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: 73 (1982)

Heft: 11

Artikel: Technische und wirtschaftliche Aspekte der Elektrizitätserzeugung mit Solarzellen

Autor: Minder, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904969

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: 24.08.2025

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

Technische und wirtschaftliche Aspekte der Elektrizitätserzeugung mit Solarzellensystemen

R. Minder

620.92::523.9–7:621 383;

Bei der systemtechnischen Betrachtung von Solarzellenanlagen zur Elektrizitätserzeugung ist im allgemeinen sowohl die Energiequelle als auch der Verbraucher in das System einzubeziehen. Die Optimierung wird deshalb für den allgemeinen Fall sehr aufwendig, kann jedoch im konkreten Fall durch vernünftige Wahl der Randbedingungen meist stark vereinfacht werden. Diese Überlegungen werden anhand einiger typischer Anwendungsfälle etwas ausgeführt. Im weitern wird ein Überblick über heute übliche sowie kurz- und mittelfristig zu erwartende Anwendungen solcher Anlagen gegeben, wobei zwischen dem Einsatz in Industrie- und Entwicklungsländern unterschieden wird. Ferner befasst sich der Artikel mit Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, wobei Folgerungen bezüglich noch notwendiger technischer Entwicklungen und zukünftiger Marktchancen gezogen werden.

Dans le cas de systèmes d'installations à cellules solaires pour la production d'électricité, il faut tenir compte à la fois de la source et des récepteurs de cette forme d'énergie. L'optimisation du cas général est ardue; mais elle peut être grandement simplifiée dans les cas concrets, en adoptant des conditions marginales raisonnables, comme on le montre pour quelques applications typiques. On donne un aperçu des applications actuelles et futures tout en faisant une distinction entre pays industrialisés et pays en voie de développement. Il est également question de la rentabilité; par certains développements techniques, il sera possible d'ouvrir des marchés nouveaux.

1. Einleitung

Das physikalische Prinzip der photovoltaischen Energieumwandlung ist schon sehr lange bekannt: 1839 entdeckte der französische Physiker *Jacques Becquerel* den Photoeffekt in einer elektrolytischen Zelle. Ebenfalls vor mehr als 100 Jahren gelang es *Adams*, die erste Halbleiter-Photozelle herzustellen, wobei er als aktives Material Selen verwendete. Anschliessend wurden während langer Zeit kaum Fortschritte in Richtung Anwendung des Photoeffekts erzielt, bis 1954 etwa gleichzeitig in den Laboratorien von Bell und RCA Photozellen aus Silizium bzw. Cadmiumsulfid hergestellt wurden, welche einen Umwandlungswirkungsgrad von mehr als 5 % aufwiesen. 1958 schliesslich wurde von den USA Vanguard I, der erste Satellit, dessen Stromversorgung auf Solarzellen beruhte, auf eine Umlaufbahn geschossen. Seither hat sich die photovoltaische Stromversorgung von Raumflugkörpern zu einer Standardtechnologie mit grosser Zuverlässigkeit entwickelt.

Während die anfänglich extrem hohen Kosten der Solarzellen für die Raumfahrt nur eine geringe Rolle spielten, wurde deren Anwendung zur Elektrizitätserzeugung auf der Erde nahezu völlig verhindert. Erst als die Kosten Mitte der siebziger Jahre in die Grössenordnung von 100 Fr. pro Watt Nennleistung absanken, wurden die ersten wirtschaftlich arbeitenden Installationen z.B. im Fernmeldesektor möglich. Heute stellt die Stromversorgung von isolierten Verbrauchern mit kleinem Leistungsbedarf einen echten kommerziellen Markt für die Hersteller von Solarzellensystemen dar [1]. Für diesen Anwendungszweck hat sich die photovoltaische Technologie heute technisch und wirtschaftlich durchaus etabliert, ebenso wie auf dem Markt für die Stromversorgung von kleinen elektronischen Geräten (Uhren, Taschenrechner usw.). Grosse Installationen von einigen kW bis zu einigen 100 kW sind heute noch nicht wirtschaftlich. Solche Anlagen wurden daher auch erst vereinzelt und zu Forschungs- oder Demonstrationszwecken gebaut [2].

