Fotovoltaisch-thermische Konzentratoren

Autor(en): **Michel, Bruno**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **104 (2013)**

Heft 3

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856464

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Fotovoltaisch-thermische Konzentratoren

Hocheffiziente Konversion solarer Strahlung

Bisher stand man bei der Nutzung von Sonnenenergie meist vor der Wahl, entweder fotovoltaisch elektrischen Strom mit einem Wirkungsgrad unter 25 % oder mit Kollektoren Warmwasser zu erzeugen. Ein neuer Ansatz kombiniert nun beides: Ein im Fokus eines Parabolspiegels installiertes, heisswassergekühltes Multichipsystem erzeugt sowohl Wärme als auch Strom. Besonders für trockene Gebiete mit grosser Direkteinstrahlung ist dies eine vielversprechende Technologie.

Bruno Michel et al.

Solarenergie kann heute entweder über reine Fotovoltaik- oder Solarthermie-Anlagen genutzt werden. Beide Anlagentypen machen aber nur je einen Bruchteil der in der Sonnenstrahlung enthaltenen Energie bzw. Exergie[1)] nutzbar. Auch die Umwandlung von Wärme in elektrische Energie in solarthermischen Kraftwerken bringt nur sehr kleine Gesamtausbeuten. Zudem sind elektrische Netze in heissen sonnigen Klimas im Sommer wegen der grossen Nachfrage nach Kühlung überlastet. Bisher hat sich eine direkte Nutzung von Solarwärme wegen der kleinen Effizienz, dem ineffizienten Wärmetransport, der schwierigen Umwandlung von Wärme, sowie der hohen Kosten und dem komplizierten Geschäftsmodell nicht durchgesetzt. Eine neue Alternative basierend auf konzentrierenden Spiegeln, Hochleistungs-Fotovoltaik und Heisswasserkühlung kann nun aber einer kombinierten Nutzung zum Durchbruch verhelfen.

Fotovoltaisch / thermische Konzentratoren

Fotovoltaisch-thermische Konzentratoren **(Bild 1)** erzeugen gleichzeitig sowohl elektrische Energie mit einer für fotovoltaische Systeme hohen Effizienz (über 25 %) als auch rund 50 % nutzbare Wärme – für Heizung, Meerwasserentsalzung oder Adsorptionskühlung. Ihre Gesamtausbeute liegt bei über 75 %. Der Kern dieser Konzentratoren ist das heisswassergekühlte Fotovoltaiksystem.

Mehrschicht-Fotovoltaik

Fotovoltaiksysteme (PV) wandeln Sonnenlicht mit einem Ladungstrennungsprozess über einer Halbleiterdiode aus Silizium, Germanium, Galliumarsenid oder Indiumgalliumarsenid in elektrische Energie um. Unterschiedliche Halbleiter absorbieren Licht unterschiedlicher Wellenlänge, sodass mehrere Dioden gestapelt und deren Spannungen addiert werden können.

Die Umwandlung in elektrische Energie findet jeweils nur an einer Wellenlänge statt. Kürzere Wellenlängen können erst umgewandelt werden, nachdem die überschüssige Energie als Wärme abgegeben wurde. Aus diesem Grund ist die Effizienz einer Fotovoltaikzelle kleiner als 25 % und die einer Dreifachdiode (3J) derzeit höchstens 44 %. Der Rest der Energie wird als Wärme frei und heizt die Fotovoltaikzelle auf, was zu einer noch tieferen Effizienz führt. Für Silizium liegt der Effizienzverlust bei 0,4 %, und für kommerziell erhältliche 3J-Zellen bei 0,18 % pro Grad [1]. Unter voller Belichtung mit 1 kW/m² heizt sich ein PV-Kollektor auf über 100 °C auf und verliert rund einen Drittel seiner Effizienz.

Dreifachdioden-Zellen sind leider zu teuer und die Materialien nicht in ausreichender Menge verfügbar, um sie in vollflächigen Solarkollektoren anzuwenden.

Solare Konzentrationssysteme

Um den Materialbedarf und die Kosten zu reduzieren, kann man nun solche Mehrschicht-PV-Systeme in Konzentratoren einsetzen. Die Verwendung von 1000-fach konzentriertem Sonnenlicht ist aber eine besondere Herausforderung, denn es wird eine Leistungsdichte von 100 W/cm² erreicht – das Zehnfache einer Kochplatte auf höchster Stufe. Da die Leistungsdichte diejenige von Hochleistungsprozessoren erreicht, werden zur Kühlung ähnliche Lösungen wie bei Computern angewendet.

Bestehende 500-fach konzentrierende fotovoltaische Systeme (CPV) funktionieren mit kleinen Zellen (1–10 mm²) auf Keramiksubstraten, die über zwei thermische Schnittstellen mit einem Luftkühler passiv gekühlt werden. Der Wärmewiderstand von 1,5 K/(cm²*W) verursacht bei 500 Sonnen einen Gradienten von 75 °C und damit bei 40 °C Umgebungstemperatur eine Diodentemperatur von 115 °C und reduziert deren Effizienz um einen Drittel. Derzeit ist der beste Betriebspunkt eine 600-fache Konzentration und 6 mm Zellengrösse. Setzt man aber eine aktive Wasserkühlung ein, können grössere Zellen und grössere solare Konzentrationen realisiert werden, wodurch die Energiekosten sinken und die elektrische Effizienz steigt.

