

# Photovoltaik- anlagen mit passiver Nach- führung und V-Trog Konzen- tratoren

von Fritz Harald Klotz

## Überblick

Passive Nachführung und V-Trog Konzentration können die spezifische Energieausbeute (Energieertrag pro installierter Leistung) von Photovoltaikanlagen in Europa etwa 60% bis 100% (je nach Standort und Anlagenkonfiguration) steigern. Durch den Einsatz besonders einfacher Technik können damit die Energiegestehungskosten gegenüber konventionellen, festorientierten Photovoltaikanlagen um ca. 20% bis 30% gesenkt werden.

Dieser Beitrag stellt das Konzept der passiv nachgeführten Photovoltaikanlage mit V-Trog Konzentratoren (PV V-Trog) vor. Der Stand der Technik wird anhand der Betriebsergebnisse von realisierten Anlagen in Widderstall/Schwäbische Alb und in Manfredonia/Apulien dargestellt. Das technische und wirtschaftliche Potential dieser Anlagentechnik wird für verschiedene Standorte und Systemvarianten aufgezeigt und diskutiert.

Passive tracking and V-trough concentration (PV V-trough) can enhance the array yield (energy yield per installed power) of photovoltaic systems in Europe by 60% to 100% (dependent on site and configuration). By the use of simple techniques, energy costs can be decreased by 20% to 30% relative to conventional fixed-tilt PV systems.

This contribution presents the passively tracked PV V-trough concentrator concept. The state-of-the-art of this technology will be demonstrated by results from two systems in Widderstall/Schwäbische Alb and Manfredonia/Apulien. The technical and economic potential of this system concept will be discussed for different climates and system configurations.

lungskonzentration – die Anwendung des sogenannten V-Trog Konzeptes. Damit sich Kostenvorteile gegenüber der konventionellen PV Anlagentechnik ergeben, ist die Verwendung einer einfachen, robusten und langlebigen Technik bei Nachführung, Reflektoren und Strukturen von entscheidender Bedeutung.

Thermohydraulische Nachführsysteme bieten die Möglichkeit, einfache und zuverlässige Nachführsysteme zu bauen. Der thermohydraulische Antrieb (THA) ist energieautark und selbstregelnd, d.h. er benötigt weder eine Stromversorgung noch eine Steuerelektronik. Er bezieht seine Antriebsenergie direkt von der Sonne und richtet sich selbsttätig nach ihr aus.

Die Zielsetzung der bisherigen Projekte auf dem Gebiet der V-Trog Technologie ist die Entwicklung und Demonstration eines Anlagentyps, der gekennzeichnet ist durch eine Nord-Süd ausgerichtete horizontale bzw. hangparallele Drehachse [1] [2]. Eine hangparallele Drehachse reduziert die Anlagenhöhe und ermöglicht den Bau von großen modularen Trageinheiten. Diese lassen sich gut vormontieren und mit Kränen schnell installieren. Anwendungsgebiete sind sowohl zentrale als auch dezentrale PV Anlagen von einigen 10 kW<sub>p</sub> bis in den multi-MW<sub>p</sub> Bereich.

In einer Ökonomiebetrachtung werden die Randbedingungen (Kostentwicklung der PV, Standardisierung, Vereinfachung etc.) diskutiert, die zu Kostenvorteilen von über 30% gegenüber konventionellen festorientierten PV Anlagen führen.

## 1. Einleitung

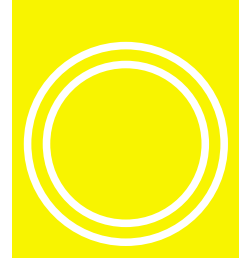
Wenn man firmenpolitisch motivierte Preisabschläge bei exponierten Projekten außer Acht läßt, liegen die PV-Modulpreise bei kristallinem Silicium bei ca. 8 – 9 DM/W<sub>p</sub>. Damit repräsentieren sie etwa 50% – 60% der aktuellen PV-Anlagenkosten. Aufständigung und Fundamente dagegen verursachen etwa 10% der Kosten. Nachführung verursacht einen höheren Aufwand bei der Aufständigung, ermöglicht jedoch eine höhere spezifische Energieausbeute. Dasselbe gilt für die Konzentration: Standard PV-Module erlauben eine gewisse Strah-

## 2. PV V-Trog Konzept

Das PV V-Trog Konzept läßt sich für nahezu alle frei aufgeständerten PV Anlagen anwenden. Am ZSW wurde zunächst ein Konzept für mittlere bis große PV Anlagen entwickelt, das sowohl für zentrale als auch für dezentrale Anwendungen geeignet ist.