2. Die systematische Betrachtung von Solarzellenanlagen

Bei der Untersuchung eines Systems müssen zunächst dessen Grenzen klar definiert werden. Je nachdem, was alles in das System eingeschlossen wird, ergeben sich unterschiedliche Kriterien für die Bestimmung der Kenngrössen. Schliesst man z.B. im Fall der photovoltaischen Energieumwandlung die Strahlungsquelle, d.h. die Sonnenoberfläche mit einer Temperatur von etwa 5000 K ein, ergibt sich für eine Solarzelle auf der Erde aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ein theoretischer Grenzwirkungsgrad von etwa 95 %. Begrenzt man das System bei der einfallenden Lichtstrahlung unterhalb der Atmosphäre, ergibt sich der maximale theoretische Wirkungsgrad aus quantentheoretischen Überlegungen.

Für den praktischen Einsatz von Solarzellenanlagen werden im allgemeinen die Systemgrenzen so gewählt, dass sie sowohl die Energiequelle, die Strahlung auf der Erdoberfläche als auch den Elektrizitätsverbraucher einschliessen. Figur 1 zeigt schematisch ein solches System.

Aus den wenigen in dieser Figur eingetragenen Parametern ergeben sich bereits derart komplizierte Zusammenhänge, dass z.B. die wirtschaftliche Optimierung den Einsatz von numerischen Optimierungsmodellen oder mindestens eine wiederholte Simulation verlangt. Auf der andern Seite zeigt es sich in der Praxis, dass bei weitem nicht in allen Fällen eine aufwendige Optimierung nötig ist. Oft ergeben sich einzelne Kenngrössen bereits aus praktischen Randbedingungen, z.B. maximale Fläche, welche zur Verfügung steht, maximales Gewicht des Speichers usw. Oft lässt sich so die Zahl der «Freiheitsgrade» und somit der Optimierungsaufwand auf ein vernünf-

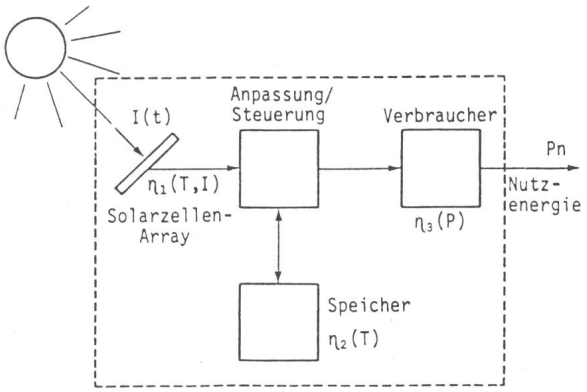

Fig. 1 Blockschema eines Solarzellensystems

$I(t)$	Einfallende Strahlungsintensität
$\eta_1(T, I)$	Wirkungsgrad der Solarzellenanordnung
$\eta_2(T)$	Speicher-Zykluswirkungsgrad
$\eta_3(P)$	Umwandlungswirkungsgrad des Verbrauchers
P_n	Abgegebene Leistung (Nutzenergie)

Dieser Aufsatz entspricht dem Vortrag an der SEV-Tagung über photovoltaische Energieumwandlung vom 15. April 1982.