Kühlung als Wärmequelle

Heisswassergekühlte Silizium-Mikrokanalkühler **(Bild 2)** erlauben eine aktive Kühlung mit sehr hohem Energiedurchsatz. Dank ihrem äusserst niedrigen thermischen Widerstand können 100 °C heisse fotovoltaische Zellen mit 90 °C heissem Wasser bei 2000-fach konzentrierter Beleuchtung gekühlt werden. Zudem ist die Wassertemperatur hoch genug für einen vielfältigen Einsatz der Wärme.

Mit hoch konzentrierenden fotovoltaischen Systemen mit thermischer Nutzung, HCPVT, erreicht man in naher Zukunft die Netzparität von Solarkraftwerken [2]. Ein weiterer Vorteil solcher Systeme ist die bei über 1000-facher Konzentration bis zu 20 % höhere PV-Effizienz.

Solare Konzentratoren brauchen zwar teure aktive, zweidimensionale Sonnenfolger (Tracker oder Heliostaten), diese verbessern jedoch die Ausbeute pro m²

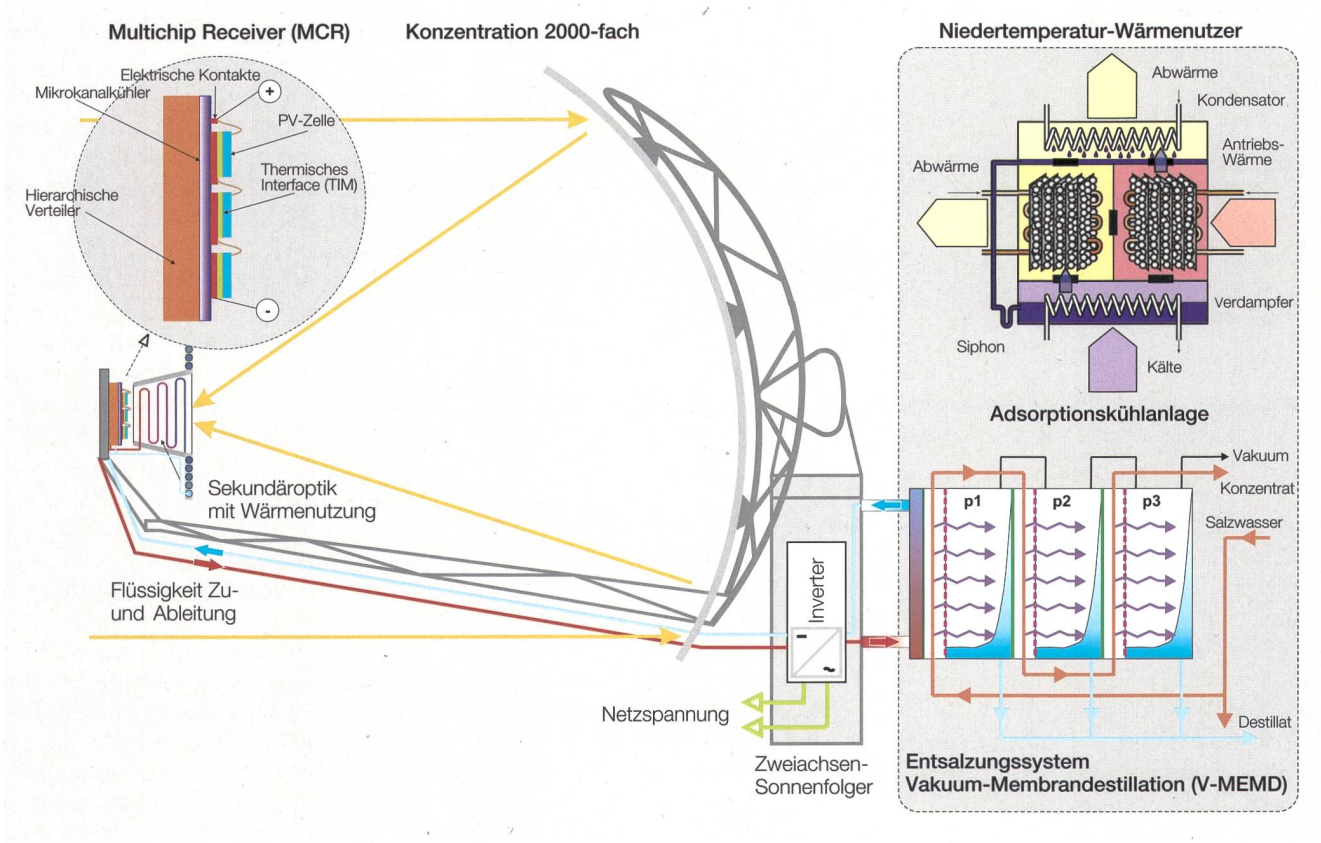


Bild 1 Schema eines HCPVT-Systems mit Niedertemperatur-Wärmenutzung für Adsorptionskühlung (oben rechts) und Membrandestillation (unten rechts). Fotovoltaische Dreifachdioden-Zellen (3J) sind auf einem Mikrokanalkühler platziert (oben links).

Kollektor um 40 % und decken die Nachfragespitze am Nachmittag gut ab [3, 4].

