Entwurf eines Sonnenkraftwerkes

Autor(en): **Russel, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **66 (1975)**

Heft 5

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915261

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

Entwurf eines Sonnenkraftwerkes

Von J. Russel, jr.

Die Erzeugung von Elektrizität aus Sonnenenergie in grösserem Maßstab ist in wirtschaftlicher Weise nur in Kraftwerken möglich. Es wird das Projekt eines Sonnenkraftwerkes beschrieben, welches im Boden eingeformte Spiegel verwendet, welche das einfallende Sonnenlicht gebündelt auf bewegliche Wärmesammelrohre abgeben. Die für einen Standort in der südkalifornischen Wüste wirtschaftlich noch zulässigen Kostenfaktoren werden abgeschätzt.

La production à grande échelle d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire n'est économiquement possible que dans des centrales. Description est faite d'un projet de centrale solaire qui utilise des miroirs coulés dans le sol qui renvoient la lumière solaire reçue sur des tuyaux mobiles collecteurs de chaleur. L'auteur évalue les coûts économiquement acceptables pour un établissement qui se situerait dans le désert sud-californien.

1. Einleitung

Das grösste Hindernis für eine Anwendung der Sonnenenergie in grosstechnischem Maßstab sind die Erstellungskosten. Die Kapitalkosten der erforderlichen Anlagen für die Aufnahme von Sonnenenergie in nutzbaren Mengen sind so hoch, dass bis jetzt die Verwendung des gratis anfallenden Sonnenlichts wirtschaftlich nicht vertretbar war.

Der Zweck der hier beschriebenen Untersuchung ist die Bewertung einer neuen Idee zur Reduktion der Kapitalkosten, d. h. die Abklärung, ob eine Kostenreduktion in einer Gesamtanlage zur Erzeugung von elektrischer Energie in dem Ausmass erreicht werden kann, um gegenüber anderen primären Energiequellen, wie Kernenergie oder fossile Brennstoffe, konkurrenzfähig zu sein.

Folgende Daten mögen zur Veranschaulichung dienen. Die Hochtemperatur-Sonnenwärme, die an einem Standort im Südwesten der Vereinigten Staaten durch ein leistungsfähiges Spiegelsystem gesammelt werden kann, beträgt nach Berücksichtigung der Verluste etwa 900 000 kcal/m² und Jahr. Der Wert der Wärme aus Fossil- oder Kernbrennstoff beträgt 1.20 bis 2.40 $ pro Gcal [1]). Demgemäss liegt der Wert der Wärme aus Sonnenlicht, das während eines Jahres auf einen Quadratmeter fällt, im Bereich zwischen 1 und 2 US-Dollar. Der Kapitalaufwand (Steuern, Zinsen, Abschreibungen usw.) für die Energieerzeugung beträgt ungefähr 14 %; die zulässigen Kosten für einen Sonnenkollektor würden daher im Bereich zwischen 8 und 15 $/m² liegen. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass der Sonnenkollektor (inkl. Spiegel, Rohre und Wärmespeicheranlage) nur dann konkurrenzfähig sein kann, wenn seine Kosten den Betrag von etwa 10 $/m² Primärspiegelfläche (die Oberfläche, die das Sonnenlicht in der schwächsten Konzentration empfängt) nicht übersteigen. Diesem Betrag werden dann Kapitalkosten von ungefähr gleicher Höhe für den konventionellen Restteil der Anlage zugeschlagen.

Da die normalerweise für die Energieerzeugung erforderlichen Wärmeaustauschoberflächen [2]) beträchtlich über 10 $/m² kosten und für einen hohen Leistungsgrad höhere Temperaturen erforderlich sind, muss das Sonnenlicht stark konzentriert werden, bevor es sich von einer Wärmeaustauscheroberfläche auf wirtschaftliche Weise sammeln lässt. In der Tat sind deshalb Fokussierspiegel Bestandteile der meisten bis heute in Vorschlag gebrachten Sonnenkraftzentralen grösseren Maßstabs.