Tabelle I

	Systemtyp	Mögliche Kriterien, Optimierungsziele	Dimensionierungsmethoden
1	Grosse ASF mit kleiner Ausfallhäufigkeit	Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit	Gesamtoptimierung (z.B. lineares Optimierungsmodell), wiederholte Systemsimulation
2	Kleine ASF mit kleiner Ausfallhäufigkeit	Versorgungssicherheit	Auslegung aufgrund von Strahlungsmittelwerten, Überdimensionierung
3	ASF mit höherer Ausfallhäufigkeit	Wirtschaftlichkeit	Auslegung aufgrund von Strahlungsmittelwerten; Anlage so aufgebaut, dass sie vergrössert werden kann
4	ASA mit meteo-abhängigem Bedarf	Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit	Auslegung aufgrund Korrelation zwischen Strahlung und Bedarf
5	ASA mit «wählbarem» Bedarf	Versorgungssicherheit für minimalen Energiebedarf, Wirtschaftlichkeit	Optimierung für durchschnittliches Strahlungsangebot und Bedarf, Abschaltung von Verbrauchern mit kleiner Priorität
6	NAS mit Back-up-System (Dieselgenerator)	Wirtschaftlichkeit, max. Anteil Back-up-Energie	Optimierung aufgrund von Strahlungsmittelwerten und Spitzenleistungswerten
7	NAS mit Netzkoppelung	Platzbedarf, Leistungsbedarf, Jahresenergiemenge, Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung der Tarife, Anteil der Autonomie	Bei grossen Anlagen: Gesamtoptimierung Bei «residential systems»: z.B. Auslegung auf Spitzenbedarf für Klimatisierung

tiges Mass reduzieren. Im folgenden soll nun versucht werden, die wichtigsten Systemtypen zu klassifizieren und einige Anregungen für die entsprechenden Berechnungsmethoden zu geben.

Die verschiedenen Typen von Solarzellenanlagen lassen sich grob in drei Klassen einteilen. Die erste Klasse umfasst die *autonomen Systeme mit fest vorgegebenem Energiebedarf (ASF)*. Solche Systeme müssen den Verbraucher mit einer vorgegebenen Energiemenge pro Zeitintervall beliefern, wobei im allgemeinen eine gewisse Ausfallwahrscheinlichkeit zugelassen ist, z.B. drei Tage pro Jahr. Anwendungen für ASF sind z.B. Stromversorgung von Telekommunikationsanlagen, anodischer Korrosionsschutz, Navigationshilfen usw.

Die zweite Klasse enthält die *autonomen Systeme mit einem der Einstrahlung anpassbaren Bedarf (ASA)*. Der Verbraucher begnügt sich mit der vom System gelieferten Energie, wobei die zulässigen Schwankungen des Angebots je nach Anwendung innerhalb engerer oder weiterer Grenzen liegen können. Zu den ASA gehören beispielsweise Bewässerungsanlagen, Kühl- oder Klimatisierungsanlagen, aber auch Stromversorgungen von abgelegenen Verbrauchern, bei denen der Bedarf z.B. durch Komfortreduktionen dem Angebot angepasst werden kann.

Die dritte Klasse schliesslich umfasst die *nicht-autonomen Systeme (NAS)*. Dazu gehören alle Anlagen mit Hilfsenergiesystemen (z.B. mit Notstromdiesel) sowie die mit einem Elektrizitätsnetz gekoppelten Systeme. Eine interessante Untergruppe bilden auch Solarzellenanlagen, welche mit Windgeneratoren gekoppelt sind.

Bereits aufgrund dieser groben Charakterisierung der verschiedenen Systemtypen ist offensichtlich, dass auch Auslegekriterien und -methoden sehr unterschiedlich sein werden, falls man von der erwähnten Gesamtoptimierung absieht. In Tabelle I wird versucht, die auf die verschiedenen Klassen anwendbaren Kriterien und Methoden darzustellen.

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass bei der Wahl der Methode zur Systemdimensionierung in jedem Fall zunächst abgeklärt werden muss, in welcher Form und Qualität die benötigten Eingabedaten vorhanden sind. Insbesondere für den Einsatz von numerischen Optimierungsmethoden werden an die Eingabedaten, vor allem an die Strahlungsdaten, hohe Anforderungen bezüglich Form und Genauigkeit gestellt. Falls – was oft vorkommt – nur gerade Strahlungsmittelwerte und/oder Sonnenscheinstunden der nächstgelegenen Meteostation zur Verfügung stehen, empfiehlt es sich kaum, eine allzu aufwendige Berechnungsmethode anzuwenden.