### 2.1 V-Trog Konzentratoren

Im PV V-Trog werden konventionelle PV Flachmodule eingesetzt. Der V-Trog Konzentratoren wird durch zwei Flach-



spiegelbänke gebildet, die seitlich der Photovoltaik mit einem Anstellwinkel von  $60^\circ$  angebracht sind (Abbildung 1). Daraus ergibt sich ein geometrischer Konzentrationsfaktor von  $C = 2$ . Die Bestrahlungsstärke in Modulebene hängt von der Reflektorqualität und dem Direktstrahlungsanteil ab. An klaren Tagen werden mit guten Reflektoren (Reflexion  $> 90\%$ ) Bestrahlungsstärken bis zu  $1900 \text{ W/m}^2 - 2000 \text{ W/m}^2$  erreicht.

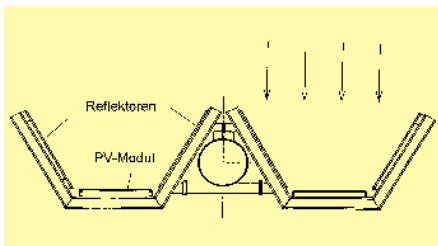


Abbildung 1: Querschnitt des PV V-Troges. Die Tragstruktur ist hier als Stabtragwerk realisiert. Der Massenschwerpunkt liegt in der Drehachse.

## 2.2 PV Modul und Verschaltung

Bei der PV V-Troganlage Widderstall wurde ein sehr hoher Parallelisierungsgrad bei der elektrischen Verschaltung der Photovoltaik realisiert, um Fehlanpassungsverluste durch gegenseitige Beschattung und Nachführfehler zu reduzieren. Der modulare Aufbau der Anlage steigert die Anlagenverfügbarkeit, da bei eventuellen Wartungs- oder Reparaturmaßnahmen nur das jeweilige Teilsystem betroffen ist.

- Die PV V-Troganlage Widderstall besteht aus 9 modularen Teilsystemen mit jeweils  $2,72 \text{ kWp}$  installierter PV Modulleistung (ohne Konzentration).
- Jeder Teilgenerator wird aus 2 parallelen Strängen à 16 PV Module gebildet.
- Die Module selbst bestehen aus 4 parallelen Zellreihen von je 15 Zellen.
- Jeder Teilgenerator ist über einen Wechselrichter mit  $3,5 \text{ kW}$  Nennleistung ( $110 \text{ V}$ ,  $35 \text{ A}$ ) mit dem Netz gekoppelt.

Die Modultemperaturen erreichen im V-Trog Konzentratoren Spitzenwerte von ca.  $70^\circ\text{C}$  bei Stabtragwerken (freier Luftanströmung) und bis zu  $90^\circ\text{C}$  bei nahezu geschlossenen Flächentragwerken. Fortschritte in der Modul-La-

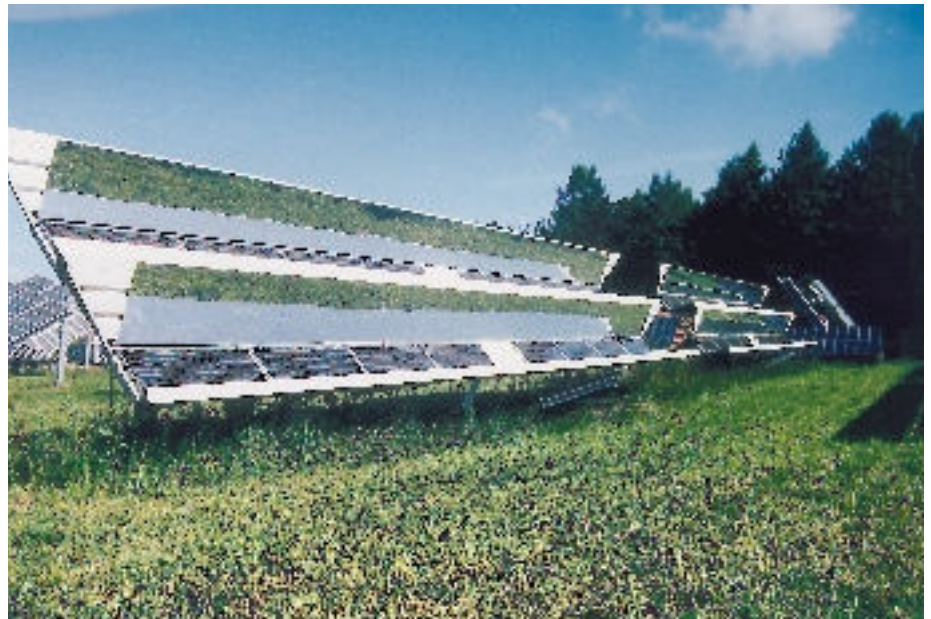


Abbildung 2: PV V-Trog mit Blech-Flächentragwerk, das aus Trapezblechen mit der Dicke von  $0,625 \text{ mm}$  gefertigt ist. Die Stützen sind seitlich eingezogen, um das Biegemoment zu reduzieren. Der thermohydraulische Antrieb ist in der Mitte der Struktur angebracht.

miniertechnik [3] haben die anfänglichen Probleme von Lamineintrübungen [4] bei hoher Temperatur und Bestrahlungsstärke gelöst. Man kann deshalb davon ausgehen, daß bei einer sorgfältig konzipierten PV V-Troganlage keine derartigen Degradationserscheinungen während der Anlagenlebensdauer eintreten.