CPV-Systeme haben wegen der grossen Effizienz und dem kleinen Temperaturkoeffizienten einen Vorteil in heissen, trockenen Gebieten mit grosser Direktstrahlung (Direct Normal Irradiance, DNI > 2000 kWh/(m²a)) [5] und können dort die Kosten am besten reduzieren.

Das Testobjekt

Das IBM Forschungslabor in Rüschlikon und das IBM Egypt Nanotechnology Center haben gemeinsam ein solches HCPVT-System gebaut und getestet.

Bei diesem System (Bild 1) konzentriert ein primärer Parabolspiegel das Sonnenlicht durch eine sekundäre Optik auf den Multichip-Receiver (MCR, Bild 3). Die wassergekühlte sekundäre Optik schützt die Installation, ermöglicht eine homogene Ausleuchtung der Zellen und erlaubt eine Wärmenutzung der Reflektionsverluste. Der MCR liefert sowohl elektrische Energie ins Netz als auch Heisswasser zum Antrieb eines Adsorptionskühlers oder einer Membrandestillationsanlage.

Ausser den Reflektionsverlusten am Primärspiegel (10–15 %) geht keine weitere Energie verloren. Zudem erlaubt der Receiver auch die Nutzung ungenauerer Sonnenfolger.

Der Kostenvorteil eines grossen zentralisierten Receivers mit einer Vielzahl von PV-Zellen auf einem gemeinsamen Kühler (MCR) ist gross. Der Mikrokanalkühler ist direkt in das Substrat eingearbeitet, das den elektrischen Anschluss, die mechanische Integrität und den thermischen Kontakt über nur einen thermischen Übergang sicherstellt (Bild 2).

Ein hierarchisch verzweigtes Flüssigkeitsnetzwerk minimiert die Pumpenergie. Mit dieser Konfiguration reduziert sich der Wärmewiderstand auf unter 0,12 K/cm²W.

Der Multichip-Receiver zeichnet sich durch einen kleinen thermischen Widerstand und eine fast vollständige Übereinstimmung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten aus, was eine hohe Zuverlässigkeit und Langlebigkeit ergibt. Die hierarchisch verzweigte Verteilungsstruktur reduziert den Druckabfall und die benötigte Pumpleistung und erlaubt je einen einzelnen Zu- und Abfluss, um das Wasser in die knapp 400 50 µm breiten Kühlkanäle zu leiten.

Aufgrund der Grösse des gesamten Systems sind die Kosten für Konzentration, Kühlung und Verrohrung klein, während die thermische und elektrische Abgabeleistung gross ist. Die Vorteile dieses thermischen Packaging wurden bei Konzentrationen bis zu 4930 Sonnen in einem Sonnensimulator ausgemessen [6].

Die hier eingesetzten, kommerziell erhältlichen 3J-PV-Zellen wurden in einer 3x3-Anordnung auf einen metallisierten Siliziumträger aufgebracht. Die Reihen sind parallel verbunden und anschliessend die Kolonnen in Serie, mit je einer Freilaufdiode auf beiden Seiten (Bild 3). Auf dem Siliziumträger sind ausserdem noch eine Isolationsschicht und thermische Sensoren integriert (Bild 2). Die Frontelektroden wurden mit 300-µm-Bond-Drähten realisiert. Für die Fertigstellung des Receivers waren noch ein wassergekühlter Mixer und eine gekühlte Frontplatte nötig. Schliesslich wurde der MCR an das Kühlwasser angeschlossen und die IV-Charakteristik mit einer programmierbaren Last ausgemessen.

Testmessungen und Resultate

In einem Testaufbau mit dem MCR im Fokus eines mittelgrossen Parabolspiegels auf einem 0,12° genauen Zweiachsen-Sonnenfolger wurden experimentelle

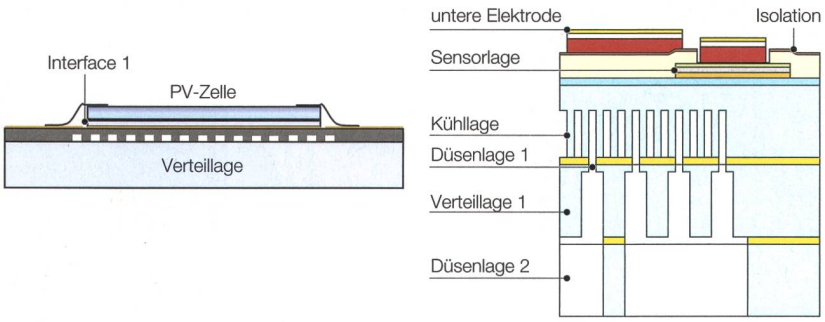


Bild 2 Querschnitt einer PV-Zelle auf einem Silizium-Mikrokanalsubstrat. Auf dem Substrat befinden sich eine Metallschicht und ein thermisches Interface (TIM) für die elektrische und thermische Kontaktierung.

Resultate gesammelt. Die Direktstrahlung (DNI) wurde gleichzeitig mit einem Pyrheliometer auf einem Präzisions-Sonnenfolger-System gemessen. Erste Testmessungen wurden bei 500-facher Konzentration und Kühlwassertemperaturen von 25 bis 75 °C ausgeführt (Bild 4).