3. Anwendungsmöglichkeiten und Beispiele

Die bisher weitaus grösste Zahl von installierten Anlagen gehört zur Klasse der kleinen ASF (installierte Leistung maximal einige kW). Das Anwendungsgebiet umfasst dabei vor allem den Bereich Telekommunikation: Radio/TV-Relaisstationen, drahtlose Telefonstationen, Telemetriesysteme, unbemannte Meteostationen, Navigationshilfen usw. Eine weitere wichtige Anwendung ist der anodische Korrosionsschutz von Brücken, Pipelines und andern Metallstrukturen. Zu derselben Klasse gehört auch die Stromversorgung von abgelegenen Gebäuden, z.B. landwirtschaftlichen Betrieben in Berggegenden. Auch in der Schweiz gibt es in Berggebieten noch eine ganze Anzahl von Objekten, für die aus verschiedenen Gründen ein Anschluss an das öffentliche Netz nicht in Frage kommt. Ein Beispiel, bei dem in diesem Jahr die Realisierung einer Solarzellenanlage vorgesehen ist, sei hier kurz vorgestellt.

Das für die Installation der Pilotanlage vorgesehene Objekt, eine Alphütte, liegt in der Zentralschweiz auf einer Höhe von rund 1500 m ü.M. Heute wird für die Beleuchtung Gas verwendet; sämtliche Arbeiten wie Melken, Butter- und Käseherstellung werden von Hand ausgeführt. Ein Gespräch mit dem Besitzer der Liegenschaft ergab – zumindest für eine erste Ausbaustufe – den in Tabelle II zusammengestellten Elektri-

Tabelle II

Verbraucher	Installierte Leistung	Energiebedarf/ Tag
Licht: 6 Lampen à 40 W	240 W	0,3 kWh
Kühlschrank 200 l	120 W	1,2 kWh
Butterfass	200 W	0,1 kWh
Diverse Kleinverbraucher		0,1 kWh
Total		1,7 kWh

zitätsbedarf. Die Dimensionierung der Anlage erfolgte aufgrund von Strahlungsdaten von Meteostationen sowie von Strahlungsmessungen am Ort während einiger Monate. Es ergab sich daraus eine notwendige Nennleistung der Solarzellenpanels von 1200 W sowie eine Batteriekapazität von 15 kWh. Figur 2 zeigt das Blockschema der Anlage.

Es ist vorgesehen, die Anlage mit einem einfachen Datenerfassungssystem auszurüsten, um für spätere Anlagen verbesserte Dimensionierungsmethoden entwickeln zu können. Von ebenso grossem Interesse sind natürlich die praktischen Betriebserfahrungen. Die Gesamtkosten des Projekts liegen bei rund 70000 Fr., welche zum grössten Teil von der für das Gebiet zuständigen Elektrizitätsgesellschaft aufgebracht werden, da die Kosten einer Netzzuteilung wesentlich höher liegen würden.

Grössere ASF-Anlagen (≧ 5 kW) wurden erst in vergleichsweise wenigen Fällen realisiert, hauptsächlich vom amerikanischen Department of Energy sowie von der Europäischen Gemeinschaft. Ebenso gibt es kaum kommerzielle Anlagen dieses Typs. Das Marktpotential für grössere ASF bis vielleicht in den Megawattbereich ist jedoch sehr gross. Ein grosser Teil der ländlichen Gebiete in der dritten Welt ist noch nicht elektrifiziert und wird auch wegen der teilweise dünnen Besiedlung noch auf Jahre oder sogar Jahrzehnte hinaus kaum mit elektrischen Netzen erschlossen werden. Gegenwärtig wird beispielsweise eine Untersuchung über die Möglichkeiten der Nutzung von Sonnenenergie (neben Wind, Biomasse und Kleinwasserkraftwerken) für die Versorgung abgelegener Gebiete im mittelamerikanischen Staat Costa Rica durchgeführt. In den USA und Mexiko wurden bereits solche Anlagen installiert.