## 2.3 Tragstruktur

In der Entwurfsphase der Projekte wurden verschiedene Materialien (Aluminium, Stahl, Holz, Kombination Holz+Stahl) und Konstruktionsarten in Betracht gezogen. Nach der Auswertung der Entwürfe wurden zwei Varianten realisiert, die sich nun in der Testphase befinden.

Blech-Flächentragwerke verbinden Form (V-Trog Querschnitt) und Funktion (Statik) zu einer Einheit und haben damit das Potential, den Materialeinsatz zu reduzieren (Abbildung 2). Ob der Energieinhalt und die Kosten dadurch im selben Maße sinken, hängt stark von der Verarbeitungs- und Verbindungstechnik (Nieten, falzen) ab. Eine Trageinheit ist  $14 \text{ m}$  lang und  $2,75 \text{ m}$  breit. Die eingezogenen Stützen haben einen Abstand von  $8 \text{ m}$ . Problematisch bei dieser Konstruktion ist die Wärmeabfuhr, aufgrund der kleinen Öffnungen am Trogboden-

blech. Eine völlige Öffnung des Trogbodens würde die Torsionssteifigkeit beeinträchtigen.

Bei der Stabtragwerk-Konstruktion übernimmt ein Träger die statische Funktion und Quertraversen bilden den V-Trog Querschnitt zur Aufnahme der PV Module und Reflektoren. Klassische Verbindungstechnik (Schrauben, Schweißen) erleichtert hier die Fertigung und Montage (Abbildung 3). Eine Trageinheit hat eine Fläche von  $13,6 \text{ m} \times 2,75 \text{ m}$  bei einer Stützweite von ca.  $14 \text{ m}$ . Die Trageinheiten können über die Stützen gekoppelt werden. Jeweils 2 Trageinheiten sind zu einem Teilsystem zusammengefaßt. Die Luftanströmung der PV Module ist beim Stabtragwerk optimal gelöst und deutlich günstiger als bei festorientierten PV Anlagen, die in größeren zusammenhängenden Flächen aufgeständert sind.

## 3. Thermohydraulische-Solarnachführung

Es gibt zwei Arten von thermohydraulischen Solarnachführungen. Das eine arbeitet nach dem Schwerkraftprinzip – Gewichtsverlagerung durch thermohydraulische Verschiebung einer Flüssigkeitssäule, das andere nach dem hydrostatischen Prinzip – thermohydraulische Bewegung eines Stellzylinders.



Abbildung 3: PV V-Trog mit Stabtragwerk. Der Träger mit Quertraversen hat eine Stützweite von über 14 m. Die Aperturfläche beträgt 75 m<sup>2</sup> (27,2 m Länge, 2,75 m Breite). Der thermohydraulische Antrieb sitzt am Rand der Struktur.

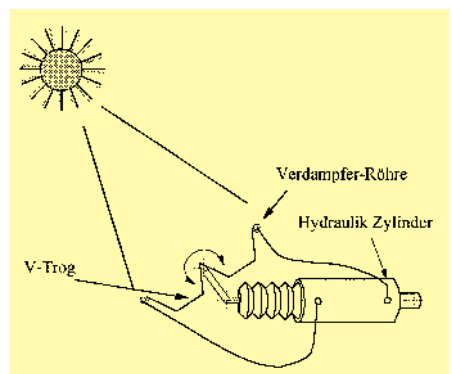
Systeme nach dem Prinzip der Gewichtverlagerung sind seit etwa 10 Jahren kommerziell verfügbar. Aufgrund ihrer kleinen Stellkräfte sind sie sehr windanfällig und ungenau, so daß sie sich nur für kleine Systeme mit Flachmodulen eignen. Vorteilhaft ist, daß dieses System ohne Dichtungselemente auskommt. Thermohydraulische Solarnachführungen mit Stellzylindern wurden erstmals in den USA kommerzialisiert. Mehrere einachsige nachgeführte Großanlagen mit PV Flachmodulen wurden dort seither realisiert, z.B. eine 300 kW<sub>p</sub> Anlage Austin/Texas, eine 500 kW<sub>p</sub> Anlage in Kerman/Kalifornien u. a.. Bei all diesen Anlagen sind die Strukturkosten (incl. Nachführung) mit denen von festorientierten Anlagen vergleichbar. Dies bedeutet, daß die erzielten Nachführungszugewinne sich in eine unmittelbare Reduktion der kWh Kosten niederschlagen. Allgemein wurde aber die Unzuverlässigkeit und Ungenauigkeit der Antriebe kritisiert [5] [6]. Zudem ist die Verwendung von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen als Medium inakzeptabel. Am ZSW wurden seit 1989 diese kommerziellen Antriebe untersucht; dabei fielen während des ersten Winters 50% der Antriebe witterungsbedingt aus.