Der Primärspiegel selbst jedoch, der nur einen Teil des ganzen Konzentrators bildet, muss billiger als 10 $/m² sein, damit die nötigen Geldmittel für die restliche Anlage verfügbar bleiben. In den zurzeit vorliegenden Systemkonzepten würden ein Spiegel und eine mechanische Struktur,

[1]) 1 Gcal = 1 Million kcal

[2]) Automobilkühler und Wärmeaustauscher für andere Niederdrucksysteme kosten über 10 $/m².

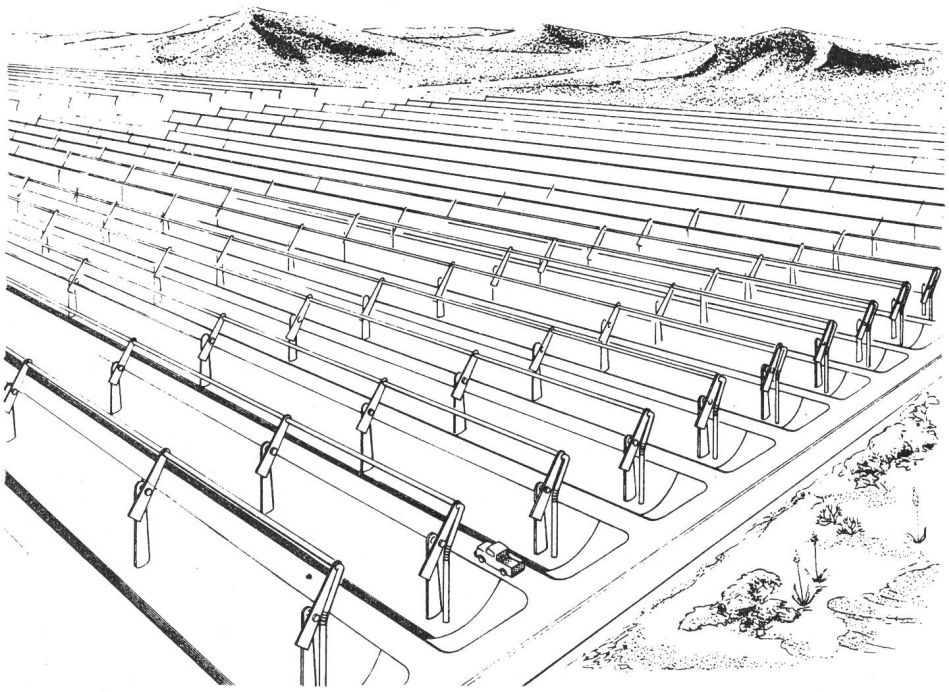

Fig. 1
Konzept eines Sonnenenergie-Kraftwerkes mit festem Spiegelsystem und den entsprechend dem Sonnenstand verstellbaren Wärmeabsorptionsrohren

die angemessenen Windlasten widerstehen und gleichzeitig genau in die Sonnenrichtung gedreht werden könnten, für die Materialien allein – ohne Berücksichtigung der Fertigungskosten – weit über 10 $/m² in Anspruch nehmen. Es ist deshalb offensichtlich, dass ein Mittel für die Hochkonzentration von Sonnenlicht ohne die Verwendung von teuren, steuerbaren Primärspiegeln gefunden werden muss, wenn die Sonnenenergie auf dem Energiemarkt der Zukunft konkurrenzfähig sein soll.

Eine kürzlich in der General Atomic Company gemachte neuartige Erfindung versucht eine Lösung dieses Problems. Diese Lösung besteht in der Verwendung eines nichtparabolischen Spiegels, der parallel einfallende Lichtstrahlen ungeachtet der Lichteinfallsrichtung scharflinig fokussiert.

