Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 6

Artikel: Solarthermische und photovoltaische Stromerzeugung

Autor: Durisch, W. / Kesselring, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904175

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Solarthermische und photovoltaische Stromerzeugung

W. Durisch, P. Kesselring

Sowohl bei der solarthermischen wie auch bei der photovoltaischen Stromerzeugung wurden in den vergangenen Jahren beachtliche Entwicklungsfortschritte erzielt. Der Beitrag stellt die spezifischen Vor- und Nachteile beider Technologien einander gegenüber.

La production d'électricité d'origine aussi bien thermique solaire que photovoltaïque a vu ces dernières années des progrès considérables dans son développement. L'article confronte les avantages et désavantages de ces deux technologies.

Adresse der Autoren
Dr. *Wilhelm Durisch* und Dr. *Paul Kesselring*
Eidg. Institut für Reaktorforschung,
5303 Würenlingen

1. Einleitung

Die Sonne stellt für den Menschen eine praktisch unerschöpfliche Quelle wertvoller sauberer Energie dar. In Form der fossilen Energieträger hat sie ihm über Jahrmillionen hinweg einen unschätzbaren Energievorrat gehortet. Der erste Ölpreisschock 1973/74 hat weltweit zu einer sprunghaften Intensivierung der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Sonnenenergienutzung geführt. Die Schweiz arbeitet hier seit zehn Jahren mit. Vielfach waren zwar die Erwartungen bezüglich Kosten und Markteinführung unrealistisch hoch gespannt. Wir wissen heute auch, dass die konventionellen Energiequellen weiter reichen werden, als vor zehn Jahren angenommen wurde, und dass wir mit den fossilen Energieträgern eher ein Umwelt- und Klima- als ein Ressourcenproblem haben werden. So hat denn die anfängliche Sonnenenergie-Euphorie einer weitgehend sachlichen Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen Platz gemacht. Das ist gut so.

Die Sonne bleibt auch so eine Energiequelle, deren weltweite Nutzung früher oder später in grösserem oder kleinerem Massstab Bedeutung erlangen wird. Denn, vergessen wir nicht, der gesamte heutige Weltenergieverbrauch könnte auf lediglich 0,1% der Erdoberfläche durch die Nutzung der eingestrahlten Sonnenenergie gedeckt werden, setzt man für die Umwandlung in Nutzenergie einen Wirkungsgrad von nur 10% voraus. Dies alles rechtfertigt die kontinuierliche Weitererforschung und Weiterentwicklung der Sonnenenergienutzung. Es ist an der Zeit, die Sonnenenergie als gleichberechtigte Energiequelle anzuerkennen.

Im folgenden soll ausschliesslich auf die grosstechnische Nutzung der Sonnenenergie in solarthermischen und photovoltaischen Kraftwerken eingegangen werden. Mit Fragen zu ihrer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit – vorzugsweise in den Schweizer Alpen – befasst sich seit einigen Jahren das Konsortium SOTEL (Solarthermische Elektrizität) unter der Federführung des EIR. Der Eigeninitiative dieses Konsortiums ist es zu verdanken, dass zum Thema Solarkraftwerk mehrere international beachtete Arbeiten zustande kamen bzw. auf Anregung des Konsortiums hin durchgeführt wurden ([1] bis [7]). Sie erlauben es nun, die Solarthermik und die Photovoltaik eingehender miteinander zu vergleichen, die Vor- und Nachteile beider Technologien gegeneinander abzuwägen und einen – so hoffen wir – sachkundigen Beitrag in die Solarkraftwerkdiskussion einzubringen.

2. Solarthermische Stromerzeugung

2.1 Das Prinzip

Bei der solarthermischen Umwandlung der solaren Strahlungsenergie wird die anfallende Direktstrahlung zunächst mittels rechnergesteuerter Heliostaten konzentriert. Danach wird sie in thermische Energie umgewandelt und nach eventueller Speicherung über den bekannten konventionellen Weg in elektrische Energie überführt. Weltweit existieren ein halbes Dutzend Versuchskraftwerke dieses Typs. Das grösste davon zeigt Figur 1 und 2.

Technisch kann die nun rund acht Jahre alte Entwicklung als Erfolg bezeichnet werden. Bemerkenswert ist, dass nicht mit den solarspezifischen Komponenten (Heliostaten, Receiver) Probleme auftraten, sondern mit den konventionell-thermischen Anlagekomponenten, welche der Dynamik, wie sie durch die stochastische Natur der Solarstrahlung vorgegeben ist, offensichtlich nicht ausreichend angepasst waren.

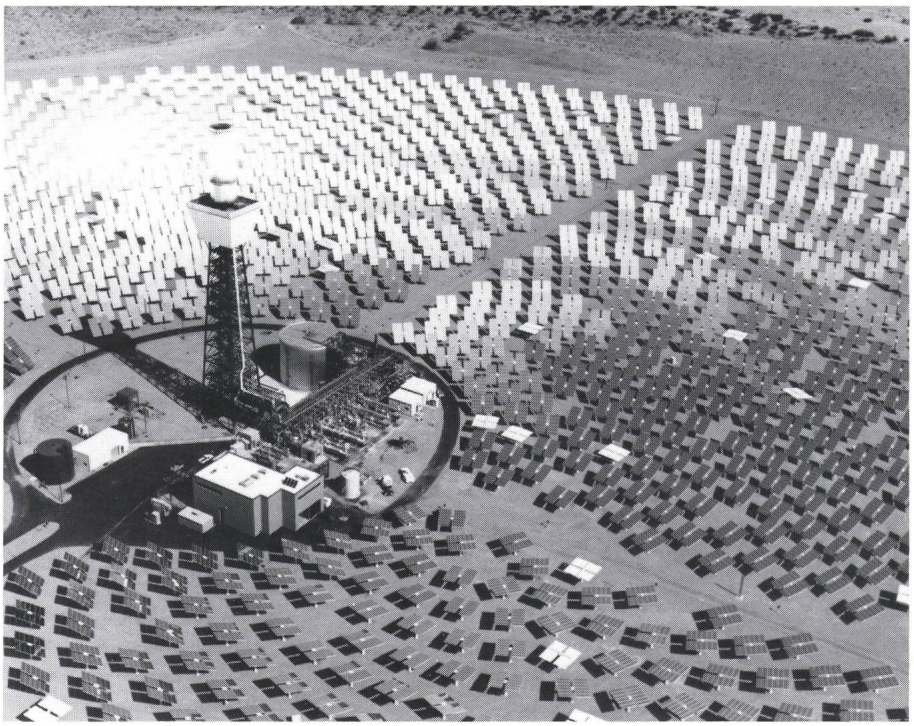

Fig. 1 Solarthermisches Versuchskraftwerk in der Mojave-Wüste bei Barstow in Kalifornien, USA