Seit 1990 wird die thermohydraulische Solarnachführung am ZSW weiterentwickelt. Diese Arbeiten führten zu entscheidenden technologischen Verbesserungen, die die Anwendung dieses Nachführprinzips auch auf anderen Gebieten attraktiv macht. Eine Beschreibung des Nachführkonzeptes und der erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der thermohydraulischen Solarnachführung soll in den folgenden Abschnitten gegeben werden.

### 3.1 Aufbau und Wirkungsweise der Thermohydraulik

Der thermohydraulische Antrieb besteht aus zwei Verdampferrohren und einem doppelwirkenden Zylinder (Abbildung 4). Die Verdampferrohren sind jeweils an einer Seite der nachzuführenden Fläche angebracht. Als Arbeitsmedium dient eine leicht zu verdampfende Flüssigkeit. Der Druck in jeder Verdampferrohre ist direkt von der Temperatur abhängig. Ist die nachzuführende Fläche nicht korrekt zur Sonne ausgerichtet, so werden die Verdampferrohren unterschiedlich stark bestrahlt und es entsteht ein Temperatur- und damit auch einen Druckunterschied, der den Kolben des Zylinders bewegt. Der Kolben bewegt die Fläche so lange, bis Kräftegleichgewicht und damit eine gleichmäßige Bestrahlung beider Röhren gegeben ist. Auf diese Weise wird die Fläche völlig selbsttätig und ohne externen Energieeinsatz der Sonne nachgeführt.

Abbildung 4: Schematischer Aufbau der thermohydraulischen Solarnachführung



### 3.2 Statik und Kinematik

Der thermohydraulische Antrieb ist im Prinzip über die Parameter Hub und

Kolbenfläche für nahezu jede Anwendung frei skalierbar. Eine Standardisierung innerhalb weniger Baureihen soll jedoch eine Vereinfachung der Planung, Projektierung und Fertigung der Antriebe bringen. Bisher wurden Nachführsysteme (Struktur und Antrieb) realisiert, die von Funktionsmodellen mit 0,5 m<sup>2</sup> Fläche bis zu PV V-Trog Anlagen mit 84 m<sup>2</sup> Teilsystem-Aperturfläche reichen (Abbildung 5).



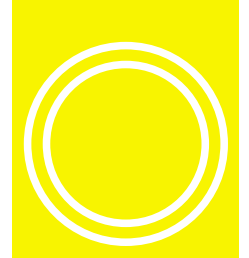
Abbildung 5: PV V-Trog Funktionsmodell mit einer Fläche von 0,5 m<sup>2</sup>

### 3.3 Nachführverhalten im Vergleich zu konventionellen Nachführsystemen

Bei klarem Himmel wird eine Nachführungsgenauigkeit von ca. 1° erreicht. Bei leichter Bewölkung kann der Fehlwinkel etwas größer sein. Bei starker Bewölkung können Fehlwinkel auftreten, die größer als 5° sind. Die eingestrahlte Energie in diesen speziellen Situationen ist jedoch so gering, daß die dadurch verursachte Ertragsminderung kaum ins Gewicht fällt. Im Vergleich dazu ist die technische Verfügbarkeit kalendarischer Nachführungen erfahrungsgemäß unter 100%, bei einem deutlich höheren Überwachungs- und Wartungsaufwand.

Derzeit wird eine neue Generation von Richtreflektoren entworfen, die mit Hilfe von abbildenden Segmenten zu einer weiteren deutlichen Verbesserung der Nachführungsgenauigkeit und Dy-





namik führen sollen. Eine Anwendung der thermohydraulischen Solarnachführung bei höher konzentrierenden Systemen und in der Tageslichttechnik wird derzeit vorbereitet [7].

### 3.4 Inbetriebnahme, Wartung, Reparatur und Lebensdauer

Nach der Installation des Stellzylinders und der beiden Absorberröhren mit Richtreflektoren ist das System betriebsbereit. Das System wird an einem klaren Tag feinjustiert. Von diesem Zeitpunkt an bewegt die thermohydraulische Nachführung das System mit dem oben beschriebenen Nachführverhalten über mehrere Jahre hinweg ohne weitere Wartungs- und Reparaturmaßnahmen. Zur Orientierung sei erwähnt, daß sich zur Zeit noch alle 3 Systeme einer Vorgängerversion ohne Wartung in Betrieb befinden, die 1991 installiert wurden.

Betrachtet man das reale Nachführverhalten von kalendarisch gesteuerten Systemen, so ist aus derzeitiger Sicht ohne entsprechende Anlagenüberwachung, Wartung/Reparatur eine technische Verfügbarkeit von 100% über einen Zeitraum von mehreren Jahren unrealistisch.