2. Konzept einer Sonnenkraftanlage

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Sonnenenergie mit den gegenwärtigen Quellen für elektrische Energie konkurrieren könnte, wenn erstens die Primärspiegel (die Oberflächen, die das Sonnenlicht im Originalzustand empfangen) das Licht um einen grossen Faktor konzentrieren (fokussieren) und zweitens diese Primärspiegel dauerhaft und sehr billig wären. Ein Spiegel, der hergestellt wird durch Einpressen einer glänzenden Metallfolie in Asphalt oder durch Installation eines dünnen Metallspiegels auf einer Bodenmörteltragfläche, kann unter Umständen beiden Anforderungen genügen. Die Verwendung eines Festspiegels mit einem hohen Konzentrationsfaktor wird durch die Erfindung der neuen, in Fig. 4 im Modell vorgestellten Spiegelgestaltung möglich.

Zwei andere Probleme der Energieerzeugung aus Sonnenlicht sind die Energiespeicherung für den Betrieb über Nacht und Vorkehrungen für längere Schlechtwetterperioden. Eine wirtschaftliche Lösung für den Nachtbetrieb kann die Speicherung der Wärme in Kies- oder Schotterbetten in Betondruckgefässen darstellen. Eine Einrichtung für das Beheizen der Kiesbetten mit fossilem Brennstoff bietet eine verhältnismässig billige Möglichkeit für den Betrieb während gelegentlich auftretender längerer Schlechtwetterperioden.

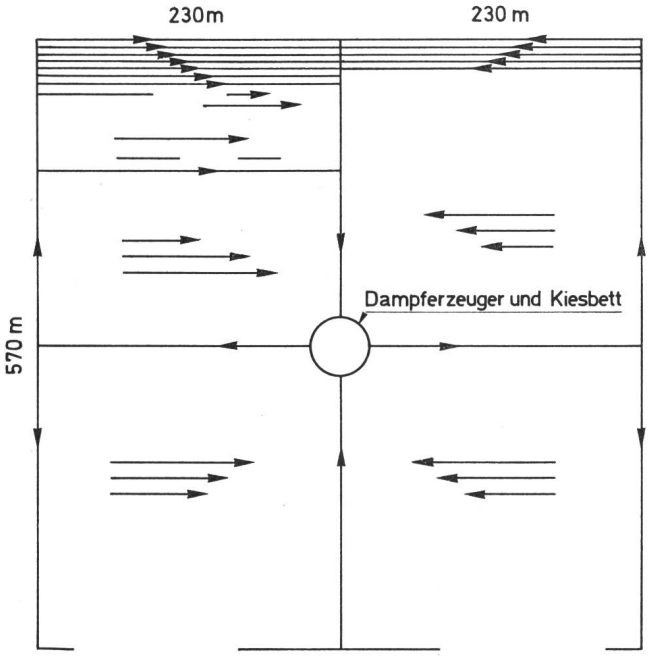

Fig. 2 Grundriss einer Einheit mit 125 beweglichen Wärmeabsorptionsrohren in vier Quadraten

In der gewählten Lösung ist Luft das Kühlmittel und Dampf die Wärmezyklus-Arbeitsflüssigkeit. Während des Tages wird Luft durch die vom Licht aus den Primärspiegeln erhitzten Rohre geleitet, um die Wärme sowohl dem Dampferzeuger als auch den Kiesbetten für die Energiespeicherung zuzuführen. Nachts wird der Dampf für die Turbinen in den Kiesbetten erzeugt.

Eine approximative wirtschaftliche Analyse lässt annehmen, dass die Kosten für die Elektrizitätserzeugung aufgrund der vorstehenden Methode mit denjenigen bei Verwendung von Fossil- oder Kernbrennstoff konkurrenzfähig wären, wenn die Kapitalkosten für grosse Anlagen nicht mehr als 15 % über denjenigen für Kernkraftanlagen liegen würden. Von diesen Kosten ist die Hälfte für die Aufwendungen im Zusammenhang mit dem Sammeln und der Speicherung von Wärme verfügbar, während die verbleibende Hälfte für den konventionellen Restteil der Anlage verwendet werden muss.

Zur Überprüfung der Kosten und des Wirkungsgrades des Primärspiegels, des vom fokussierten Licht beheizten Rohrs und des Kiesbettes sind Forschungsarbeiten und die Entwicklung von Prototypanlagen erforderlich. Der Rest der Anlage ist konventionell. Da die einzelnen Spiegel für kleine und grosse Anlagen keine Unterschiede aufweisen, können die Versuche an kleinen Anlagen vorgenommen werden. Maßstabvergrösserungen bedingen nur geringfügige zusätzliche Forschungsarbeiten.