Der thermische Gesamtwiderstand lag unter 0,11 cm²K/W [7]. Dieser sehr niedrige Widerstand erlaubt einen Betrieb der PV-Zellen bei moderaten Temperaturen und gleichzeitiger Produktion von nutzbarer Nieder- bis Mitteltemperaturwärme. Zusätzlich zu den Messungen auf dem Sonnenfolger wurden die thermischen und fluiddynamischen Eigenschaften auf einem Testaufbau mit Widerstandsheizer, Temperatursensoren und einer Infrarotkamera ausgemessen. Die für die Kühlung benötigte Pumpleistung lag unter 1,5 W bei einer Flussmenge von 4 l/Minute und einem Druckabfall über dem Modul von 0,18 bar.

Messungen bei höheren Konzentrationen und höheren Kühlwassertemperaturen sind geplant.

Vor- und Nachteile

Die Vorteile eines HCPVT-Systems sind die doppelte Abgabeleistung und eine höhere Exergieeffizienz[1]. Je höher die Konzentration und die Umgebungstemperatur, umso effektiver ist das System [8]. Nicht konzentrierende PVT-Systeme können da nicht mithalten, weil sie nur 15 % elektrische Effizienz erreichen und Niedertemperaturwärme von unter 60 °C produzieren [9].

Die Nachteile von HCPVT-Systemen sind ihre Komplexität, eine tiefe Technologiereife und das Fehlen von Standards [10]. Eine weitere Herausforderung ist die richtige Bewertung der Wärme. Die direkte Umwandlung in elektrische Energie mittels eines organischen Rankine-Systems (ORC) bringt nur 10 % Effizienz und führt zu einem relativen Wert 1:17 [11]. Bessere Vergleiche sind möglich über Exergie, Marktanalysen sowohl für offene als auch für erneuerbare Märkte und ökologische Analysen über vermiedene Treibhausgas-Emissionen. Es scheint, dass der erneuerbare Energiemarkt die ausgewogensten Resultate bringt [12]. Im Kontext von verschiedenen Energieträgern erlaubt der Exergieansatz auch den Einbezug der Wärmequalität [13].

Ein offensichtlicher Nachteil von PV-Systemen ist, dass sie nur Strom liefern, wenn die Sonne scheint. Schon kleine Wolken reduzieren die direkte Strahlung und somit die Produktion. Aufgrund dieser inhärenten Variabilität sind die erzielbaren Tarife niedrig. Die Speicherung von thermischer (Niedertemperatur-) Energie ist aber zwischen 100- und 1000-mal billiger als die von elektrischer Energie und erlaubt auch eine voraussagbare kontinuierliche Abgabeleistung des thermisch erzeugten Produktes (Kühlung, Wasser), wodurch dessen relativer Wert steigt (Tabelle). Für eine optimale Umsetzung ist eine Multicarrier-Optimierung nötig.

Wärmenutzung

Aus ökonomischer und ökologischer Sicht lohnt es sich, CPV-Systeme mit einer aktiven Kühlung mit sehr tiefem thermischem Widerstand auszustatten, denn die gewonnene Wärme kann beispielsweise zu Heiz-/Kühlzwecken oder zur Entsalzung genutzt werden.

Heizzwecke

Heutige Heizungen können Niedertemperaturwärme gut nutzen, denn sie kommen mit viel niedrigeren Temperaturen aus als früher, da der Wärmewiderstand zwischen dem Heizmedium (Wasser) und dem Gebäude sowie der Raumluft viel kleiner ist.

Kühlzwecke

Der weltweite Kühlbedarf steigt stetig. Gemäss der Internationalen Energieagentur (IEA) wird sich der Bedarf an Kühlung aufgrund von Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum sowie dem Klimawandel bis 2050 verdreifachen [14].

Gewöhnlich werden zur Deckung des Kühlbedarfs Sorptionskühler eingesetzt, die Niedertemperaturwärme (90 – 120 °C) in Kälte (10 °C) umwandeln können. Leider liegt ihre Exergieeffizienz bisher unter 20 %, so dass in heissen Klimata Öl oder Gas verbrannt wird, um mittels Dampf- oder Gasturbinen mit 40 % Effizienz elektrische Energie zu produzieren und damit eine 30 % effiziente Kompressionskühlanlage zu betreiben. Unter Einbezug von Netzverlusten resultiert eine Systemeffizienz unter 15 %.

Dabei steht in diesen Regionen eine nahezu unlimitierte Menge an Nieder- und Mitteltemperaturwärme zur Verfügung [15], die mit Adsorptionskühlern direkt genutzt werden kann. Diese sind wärmegetriebene Kühler, in denen die Antriebswärme über einen Wärmetauscher ein Arbeitsfluid von einem nanoporösen Festkörper desorbiert, während in

Vergleich	Elektrisch: Wärme	Elektrisch Wärme / %	effektiv / %	Total / %
Carnot-Effizienz (theoretisch)	8	28	6	34
Organisch Rankine (experimentell)	17	28	3	31
Ökonomische Effizienz	4,24	28	12	40
Emissions-Effizienz	4	28	13	41
Nachfrage-Effizienz	**3**	**28**	**17**	**45**
Ersatz elektrischer Energie				
zur Heizung	3,6	28	14	42
zur Kühlung	5,35	28	9	32
zur Entsalzung	5	28	10	38

Tabelle Vergleich des Wertes von elektrischer Energie und von Wärme in verschiedenen ökonomischen Szenarien [13].