Der 86 m hohe Turm in der Mitte trägt auf seiner Spitze den Receiver («weissglühender» senkrecht stehender Zylinderabsorber). Dieser absorbiert die von den rund 1800 Heliostaten reflektierte und konzentrierte Solarstrahlung und wandelt sie in thermische Energie um, die in konventioneller Weise in elektrische Energie umgewandelt wird. Das Versuchskraftwerk hat eine maximale Nettoleistung von 12,5 MW. Ein Heliostat ist eine Spiegelvorrichtung, die die einfallende direkte Solarstrahlung in eine gleichbleibende, vorgegebene Richtung umlenkt. Der Receiver scheint weissglühend zu sein, weil von der mit einer Intensität von etwa 500 Sonnen einfallenden Strahlung einige Prozente reflektiert werden. Der schwarze Absorber erscheint deshalb so hell wie eine perfekt weisse Fläche, welche mit der Intensität von einigen 10 Sonnen angestrahlt wird.

In der Schweiz wurde für einen konkreten Standort im Val Maroz, Bergell, die Möglichkeit für ein solarthermisches Kraftwerk untersucht [6]. Da darüber bereits in [8] zusammenfassend berichtet wurde, soll hier nicht mehr näher darauf eingegangen werden. Es sei lediglich bemerkt, dass die Untersuchung zur Zeit wohl zu den weltweit am weitesten fortgeschrittenen Arbeiten gezählt werden darf und zu einem völlig neuen Receiver/Speicher-Konzept geführt hat. Aus standortspezifischen Gründen kam das Konsortium SOTEL jedoch zum Schluss, dass von der Realisation eines Solarkraftwerkes im Val Maroz abzuraten ist. Die dort durchgeführten Arbeiten, inkl. Meteomessungen ([9], [10]) stellen aber dennoch eine höchst wertvolle Vorleistung dar, falls je ein Solarkraftwerk in den Schweizer Alpen gebaut werden sollte.

2.2 Potential in der Schweiz

Nach [1] könnten in der Schweiz – vorzugsweise in den Alpen – auf einer ausgesuchten Fläche von 120 Quadratkilometern solarthermische Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von rund 4300 MW errichtet werden. Grössenordnungsmässig sind diese Zahlen auch nach neueren, detaillierteren Standortuntersuchungen noch richtig. Kritisch ist allerdings die Zahl der Plätze, an denen grössere Anlagen (10 MW und mehr) gebaut werden könnten. Mit den 4300 MW liessen sich jährlich etwa 4,8 Mia kWh elektrische Energie erzeugen, d.h. etwa 12% des momentanen Elektrizitätsverbrauchs der Schweiz. Dies ist zu vergleichen mit der Elektrizitätsmenge, die durch zusätzliche Wasserkraftwerke – bei Ausschöpfung der noch bestehenden Ausbaumöglichkeiten – oder durch ein 650-MW-Kernkraftwerk erzeugt werden könnte.

Auch die Befürworter der Sonnenenergie dieser Energieform sind sich dieser Grenze für die inländische Produktion mittels solarthermischer Kraftwerke voll bewusst (sie wird vor allem durch das für diesen Zweck potentiell verfügbare Land bestimmt). Auch wenn solarthermische Kraftwerke nur einen bescheidenen Anteil an unserer Gesamtenergieversorgung zu leisten vermöchten, sollte er als versorgungssicherer, importunabhängiger, immissionsarmer Beitrag an eine auf mehrere Energieträger abgestützte Energieversorgung aufgefasst werden (ausgewogene Diversifikation). Die entscheidende Frage wird aber sein, wieviel man dafür zu bezahlen bereit ist. Wie beim weiteren Ausbau des Wasserkraftwerkparks dürfte auch hier mit lebhaften Diskussionen mit Umweltschutzorganisationen zu rechnen sein.

Fig. 2 Dasselbe Kraftwerk wie in Figur 1

Zu Versuchszwecken konzentrieren die Heliostaten das einfallende Sonnenlicht rechts und links vom Receiver.

2.3 Meteodaten

Für solarthermische Kraftwerke ist die direktnormale Einstrahlung die relevante Strahlungskomponente. Diese Komponente wurde an den bisherigen Kraftwerkstandorten in Spanien, Sizilien, Frankreich, Kalifornien, Japan und Israel eher überschätzt. Dies vor allem in Ermangelung geeigneter Messungen, welche es erlaubt hätten, neben der Quantität auch die Qualität der Strahlung vorab zu beurteilen. Da die Einstrahlungsdaten nicht nur für die Standortwahl und die Kraftwerkauslegung, sondern auch für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen von entscheidender Bedeutung sind, kommt der systematischen Erhebung verlässlicher Meteodaten an möglichen Kraftwerkstandorten erhebliche Bedeutung zu. Dies insbesondere auch deshalb, weil sie - wie sämtliche Studien ausweisen - einen starken Einfluss auf die Stromgestehungskosten haben. Eine Wissenslücke besteht hier vor allem auch noch bei Daten aus potentiellen «Sonnenländern», was einen Vergleich auf internationaler Basis vorderhand weitgehend verunmöglicht. Aber auch in der Schweiz steht es bezüglich kraftwerkspezifischer Meteodaten nicht zum besten, obwohl die Schweiz weltweit das dichteste Netz meteorologischer Stationen besitzt. In der Schweiz fehlen vor allem langjährige Messreihen der direkt-normalen Einstrahlung.

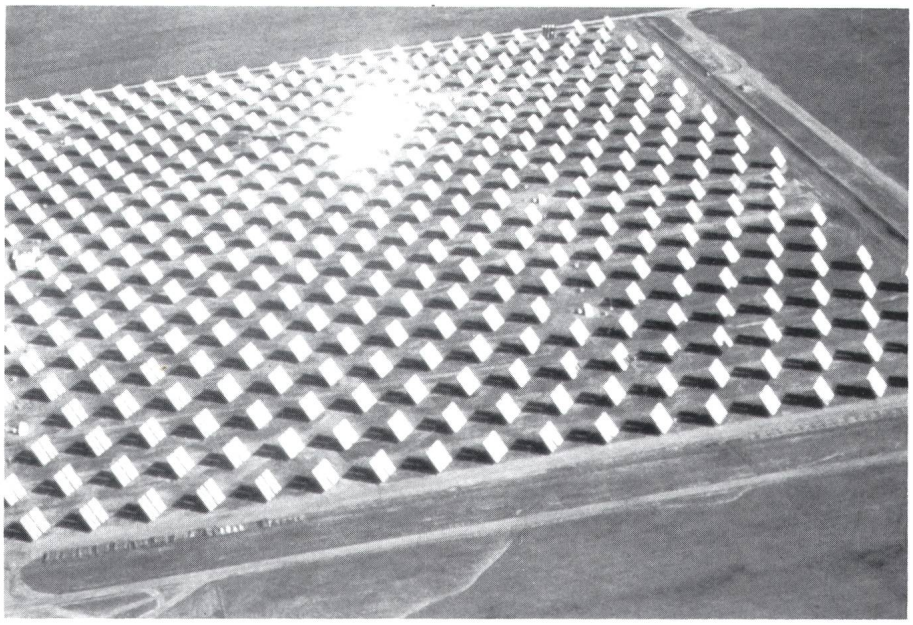

Fig. 3 Photovoltaisches Versuchskraftwerk östlich von San Luis Obispo auf den Carrisa Plains, Kalifornien, USA