### 3.5 Investitionskosten

Die geringe Stückzahl von ca. 35 realisierten Antrieben verschiedener Bauweisen läßt noch keine endgültige Angabe über die möglichen Serienproduktionskosten zu. Zur Orientierung seien hier die Prototypenkosten der größten Baureihe (ca. 84 m<sup>2</sup> Aperturfläche) angeführt, deren flächenspezifische Kosten bei optimaler Auslegung der Anlage ca. 60 DM/m<sup>2</sup> betragen. Es wird angenommen, daß eine überarbeitete Version in Serienfertigung günstiger wird.

## 4. PV V-Trog Anlagen

In Europa werden an den Standorten Widderstall und Manfredonia seit mehr als 2 Jahren PV V-Trog Anlagen betrieben. Die Betriebserfahrungen und die erzielten Resultate werden zusammengefaßt dargestellt. In Stuttgart Bad Cannstatt entsteht derzeit die erste gebäudemontierte PV V-Trog Anlage.

### 4.1 Standort Widderstall/Schwäbische Alb

Zu Projektbeginn dieser Anlage, im September 1992, wurden verschiedene Strukturkonzepte entworfen und berechnet. Im Juli 1993 wurde die Produktion gestartet und im September die Erdarbeiten begonnen. Im Mai 1994 wurden die Installationsarbeiten abgeschlossen. Im Juni 1994 wurde die PV V-Trog Anlage in Widderstall offiziell in Betrieb genommen (Abbildung 6) [1]. Ende Juni 1996 wurde die zweijährige Meßphase beendet.

Eine vorläufige Auswertung der Daten der ersten zwei Betriebsjahre (Juli '94 - Juni '96) haben folgende Resultate erbracht:

- Die kommerzielle kalendarische Nachführung (die Referenzeinheit) bereitete bei der Inbetriebnahme einige Schwierigkeiten und zeigte auch Mängel während des Betriebs. Durch ständige Wartungs- und Reparaturmaßnahmen konnten die durch Ausfall bedingten Energieverluste minimiert werden.
- 6 thermohydraulische Nachführungen arbeiten seit der Inbetriebnahme ohne Wartung und Reparatur mit 100% technischer Verfügbarkeit.

- Bei einem thermohydraulischem Antrieb wurde die Stangendichtung durch Eis beschädigt und wurde ausgewechselt. Ein Materialfehler des Kolbenstangenbalgs hatte den Ausfall verursacht.
- Die Standard PV Module im V-Trog Konzentrator zeigen keine Degradationserscheinungen aufgrund erhöhter Einstrahlung und Betriebstemperatur.
- Die Jahresstrahlungsernte der Anlage betrug 1.826 kWh/m<sup>2</sup> (kalendarisch geführtes Referenzsystem).
- Eine Analyse der V-Trog Konzentrator Reflektoren hat gezeigt, daß die Spiegel nach DIN zwar über 90% (500nm) Reflexionsvermögen haben, aber im relevanten Spektralbereich der kristallinen Siliciumzellen (bis 1.200 nm) effektiv nur 72% Reflexion aufweisen. Dies ist im wesentlichen auf den hohen Eisengehalt des Spiegels und seine Dicke von 4 mm zurückzuführen. Bezogen auf die Jahresenergieausbeute bedeutet dies eine Minderung von 10%. Ein neues Reflektorkonzept liegt bereits vor.
- Die durchschnittliche Gleichstrom-Jahresenergieernte betrug:
  - 1.271 kWh/kW<sub>p</sub> = 97% (Gesamtanlage)
  - 1.303 kWh/kW<sub>p</sub> = 100% (kalendarisch nachgeführtes Referenzsystem bei < 100% Verfügbarkeit)

Abbildung 6: PV V-Trog Anlage auf dem ZSW Solartestfeld in Widderstall/Schwäbische Alb. Die Anlage besteht aus 9 Teilsystemen mit je 2,72 kW<sub>p</sub> installierter PV Modulleistung.



- 1.266 kWh/kW<sub>p</sub> = 97,2%  
(thermohydraulisches Einzelsystem)
- 1.323 kWh/kW<sub>p</sub> = 101,5%  
(Maximalwert; thermohydraulisches Einzelsystem)

Zu berücksichtigen ist dabei, daß die tatsächliche Leistung der verwendeten Module ca. 10% unter den Nennleistungsangaben liegt.

- Der Wechselrichterwirkungsgrad lag bei allen Systemen bei ca. 90%.

#### 4.2 Standort Manfredonia/Apulien

Im Januar 1994 wurden zwei thermohydraulisch der Sonne nachgeführte PV V-Trog Systeme (Stahl Stabtragwerke) und ein festorientiertes Vergleichssystem in der ENEA (Nationale Energieagentur Italiens) Testanlage 'Delphos' in Manfredonia/Apulien installiert. Die PV Generatoren und die Datenerfassung sind seit August 1994 in Betrieb. Eine Trageinheit ist mit einem PV Generator von 700 W<sub>p</sub> ausgestattet der über einen 1.500 W Wechselrichter mit dem Netz gekoppelt ist. Auf der zweiten Trageinheit werden verschiedene Modultechniken auf ihre Eignung für den Einsatz im V-Trog Konzentratoren getestet [8].