Bei den autonomen Systemen mit anpassbarem Bedarf (ASA) ist vor allem der Einsatz für Bewässerungs- und Kühlzwecke wichtig. Bei der Bewässerung kann z.B. im tropischen Klima der höchste Wasserbedarf mit der Trockenzeit zusammenfallen. Damit ergibt sich eine gute Übereinstimmung der zeitlichen Angebots- und Bedarfsschwankungen. Photovoltaische Wasserpumpen sind in Entwicklungsländern bereits in beträchtlicher Anzahl im Einsatz [3], für die direkte Koppelung ohne Batterie wurden spezielle Elektropumpen entwickelt. Diese Systeme haben mittlerweile die auf einem thermodynamischen Kreislauf basierenden Solarpumpen völlig verdrängt, sowohl aus Kostengründen als auch wegen der viel höheren Betriebssicherheit und Wartungsfreiheit.

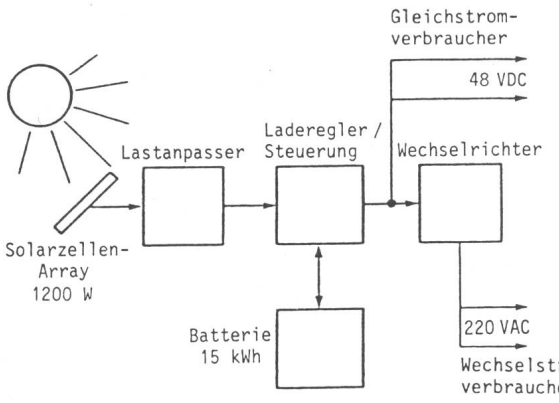

Fig. 2 Blockschema der Solarzellenanlage zur elektrischen Versorgung einer Alphütte

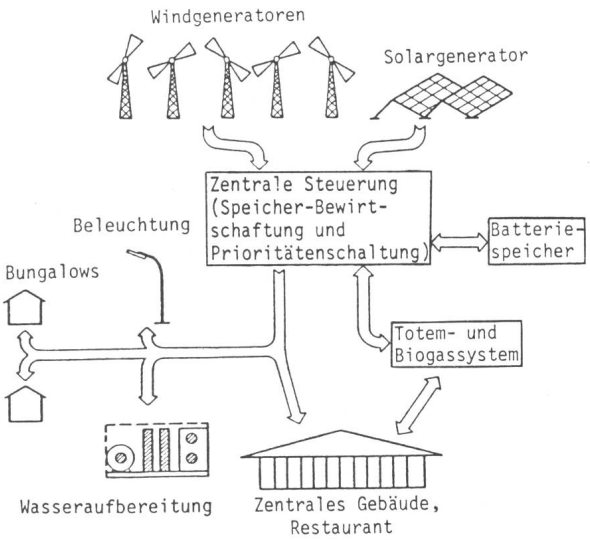

Fig. 3 Blockschema der autonomen Energieversorgung für ein isoliertes Touristikzentrum

Auch bei Anlagen zur Kühlung oder Klimatisierung ergibt sich meist eine recht gute Übereinstimmung zwischen Strahlungsintensität und Kältelast. Je nach Verwendungszweck der Kälte kann das System z.B. auf Spitzenlast bei maximaler Einstrahlung dimensioniert werden und benötigt nur geringe oder gar keine Speicherkapazität. Bei den heutigen Preisverhältnissen ist allerdings die solarthermisch erzeugte Kälte [4] noch billiger als die photovoltaisch erzeugte.