Das Kraftwerk hat eine maximale elektrische Nettoleistung von 6,5 MW. Auf 756 Tracker werden je rund 10 000 Solarzellen zweiachsig, computergesteuert der Sonne nachgeführt. Die Solarzellen bestehen aus monokristallinem Silizium und weisen einen Wirkungsgrad von rund 10% auf. Das Kraftwerk wurde in acht Monaten errichtet und arbeitet nun seit gut einem Jahr weitgehend wartungsfrei. Die erwartete jährliche Elektrizitätserzeugung beträgt 14 Mio. kWh. Sie wird ins Netz der Southern California Edison Company eingespeist. Das Kraftwerk wird möglicherweise auf 16 MW erweitert.

3. Photovoltaische Stromerzeugung

3.1 Das Prinzip

In photovoltaischen Kraftwerken wird mittels einer Vielzahl von Solarzellen ein Teil der Solarstrahlung direkt in elektrischen Gleichstrom umgewandelt und nachfolgend in Sammelleitungen zu Umformer/Trafo-Stationen transportiert. Die Umwandlung basiert auf der Absorption von Lichtquanten (Photonen) in dotierten Halbleiter-Materialien. Dabei wird die Energie der Photonen teilweise auf Elektronen übertragen, was zum Aufbau einer Spannung über den Klemmen der Solarzelle führt. Diese leistet Arbeit, sobald der elektrische Kreis durch Anfügen einer externen Last geschlossen wird.

Obwohl dieser sogenannte photoelektrische Effekt bereits 1839 entdeckt wurde (Becquerel), gelang die Herstellung der ersten Silizium-Solarzellen erst Anfang der fünfziger Jahre. Infolge des hohen Preises dieser Zellen fanden sie zunächst nur in der Raumfahrt Anwendung. Auf der Erde sind inzwischen zahlreiche kleinere Photovoltaikanlagen im Bereich von 1 bis 300 kWe Spitzenleistung gebaut worden. In neuester Zeit wurden auch drei grössere «Experimentier-Kraftwerke» im Bereich von 1 bis 6,5 MWe Spitzenleistung gebaut und in Betrieb genommen. Das grösste davon zeigt Figur 3. In der Schweiz sind vor allem die 15-kW-Anlage im Tessin (TISO, s. S. 309 in diesem Bulletin) und die in den Alpen betriebene Versuchsanlage des EIR (1,3 kW) zu erwähnen.

3.2 Potential in der Schweiz

Nach [3] liessen sich in den Schweizer Alpen - einer vorsichtigen Schätzung zufolge - photovoltaische Kraftwerke mit einer gesamten installierten elektrischen Leistung von rund 1800 MW errichten. Diese könnten jährlich rund 2,8 Mia kWh oder 7% des heutigen schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs erzeugen. Die von diesen Kraftwerken eingenommene Landfläche betrüge etwa 60 km², d.h. etwa 0,4% der Fläche des schweizerischen Alpenraumes. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um abgelegenes Ödland, das anderweitig (Landwirtschaft, Tourismus, Militär, Forstwirtschaft, Naturschutzgebiete usw.) kaum von Interesse ist, jedoch für Photovoltaikkraftwerke gut geeignet wäre. Würde von Aspekten des Umweltschutzes und der Ästhetik abgesehen und würden sämtliche - auch weniger geeignete - Standorte für photovoltaische Kraftwerke in Betracht gezogen, könnten auf einer Fläche von 135 km² sogar 3660 MWe installiert werden mit einer Jahresenergieproduktion von 5,7 Mia kWh, d.h. rund 14% des heutigen schweizerischen Elektrizitätsverbrauches.

Obige Abschätzungen gelten für einen realistisch angenommenen Wirkungsgrad der Solarzellen von 10%. Bei photovoltaischen Kraftwerken sieht die Situation bezüglich Solarstrom also ähnlich aus wie bei den solarthermischen Kraftwerken. Hier sei noch darauf hingewiesen, dass es sich bei den in [1] und [3] evaluierten potentiell geeigneten Landflächen weitgehend um dieselben Flächen handelt. Eine kombinierte Anwendung beider Kraftwerktechnologien auf derselben Fläche ist bis heute nicht untersucht worden, müsste aber grundsätzlich möglich sein.

3.3 Meteodaten

Für photovoltaische Kraftwerke ist die globale Einstrahlung massgebend.

Sie setzt sich aus der direkten und der diffusen Solarstrahlung zusammen. Während von der globalen Einstrahlung auf die horizontale Ebene für mehrere Orte in der Schweiz verlässliche langjährige Messreihen vorliegen (Schweizerische Meteorologische Anstalt, SMA), existieren entsprechende Messreihen für geneigte, nach Süden orientierte Ebenen für potentielle Solarkraftwerkstandorte nicht, so dass man dort bis anhin auf rechnerische Abschätzungen angewiesen war. Dasselbe gilt für die globale Einstrahlung in ein- oder zweiachsig der Sonne nachgeführte Flächen.

Sämtliche bis heute in der Schweiz durchgeführten Solarkraftwerkstudien sind demzufolge von den Einstrahlungsdaten her mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, die nur durch geeignete Messungen beseitigt werden kann. Entsprechende Messungen, die kürzlich im Raume Disentis aufgenommen wurden, zeitigten bereits interessante Ergebnisse (EIR-interne Berichte). Es zeigte sich z.B., dass in den Alpen vor allem im Winter das Nachführen der Solarzellen von Nutzen ist. Ein gezieltes Experiment könnte hier aufschlussreich sein.

