation for pumping water for irrigation in India. Symposium on Rainwater and Dryland Agriculture, New Delhi (IND), 1982, S. 131-138.
- [34] WHIFFEN, H.J.H., D.Z. HAMAN u. C.D. BAIRD: Photovoltaic-powered water pumping for small irrigation systems. Applied Engineering in Agriculture 8 (1992) Nr. 5, S. 625-629.
- [35] WRIGHT, D.E.: The use of photovoltaic pumps for small-scale irrigation in the developing world: a progress report on the UNDP/World Bank project. 3rd E.C. Photovoltaic Solar Energy.

6.4 Nennung

- [1] ANONYM: Moroccan solar pumping system: a case history. *Water Well Journal* 40 (1986) Nr. 3, S. 79-80.
- [2] ANONYM: Windkraft und Solarenergie haben gute Chancen in der Dritten Welt. *BMFT-Journal* (1992) Nr. 1, S. 7.
- [3] ANONYM: Solar pumps - field test of photovoltaic driven water pumps. *Bine-Projekt-Info* 5 (1995), S. 1-4.
- [4] ANONYM: Zwischenbericht zum Abschluss der Phase 1. Programm zur Einführung photovoltaischer Pumpen (PVP-Programm), Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn (GER), 1996.
- [5] ABERNATHY, G.H. u. V.V. RISSER: Photovoltaic power for water pumping. ASAE Paper Nr. 82-2525, American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St. Joseph (USA), 1982.
- [6] ADURODIJA, F.O., I.O. ASIA u. M.A.C. CHENDO: Market potentials of photovoltaics systems in Nigeria. ISES Solar World Congress, Taejon, 1997,
- [7] ALTAF, S. u. I.H. SHAH: Solar energy applications for hilly areas of Pakistan. *Journal of Rural Development and Administration* 24 (1992) Nr. 2, S. 85-97.
- [8] ARROUF, M. u. P.C. GOEDEL: Photovoltaic pumping system for induction machine with hysteresis array current control. 4th Africon Conference in Africa (AFRICON '96), Stellenbosch (RSA), 1996, S. 853-855.
- [9] AVARITSIOTIS, J. u. E. VAZEOS: PV pumping for irrigation. 2nd Photovoltaic Demonstration Projects Contractors' Meeting, Brüssel (BEL), 1988, S. 147-159.
- [10] BAHADORI, M.N.: Solar water pumping energy sources. *Solar Energy* 21 (1978) Nr. 4, S. 307-316.
- [11] BALASUBRAHMANYAM, V.R. u. R.S. CHAURASIA: Irrigating betelvine plantations the right way. *Indian Horticulture* 36 (1992) Nr. 4, S. 16-26.
- [12] BARLOW, R., B. MCNELIS u. A. DERRICK: Solar pumping: an introduction and update on the technology, performance, costs, and economics. Intermediate Technology Publications/The World Bank, Washington (USA), 1993.
- [13] BASU, P., K. MUKHOPADHYAY, T. BANERJEE, S. DAS u. H. SAHA: Field trial of rural solar photovoltaic system. 4th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Stresa (ITA), 1982, S. 203-209.
- [14] BAUM, V.A. u. A.G. BABAIEV: Development of a solar pump for lift irrigation purposes. *Annals of Arid Zone* 15 (1976) Nr. 3, S. 137-145.
- [15] BENTLEY, R.W.: A manually-positioned concentrating photovoltaic solar water pump. UK-ISES Conference 28, London (UK), 1982, S. 103-107.
- [16] BHATTACHARJEE, C.R.: Photovoltaic system for mini irrigation and rural electrification in tribal areas. *Irrigation Power* 42 (1985) Nr. 3, S. 271-273.
- [17] BUCHER, W.: Testergebnisse eines PV-Pumpen-Projektes in Ägypten. 7. Internationales Sonnenforum, Frankfurt/Main (GER), 1990, S. 841-846.