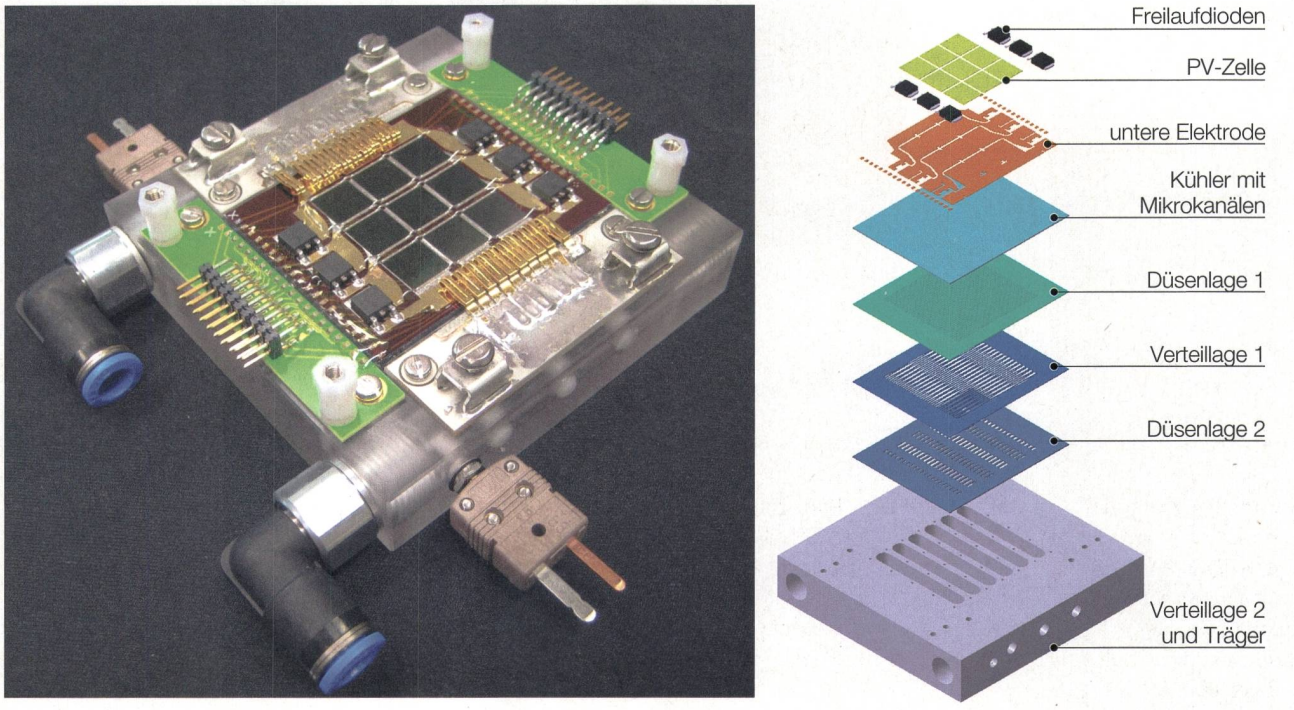


Bild 3 Multi-Chip-Receiver (MCR) Demonstrator (links) mit schichtweisem Aufbau (rechts) aus PV-Zellen und Freilaufdioden, unterer Elektrode, Substrat im Mikrokanälen, Düsen- und Zulauf- bzw. Verteillagen.

einer zweiten Kammer das Fluid in einem gekühlten Festkörper wieder resorbiert wird. Das Fluid wird zuerst komprimiert, kondensiert und gekühlt und liefert dann die Kühlung im Expansions- und Verdampfungszyklus.

Wasserentsalzung

Die Entsalzung von Wasser ist auch ein potenzieller Einsatzort für Wärme aus HCPVT-Systemen. In einer mehrstufigen Membrandestillationseinheit verdampft Salzwasser durch eine poröse hydrophobe Membrane und kondensiert auf der anderen Seite unter Abgabe der Kondensationswärme an die nächste Stufe, die auf leicht tieferer Temperatur und leicht tieferem Druck betrieben wird. Das Vakuum-Multieffekt-Membrandestillations-Prinzip (V-MEMD) benutzt Wärme mehr als sechsmal (Gain output ratio, GOR > 6), um so den thermischen Energieverbrauch auf 80–120 kWh/m³ zu reduzieren [16].

Strom- und Wärmeübertragung

Die Verteilung und Nutzung elektrischer Energie setzte sich erst mit der Einführung von Wechselspannungstransformatoren durch, da diese die verlustarme Umwandlung zwischen Transportspannung und Verbrauchsspannung ermöglichten. Damit wurde Wärme als Energietransportform, wie sie Edison für seine Gleichstromsysteme in New York noch brauchte, abgelöst [17].

Während sich Wärme in Elektrizität umwandeln lässt, gibt es bisher noch keine Wärme-zu-Wärme-Transformatoren. Das äquivalente Instrument zum elektrischen Transformator fehlt also. Aber auch wegen den grossen konduktiven und konvektiven Verlusten konnte sich der Wärmetransport nicht durchsetzen. Eine verbesserte Adsorptionswärmepumpen- (und Wärmetransformator-) Technologie ist daher nötig und wird in einem parallelen Projekt entwickelt [15]. Ebenso fehlt noch ein standardisiertes, mit dem elektrischen Netz vergleichbares Wärmetransportnetz. Diese Technologie wird derzeit im Zusammenhang mit Solarkraftwerken ökonomisch evaluiert und mit elektrischem Transport verglichen [18].