4. Vergleichende Betrachtung

4.1 Allgemeines

Beim Vergleich der solarthermischen mit der photovoltaischen Stromerzeugung spielen neben der Wirtschaftlichkeit noch folgende Aspekte eine Rolle: Akzeptanz, Umweltbelastung, Ästhetik, Betriebssicherheit, Beschäftigungslage, Versorgungssicherheit, Energiepolitik, Ethik, Ökologie usw. In einer Gesamtbeurteilung der Solarthermik und der Photovoltaik müsste all diesen Gesichtspunkten in gewichteter Weise Rechnung getragen werden. Da eine Gewichtung weitgehend subjektiven Einflüssen unterworfen ist, soll im folgenden zunächst einmal ein Vergleich mehr technischer Natur durchgeführt werden.

Gegenüber der Photovoltaik hat die *Solarthermik folgende Vorteile:*

- Im Gegensatz zu Photovoltaikanlagen nimmt der Jahreswirkungsgrad bei Solarthermikanlagen mit der Kraftwerkgrösse zu.
- Bei Solarthermikanlagen kann über die ohnehin erforderliche Wärmespeicherung eine gewisse Anpassung der Elektrizitätsproduktion an die Nachfrage vorgenommen werden, nicht jedoch bei Photovoltaikanlagen. Letztere folgen dem zeitlichen Anfall der Solarstrahlung praktisch verzögerungsfrei, d.h., die Elektrizitätsproduktion kann innert kurzer Zeit auf beispielsweise 10% der Spitzenleistung abfallen und schnell wieder auf 100% anwachsen (Wolkendurchgänge). Batteriepuffer sind zwar technisch möglich, aber teuer. Die Speicherung von Elektrizität aus Solarzellenkraftwerken kann, falls ein Verbundnetz und Pumpspeicher zur Verfügung stehen, in Form potentieller Energie erfolgen. Dabei sind jedoch Pump- und Turbinierverluste in Kauf zu nehmen. Sowohl Solarthermik- als auch Photovoltaikstrom könnte jedoch dazu benützt werden, die Wasservorräte in den Speicherseen zu schonen («fuel saving»).
- Der Schutz gegen Blitzschäden dürfte bei Heliostaten wahrscheinlich einfacher zu realisieren sein als bei Solarzellen. Ebenso der Schutz gegen Hagelschlag (Ausnahme: Solarzellen auf «Heliostaten»).
- Mit Solarthermikanlagen kann neben Elektrizität, mit höherem Wirkungsgrad, auch Hochtemperaturwärme für industrielle Prozesse und/oder Wärme für Fernheizzwekke erzeugt werden. Mit Solarzellen produziert man sinnvollerweise «nur» Strom.
- Solarthermikanlagen lassen eine Zusatzfeuerung mit Öl, Kohle oder Gas auf relativ einfache Weise zu, nicht jedoch Photovoltaikanlagen.
- Bei solarthermischen Kraftwerken könnten alle Komponenten in der Schweiz hergestellt werden (wichtig für Export). Bei photovoltaischen Anlagen müsste das Herz des Kraftwerks, nämlich die Solarzellen, importiert werden. Denn in der Schweiz wurden bis heute keine Solarzellen in grösseren Mengen industriell produziert. Hier den Anschluss an die weit fortgeschrittene internationale Entwicklung noch zu finden, dürfte wohl nicht so rasch gelingen. So bleiben denn bei der Photovoltaik Planung, Engineering, Anlagenbau, Steuerelektronik, Umrichtsysteme, Transformatorenanlagen und Leittechnik als «Exportmöglichkeiten» übrig.

Dagegen hat die *Photovoltaik* gegenüber der Solarthermik *folgende Vorteile:*

- Photovoltaikanlagen sind im Hinblick auf den Systemaufbau wesentlich einfacher als Solarthermikanlagen.
- Die Nachführgenauigkeit bei sonnennachgeführten Solarzellen ist weit weniger kritisch als bei Heliostaten (Ausnahme bei Anwendung von Konzentratorspiegeln oder anderer Vorkonzentration).
- Solarzellen vermögen neben der direkten Solarstrahlung auch diffuse Strahlung in elektrische Energie umzuwandeln. Dagegen kann in Solarthermikanlagen ausschliesslich die direkte Solarstrahlung verarbeitet werden.
- Photovoltaikanlagen dürften mit Sicherheit einfacher zu automatisieren sein als Solarthermikanlagen.
- Solarzellen können im Labor im Milliwattleistungsbereich entwickelt und im Milliwatt- bis Megawattbereich eingesetzt werden. Die Weiterentwicklung in der Solarthermik erfordert Anlagen im Megawattbereich.

Die aufgezählten Vor- und Nachteile gestatten es nicht – zumindest aus technischer Sicht – einen klaren Gesamtvorteil der einen Technik gegenüber der anderen aufzuzeigen. So bleibt denn vorderhand nichts anderes übrig, als von Fall zu Fall zu entscheiden und/oder andere Entscheidungskriterien heranzuziehen. Die Wahrscheinlichkeit ist indessen gross, dass beide Kraftwerktechnologien ihre spezifischen Anwendungen in der künftigen Weltenergieversorgung finden werden.

Generell scheint es wichtig, zur Vermeidung von Missverständnissen deutlich zu sagen, welche Teilaspekte bei einem Vergleich der Solarthermik mit der Photovoltaik jeweils hervorgehoben werden sollen und was die Vergleichsbasis ist. Dies sei am Beispiel des auf Seite 306 in diesem Bulletin dargestellten Vergleichs illustriert, der auf der «Elektrowatt-Studie» [4] basiert, welche innerhalb des IEA-SSPS-Projekts in Almería durchgeführt wurde. Verglichen wurden dort die *Tageserträge von Anlagen mit gleicher Spitzenleistung*. An wolkenlosen Tagen liefern beide Anlagen etwa denselben Tagesertrag. An dunstigen und teilweise oder ganz bewölkten Tagen wird der Ertrag der Solarzellenanlage weniger reduziert als derjenige der Heliostatenanlage (Ausnützung der Globalstrahlung statt nur der Direktstrahlung). Die Studie [4] zeigt auf, um wieviel stärker die Stromproduktion der so-

Technische und wirtschaftliche Daten solarthermischer und photovoltaischer Kraftwerke am Modellstandort im Val Maroz, Bergell (Varianten ST0 und PV1) sowie an einem fiktiven Standort mit höherer Einstrahlung und tieferen Erschliessungskosten (Varianten ST3 und PV3). Bei den Photovoltaik-Varianten PV1 und PV3 handelt es sich um Anlagen mit sonnennachgeführten Solarzellen (Zellen auf Tracker montiert) Tabelle I

