

Konzentrierende Photovoltaik (CPV) für Länder mit hoher direkter Einstrahlung

1. Einleitung

Ziel aller Forschungsarbeiten im Bereich der Photovoltaik (PV) ist letztlich, die Kosten für PV-erzeugte Energie zu senken und so eine nachhaltige Energieversorgung bereit zu stellen.

Der heutige Markt wird durch Si-Module dominiert. Technologien auf Dünnschichtbasis (a-Si, CIGS, CdTe) haben in den letzten beiden Jahren die industrielle Massenfertigung erreicht.

Die Konzentrator-Photovoltaik ist ein alternativer technologischer Ansatz, um die Kosten je PV-generierte kWh zu reduzieren. Die zu Grunde liegende Idee ist einfach zu verstehen: Diese Technologie reduziert den Bedarf an vergleichsweise teurer Solarzellenfläche dadurch, dass das Sonnenlicht mittels eines preiswerten optischen Konzentrators gebündelt wird. Im Fokus des Lichtbündels sitzt dann eine kleine Zelle, welche die hohe Strahlungsdichte effizient wandelt. Um das Sonnenlicht ausreichend hoch konzentrieren zu können, muss das System dem Lauf der Sonne nachgeführt werden. Daher eignen sich Konzentratorsysteme vor allem für Länder mit einer hohen direkten Einstrahlung.

Konzentratorsysteme werden bevorzugt als PV-Kraftwerke im kW-MW Leistungsbereich betrieben. Das Interesse an dieser Technologie ist in den letzten Jahren stark gewachsen, weil die Kosten reduziert werden konnten und hohe Systemwirkungsgrade von über 25 % im Feld erreicht wurden [1].

2. Die technologische Basis der Konzentrator-Photovoltaik

Konzentrator-Photovoltaik ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Komponenten, wie Zelle, Kühlung, Konzentratoroptik und Nachführung, in starker Wechselbeziehung stehen und somit in der Gesamtheit optimiert werden müssen. Die Konzentrator-Photovoltaik muss also als ein integrativer technologischer Ansatz verstanden werden. So ist es beispielsweise möglich, die Anforderungen an die Nachführungsgenauigkeit der Mechanik zu senken, wenn der optische Konzentrator z. B. durch den Einsatz einer zweiten Stufe entsprechend gestaltet wird. Dies kann wiederum eine erhöhte Komplexität beim Montageprozess zur Folge haben. Dieses Beispiel zeigt die Verkettung der Technologien und die Komplexität bei der Entwicklung eines Konzentratorsystems. Daher gibt es nicht „das“ Konzentratorsystem, sondern jedes System muss individuell entwickelt und analysiert werden. Als Folge gibt es eine Vielzahl von möglichen System-Realisierungen.

Die wahre Bewertung eines Konzentratorsystems zeigt sich letztlich erst in der Anwendung und wird durch die Kosten pro erzeugter Kilowattstunde (€/kWh) angegeben. Diese Bewertungsgröße ist natürlich von den Einstrahlungsverhältnissen und damit vom Standort abhängig.

Die Vielfalt der Konzentratorsystem-Ansätze lässt sich am besten verdeutlichen, wenn der Konzentrationsfaktor herangezogen wird. Der Konzentrationsfaktor heutiger Systeme reicht von 2 bis 1000. In *Abbildung 1* sind zwei Beispiele von Systemkonzepten gezeigt: Links das niedrig-konzentrierende ARCHIMEDES-System, das am ZSW in Stuttgart entwickelt wurde. Es nutzt Si-Konzentratorzellen und hat eine einachsige Nachführung. Rechts das hoch-konzentrierende