Der erste Schritt bei der Konstruktion eines wirtschaftlichen Gesamtsystems besteht in der optischen Konzentration der Energie. Dies wird durch Festspiegel gemäss Fig. 1 bewirkt. Jeder Spiegel erzeugt einen gebündelten Sonnenlichtstrahl, und zwar ungeachtet des Sonnenlicht-Einfallwinkels. Das beheizte Rohr wird laufend so verstellt, dass es immer im Lichtstrahl liegt. Das Rohr ist von einem Glaszylinder mit Vakuumisolation umgeben. Heissluft wird aus diesem beweglichen Rohr durch ein System von Sammlern gemäss Fig. 2 erzeugt. Die Heissluft fliesst zu einem Kiesbett für die Speicherung und durch einen Dampferzeuger, wie in Fig. 3 dargestellt. Es sei angenommen, dass die Dampfturbine, die Generatoren und die übrigen Komponenten der Anlage konventioneller Konstruktion sind.

Eine andere Methode, die zurzeit vielleicht als ebenso interessant gelten kann, besteht in der direkten Verwendung von Heissluftturbinen, was ein Dampfsystem und Kühltürme überflüssig machen würde. Der Einfachheit halber sei nachfolgend lediglich auf das Luft-Dampf-System eingegangen.

Die Kosten der Anlage

Die vergleichsweisen Kosten von Kern- und Sonnenenergie bei einer geplanten Erweiterung einer bestehenden Energieerzeugungsanlage im Südwesten der Vereinigten Staaten wurden verglichen. Die Rentabilitätsschwelle für die Sonnenenergieanlage lag bei $ 314/kW(e), wenn für die Kernenergieanlage Kapitalkosten von $ 275/kW(e) bei Spaltstoffkreislaufkosten von $ $1{,}6 \cdot 10^{-3}$ kWh vorausgesetzt werden. Mit anderen Worten: Die Sonnenenergieelektrizität würde also für die betreffende Erzeugungsanlage gleichviel wie die Kernenergieelektrizität kosten, sofern die vorstehend genannte Kostengrenze von $ 314/kW(e) eingehalten werden

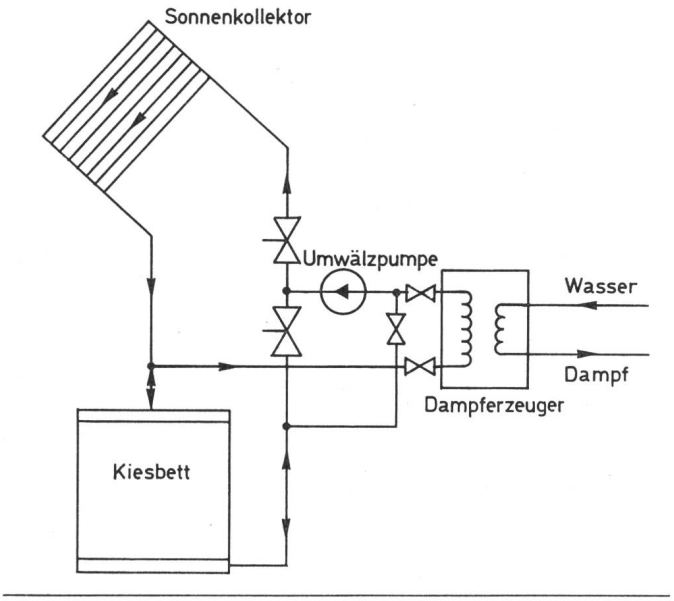

Fig. 3 Wärmefluss-Schema

könnte. Da die konventionelle Dampfausrüstung etwa \$ 150/kW(e) kostet, verbleiben etwa \$ 150/kW(e) für die Aufwendungen im Zusammenhang mit dem Sammeln und Speichern der Wärme.

