



Fachbericht

AEE - Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE

©1994/1996 Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE

Kumulierter Energieverbrauch und Erntefaktoren von Photovoltaik-Systemen

Von Gerd Hagedorn

Als Ergebnisse einer umfangreichen Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) in Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen, können erstmalig detaillierte Angaben über den kumulierten Energieverbrauch zur Herstellung von Solarzellen und photovoltaischen Kraftwerken gegeben werden. Die daraus resultierenden Erntefaktoren zeigen, dass terrestrische photovoltaische Stromerzeugung aus der Sicht des Primärenergieverbrauchs bzw. der energetischen Amortisationszeiten sinnvoll ist. Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des deutschen Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0328830B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. Der kumulierte Energieverbrauch (KEV) und die damit bestimmbaren Erntefaktoren von Energieerzeugungssystemen sind ein wichtiges Kriterium für die Bewertung von regenerativen Systemen und ihres möglichen rationellen Beitrages zur Energieversorgung.

Ein Einsatz eines Energieerzeugungssystems, das regenerative Energiequellen zur Nutzung erschließt, kann nur dann befürwortet werden, wenn zu seiner Herstellung nicht mehr Energie verbraucht wird, als es in seiner Lebensdauer erzeugen kann. Angefangen bei der Gewinnung der Rohstoffe umfasst der kumulierte Energieverbrauch eines Produkts sämtliche Prozess- und Hilfsenergieverbräuche über die gesamte Prozesskette seiner Herstellung, einschließlich des kumulierten Energieverbrauchs zur Herstellung von Einsatzstoffen und der zur Fertigung benötigten Betriebsmittel (Anlagen und Gebäude). Für eine energiewirtschaftliche Betrachtungsweise ist es erforderlich den kumulierten Endenergieverbrauch getrennt nach elektrischer Energie und Brennstoffen sowie den nichtenergetischen Verbrauch (NEV) zu erfassen, um exakte Angaben über kumulierten Primärenergieverbrauch treffen zu können. Bild 1 (Abbildung nicht im Netz verfügbar) gibt eine Abgrenzung und Gliederung der untersuchten Prozessketten und verdeutlicht den Beitrag vieler "konventioneller Einsatzstoffe". Daten über den KEV zur Herstellung dieser Einsatzstoffe sind in einer Datenbank, die in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der TU München in vielen Jahren erstellt wurde, für die FfE verfügbar.

Die energetischen Aufwendungen für die Herstellung von kristallinen Photovoltaik-Modulen wurden auf der Grundlage von eigenen messtechnischen Untersuchungen und Betriebsaufzeichnungen in bestehenden Fertigungseinrichtungen ermittelt. Belastbare Anhaltswerte zum Energieverbrauch für die Herstellung von amorphen Photovoltaik-Modulen konnten aus den fortgeschrittenen Planungsunterlagen für eine Fertigungsstätte gewonnen werden. Die umfangreichen Untersuchungen wurden aus Mitteln des BMFT finanziert und in enger Zusammenarbeit mit den in der BRD produzierenden Herstellern und Zulieferern durchgeführt, ohne deren Mitwirkung und Unterstützung das Ergebnis nicht hätte erreicht werden können. Allen involvierten Herstellern und Institutionen und insbesondere den mitwirkenden Personen sei auf das herzlichste gedankt.

Annahmen und Randbedingungen

Die derzeitige Situation auf dem Photovoltaik-Markt ist dadurch gekennzeichnet, dass die bei den Herstellern vorhandenen Fertigungseinrichtungen nicht ausgelastet werden. Da gerade bei den hier betrachteten Fertigungsprozessen ein hoher Grundlastanteil am Energieverbrauch zu verzeichnen ist und nur ein Teil des Gesamtaufwandes lastabhängig ist, liegt der heutige spezifische Energieverbrauch signifikant über dem, der sich bei voller Kapazitätsauslastung ergeben würde. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wurden Modellfälle gebildet, die es aufgrund der Detailtiefe der Untersuchung gestatten, repräsentative und vergleichbare Werte für eine industrielle Serienanfertigung angeben zu können. Der Fall I bezieht sich auf den heutigen fertigungstechnischen Stand, unterstellt eine volle Ausnutzung der vorhandenen Fertigungskapazität bei Einschichtbetrieb in der Zellen- und Modulfertigung und stellt somit die Untergrenze des KEV für den Status quo dar.