Fraunhofer ISE

Dr. Andreas W. Bett
andreas.bett@ise.fraunhofer.de

Dr. Bruno Burger
bruno.burger@ise.fraunhofer.de

Joachim Jaus
joachim.jaus@ise.fraunhofer.de

Tobias Fellmeth
tobias.fellmeth@ise.fraunhofer.de

Dr. Oliver Stalter
oliver.stalter@ise.fraunhofer.de

Dr. Matthias Vetter
matthias.vetter@ise.fraunhofer.de

ZSW

Hans-Dieter Mohring
hans-dieter.mohring@zsw-bw.de

Concentrix Solar GmbH

Bötzingen Str. 31
79111 Freiburg

Dr. Andreas Gombert
andreas.gombert@concentrix-solar.de

Hansjörg Lerchenmüller
lerchenmueller@concentrix-solar.de

Abbildung 1
Links: niedrig-konzentrierendes ARCHIMEDES-System (ZSW)

Rechts: hoch-konzentrierendes FLATCON-System (Fraunhofer ISE/Concentrix Solar)



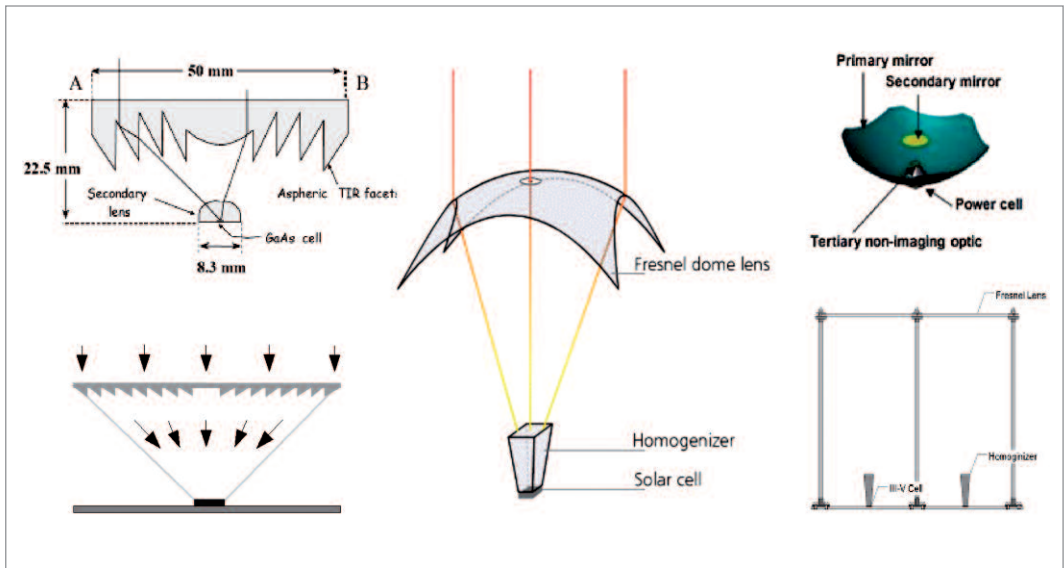
Abbildung 2
Beispiele für optische Konzentratoren:

Links oben: asphärische TIR (total internal reflection) Linse in Kombination mit einer Sekundärlinse direkt auf der Zelle

Links unten: Fresnellinse

Mitte: Fresnel-Dom Linse in Kombination mit einem Strahlhomogenisierer.

Rechts oben: Eine Cassegrain-Optik, wo das Licht über einen Parabolspiegel auf einen kleinen Sekundärspiegel und dann auf die Zelle gelenkt wird.



FLATCON-System, das am Fraunhofer ISE in Freiburg entwickelt und von der Firma Concentrix Solar, Freiburg zur Marktreife gebracht wurde. Dieses System nutzt III-V-Halbleiter Mehrfachsolarzellen, hat eine zweiachsige Nachführung und einen Konzentrationsfaktor von 380.