Zu den ASA, bei denen der Bedarf willkürlich dem Angebot angepasst werden kann, sei im folgenden ein interessantes Beispiel, das sich allerdings noch im Planungsstadium befindet, erwähnt. Diese Anlage, welche neben einem Solarzellen-Array noch weitere Energiequellen umfasst (Wind, Biogas-Totem) dient zur Elektrizitätsversorgung eines Touristikkomplexes, welcher auf einer bisher unbewohnten Malediveninsel geplant ist. Um möglichst ohne Fremdenergie auszukommen, ist folgendes Konzept vorgesehen: Bei durchschnittlichen Strahlungs- und Windverhältnissen genügt die produzierte Elektrizität, um den Bedarf sämtlicher Verbraucher zu decken; die Batterie bleibt dabei ständig im Bereich von 80–100% Ladezustand. Nimmt die Produktion einer oder beider Quellen ab, so dass der Ladezustand der Batterie unter 75% fällt, tritt ein «Rationierungsplan» in Kraft. Gewisse Verbraucher, welche zwar den Komfort verbessern, jedoch nicht unbedingt nötig sind, werden abgeschaltet. Fällt im Extremfall – im Mittel 1 Tag pro Jahr – der Ladezustand der Batterie auf unter 45%, werden alle Verbraucher bis auf eine Notbeleuchtung und die Kühlschränke abgeschaltet. Sobald sich die Energiesituation wieder normalisiert hat (was in diesem Fall nicht von der Weltpolitik abhängt), werden die Verbraucher sukzessive wieder eingeschaltet. Das in Figur 3 schematisch dargestellte Energieversorgungssystem hätte neben den interessanten technischen Aspekten zweifellos auch eine nützliche erzieherische Wirkung auf dessen Benützer: Es demonstriert auf eindrückliche Weise, dass die hundertprozentige Verfügbarkeit der Energie nicht so selbstverständlich ist, wie wir es heute gewöhnt sind, und dass man mit erheblich weniger Energie auskommen kann, wenn es nötig ist.

Die Anwendungsmöglichkeiten für nicht-autonome Systeme (NAS) können in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe umfasst die Anlagen, welche mit einem Zusatz-Energiesystem, z.B. einem Benzin- oder Dieselgenerator gekoppelt sind. Je nach Anwendungszweck kann dabei das Zusatzsystem reine Notfunktion haben, um den technisch oder meteorologisch bedingten Stromausfall der Solarzellenanlage zu ersetzen. Es ist jedoch auch denkbar, dass das Zusatzsystem kontinuierlich betrieben wird und dass das Solarzellensystem dieses je nach Strahlungsintensität und Elektrizitätsbedarf mehr oder weniger entlastet. Bei dieser Betriebsart werden im wesentlichen Treibstoff gespart («Fuel saver») sowie der Unterhaltsaufwand für das Zusatzsystem verringert. Anwendungsmöglichkeiten von NAS mit Zusatz-Energiesystem sind teilweise gleich wie bei den autonomen Systemen. Besonders attraktiv ist die Anwendung in jenen Fällen, bei denen bereits eine Stromversorgung z.B. auf Dieselbasis besteht und wo der Brennstoffnachschub problematisch und teuer ist. Hier können Solarzellenanlagen zunächst als «Fuel saver» installiert und später bis zum autonomen System ausgebaut werden, wobei der vorhandene Dieselgenerator noch als Notstromaggregat beibehalten wird.

Die zweite Gruppe der NAS umfasst die Systeme mit Netzkoppelung. Von besonderem Interesse sind dabei einerseits kleine Anlagen, welche z.B. auf einem Hausdach installiert sind und eine Nennleistung von wenigen kW aufweisen, andererseits eigentliche photovoltaische Kraftwerke, welche im Netzverbund arbeiten. Merkmal dieser Systemtypen ist, dass sie über keinen Energiespeicher verfügen müssen, sondern die im Moment erzeugte Elektrizität direkt ins Netz einspeisen, soweit sie nicht an Ort und Stelle verbraucht wird. Nach verschiedenen amerikanischen Studien stellen netzgekoppelte Anlagen, und zwar in erster Linie die dezentralen «residential systems», einen riesigen zukünftigen Markt dar, der allerdings erst erschlossen werden kann, wenn die Systemkosten gegenüber heute um eine Grössenordnung reduziert werden können. Insbesondere im Sonnengürtel der USA könnten Solarzellenanlagen, welche auf Einfamilienhäusern installiert sind, die durch die Klimageräte bewirkte Bedarfsspitze brechen und somit nicht nur Energie sparen, sondern auch die notwendige Reserveleistung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen reduzieren. Voraussetzung für eine weite Verbreitung solcher Anlagen ist auch eine entsprechende Tarifpolitik der Elektrizitätsversorgungsunternehmen.