Kraftwerksart	Solarthermisch		Photovoltaisch	
Variante	ST0	ST3	PV1	PV3
Anzahl Heliostaten (Spiegelfläche: 95 m²)	1346	10 400	-	-
Anzahl Tracker (Zellenfläche: 95 m²)	-	-	989	8916
Einstrahlung, kWh/m²/a	1257[1]	1395[1]	2138[2]	2373[2]
Elektrische Nettoleistung, MW	5	50	-	-
Elektrische Spitzenleistung, MW	-	-	11	100
Stromerzeugung, GWh/a	20,7	207	20,4	204
Jahreswirkungsgrad, %[3]	12,8	15,2	9,3	9,6
Investitionskosten, Mio Fr. (5,5%, 25 a)	174	730	220	1663
Kapitalkosten, Mio Fr./a (5,5%, 25 a)	13,0	54,4	16,4	123,9
Betrieb und Unterhalt, Mio Fr./a	2,6	9,4	2,8	22,1[4]
Stromgestehungskosten, Mio Fr./a	15,6	63,8	19,2	146,0
Spezifische Stromgestehungskosten Fr./kWh	0,75	0,31	0,94	0,72

[1] Direkt-normale Einstrahlung
[2] Global-normale Einstrahlung
[3] Verhältnis der Netto-Elektrizitätserzeugung zur Einstrahlung mal Spiegelfläche bzw. Zellenfläche
[4] Vor allem Ersatz von Zellen

larthermischen Anlage unter diesen Umständen reduziert wird als diejenige der photovoltaischen Anlage. Daraus aber schon zu schliessen - wie das z.T. gemacht wurde -, solarthermische Anlagen würden unwirtschaftlicher Strom produzieren als photovoltaische, ist natürlich falsch. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich ist erstens - in erster Näherung - die *jährliche Energieproduktion und nicht* die *Spitzenleistung massgebend,* und zweitens ist nicht nur die jährliche Produktion, sondern auch der *spezifische Stromgestehungspreis mitentscheidend.* So trivial diese Feststellung ist, unnötig scheint sie nicht zu sein.

4.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Ein eingehender Vergleich der Wirtschaftlichkeit von solarthermischen und photovoltaischen Kraftwerken unter alpinen Bedingungen wurde vom Konsortium SOTEL in [7] durchgeführt. Um dabei an die Ergebnisse der Untersuchungen in [6] anschliessen zu können, wurde als Modellstandort wieder das Val Maroz, Bergell, gewählt. Vereinfachend wurde der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Annuitätenmethode zugunde gelegt. Da für das Val Maroz keine Messungen über die Quantität und Qualität der Einstrahlung existierten, mussten die erforderlichen Daten für die Studie [6] rechnerisch abgeschätzt werden. Durch die inzwischen im Val Maroz erhobenen Daten konnten diese Abschätzungen - soweit die Messungen dies zuliessen (keine langjährigen Messreihen verfügbar) - bestätigt werden ([10] und EIR-interne Berichte). Für die Untersuchung [7] lag dann bereits ein einjähriger Meteodatensatz vom Val Maroz vor. Dieser wurde vom Konsortialpartner Elektrowatt zur Auslegung und Berechnung der Stromproduktion verschiedener Varianten von Photovoltaik-Kraftwerken im Val Maroz mitberücksichtigt. Als *Vergleichsbasis für die Solarthermik- und Photovoltaikanlagen* wurde vereinbart, die verschiedenen Kraftwerkvarianten so auszulegen, dass sie die *gleiche jährliche Stromproduktion* aufweisen. Neben den Varianten im Val Maroz selbst wurde auch der Einfluss des Standorts und der Kraftwerkgrösse auf die spezifischen Stromgestehungskosten untersucht, bei den Photovoltaik-Anlagen zusätzlich der Einfluss der Ausrichtung der Zellen (fest montierte bzw. sonnennachgeführte Zellen). Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle I und Figur 4 wiedergegeben.

Der Tabelle I und der Figur 3 ist zu entnehmen, dass in allen Fällen mit gleicher Jahresproduktion die solarthermischen Kraftwerke - unter den heutigen Preisverhältnissen und den angenommenen technischen Daten -

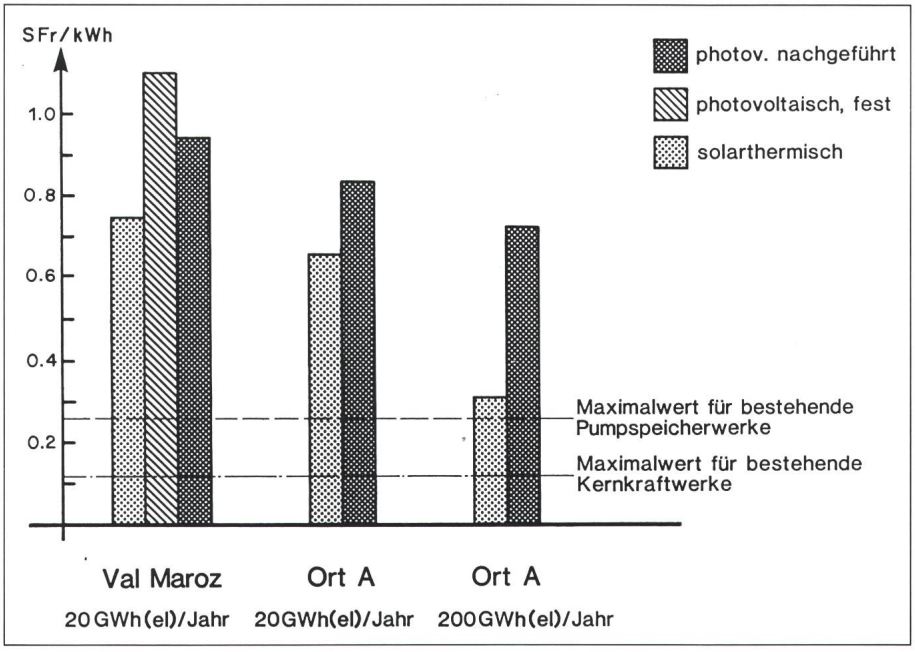

Fig. 4 Vergleich der Stromgestehungskosten von solarthermischen mit photovoltaischen Kraftwerken

Die für das Val Maroz ermittelten Werte sind verglichen mit jenen an einem günstigeren fiktiven Standort A mit gleicher und mit zehn mal grösserer jährlicher Stromproduktion. Für das Val Maroz sind auch noch die Kosten für eine Variante mit fest montierten Solarzellen wiedergegeben. Zum Vergleich sind die maximalen Gestehungskosten für bestehende Kernkraftwerke und Pumpspeicherwerke eingezeichnet. Nicht eingezeichnet sind die Gestehungskosten für fossilthermische Spitzenkraftwerke, die je nach jährlicher Betriebsstundenzahl bis 42 Rp./kWh betragen können. Die Elektrizität aus Solarkraftwerken ist weder Band- noch Spitzenenergie. Sie fällt zwar bevorzugt zur mittäglichen Spitzenverbrauchszeit an, ist aber witterungsbedingt nicht mit Sicherheit verfügbar.

den photovoltaischen wirtschaftlich überlegen sind. Ein wesentlicher Grund dafür ist der bei den solarthermischen Kraftwerken höhere Wirkungsgrad. Bei den solarthermischen Kraftwerken ist die Abnahme der Stromgestehungskosten mit der Kraftwerkgrösse («economy of scale») weit stärker ausgeprägt als bei den photovoltaischen. Dies hat zur Folge, dass kleine solarthermische Kraftwerke mit photovoltaischen wirtschaftlich nicht konkurrieren können.