Die Auswertung der Daten des ersten Betriebsjahres haben folgende Resultate erbracht:

- Die passive thermohydraulische Nachführung hat trotz einiger Stürme mit Windgeschwindigkeiten über 140 km/h 100 % technische Verfügbarkeit erzielt.
- Die Standard PV Module im V-Trog Konzentratoren zeigen bisher keine Degradationserscheinungen aufgrund erhöhter Einstrahlung und Betriebstemperatur.
- Die Jahresstrahlungsernte in Modulebene betrug 2.768 kWh/m<sup>2</sup>.
- Die Jahresenergieernte betrug (Gleichstrom) 2.185 kWh/kW<sub>p</sub>.
- Die Leistungsbemessung der PV Module wurde durch einen Sonnensimulator bestätigt.
- Das V-Trog Konzept erzielte gegenüber der fest installierten Referenzanlage einen Energiezugewinn pro installiertem W<sub>p</sub> von 59 % und bestätigte somit die Erwartungen.

#### 4.3 Standort Stuttgart - Bad Cannstatt

Auf dem Dach des Motorenwerks

eines Automobilunternehmens entsteht derzeit die erste dachintegrierte PV V-Trog Anlage. Die Gestelle sind als Stabtragwerke konstruiert und paarweise miteinander gekoppelt, um die Kosten für die Nachführung zu senken. Die 15 Trageinheiten haben eine Fläche von ca. 14 m x 2,9 m bzw. 12 m x 2,9 m. Die installierte PV Leistung beträgt ca. 27 kW<sub>p</sub>.

Die Energiegestehungskosten können deutlich gesenkt werden, wenn schon bei der Gebäudeplanung die Infrastruktur und die Dachflächen für die solare Nutzung vorbereitet werden.

Bei gebäudeintegrierten Anlagen entstehen folgende potentielle Kostenvorteile gegenüber zentralen Freiland PV Kraftwerken:

- Reduzierung des Landverbrauchs und den damit verbundenen Erschließungsmaßnahmen.
- Einsparung der Fundamente und Erdverkabelung. Kräfteeinleitung in die bestehende Bausubstanz.
- Keine Erdverkabelung (DC- und AC Verkabelung, Erdleiternetz, etc.).
- Vorhandener Netzanschluß.
- Vereinfachung der Anlagenüberwachung über eine bereits bestehende Haustechnik.

### 5. Technisches Potential der PV V-Trog Technologie

Der zweijährige Anlagenbetrieb an zwei unterschiedlichen Standorten hat wertvolle Ergebnisse und Erkenntnisse zur Einschätzung des technischen Potentials der V-Trog Technologie gebracht. So konnte die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der thermohydraulischen Solarnachführung unter Beweis gestellt werden. Zugleich ergaben sich Ansatzpunkte zur weiteren Verbesserung der V-Trog Technologie [9].

#### 5.1 Technische Entwicklungspotentiale bei den Komponenten

Bei der thermohydraulischen Solarnachführung kann in Aussicht gestellt werden, daß weitere Optimierungsmaßnahmen an den Richtreflektoren eine weitere Steigerung der Nachführgenauigkeit und Dynamik der Antriebe bringen wird. Durch eine Verstellvorrichtung an den Gestellen soll in Zukunft der Schwerpunkt der

rotierenden Masse problemlos zentrierbar sein. Dieser Effekt wird sich in einer Steigerung der Energieausbeute von ca. 5% niederschlagen.

Am ZSW werden verschiedenen Reflektor- und Trägermaterialien auf ihre V-Trog Eignung analysiert. Hierbei müssen die optische Eigenschaften gegen die Kosten abgewogen werden. Attraktiv erscheint die Verwendung von sehr einfachen Dünnglasspiegeln (Massenprodukt für den Automobil- und Sanitärbereich) die auf einen geeigneten Träger appliziert werden. Messungen belegen ein Reflexionsvermögen von 92% im relevanten Spektralbereich des kristallinen Siliciums. Strahlungssimulationen ergeben eine Steigerung der jährlichen Einstrahlung in Modulebene um 10%.

#### 5.2 Potential bei Großanlagen (hangparallele Drehachse)

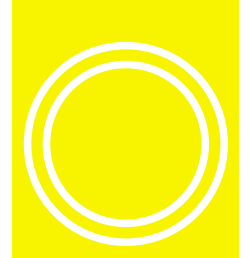
Die Umsetzung der oben erwähnten technischen Entwicklungspotentiale erhöht den Energiezugewinn (pro W<sub>p</sub>) von PV V-Trog Anlagen mit hangparalleler Achse (6° Neigung) auf 58% für Mitteleuropa bzw. auf 84% für Süditalien bzw. den Mittelmeerraum.