Im folgenden Abschnitt werden die Hauptkomponenten eines Konzentratorensystems kurz diskutiert:

Der optische Konzentratoren

Als optische Konzentratoren werden entweder Linsen oder Spiegel eingesetzt. Oftmals wird noch eine zweite optische Stufe genutzt, die meist direkt auf die Solarzelle montiert wird. Fresnel-Linsen werden häufig anstelle massiver Linsen eingesetzt. Sie benötigen weniger Material und können kostengünstiger hergestellt werden. Beim Einsatz von Linsen müssen

Abbildungsfehler und hier im Besonderen die chromatische Aberration bei der Systemauslegung berücksichtigt werden. Hier bieten Spiegelsysteme Vorteile. Die Herausforderung für die Spiegel besteht darin, hochreflektive Schichten mit Langzeitgarantie kostengünstig zu produzieren. *Abbildung 2* zeigt schematisch verschiedene Konzepte für die optische Konzentration, wie sie derzeit in Systemen verwendet werden.

Die Konzentratorenzelle

Die in Konzentratorensystemen eingesetzten Zellen müssen mit den hohen Einstrahlungsdichten und den daraus resultierenden hohen Strömen zurecht kommen. Es gibt daher nicht „die“ Konzentratorenzelle. Je nach Konzentrationsfaktor muss die Solarzellentechnologie angepasst werden.

Die Widerstandsverluste skalieren quadratisch mit den Stromdichten, was einen höheren

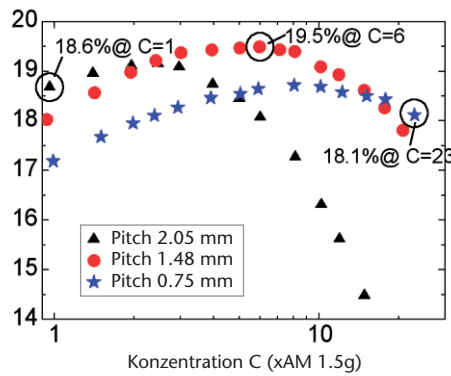
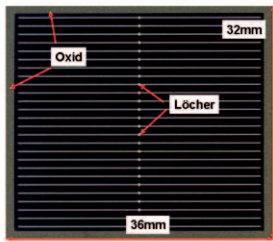


Abbildung 3

Links: Photo einer MWT-Si-Konzentratorsolarzelle. Rechts: Je nach gewählter Technologie kann die Zelle bis zu einem Konzentrationsfaktor von 20 eingesetzt werden.

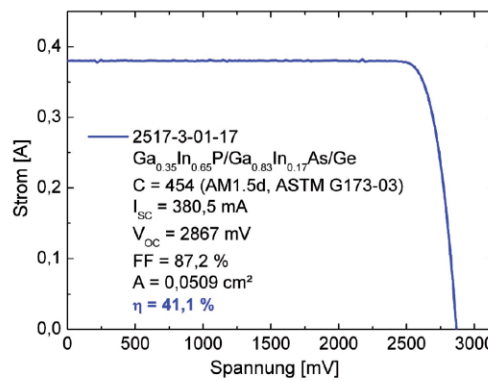
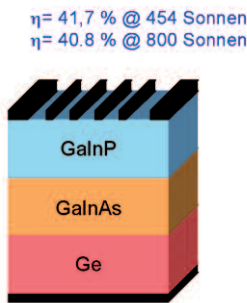


Abbildung 4

Strom-Spannungs-Kennlinie einer monolithischen Dreifach-Solarzelle aus GaInP/GaInAs/Ge bei Beleuchtung unter 454-facher Sonnenkonzentration. Es wurde ein Wirkungsgrad von 41,1% erzielt. Selbst bei einer 800-fachen Sonnenkonzentration wird noch ein Wirkungsgrad von 40,8% erreicht.

Metallisierungsgrad der Solarzellen erfordert, der wiederum die Abschattungsverluste erhöht. Zudem wird die Solarzelle je nach optischem Konzentration nicht homogen beleuchtet, was in einer entsprechenden Auslegung des Frontseiten-Kontaktgitters berücksichtigt werden kann. Die Auslegung des „optimalen“ Solarzellen-Designs ist also wiederum stark von der Systemauslegung abhängig. Generell lässt sich sagen, dass vor allem für den niedrigen Konzentrationsbereich (Abbildung 1, links) nur leicht modifizierte Industrie-Silizium Solarzellen verwendet werden. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für eine Zellentwicklung am Fraunhofer ISE [2]. Hier wurde die Metal-Wrap-Trough (MWT) Solarzelle so modifiziert, dass sie je nach Design für Konzentrationsfaktoren bis 20 eingesetzt werden kann.