Im Falle des Standorts im Val Maroz wurden neben fest montierten, nach Süden schauenden Solarzellen (Neigung: 45 Grad) auch der Sonne nachgeführte Zellen in Betracht gezogen. Wie Figur 3 zeigt, arbeiten hier interessanterweise sonnennachgeführte Zellen wirtschaftlicher als fest nach Süden ausgerichtete. (Die grossen Photovoltaikkraftwerke in den USA weisen ebenfalls sonnennachgeführte Solarzellen auf.) Allerdings basieren die Berechnungen zu den sonnennachgeführten Solarzellen auf einer groben Abschätzung der global-normalen Einstrahlung. Grob deshalb, weil für diese Art der Einstrahlung in der Schweiz keine Messungen verfügbar sind. Entsprechende Messungen sind erst kürzlich aufgenommen worden ([10] und EIR-interne Berichte). Welch starken Einfluss das Strahlungsangebot auf die Stromgestehungskosten hat, kommt in Figur 3 klar zum Ausdruck: ein um 11% erhöhtes Angebot hat eine Kostensenkung von 9,3% zur Folge.

In Figur 3 sind auch die Stromgestehungskosten von Pumpspeicherwerken und Kernkraftwerken grob eingezeichnet. Sie lassen erkennen, dass die Gestehungskosten sowohl bei der Solarthermik als auch bei der Photovoltaik höher liegen. Nicht zu vergessen ist dabei, dass es sich bei den hier untersuchten Solarthermik- und Photovoltaikanlagen um Erstanlagen nach heutigem Stand der Technik handelt. Auf mögliche Kostensenkung geht der nächste Abschnitt ein.

Interessant ist auch das Ergebnis einer Grenzkostenbetrachtung. Könnten die Heliostaten und Solarzellen so stark verbilligt werden, dass ihre Kosten gegenüber den übrigen Kraftwerkkosten vernachlässigbar wären, so würden die Stromgestehungskosten noch 14 Rp./kWh (Solarthermik) bzw. 27 Rp./kWh (Photovoltaik) betragen. In [3] liegen die Grenzkosten für die Photovoltaik sogar noch tiefer, nämlich bei 16 Rp./kWh. Wie weit die Gestehungskosten tatsächlich gesenkt werden können, ist heute schwer vorauszusagen, ebensoschwer, wie die Konkurrenzsituation mit anderen Energieversorgungssystemen langfristig – beim Versiegen und Teurerwerden der fossilen Energien – aussehen wird. Sicher ist nur, dass die grosstechnische Elektrizitätserzeugung aus Sonnenenergie sowohl in Heliostaten- als auch in Solarzellenkraftwerken noch stark verbilligt werden kann und dass die heute üblichen Elektrizitätsversorgungssysteme die Tendenz haben, sich zu verteuern (vor allem aus Umweltschutzgründen). Schwer vorauszusagen ist allerdings auch, wie schnell die technische Entwicklung bei der Solarelektrizität vorankommen wird. Es ist indessen kaum zu erwarten, dass sie schneller voranschreiten wird, als dies bei der Verstromung fossiler Energieträger und von Kernbrennstoffen der Fall war bzw. noch ist.

Im niedrigen Leistungsbereich macht ein Vergleich der Solarthermik mit der Photovoltaik keinen Sinn, da solarthermische Kraftwerke aus technischen Gründen hier nicht zur Diskussion stehen. Dagegen ist allgemein bekannt, dass sich kleinere Solarzellen-Stromversorgungsanlagen in günstigen Einsatzfällen schon heute als wirtschaftlich erweisen.

4.3 Kostenreduktionspotential

Aus den bisherigen Erfahrungen mit den existierenden, relativ kleinen solarthermischen Versuchskraftwerken lassen sich folgende Verbilligungsmöglichkeiten ableiten:

- Vergrösserung der Kraftwerke von der heutigen Experimentiergrösse auf günstigere Grössen von 30 bis 100 MW (je nach Randbedingungen)
- Serienmässiges Errichten und kontinuierlich fortgesetzte, rasche Erweiterung des Kraftwerkparks wie bei der Kernenergie in Frankreich, Japan und der Sowjetunion
- Verbesserung der Kraftwerkdynamik (schnelle erste Stufe, kurze Anfahrzeit) und damit höhere Stromproduktion
- Weitgehende Automatisierung des Kraftwerkbetriebs zur Herabsetzung der Betriebskosten
- Minimalisierung des Eigenverbrauchs (Hilfsenergie) und der Verluste
- Erhöhung der Jahresbetriebsstundenzahl und der Kraftwerkflexibilität durch grössere Speicher
- Sorgfältige Wahl von Kraftwerkstandorten mit geeigneter Meteorologie (Einstrahlung, Windverhältnisse, Niederschlagsmenge), Luftreinheit (Alpen), Topographie, Bodenbeschaffenheit, geringen Erschliessungskosten usw.
- Weiterentwicklung von Komponenten (Heliostaten, Receiver, Speicher, Wärmeaustauscher, Dampferzeuger, Turbinen usw.) zu höheren Wirkungsgraden, zu längerer Lebensdauer und zu grösserer Zuverlässigkeit
- Standardisierung
- Industrielle automatisierte Serienproduktion von Komponenten
- Neuentwicklung von Komponenten (Keramikreceiver, Dünnstglasspiegel-Heliostaten, frontverspiegelte Heliostaten, Membranheliostaten usw.)
- Erhöhung des Kraftwerk-Wirkungsgrades durch Optimierung des Gesamtsystems
- Energie- und materialsparende Produktionsverfahren für Kraftwerkkomponenten
- Optimierung der Speicherbewirtschaftung
- Optimierung des Kraftwerkbetriebs bezüglich Lokalmeteorologie (laufende Mitberücksichtigung der Wetterprognose)

Alle diese Massnahmen zeigen einen gangbaren Weg auf, der zur Hoffnung auf eine Kostenreduktion um Faktoren Anlass gibt. Als Beispiel sei die Reduktion der Heliostatenkosten im Verlaufe der letzten acht Jahre angeführt. Kosteten sie anfänglich noch 1000 $/m^2, so sind sie heute für 200 $/m^2 zu haben, und man spricht von Konzepten, die diese Preise bis gegen 50 $/m^2 herunterdrücken sollen.