Die effektive Grösse der Spiegel sowie die von jedem Sammelstück erfasste Fläche usw. werden durch eine Optimierung des Gesamtsystems ermittelt. Für die Berechnung der Kosten pro Quadratmeter oder pro Kilowatt haben jedoch diese Konstruktionsdetails nur einen geringen Einfluss.

Zu Illustrationszwecken soll eine spezifische Konstruktion für einen bestimmten geographischen Standort mit geringem Ausnützungsgrad diskutiert werden. Hier ist eine Kollektorfläche von ungefähr 1 m² für 90 W Stromerzeugungskapazität notwendig. Es wird eine konventionelle Dampfanlage mit herkömmlichen Dampfgeneratoren vorausgesetzt. Luft bei 7 ata dient als Kühlmittel, und die Spiegelbreite beträgt ungefähr 9 m. Die Wärme von insgesamt 200 000 m² Spiegeloberfläche wird in einem Kiesbett gespeichert.

Als Standort für die Anlage wurde ein Gelände in der Nähe des Salton-Salzsees in der südkalifornischen Wüste, 33,3 ⁰ nördliche Breite, angenommen. Die durchschnittliche (Tag/Nacht/Sommer/Winter)-Intensität der direkten (spektralen und daher fokussierbaren) Komponente des Sonnenlichts ist ungefähr 170 W/m². Die Maximaltemperatur (Mittag im Sommer) an einem der sehr seltenen völlig klaren Tage wäre rund 900 W/m². Ein realistischeres Konstruktionsmaximum wäre jedoch 800 W/m². Vorausgesetzt wird eine Spiegeloberfläche aus aufgedampftem Silber unter einer dünnen Glasschicht mit einem Reflexionsfaktor von 88 %.

Wenn wir annehmen, dass das erhitzte Rohr 90 % des Lichts absorbiert und 10 % der absorbierten Energie wieder abstrahlt, ergibt sich:

1. eine maximale Wärmeleistung von 120 W/m²,
2. eine durchschnittlich aufgenommene Wärmeleistung von 120 W/m².

Bei einem Wirkungsgrad von 35 % entspricht dies rund 40 W(e)/m².

Es wird angenommen, dass diese Sonnenkraftanlage einen Lastfaktor von 50 % hat. Deshalb ist für je 90 W Stromerzeugungskapazität 1 m² Kollektorfläche erforderlich. Da etwa \$ 150/kW(e) für die Aufnahme und die Speicherung von Energie zur Verfügung stehen, ergeben sich zulässige Baukosten unter Ausschluss der Dampfanlagen von 13 \$/m².

Die Bodenkosten sind bei dieser Anlage unerheblich. Wüstenland kostet beträchtlich weniger als 0,2 \$/m².

Der Primärspiegel muss, auf die Flächeneinheit bezogen, billig sein. Für die Formgebung der vielleicht 9 m breiten und einige Kilometer langen Spiegel werden Erdbewegungsmaschinen in Aussicht genommen. Als Unterlage für den Spiegel dient eine 7,5 cm dicke Asphaltschicht, in die dann eine glänzende Metallfolie als Reflektor heiss eingepresst wird. Die Kosten für den aufgetragenen Asphalt betragen ungefähr 2 \$/m². Zu den gesamten Kosten für den Spiegel dürften noch weitere rund 0,5 \$ pro Quadratmeter Spiegelfläche für Zufahrtsstrassen und Abflussgräben dazukommen. Die Kosten für eine der erforderlichen Genauigkeit entsprechende Vorbehandlung des Bodens und die Installation der Folie dürfen nur einen sehr geringen Anteil an den verfügbaren 13 \$/m² in Anspruch nehmen, wenn dem Gesamtkostenziel entsprochen werden soll.

Die Wärmespeicherung im Kiesbett

Wärmekapazität des Kiesbettes	0,2 kcal/kg ⁰C
Dichte	2,7 kg/dm²
Hohlräume	40 %
Temperaturanstieg	400 ⁰C
Elektrischer Wirkungsgrad	35 %

woraus folgt, dass in 1 m³ Kiesbett Wärme für rund 2 kW(e)-Tage gespeichert werden kann.