In der Schweiz ist der Einsatz von Solarzellensystemen auf Wohnhäusern weniger interessant, da die höchsten Bedarfsspitzen im Winter auftreten, wenn die Sonneneinstrahlung (abgesehen von den Bergregionen) vergleichsweise gering ist.

4. Kosten und Wirtschaftlichkeit, Marktbetrachtungen

Photovoltaische Systeme haben den Ruf, teure Elektrizität zu produzieren. Wenn man die Gestehungskosten der photovoltaischen Elektrizität mit Energiekosten bzw. -preisen anderer Energiesysteme, z.B. von Öl-, Kern- oder Wasserkraftwerken, vergleicht, besteht dieser Ruf zweifellos zu Recht. Auch wenn die Kosten der Elektrizitätsverteilnetze berücksichtigt werden, sind die Kosten der photovoltaischen Elektrizität am Ort des Verbrauchers noch um mehr als eine Grössenordnung höher als diejenigen der zentral erzeugten Elektrizität. Eine Ausnahme bildet der Fall eines abgelegenen Verbrauchers mit bescheidenem Leistungsbedarf. Vergleicht man die Investitionskosten für eine Versorgungsleitung mit den Kosten für eine Solarzellenanlage, so zeigt es sich, dass es durchaus Verhältnisse gibt, bei denen auch heute die Solarzellenanlage wirtschaftlicher ist als der Netzanschluss. Dies wird durch Figur 4 veranschaulicht, in welcher die Investitionskosten für eine 220-V/10-A-Freileitung den Kosten für zwei verschieden grosse Solarzellenanlagen gegenübergestellt sind. Die Kostengleichheit ergibt sich bei ca. 2 bzw. 6 km Anschlussdistanz des Verbrauchers [5].

Wie steht es nun mit den Chancen der Photovoltaik, in absehbarer Zeit konkurrenzfähig zur konventionellen Elektrizitätserzeugung zu werden? Seit Jahren publiziert das amerikanische Department of Energy Preisziele für Solarzellenmoduln: Im Jahr 1986 sollte demnach 1 kW installierter

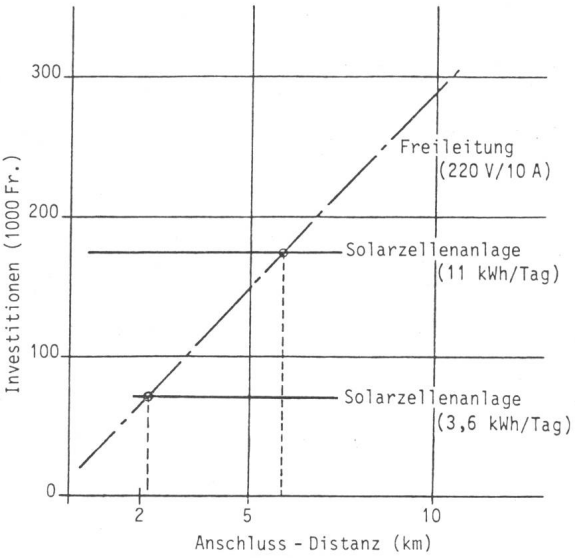

Fig. 4 Vergleich der Investitionen für eine Netzzuleitung mit denjenigen für Solarzellenanlagen