Grundsätzlich anders sieht die Situation bei der Photovoltaik aus. Die Anpassung der ursprünglich für die Raumfahrt entwickelten Siliziumsolarzellen an terrestrische Verhältnisse und die damit einhergegangene Verbilligung ist heute weitgehend abgeschlossen. Ein Indiz dafür sind die heutigen Zellenpreise, welche immer noch höher sind als erwartet. So konnte das vom US-Departement of Energy (DOE) 1981 für 1986 auf 0,7 $ pro Watt Spitzenleistung festgesetzte Kostenziel mit dem heute für Grossabnehmer gültigen Preis von 5 $ pro Watt Spitzenleistung bei weitem nicht erreicht werden. Dies im Gegensatz zu den Heliostaten, wo die Preisprognosen erfüllt wurden.

Was bei der Photovoltaik nötig ist, sind technologische Durchbrüche in der Solarzellenfabrikation, die an sich möglich, aber weder voraussehbar noch programmierbar sind. Neuartige Zellen müssten vor allem höhere Wirkungsgrade bei gleichzeitig niedrigeren Herstellungskosten und hoher Lebensdauer (keine Degradation) aufweisen. Neben der Entwicklung solcher Zellen müsste aber in zunehmendem Masse auch die Entwicklung und Verbilligung der erforderlichen Zusatzkomponenten (Umrichter, Transformatoren, Steuerelektronik, Fundation, Tragstruktur, Netzinterface und eventuell Speicher) vorangetrieben werden, da diese mit abnehmenden Zellenkosten zunehmend ins Gewicht fallen.

Die künftige Entwicklung der Solarzelle dürfte vor allem in Richtung mehrschichtiger amorpher Dünnfilmzellen gehen, wo eine Verbilligung durch Einsparung von teurem energieintensivem Material möglich ist und die Zellenempfindlichkeit der spektralen Intensitätsverteilung der Solarenergie besser angepasst werden kann. Aber auch billigere Herstellungsverfahren sind zu erwarten (z.B. Direktdeposition durch Aufdampfung oder elektrochemische Abscheidung). Auch das Auffinden neuer geeigneter Halbleitermaterialien ist denkbar. Schliesslich gelten für Photovoltaikkraftwerke eine ganze Reihe von Verbilligungsmassnahmen, wie sie schon für die Solarthermik aufgezählt wurden, nämlich vollautomatisierte Massenproduktion, Automatisierung des Kraftwerkbetriebes, Minimalisierung des Eigenverbrauchs und der Verluste, geeignete Kraftwerkstandorte usw.

5. Schlussfolgerungen / Schlussbemerkungen

Das hohe Potential der Energiequelle Sonne rechtfertigt eine angemessene Forschung und Entwicklung zur grosstechnischen Erschliessung und Nutzbarmachung dieser Quelle. Denn es besteht die begründete Hoffnung, nicht jedoch die Sicherheit, dass Solarkraftwerke früher oder später konkurrenzfähig sein werden mit anderen Energieversorgungssystemen, und es ist zumindest nicht auszuschliessen, dass sie dereinst einen Beitrag zur Lösung des Weltenergieproblems leisten werden. So oder ähnlich müsste man ja wohl auch von Fusionskraftwerken sprechen. Wie die Fusion ist die Solarkraftwerktechnologie als langfristige Forschungsaufgabe zu betrachten und eine entsprechende langfristige Forschungsplanung ist erforderlich.

Bis heute war die Entwicklung in der Solarkraftwerktechnik ein technischer Erfolg. Grosse Enttäuschungen sind - abgesehen von Teilmisserfolgen, die es immer gibt und aus denen man am meisten lernt - bis heute ausgeblieben. Im Gegensatz zur Fusion haben sowohl solarthermische als auch photovoltaische Versuchskraftwerke bereits einige Mio kWh Strom produziert, und zwar mit wesentlich weniger finanziellen Mitteln, als bis heute in die Fusionsforschung gesteckt worden sind (was nicht als Argument gegen die Fusionsforschung, wohl aber als Pluspunkt für die Solarkraftwerktechnik gemeint ist).

Anderseits ist nachdrücklich vor übertriebenen Hoffnungen in die Solarelektrizität zu warnen. Die Tatsache, dass die Sonnenenergie gratis eingestrahlt wird, heisst noch lange nicht, dass ihre Nutzung billig oder einfach sei. Der Weg bis zum technisch-wirtschaftlichen Erfolg ist noch weit und mit bedeutendem Forschungs- und Entwicklungsaufwand verbunden. Die Zeitkonstanten der Entwicklung in der Energietechnik sind ganz allgemein lang. Die Kernenergie brauchte beispielsweise 40 Jahre, um weltweit einige wenige Prozente des Energieverbrauchs zu decken.

Was für die Kerntechnik recht war, sollte für die Solartechnik eigentlich billig sein. Das aufgezeigte Entwicklungs- und Verbilligungspotential für Solarkraftwerke dürfte es rechtfertigen, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen. In der momentanen Energiesituation (tiefe Preise, Ölschwemme) ist der Anreiz dazu allerdings deutlich kleiner geworden als vor zehn Jahren. Aber es kann ja wieder Zeiten geben, wo man um einen krisen- und versorgungssicheren Energiebeitrag froh sein wird.

Angesichts dieser Lage können die Forschungs- und Entwicklungs-Aufwendungen nicht von Privatfirmen allein getragen werden. Ohne die Zusammenarbeit zwischen Privaten, Bund, Kantonen und Gemeinden wird es deshalb nicht weitergehen. Bei der so geförderten Entwicklung geht es aber nicht nur um einen möglichen, wenn auch bescheidenen Anteil an der inländischen Stromversorgung, sondern ebenso um die Wahrung der Exportchancen für eine sich weltweit entwickelnde neue Energietechnologie. Die Schweiz wird hier nur dann den Anschluss an die internationale Entwicklung nicht verpassen, wenn sie eigene Demonstrationsobjekte vorzuzeigen hat, sich auf experimentell gesichertes Datenmaterial abstützen kann und sich weiterhin an internationalen Projekten beteiligt. Wichtig ist aber auch, fundierte Entscheidungsgrundlagen zu schaffen und einen sachkundigen, klärenden Beitrag in die Solarkraftwerkdiskussion einzubringen.

6. Ausblick

Um die Photovoltaik braucht einem nicht bange zu sein. Sie hat mit den «Remote Applications» bereits einen kleinen Markt, welcher ihr Überleben sichert. Wie schnell er wachsen wird, ist allerdings unsicher und hängt von der Preisentwicklung ab.