- [18] BUCHER, W.: Die Kombination von modernen Bewässerungsverfahren und PV-Versorgung. 1995.
- [19] BUCHER, W.: Solar pumping systems. Renewable Energy Sources, Pliezhausen (GER), 1995, S. 1-16.
- [20] BURGESS, P. u. P. PRYNN: Solar pumping in the future: a socio-economic assessment. CSP Economic Publications, Cardiff (UK), 1985.
- [21] BURTON, R.: Solar thermal water pumping. In: Solar energy in agriculture. Elsevier Science Publishers, Amsterdam (NED), 1991, S. 415-424.
- [22] CABRAAL, R.A., T.G. KENNEDY, J. HOELSCHER, T. HART, L. SYLLA, M. DICKO u. R.H. ANNAN: Photovoltaic-powered water pumping in Mali. 10th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Lissabon (POR), 1991, S. 1158-1161.
- [23] CHAUREY, A., P.M. SADAPHAL u. D. TYAQI: Experiences with SPV water pumping systems for rural applications in India. Renewable Energy 3 (1993) Nr. 8, S. 961-964.
- [24] CRAVEIRO ARAGAO, P.M., A. SOUZA DE CARVALHO u. J. ANHALT: Photovoltaic water pumps for small communities in the semi-arid northeastern region of Brazil. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam (NED), 1994, S. 2016-2019.
- [25] ERDIL, E.G.: Can PV-pumping be an alternative to traditional methods of irrigation in North Cyprus. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam (NED), 1994, S. 1967-1968.
- [26] FRAENKEL, P.L.: Water lifting devices. Food and Agriculture Organization (FAO), Rom (ITA), 1986.
- [27] GIRARDIER, M.P. u. M.G. CLEMOT: Design and performance of a simple solar pump for lift irrigation purposes. Annals of Arid Zone 15 (1976) Nr. 3, S. 146-154.
- [28] GROVES, R.P.: Solar water pumping on the sustainable farm. Journal of Sustainable Agriculture 1 (1990) Nr. 1, S. 55-58.
- [29] HAMIDAT, A., A. HADJ ARAB, F. CHENLO u. M.A. ABELLA: Performance and costs of the centrifugal and displacement pumps. 5th World Renewable Energy Congress (WREC 98), Florenz (ITA), 1998, S. 1651-1654.
- [30] HAMOUDA, C., H.G. WAGEMANN, R. HANITSCH u. H.E. SIEKMANN: Cost analysis of photovoltaic water pumping systems used in arid and semi-arid zones in Algeria. 10th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Lissabon (POR), 1991, S. 1111-1114.
- [31] HAMZA, A.A. u. A.Z. TAHA: Performance of submersible PV solar pumping systems under conditions in the Sudan. Renewable Energy 6 (1995) Nr. 5/6, S. 491-495.
- [32] HART, P.R.: At last: photovoltaic pumping at affordable cost. 6th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, London (UK), 1985, S. 571-575.
- [33] HÄNEL, A., L. HOANG-GIA, F. KABORÉ u. B.S. SY: The performance of PV pumping systems in the CILSS-regional solar programme: one year of monitoring results on 10 systems. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice (FRA), 1995, S. 482-485.
- [34] JAIN, B.C.: Food-energy production system - technological intervention through renewable sources of energy. 2nd International Symposium on Food-energy Nexus and Ecosystem, New Delhi (IND), 1988, S. 430-439.
- [35] KENNA, J.P. u. B. GILLET: Solar water pumping: a handbook. Intermediate Technology Publications, London (UK), 1985.

- [36] KONDOH, S. u. T. HARA: Evaluation of photovoltaic pumping system by tracking array (test case of tracking array application system). Congress of the International Solar Energy Society - Clean and safe energy forever, Kobe (JAP), 1990, S. 364-368.
- [37] LACEWELL, R.D., D.L. LARSON, R.C. GRIFFIN, G.S. COLLINS u. W.A. LEPORI: Alternative sources of energy for pumping. In: Energy and water management in western irrigated culture. Westview Press, Boulder (USA), 1986, S. 257-290.
- [38] LAMM, F.R., T. TROOIJEN, G.A. CLARK, D.H. ROGERS u. M. ALAM: SDI and Electrotechnologies. Kansas State University, <http://www.mif.org/sdieletech.html>, 1997.
- [39] LANGRIDGE, D., W. LAWRENCE u. B. WICHERT: Development of a photo-voltaic pumping system using a brushless D.C. motor and helical rotor pump. Solar Energy 56 (1996) Nr. 2, S. 151-160.
- [40] LUMSDAINE, E.: The potential of hybrid solar irrigation systems for desert applications. International Conference on the Applications of Science and Technology for Desert Development, Cairo (EGY), 1979, S. 301-329.
- [41] LYSEN, E.H.: Output and costs of solar photovoltaic pumps. International Conference and Summer Workshop on the Physics of Non-Conventional Energy Sources, Trieste (ITA), 1985, S. 563-586.
- [42] MAKUKATIN, S.: Wasser und Strom für die Wüste. 10. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1995, S. 631-635.
- [43] MALHOTRA, K.S.: Potential for pumping irrigation water with renewable sources of energy in Indian arid zone. Energy in Agriculture 3 (1984) Nr. 3, S. 245-251.
- [44] MANN, H.S.: Solar energy utilization for arid zone development. Annals of Arid Zone 15 (1976) Nr. 3, S. 129-136.
- [45] MARSILI, A.: L'energia solare per gli impieghi irrigui. Irrigazione 26 (1979) Nr. 4, S. 5-11.
- [46] MATLIN, R.W. u. M.T. KATZMAN: Assessing solar photovoltaic energy systems for crop irrigation. Water Resources Bulletin 15 (1979) Nr. 5, S. 1308-1317.
- [47] MAYER, O., W. BECHTELER u. W. BUCHER: Einsatz neuer Pumpentypen in photovoltaischen Pumpensystemen. 8. Nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1993, S. 628-632.
- [48] MAYER, O.: Eignungskriterien für Pumpensysteme. BMFT/BML-Statusseminar, Darmstadt (GER), 1994, S. 94-106.
- [49] MCGOWAN, R.: Field tests of solar PV water pumps in Botswana. ASES Annual Meeting, Boulder (USA), 1986, S. 317-319.
- [50] MILON, J.W.: The economics of adopting solar energy systems for crop irrigation: comment. American Journal of Agricultural Economics 61 (1979) Nr. 3, S. 571-572.
- [51] MOSALAM SHALTOUT, M.A.: Availability of solar energy with different tracking modes in the western oases of Egypt. In: Advances in desert and arid land technology and development. Harwood Academic Publishers, Chur (CH), 1991, S. 289-306.
- [52] MOUSTAFA, S., H. ZEWEN u. A. AL-KANDARIE: Solar-powered food-water-power system for arid areas. Energy Sources 13 (1991) Nr. 1, S. 5-18.
- [53] MUHAIDAT, A.: Decentralized photovoltaic water pumping systems. Renewable Energy Research Centre, Royal Scientific Society, Amman (JOR), 1992.