Es wurde angenommen, dass die benötigte Energie während des Tages doppelt so gross wie während der Nacht ist.

Folglich sind für jedes kW(e) Kapazität der Anlage ⅓ kW(e)-Speichertage oder 0,17 m³ Kiesbett pro benötigte kW(e) erforderlich.

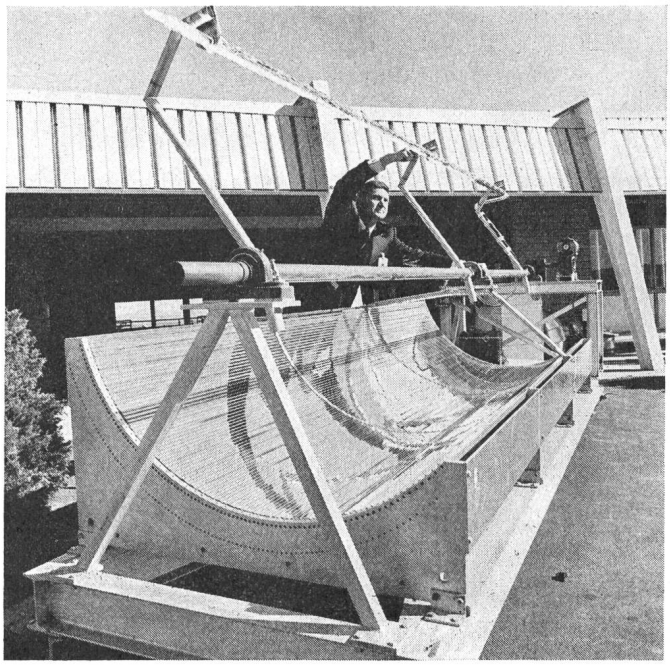

Fig. 4 Versuchsmodell des Sonnenspiegels

Dies bedeutet zum Beispiel, dass die Kosten für die Druckgefässe unter 73 $/m³ Kiesbett liegen müssen, wenn die Speicherungskosten unter 1 $/m² betragen sollen.

3. Zusammenfassung

Die Verwertung des Sonnenlichtes als Wärmequelle wird durch dessen verhältnismässig geringe Energiedichte auf der Erdoberfläche erschwert. Eine optische Konzentration durch bewegliche Anordnungen von Spiegeln scheint nicht interessant, da die Kosten von mechanischen Tragstrukturen, die hohen Präzisions- und Windlastanforderungen genügen müssen, zu gross sind. Eine einfache Lösung des Problems besteht darin, den Spiegel – eventuell durch Einformung in den Boden – zu fixieren und einen viel kleineren Wärmesammler so zu steuern, dass er dem Sonnenlichteinfall entsprechend der Tageszeit folgt. Das Problem bei dieser Lösung besteht darin, dass ein parabolischer Spiegel lediglich für dasjenige Licht einen scharfen Brennpunkt hat, das entlang der parabolischen Achse einfällt, was nur einmal pro Tag der Fall ist. Unglücklicherweise fokussieren Parabolspiegel bei allen anderen Sonnenständen sehr schlecht, so dass sich nur ein kleiner Konzentrationsfaktor erreichen lässt. Bedeutsame Reduktionen in den Kosten der mechanischen Strukturen sind nur dann möglich, wenn der bewegliche Wärmesammler sehr viel kleiner als die Spiegeloberfläche ist – ein Erfordernis, das einen grossen Konzentrationsfaktor (scharfe Fokussierung) für alle Sonnenlicht-Einfallswinkel voraussetzt.

Adresse des Autors:
John Russel, jr., General Atomic Company, P.O. Box 81608, San Diego (USA).