Das positive zukunftweisende Merkmal bei der Solarthermik ist die Tatsache, dass konzentrierte Solarstrahlung schon heute selbst in unseren Breitengraden mit 7 bis 8 Rp./kWh ein relativ billiger, mit Erdöl preislich vergleichbarer «Brennstoff» ist [17]. Der damit produzierte Strom ist heute allerdings noch zu teuer.

Die Elektrizitätserzeugung ist aber nur eine der grosstechnischen Möglichkeiten der Sonnenenergienutzung. Weitere Optionen sind:

- Gleichzeitige Erzeugung von Elektrizität und Nutzwärme (Wärme-Kraft-Kopplung)
- Erzeugung von Heizdampf für industrielle Prozesse
- Einkopplung von Solarstrahlung in endotherme chemische Prozesse zur Herstellung von speicher- und transportierbaren Brenn- und Treibstoffen bzw. hochwertigen synthetischen Energieträgern («solar fuels and chemicals») oder zur Herstellung energieintensiver industrieller Produkte (Photochemie, solare Thermochemie)

Langfristig scheint letztere Möglichkeit, wie schon in [11] angedeutet, am aussichtsreichsten zu sein. Sie würde es insbesondere auch erlauben, das bei der grosstechnischen Sonnenenergienutzung wichtige Problem der Energiespeicherung (zur Abstimmung des Angebots auf die Nachfrage) auf elegante Weise zu lösen. Aber auch das Problem des Transportes von Sonnenenergie aus sonnenreichen Wüstengebieten in energiehungrige, dichtbesiedelte Gebiete könnte dadurch gelöst werden. Beim hier angedeuteten che-

mischen Weg steht man jedoch noch völlig am Anfang, und es bedarf noch grosser Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um hier zum Ziel zu kommen. Diesbezüglich sei auf folgende erste Ansätze in dieser Richtung hingewiesen:

- Brennen von Kalkstein in der Zementindustrie [12]
- Gewinnung von Quecksilber aus Zinnober [13] und Rösten von Kupfererz
- Produktion von Leichtmetallen und Halbmetallen wie Aluminium, Silicium, Calcium, Magnesium usw. und ihre nachfolgende, energiefreisetzende Oxidation ([14], [15])

Vorgeschlagen wurde auch schon, Sonnenenergie aus sonnenreichen Wüsten via elektrolytisch oder thermochemisch gewonnenen Wasserstoff in die energiehungrige industrialisierte Welt zu transportieren (Pipeline). Aber auch geschlossene Speicherzyklen, wo man einerseits mit konzentrierter Strahlung endotherme thermolytische Prozesse durchführt und anderseits die Spaltprodukte zur Energiefreisetzung rekombinieren lässt, könnten sich zur Speicherung und zum Transport von Sonnenenergie eignen (z.B. Adam/Eva). Die Chemie mit konzentrierter Solarstrahlung wie die Photochemie stecken allerdings noch in den Kinderschuhen. Sowohl in der Solarthermik als auch in der Photovoltaik gibt es noch zahlreiche vielversprechende Gebiete zu bearbeiten. Auf beiden Gebieten darf mit Fortschritten und weiteren Erfolgen gerechnet werden.

Literatur

[1] Solarthermisches Elektrizitätswerk. Projektvorschlag, ausgearbeitet durch ein Schweizer Konsortium. ISBN 3-85677-002-X. Konsortium SOTEL, Oktober 1981. Kurzfassung: ISBN 3-85677-003-8, 2., berichtigte Auflage, Juli 1982.

[2] *U.A. Weidmann:* Solarthermische Kraftwerke – ihre Wirtschaftlichkeit im hochalpinen Gebirge. Dissertation ETH Nr. 7102, 1982.

[3] *M. Real:* Solarzellenanlagen, Abschätzung des Potentials in der Schweiz. Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 34, 1984.

[4] *P. Toggweiler* und *R. Minder:* Vergleichende Untersuchung solarthermischer und photovoltaischer Stromerzeugung. Studie z.Hd. des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Nationalen Energieforschungs-Fonds (NEFF), Juli 1984.

[5] *P. Toggweiler* and *R. Minder* Comparison of Solar Thermal and Photovoltaic Electricity Generation Using Experimental Data from the IEA-SSPS Project. 2nd International Workshop on the Design, Construction and Operation of Solar Central Receiver Projects, Varese, 4.–8.6.1984.

[6] Studie über die Möglichkeit eines solarthermischen Kraftwerks im Val Maroz. Im Auftrag des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich, Konsortium SOTEL, August 1984. Kurzfassung (Englisch), November 1984.

[7] Wirtschaftlichkeitsvergleich von solarthermischer und photovoltaischer Stromerzeugung. Konsortium SOTEL, Studie z.Hd. des Bundesamtes für Energiewirtschaft, März 1985, Kurzfassung, März 1986.

[8] *H.W. Fricker:* Studie über die Möglichkeiten eines solarthermischen Kraftwerks im Val Maroz. Bulletin SEV/VSE 76(1985)10, S. 558.

[9] *W. Durisch* et al.: Solar Radiation Measurements in the Alps. 2nd International Workshop on the Design, Construction and Operation of Solar Central Receiver Projects, Varese, 4.–8.6.1984.

[10] *W. Durisch* et al.: Meteorologische Messungen für Solarkraftwerke in den Alpen. 5. Symposium, Forschung und Entwicklung von Sonnenenergie in der Schweiz, Lausanne, 14./15. Oktober 1985.

[11] *W. Durisch* et al.: Vom Heliostatversuch zum Pilot-Solarkraftwerk. EIR-Bulletin Nr. 47, September 1982.

[12] *W. Durisch* and *P. Kesselring:* Solar Energy for Calcining of Limestone in the Cement Production Process. IEA/SSPS Evaluation Support Group Meeting, Madrid (Spain), February 20–21, 1984.

[13] *P. Kesselring:* Mercury Production from Cinnabar. IEA/SSPS Experts Meeting, Atlanta (USA), June 18–21, 1985.

[14] *H.P. Eicher:* Chemische Speicherung von Sonnenenergie, solare Brennstoffe. Dissertation, Universität Basel, 1985.

[15] *W. Durisch* et al.: Speicherung elektrischer Energie in sekundären chemischen Energieträgern am Beispiel des Aluminiums. EIR-Bericht Nr. 557, September 1985.

[16] Swiss Industrial Consortium: Heliostat Test in the Swiss Alps. Final Report, EIR Würenlingen, September 1980.

[17] *P. Kesselring:* Experiences with Solar Power. «Solar Energy 1985», Igls (A), August 1985, ESA SP-240.