- [54] NHANDO, E.W.: Power sources for pumping. 2nd Intermediate Seminar on Irrigation Farming in Kenya and Zimbabwe, Harare (ZIM), 1990, S. 385-391.
- [55] NORMAN, C.E. u. R.E.I. THOMAS: Field trial and characterization of a low-head photovoltaic pumping system. 14th Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada (SESCI 88), Ottawa (CAN), 1988, S. 105-109.
- [56] OPIE, R.: Water pumping with solar power. World Water 12 (1989) Nr. 9, S. 79-80.
- [57] OSMAN, Z. u. M.A. EL-SHIBINI: Technical and economical study of a small-scale photovoltaic pumping system in Egypt. 2nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 83), Athens (GRE), 1983, S. 1-2.
- [58] PALFY, M.: Multipurpose solar equipment. ISES Solar World Congress, Taejon, 1997,
- [59] POSORSKI, R. u. R. SCHMIDT: Nutzung photovoltaisch betriebener Trinkwasserpumpen in Entwicklungsländern - Projekterfahrungen des PVP-Programms und Perspektiven. 8. Nationales Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein/Kloster Banz (GER), 1993, S. 177-187.
- [60] PRYNN, P.: Solar energy for irrigation. Quarterly Energy Review: The World 3 (1986) Nr. 1, S. 16-21.
- [61] PYTLINSKI, J.T.: Solar energy installations for pumping irrigation water. Solar Energy 21 (1978) Nr. 4, S. 255-262.
- [62] ROGER, J.A.: Water and photovoltaics in developing countries. Solar Cells 6 (1982) Nr. 3, S. 295-308.
- [63] SCHOLZ, V. u. F.A. PEUSER: Photovoltaik-Pumpen in der Landwirtschaft. Sonnenenergie & Wärmetechnik 7 (1998) Nr. 1, S. 40-43.
- [64] SCHULZ, H.: Einsatz der Photovoltaik im ländlichen Raum. Landtechnik 44 (1989), S. 402-406.
- [65] SINGHAL, O.P.: Energy alternatives for irrigation in India. Urja 21 (1987) Nr. 2, S. 125-128.
- [66] SONTI, P.V.: Overview of criteria for selection of photovoltaic pump storage systems. 20th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Miami Beach (USA), 1985, S. 450-453.
- [67] STARR, M.R. u. B. MCNELIS: Recent improvements in photovoltaic pumping technology. 8th Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Perth (AUS), 1984, S. 864-868.
- [68] SWANSON, G.J.: Solar pumps/getting off the ground. Water Well Journal 40 (1986) Nr. 3, S. 74-78.
- [69] TAKETANI, K.: Application of solar cells for agriculture. Tokyo (JAP), 1987, S. 89-96.
- [70] THIGLE, P.M. u. S.D. GORANTIWAR: Studies on feasibility of solar photovoltaic system for pumping irrigation water. International Agricultural Engineering Conference, Bangkok (THA), 1992, S. 1207-1211.
- [71] TREHARNE, R.W., D.E. MOLES, M.R. BRUCE, C.K. MCKIBBEN u. B.K. REIN: Nitrogen fertilizer production by solar energy. Sun II - International Solar Energy Society (ISES) Silver Jubilee Congress, Atlanta (USA), 1979, S. 1-5.
- [72] VERSPIEREN, B.: The application of photovoltaics to water pumping and irrigation in Africa. 3rd E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Cannes (FRA), 1981, S. 439-445.
- [73] WARD, P.R.B. u. W.G. DUNFORD: Solar powered groundwater pumping for medium heads. Harare Symposium - Challenges in African hydrology and water resources, Harare (ZIM), 1984, S. 249-258.

-
- [74] YAHYA, H.N., M. MUSA, A.S. SAMBO u. A.T. ATIKU: Photovoltaic water pumping option for community water supply at Kalgo village in Sokoto state. 5th World Renewable Energy Congress (WREC 98), Florenz (ITA), 1998, S. 1840-1843.
- [75] ZAKI, A.M. u. M.N. ESKANDER: Photovoltaic pumping system using current source induction motor drive. 2nd World Renewable Energy Congress, Reading (UK), 1992, S. 552-556.