Prinzip eines Verbundsystems zwischen Wasserkraft und Windkraft in der Schweiz

Von H. de Witt

Ausgehend von der heutigen Situation der Elektrizitätswirtschaft wird die Problematik der Windenergienutzung diskutiert. Wenn man auf die direkte Umwandlung des Windes in elektrische Energie verzichtet und die Windenergie in den vorhandenen Anlagen der Wasserkraftwerke speichert, ergeben sich interessante Möglichkeiten für ein Zusammenwirken zwischen beiden Energieformen. Für die Konstruktion des Windmotors werden mehrere Typen als Alternative zur konventionellen Ausführung vorgeschlagen. Abschliessend wird auf einige Entwicklungsaufgaben hingewiesen.

Partant de la situation actuelle de l'économie électrique, l'auteur aborde le problème de l'utilisation de l'énergie éolienne. Si l'on renonce à la transformation directe du vent en électricité, et que l'on emmagasine l'énergie éolienne dans les installations existantes des usines hydrauliques, il en résulte d'intéressantes possibilités d'action conjuguée entre ces deux formes d'énergie. Comme alternative à la réalisation classique, l'auteur propose plusieurs types de moteurs à vent. Il mentionne pour terminer quelques problèmes de développement.

1. Einleitung

Die Schweiz gehört zu den Ländern, wo die elektrische Energie weitgehend durch die vorhandenen Wasserkräfte erzeugt wird (1974 noch 75 %); allerdings ist der Ausbau der Wasserkräfte im wesentlichen abgeschlossen. Andererseits muss nach neueren Untersuchungen mit einem weiteren exponentiellen *Wachstum* des Elektrizitätsverbrauchs um jährlich rund 5 % gerechnet werden, so dass je nach den Niederschlagsmengen schon in den nächsten Jahren Defizite zu erwarten sind.

Da die Möglichkeiten des Energieimports auf längere Sicht ungewiss sind (die Elektrizitätswirtschaft des Auslandes befindet sich in einer ähnlichen Lage wie die Schweiz), müssen weitere Anlagen installiert werden. Grosse thermische Kraftwerke mit Kohle- oder Ölfeuerung würden nicht nur die Abhängigkeit vom Ausland verstärken, sondern sie laufen auch dem Umweltschutz zuwider. Nach dem heutigen Stand der Technik kommen nur Kernkraftwerke in Frage, deren Brennstoff sich auf engem Raum für eine längere Periode lagern lässt.

Die Opposition der Öffentlichkeit gegen *Kernkraftwerke* hat bereits zu einer erheblichen Verzögerung im Bau von neuen Kraftwerken geführt. Unter den zahlreichen Argumenten der Gegner muss leider die bisherige Beseitigung der radioaktiven Abfälle (vor allem mit grosser Halbwertszeit) als unbefriedigend bezeichnet werden. Die Abfuhr grosser Wärmemengen an die Atmosphäre bietet keine technischen Schwierigkeiten, wenn auch Kühltürme ein Dorn im Auge des Heimatschutzes sind.

Wärmekraftwerke, sei es mit konventioneller Feuerung oder mit Atomkernspaltung, liefern Bandenergie. Der Spitzenverbrauch, der in der Schweiz mehr als doppelt so hoch liegt, wird mit Hilfe der Saisonspeicher gedeckt. Ihre Anzahl und Kapazität lässt sich aus wirtschaftlichen Gründen kaum erhöhen, weshalb man schon vor Jahren *Pumpspeicherwerke* errichtet hat. Sie arbeiten wegen der vierfachen Energieumsetzung zwar nur mit einem Wirkungsgrad von etwa 70 %, vermögen aber jederzeit Überschussenergie aufzunehmen (vor allem nachts) und bei maximalem Bedarf wieder abzugeben. Ihr Energieumsatz erreichte 1972/73 erst rund 6 % der Gesamterzeugung. Dieser Anteil soll durch weitere Pumpspeicherwerke und Umbauten vorhandener Anlagen erhöht werden.

2. Problematik der Windenergienutzung nach dem heutigen Stand der Technik

2.1 Rangordnung der auf der Erde dauernd zur Verfügung stehenden Energien

Windmühlen bildeten im Flachland Jahrhunderte lang die einzige natürliche Energiequelle. Heute sind Windmühlen zu Touristenattraktionen geworden. Sie besitzen in den Industrieländern keine praktische Bedeutung mehr, obwohl die Erde