Kennlinie der Fraunhofer ISE Rekordsolarzelle, welche einen Wirkungsgrad von 41,1% bei einem Konzentrationsfaktor von 454 Sonnen erzielt [3].

Die Nachführung (Tracker)

Nachführsysteme werden seit einiger Zeit auch vermehrt für Flachmodule eingesetzt, da durch die Nachführung ein Mehrertrag zwischen 20-35% zu erwarten ist [4]. Aufgrund dieser Entwicklung sind nun mehrere Anbieter von Nachführsystemen auf dem Markt, was der Konzentration-Photovoltaik zu Gute kommt. Allerdings sind die Anforderungen an die Genauigkeit und Stabilität für die Konzentrationssysteme deutlich höher. Die geforderte Genauigkeit hängt vom Konzentrationsfaktor und auch von der verwendeten Optik im System ab. Als ein Richtwert wird für ein 500-fach konzentrierendes System eine mechanische Genauigkeit von 0,1° angestrebt und auch erreicht.

Mehrfachsolarzellen, für die unterschiedliche III-V-Halbleitermaterialien übereinander abgedepontiert werden, erlauben es, sehr hohe Wirkungsgrade zu erzielen. Dieser Zelltyp wird in hochkonzentrierenden Systemen eingesetzt. Abbildung 4 zeigt die Schichtstruktur und die

Wichtig für die Erreichung dieses Zieles ist eine gute Steuerung. Am Fraunhofer ISE wurde in den letzten Jahren eine Entwicklung vorange-

trieben, welche die Steuerung des Trackers in die Inverterelektronik integriert: der so entstandene Tracker-Inverter reduziert die Kosten des Konzentratorsystems. Für niedrig-konzentrierende Photovoltaik ist oft eine einachsige Nachführung mit einer mechanischen Genauigkeit im Grad-Bereich ausreichend. Generell kann gesagt werden, dass die Zuverlässigkeit des Nachführungssystems kein Problem darstellt und dass die Leistungsaufnahme für den Antrieb im Mittel deutlich unter 100 W liegt [5], was bei Systemgrößen im kW-Bereich vernachlässigbar ist.

3. Konzentratorsysteme in Betrieb

Die Firma Concentrix Solar fertigt hochkonzentrierende FLATCON-Konzentratormodule. Seit Herbst 2008 steht eine Produktionslinie mit einer Kapazität von 25 MW zur Verfügung. Auf dieser vollautomatisierten Fertigungslinie werden Module mit Wirkungsgraden von 27% hergestellt. Die Module werden auf zweiachsige Nachführungseinheiten montiert. Die nominelle Systemleistung beträgt 6 kW. *Abbildung 5* zeigt ein Photo von einem Concentrix Konzentratorsystem und eine gemessene DC-Kennlinie des Systems. Bei günstigen Einstrahlungsbedingungen wurden DC-Systemwirkungsgrade von über 26% erzielt.

Abbildung 5

Links: FLATCON-Konzentratorsystem der Firma Concentrix Solar. Die Aperturfläche beträgt 28.8 m². Rechts ist die gemessene DC-Kennlinie des Systems gezeigt. Es wurde ein Wirkungsgrad von 26% bestimmt.