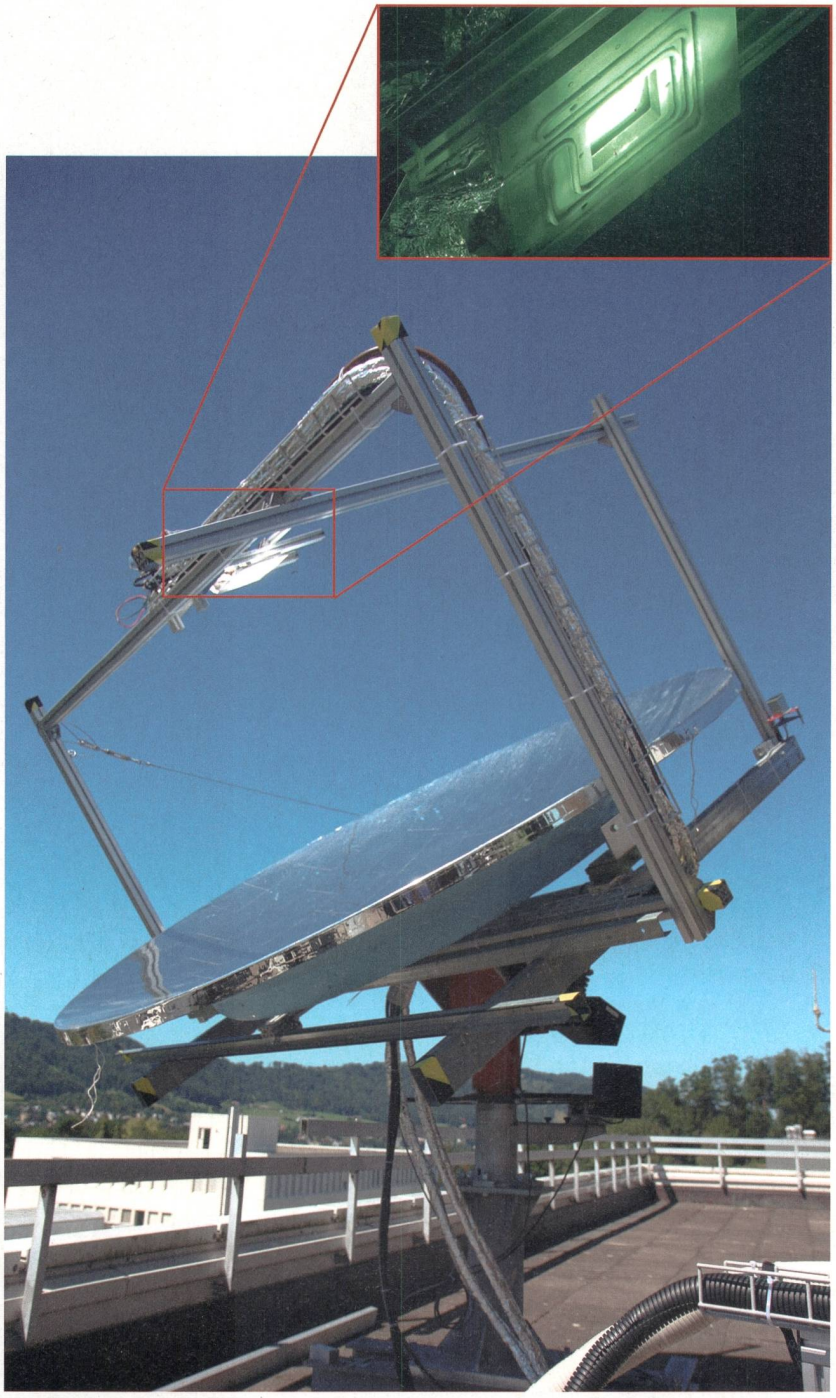
Fazit und Ausblick

Hochkonzentrierende fotovoltaisch-thermische Systeme können mit 90 °C heissem Wasser gekühlt und die Wärme für thermische Meerwasserentsalzung, Adsorptionskühlung und Raumheizung verwendet werden. Dies erlaubt eine optimale Ausnutzung der Investitionen in die aktive Kühlung. Mikrokanal-Multichip-Receiver ermöglichen grosse Konzentration-mal-Flächen-Produkte, reduzieren die Kosten von Konzentration und Kühlung und steigern die Effizienz.

Die exzellente Leistung des Kühlers erlaubt einen Betrieb bis zu 5000 Sonnen. Die Reduktion der thermischen Widerstände durch Miniaturisierung, die Eliminierung von thermischen Schnittstellen und von Luft als Transportmedium, und die Verwendung von Mikrokanälen und hierarchisch verzweigten Zu- und Abführkanälen ermöglicht eine effiziente Wärmenutzung.

Das 3x3-HCPVT-Receiversystem dient als Demonstrator für ein vergrössertes System mit 100 oder 500 Zellen. Um elektrische Verluste in den Frontelektroden bei 2000-facher Konzentration zu reduzieren, muss die Zellengrösse von 100 mm² auf 25 mm² reduziert werden. Dies erhöht die Spannung im Modul und reduziert den Strom, was dünnere Metallisierungen und Frontelektroden erlaubt. Als nächster Schritt ist die Entwicklung von 100 m² grossen Facettenspiegeln und einem 500 cm² grossen Receiver mit führender Systemeffizienz geplant.