Tabelle III

Systemkosten (Fr./W)	Energiekosten [1]) (Fr./kWh)	Marktsektoren (kumulativ)
40–100 (Stand 1982)	2–5	Telekommunikation, Korrosionsschutz, Navigationshilfen, kleine Wasserpumpen, andere Kleinanwendungen
20	1	Ersatz von Kleindieselgeneratoren im kW-Bereich, grössere Wasserpumpen
10	–.50	Ersatz von Dieselgeneratoren im 10–100-kW-Bereich; Einsatz in der Elektrifizierung landwirtschaftlicher Gebiete in Entwicklungsländern; Kühlanlagen in abgelegenen Gebieten
5	–.25	Ersatz von Diesel- und Ölkraftwerken bis zum MW-Bereich; Einsatz auf Wohnhäusern und Fabriken in günstigen Gebieten; Klimatisierung in Industrieländern

[1]) Annahme: 2000 Vollbetrieb-Std./Jahr (Schweiz: ca. 1200).

Leistung noch 700 US$ kosten (Preisbasis 1980). Ebenfalls seit Jahren erklären namhafte Solarzellenhersteller, dass diese Ziele unrealistisch seien. In der Tat blieben in den vergangenen drei Jahren die nominalen Preise der grossen Hersteller nahezu konstant. Beim gegenwärtigen Preisniveau von 7 bis 11 $ pro Watt ist der Markt so stark gewachsen, dass die Hersteller offenbar ihre Produktionskapazität stark ausbauen konnten, ohne dass die Preise gesenkt werden mussten. Die von verschiedenen Herstellern unternommenen Anstrengungen, neue Verfahren zur Verbilligung der Zellenherstellung zur Fabrikationsreife zu bringen, sowie das jederzeit mögliche Eindringen neuer finanzstarker Industrieunternehmen (z.B. aus Japan) in die Reihen der etablierten Hersteller könnten allerdings durchaus einen neuen Verbilligungsschub auslösen. Tabelle III zeigt, welche Marktsektoren bei sinkenden Systemkosten erschlossen werden können [6]:

5. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die photovoltaische Elektrizitätserzeugung heute soweit entwickelt ist, dass sie für Kleinverbraucher ohne Anschluss an ein Elektrizitätsnetz eine technisch ausgereifte und oft auch wirtschaftliche Möglichkeit darstellt. Zur Erschliessung weiterer Anwendungsbereiche sind jedoch noch erhebliche Anstrengungen notwendig, welche vor allem die folgenden Ziele anvisieren müssen:

Verbilligung der Zellen- und Modulherstellung
Reduktion des Installationsaufwands
Entwicklung bzw. Verbesserung der elektronischen Anpassgeräte («Power Tracker», DC/AC-Konverter)
Verbilligung und Verbesserung der Elektrizitätsspeicher (Akkumulatoren, Schwungräder)
Erarbeitung verbesserter Dimensionierungsmethoden insbesondere für grössere Systeme

Angesichts der bis heute erzielten technischen und wirtschaftlichen Erfolge und der weltweiten intensiven Forschungs- und Entwicklungstätigkeit darf der Technik der photovoltaischen Energieumwandlung zweifellos eine «sonnige» Zukunft prognostiziert werden.

Literatur

[1] *I.D. Roessner:* Government-industry relationships in technology commercialization: The case of photovoltaics. Solar Cells 5(1982)2, p. 101...134.
[2] *M. Wolf:* Historical development of solar cells. In: C.E. Backus: Solar cells. New York, IEEE Press, 1976.
[3] Centre régional d'énergie solaire. Quagadougou/Haute-Volta, Communauté Economique de l'Afrique de l'Ouest, 1981.
[4] *A. Wyss* und *R. Minder:* Kühlung mit Sonnenenergie. NZZ Forschung und Technik vom 22. 8. 1979, Nr. 193, S. 53.
[5] Beiträge zum vergleichenden Studium zentraler und dezentraler Nutzung der Sonnenenergie. Studie der Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft Nr. 16. Bern, Eidgenössische Drucksachen- und Material-Zentrale, 1981.
[6] *E.J. Rattin:* Overview of photovoltaic market studies. Report No. ATR-78 (7694–05)1. El Segundo/California, Aerospace Corporation, 1978.

Adresse des Autors

Dr. *R. Minder*, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Bellerivestrasse 36, 8022 Zürich.