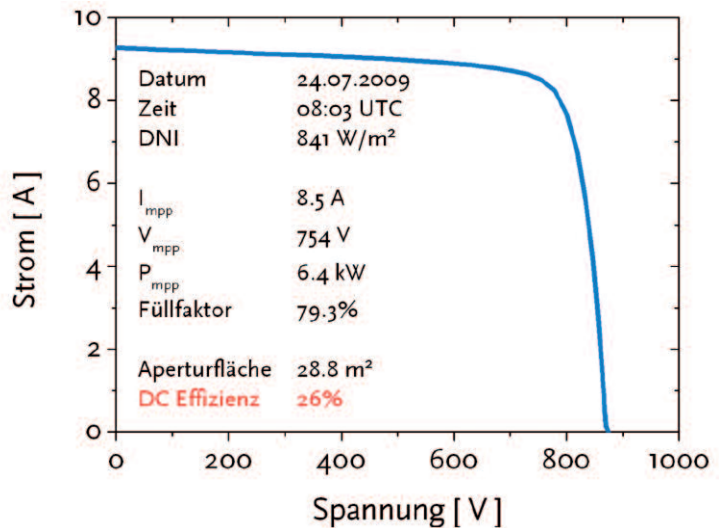


Abbildung 6

Links: Photos der 100 kW-Anlagen in Sevilla (oben) und Puertollano (unten) in Spanien. Rechts ist der maximale AC-Kraftwerkswirkungsgrad der zwei Anlagen über einen Zeitraum von Mai bis September 2009 dargestellt.

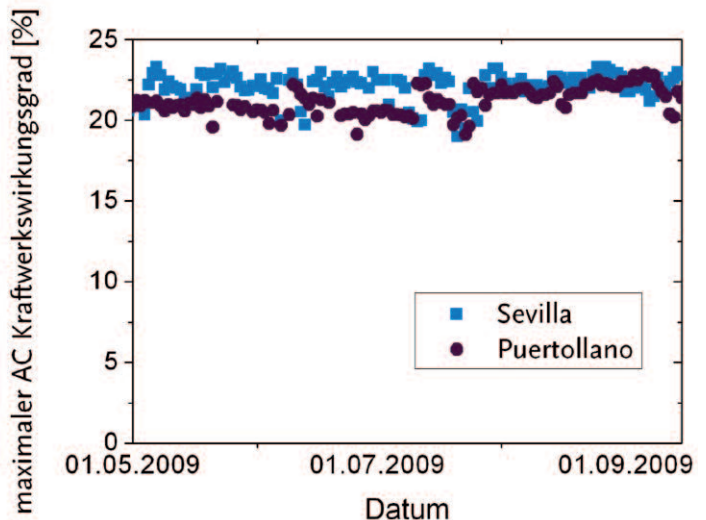


Abbildung 6 zeigt den maximalen AC-Wirkungsgrad über den Zeitraum von Mai bis September 2009 für zwei 100 kW-Kraftwerke an den Standorten in Sevilla und Puertollano in Spanien. Die Wirkungsgrade liegen kontinuierlich deutlich über 20 %, und es konnten Spitzenwerte bis 24 % erzielt werden.

4. Zusammenfassung und Fazit

Die konzentrierende Photovoltaik hat nun einen Entwicklungsstand erreicht, bei dem der Übergang vom Labor zur industriellen Fertigung vollzogen ist. Der Markteinstieg ist für diese Technologie möglich. Die Kosten- und Ertragsanalysen lassen erwarten, dass CPV-Systeme an Standorten mit hoher Direkteinstrahlung Stromgestehungskosten erreichen können, die deutlich unter denen der klassischen PV-Technologie liegen. Diese Prognosen müssen sich in den kommenden zwei Jahren bewahrheiten, dann wird dieser Technologie ein rasantes Wachstum bevorstehen.

Literatur

- [1] A. Hakenjos, J. Wüllner, H. Lerchenmüller, Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2007, pp. 156-159.
- [2] T. Fellmeth et al., 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg 2009
- [3] W. Guter, J. Schöne, S. P. Philipps, M. Steiner, G. Siefer, A. Wekkeli, E. Welsler, E. Oliva, A. W. Bett, F. Dimroth, Appl. Phys. Letter, 2009, 94, 223504
- [4] H. D. Moring, H. Gabler, Proc. 29th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, 2002, pp. 1608-1611.
- [5] V. D. Romyantsev, V. M. Andreev, N. A. Sadchikov, A. W. Bett, F. Dimroth et al., PV in Europe - From PV Technology to Energy Solutions Conference and Exhibition, 2002, pp. 521-525.