#### 5.3 Potential bei Kleinanlagen (Polachsennachführung bzw. Azimutnachführung)

Die gegenwärtige Planung zielt auf die Anwendung der V-Trog Technologie auch bei Kleinanlagen im Bereich von 0,5 kW<sub>p</sub> bis zu einigen 10 kW<sub>p</sub>. Bei diesem Anlagentyp kann die energetisch günstigere Polachsen- oder Azimut-Nachführung angewandt werden, da hier die Anlagenhöhe keine Probleme bereitet. Im Gegensatz zu den seither untersuchten Großsystemen sollen diese PV V-Trog Kleinanlagen ohne schweres Gerät von Hand zu installieren sein.

Die zu erwartende Energieausbeute liegt bei diesen Systemen bei 72% Zugewinn für Mitteleuropa und 100% Zugewinn in Südeuropa. Dieser Anlagentyp eignet sich besonders für kleine dezentrale Anwendungen.

Für Pumpsysteme (Wasserpumpen, Meerwasserentsalzung) ergibt sich ein weiterer Vorteil bedingt durch das konstante Leistungsprofil bei Nach-



führung. Hier wird eine Ertragssteigerung von ca. 115% für Mitteleuropa und 150% für Südeuropa erwartet, gegenüber konventionell festaufgeständerten PV Anlagen .

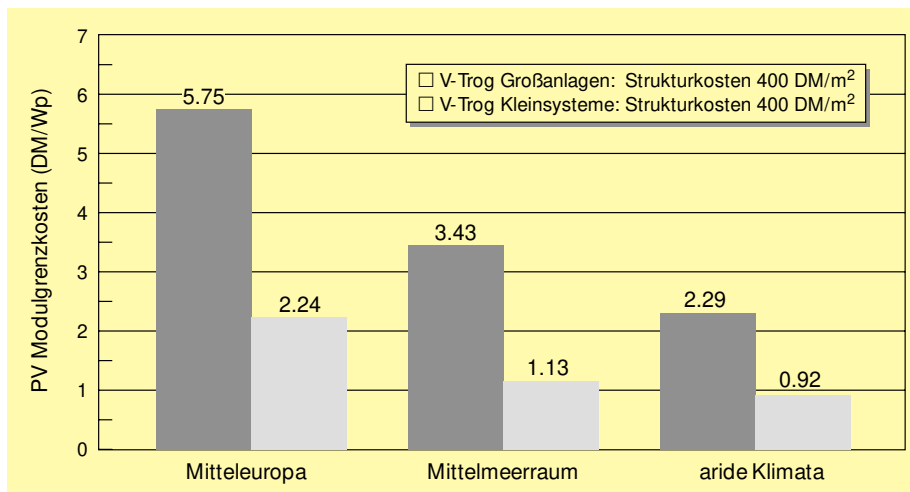
### 6. Wirtschaftliches Potential der PV V-Trog Technologie

Betrachtet man das technische V-Trog Potential, so kann gesagt werden, daß im Mittelmeerraum nur ca. die Hälfte der PV Module benötigt wird als bei konventionellen festorientierten PV Anlagen. Die Mehrkosten für Nachführung und Konzentration müssen somit geringer als die halben PV Kosten sein, damit sich ein Kostenvorteil ergibt.

Bei den gegenwärtigen Modulpreisen ergeben sich Kostenvorteile von 20% für Mitteleuropa und 30% für den Mittelmeerraum und die ariden Klimata. Bei Modulkosten von 5 DM/W<sub>p</sub> sinkt der Kostenvorteil auf ca. 12% und 20%.

In **Abbildung 7** sind die Modulgrenzkosten dargestellt, bei denen sich die Kostenneutralität der V-Trog Technologie ergibt. Die Daten zeigen ein sehr hohes ökonomisches Potential bei den Kleinanlagen auch für Mitteleuropa. Für den Mittelmeerraum und aride Klimata sind die Kostenvorteile am deutlichsten. Demnach ergeben sich Kostenvorteile durch die V-Trog Technologie gegenüber konventionellen PV

*Abbildung 7: Ökonomiebetrachtung der PV V-Trog Technologie (Groß- und Kleinstrukturen) im Vergleich zu konventionellen PV Anlagen, unter Einbeziehung der technischen Entwicklungspotentiale bei der thermohydraulischen Nachführung und den Reflektoren. Annahme: Modulwirkungsgrad = 15% Kosten der konventionellen Aufständigung = 200 DM/m<sup>2</sup>*



Anlagen bis zu PV Modulpreisen von 1 DM/W<sub>p</sub> für die sonnenreicheren Zonen und etwas über 2 DM/W<sub>p</sub> für Mitteleuropa.