Eine Skalierung von HCPVT-Systemen zu Terawatt-Grössen ist nicht durch die Materialverfügbarkeit beschränkt [19]: Die primären Materialien sind Beton, Stahl, und Glas. Halbleiter oder seltene Erden werden nur in geringen Mengen



Bilder: IBM

Bild 4 Kostengünstiger Parabolkonzentrator mit Multichip-Fotovoltaik-Receiver und thermischem Receiver mit passender Apertur.

benötigt. Umwelt-, Life-cycle- und Energieprobleme der Halbleiterherstellung für vollflächige Anwendungen sind bei HCPVT-Systemen um den Konzentrations- und Effizienzfaktor reduziert (ca. 5000 mal).

Für den Bau von HCPVT-Systemen können zudem existierende saubere und massenproduktionstaugliche industrielle Prozesse aus der Computer-, Bau- und Automobilbranche verwendet werden. Die Verfügbarkeit von billigen Spiegeln ist wegen dem hohen Kostendruck in der Solarindustrie zentral. Neue Methoden werden derzeit evaluiert, um grosse Spiegel mit hohen Konzentrationsfaktoren kostengünstig zu bauen, mit dem Ziel, kurzfristig Netzparität in heissen und trockenen Klimata zu erreichen.

Ein weiteres Ziel sind HCPVT-Systeme mit steuerbarer elektrischer Abgabeleistung, die trotz schwankender Direktstrahlung elektrische Energie auf Bestellung liefern können. Thermisch gespeicherte Überschussenergie steht dann auch nachts zur Verfügung. Dies erhöht die Rendite von Solarkraftwerken und ermöglicht stabile Netze auch bei hohem Anteil an Solarkraftwerken.

Résumé

Concentrateurs photovoltaïques thermiques

Conversion à haute efficacité du rayonnement solaire

Les installations photovoltaïques et solaires thermiques ne permettent d'utiliser qu'une fraction de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire. La conversion de chaleur en électricité dans les centrales thermiques solaires n'engendre également que de très faibles rendements globaux. Une nouvelle alternative basée sur des miroirs à concentration, sur une technique photovoltaïque très performante et sur un refroidissement à eau chaude permet d'obtenir des rendements globaux supérieurs et de favoriser la percée d'une utilisation combinée d'électricité et de chaleur.

Les systèmes photovoltaïques thermiques à haute concentration (HCPVT) peuvent être refroidis avec de l'eau à 90 °C et utiliser la chaleur pour le dessalement d'eau de mer, le refroidissement par absorption et le chauffage de locaux. Des récepteurs de type MCR (microchannel multi-chip receiver) permettent d'obtenir d'importants produits « concentration x surface », de réduire les coûts de la concentration et du refroidissement et d'augmenter l'efficacité photovoltaïque. Le rendement global de tels systèmes HCPVT se situe au-delà de 75 %.

Un changement d'échelle des systèmes HCPVT vers la dimension du térawatt ne saurait être limité par la disponibilité des matériaux : en effet, les matériaux primaires sont le béton, l'acier et le verre. Les semi-conducteurs et les terres rares ne sont utilisés qu'en faible quantité. Les problèmes liés à l'environnement, au cycle de vie et à l'énergie posés par la fabrication des semi-conducteurs pour des utilisations sans concentrateurs sont réduits du facteur concentration et efficacité pour les systèmes HCPVT. En outre, des procédés industriels aptes à la production de masse, propres et déjà existants, issus des branches de l'informatique, de la construction et de l'automobile, peuvent être utilisés pour la construction des systèmes HCPVT. No

Referenzen

[1] Perhaz, G. et al., Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-

junction solar cells, Prog. Photovolt. Res. Appl. 19, 54–60 (2011).
[2] Lee, S.S., Thermal Challenges and Opportunities in Concentrated Photovoltaics, IEEE 12th Electronics Packaging Technology Conference, pp. 608–613 (2010).
[3] Gombert, A. et al., Recent progress in concentrator Photovoltaics, Proc. SPIE 7725 772508-1-9 (2010).
[4] Handy, J., and Peterson, T., Concentrating PV Survey: An Unbiased Overview, High and Low Conc. Systems for Solar El. Appl. VI, VanSant, K., Sherif, R.A., eds., Proc. SPIE 8108, 810808 (2011).
[5] Kurtz, S., Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry, NREL Technical Report Revised August 2012.
[6] Müller, M. et al., Ultra-High-Concentration Photovoltaic-Thermal Systems Based on Microfluidic Chip Coolers, 7th Int'l. Conf. on Conc. Photovoltaic Systems, Las Vegas, USA, April 4–6 (2011).
[7] Escher, W. et al., D., Experimental Investigation of an Ultra-thin Manifold Micro-channel Heat Sink for Liquid-Cooled Chips, ASME J. Heat Transf., 132 (8), pp. 081402-1– 081402-10 (2010).
[8] Kribus, A., and Mittelman, G., Potential of Polygeneration with Solar Thermal and Photovoltaic Systems, J. Solar Energy Eng. 130, 011001 (2008).
[9] Kosmadakis et al., Simulation and economic analysis of a CPV /thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation, Solar Energy 85, 308– 324 (2011).
[10] Vivar, M., et al., A Review on Suitable Standards for Hybrid Photovoltaic/Thermal Systems,7th Intl Conf. on Conc. Photovoltaic Syst., AIP Conf. Proc. 1407, 390–395 (2011).
[11] Tyagi, V.V. et al., Advancement in solar Photovoltaic thermal (PV/T) hybrid collector technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 1387–1398 (2012).
[12] Coventry J.S. and Lovegrove, K., Development of an approach to compare the ‹value› of electrical and thermal output from a domestic PV I thermal system, Solar Energy 75, 63–72 (2003).
[13] Krause, K. and Kienzle, F., Maximizing Exergy Efficiency in Multi-Carrier Energy Systems, Proc. IEEE Power & Energy Soc. Gen. Mtg. Minneapolis July 25–29 (2010).
[14] «Renewables for Heating and Cooling», Untapped Potential, OECD/IEA (2007), http://www.iea.org/textbase/npsum/Renewables_Heating_Cooling07SUM.pdf
[15] Al-Mogbel, A., et al., A Simulation Study for Solar Adsorption Air-Conditioning in Saudi Arabia, Proc. Saudi HVAC Confex Conf. Feb. 11–13, 2013 and manuscript in preparation.
[16] Ong, C.L. et al., A Novel Concept of Energy Reuse from High Concentration Photovoltaic Thermal (HCPVT) System for Desalination, Desalination 295, 70–81 (2012).
[17] New York City steam system, http://en.wikipedia.org/wiki/New_York_City_steam_system
[18] V. Garcia-Heller et al., Economics of heat re-use in solar power stations, in preparation.
[19] Depuyt, B., et al., Scalability of CPV Towards Multi-Gigawatt Deployment, 8th Intl Conf. on Conc. Photovolt. Sys AIP Conf. Proc. 1477, 376–382 (2012).
[20] Rant, Z., Exergie, ein neues Wort für «Technische Arbeitsfähigkeit». Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens 22, 36–37 (1956).

Angaben zu den Autoren

Stephan Paredes arbeitet als Ingenieur bei IBM Research – Zürich im Advanced Thermal Packaging Projekt. Er entwickelt die Wasserkühlung von Hochleistungsrechnern und koordiniert die technische Umsetzung der Solartechnologieforschung.

IBM Research – Zürich, 8803 Rüschlikon
spa@zurich.ibm.com

Dr. **Werner Escher** arbeitete als Research Staff Member bei IBM Research – Zürich im Advanced Thermal Packaging Projekt. Verantwortungsbereich: Siliziumkühler und thermische Membranentsalzung.

IBM Research – Zürich, 8803 Rüschlikon
wernerescher@gmail.com

Dr. **Chin-Lee Ong** arbeitet als Postdoktorand an der Entwicklung von Membranentsalzung als thermischer Nutzer des HCPVT-Systems.

IBM Research – Zürich, 8803 Rüschlikon
ong@zurich.ibm.com

Dr. **Rami Ghannam** arbeitete an der Entwicklung von konzentrierten fotovoltaischen Systemen (Kooperation zwischen IBM und dem Ägyptischen Nanotechnologiezentrum).

IBM Egypt Nanotechnology Center, Giza, Egypt
rmghannam@googlemail.com, rami@aucegypt.edu

Dr. **Gilles Maag** arbeitete als Postdoktorand von Prof. Aldo Steinfeld an der Entwicklung des Primärspiegels, des Sonnenfolgers und der Sekundäroptik des HCPVT-Systems.

ETH Zürich, 8092 Zürich, gmaag@ethz.ch

Prof. **Aldo Steinfeld** leitet die Professur für erneuerbare Energieträger an der ETH Zürich und das Labor für Solartechnik am Paul-Scherrer-Institut.

ETH Zürich, 8092 Zürich, aldo.steinfeld@ethz.ch

Veronica Garcia-Heller arbeitete als Masterstudentin im Advanced Thermal Packaging Projekt an der ökonomischen Evaluation des HCPVT-Systems.

IBM Research – Zürich, 8803 Rüschlikon
vga@zurich.ibm.com

Dr. **Bruno Michel** leitet die Advanced Thermal Packaging Gruppe und die Aktivitäten im Bereich Smart Planet und Smart Energy (heisswassergekühlte Rechenzentren, solare Energie, Entsalzung und Adsorptionskühlung).

IBM Research – Zürich, 8803 Rüschlikon
bmi@zurich.ibm.com.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das IBM-EGNC Nanotechnology Center und für die Diskussionen mit Monika Müller, Ahmed Khalil, Ahmed Al-Mogbel und Patrick Ruch.

[1] Exergie bezeichnet den Teil der Gesamtenergie eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn diese in das thermodynamische Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird [20]. Die Exergie ist im Gegensatz zur Energie keine Erhaltungsgrösse und kann in einem irreversiblen Prozess zugunsten der Anergie vernichtet werden. Exergie ist wichtig, um den Wert von thermischer Energie zu verstehen und ist entscheidend für die Verbesserung der Gesamteffizienz in der industriellen Ökologie. Die Exergie von Wärme kann, etwas vereinfacht, wie elektrische Energie verstanden werden: Mit einer hohen Spannung (Temperatur) kann bei gleichem Strom (Wärmemenge) mehr Arbeit geleistet werden als mit einer niedrigeren Spannung. Die Einheiten von Energie als auch Exergie sind das Joule.

Anzeige