### 7. Ausblick

Nach dem ersten Bau von konventionellen PV Demonstrationsanlagen in Europa (Italien, Spanien) im MW-Leistungsbereich ist eine weitere schnelle Diffusion dieses Anlagentyps zur Zeit nicht auszumachen. Dies liegt unter Anderem an dem hohen Planungs- und Entwicklungsaufwand dieses Anlagentyps und den zusätzlichen Infrastrukturmaßnahmen (Wege, Straßen, Einfriedung, Änderungen des Geländeprofiles, Netzanschluß, Überwachungseinrichtungen, Gebäude, Container, Schaltanlagen, Netzschutzmaßnahmen, Erdverkabelung, etc.). Eine Standardisierung der Anlagen kann hier eine deutliche Verbesserung der Kostensituation bringen. Die Marktentwicklung geht eher den Weg über die dezentralen Anwendungen (Gebäude- und Fassadenintegrierte PV Anlagen, netzferne, Kleinanlagen, etc.).

Nach der Entwicklung und Demonstration der V-Trog Technologie für mittlere bis große Anlagen werden nun auch die Kleinanlagen erschlossen. Der angestrebte Anlagentyp ist gekennzeichnet durch:

- einen modularen Aufbau der Anlage, die einfach zu erweitern ist,

- einen hohen Standardisierungsgrad der verwendeten Komponenten,
- einen minimalen Planungsaufwand,
- einen minimalen Gründungsaufwand,
- einen schonenden Einsatz von Material und Energie,
- einen hohen Wiederverwendungsgrad der Materialien nach der Anlagenlebensdauer von mehr als 20 Jahren,

Dieser Anlagentyp eignet sich vor allem für den dezentralen Einsatz sowohl für netzferne Anwendungen als auch für die Netzkopplung. Er deckt damit ein weites Gebiet von Anwendungen in Europa und in den Entwicklungsländern ab, die sich im Leistungsbereich von 0,5 kW<sub>p</sub> bis zu einigen 10 kW<sub>p</sub> befinden.

Weitere potentielle Einsatzgebiete der Thermohydraulik ergeben sich bei:

- Systemen mittlerer bis höherer Konzentration,
- beweglichen Sonnen- und Blendenschutz [7],
- Tageslicht- bzw. Sonnenlichtlenkung [7].

### 8. Dank

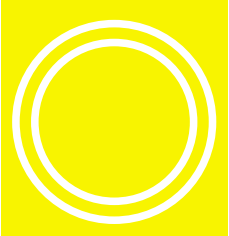
Danken möchte ich den Mitarbeitern des Fachgebiets Photovoltaische Anlagentechnik des ZSW in Stuttgart, die zu den Projekten wertvolle Beiträge geleistet haben. Besonders danken möchte ich den Mitarbeitern A. Köhke, S. Leidig, O. Schanz, P. Küber und R. Köhler in der Werkstatt und in Widderstall. Die Projekte wurden unterstützt durch die JOULE und THERMIE Programme der EU Kommission, der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg und dem Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.

### Literatur

[1] EU-THERMIE Programm, Projekt Nr. SE165/92 DE, Abschlußbericht, in Vorbereitung

[2] EU-JOULE Programm, Projekt Nr. JOU 2 92 CT 0139, Abschlußbericht



- 
- [3] J.P. Galica, W.H. Holley, S.C. Agro, R.S. Yorgensen, M. Ezrin, P. Klemchuk, G. Lavigne  
„Advanced Development of Non-Discoloring EVA-based Encapsulants“, 13th EU PV Solar Energy Conf., Nice (1995) 2370–2372
- [4] J. H. Wohlgemuth, R. C. Petersen  
Proc. 23rd IEEE PV Spec. Conf., Louisville (1993) 1090
- [5] J. Hoffner  
Private Kommunikation, Austin TX (1995)
- [6] T. Townsend  
Private Kommunikation, San Ramon CA (1995)
- [7] F.H. Klotz  
„Solar control and light guiding devices with passive tracking (SOLID PAT)“, 4th EU Conf. on Solar Energy and Urban Planning, Berlin (1996), in Druck
- [8] F.H. Klotz, G. Noviello & A. Sarno  
„PV V-Trough Systems with Passive Tracking - Technical Potential for Mediterranean Climate“, 13th EU PV Solar Energy Conf., Nice, (1995) 372–375
- [9] F.H. Klotz  
„PV Systems with V-Trough Concentration and Passive Tracking – Concept and Economic Potential in Europe“, 13th EU PV Solar Energy Conf., Nice (1995) 1060–1063

*Ein vollständig autark arbeitender Heliostat (Prototyp) wurde am ZSW im März 1996 fertiggestellt und in Betrieb genommen. Er wird thermohydraulisch durch die Sonne selbst angetrieben und nachgeführt. Das direkte Sonnenlicht wird in eine feste Richtung gelenkt. Das feststehende virtuelle Bild kann für vielfältige Anwendungen in der Solar- und Tageslichttechnik verwendet werden.*

*Dieser Heliostat wurde von Mai bis September 1996 auf der 1. Sächsischen Landesgartenschau in Lichtenstein zur Beleuchtung eines Kunstobjektes eingesetzt. Seit November 1996 wird der Heliostat zu Testzwecken am ZSW in Stuttgart betrieben.*