Um auch eine Abschätzung des Reduktionspotentials für den Energieaufwand geben zu können, wurde der Fall II gebildet. Der Fall II unterstellt eine Umsetzung heute bekannter technologischer Verbesserungen in die Produktion, wiederum eine volle Ausnutzung der Fertigungseinrichtungen bei Vierschichtbetrieb in der Zellen- und Modulfertigung und gleichzeitig einen Ausbau der Fertigungskapazität. Auf diese Weise kann eine Aussage getroffen werden, welche Untergrenze des KEV in einem Zeitraum von fünf Jahren erreicht werden könnte, würde die Entscheidung zur Planung und zum Aufbau einer dementsprechenden Fertigung heute fallen.

Zur Orientierung der Größenordnung in der Zellen- und Modulfertigung können für die Modellfälle folgende Produktionsziffern angegeben werden:

Fall I (t): jährliche Produktionskapazität: ca.2 MWp

Fall II (t+ 5): jährliche Produktionskapazität: ca.25 MWp

Zur Berechnung des kumulierten Primärenergieverbrauchs müssen die erhobenen Werte in den Verbrauchssektoren Endenergie und nichtenergetischer Verbrauch in Primärenergie umgerechnet werden. Für die Bereitstellung von elektrischer Energie in der Industrie wurde ein Nutzungsgrad von 0,4 angesetzt, für gasförmige und flüssige Brennstoffe ein Nutzungsgrad von 0,85 - bei anderen Brennstoffen im Einzelfall davon abweichend - und für den NEV ein Nutzungsgrad von 0,8. Diese Umrechnungsfaktoren orientieren sich an den Durchschnittswerten, die für die Versorgungsstruktur der Bundesrepublik gültig sind und liegen an der Untergrenze der aktuellen Statistik. Die so errechneten Primärenergienmengen liegen daher auf der sicheren Seite und ermöglichen eine vergleichende Betrachtungsweise auch im Zusammenhang mit anderen durchgeführten und geplanten Untersuchungen zum KEV.

Herstellung von halbleiterreinem Poly-Silizium (EG-Si)

Zur Herstellung von Solar-Zellen aus kristallinem Silizium wird derzeit halbleiterreines Poly-Silizium verwendet. Überkapazitäten auf dem Halbleitermarkt und eine nicht genügend große Nachfrage nach Solar-Silizium, dessen Reinheitsanforderungen nicht so extrem wie die an halbleiterreines Material sind, lohnen derzeit nicht den Aufbau einer eigenständigen Silizium-Reinigung mit unkonventionellen Methoden. In einer Vorstufe wird der Rohstoff Siliziumdioxid in Form von Quarz oder Sand mit Kohlenstoff zu technischem Silizium (MG-Si) reduziert.

Das Verfahren wird großtechnisch in sogenannten Elektro-Niederschachtöfen durchgeführt, die in kontinuierlicher Fahrweise ca.1t MG-Si/h mit einer Reinheit von >98% produzieren. Durch Beschickung der Öfen mit einem neuartigen Möller, ein Gemisch aus stückigem Quarz und Sandbriketts, konnte der Prozessenergieverbrauch auf 13000 kWh je t MG-Si gesenkt werden. Der Brennstoffanteil am KEV (Tabelle 1) wird hauptsächlich durch aschearme Kohle und Petrolkoks verursacht, aus denen mit Quarzsand die eingesetzten Sandbriketts gefertigt wurden. Die Energiebilanz für die großtechnische Reduktion weist u.a. Abgasverluste von über 50% auf, jedoch sind theoretisch mögliche Maßnahmen zur Verringerung des Energieeinsatzes unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit einem technischen Risiko behaftet, so daß der KEV auch in naher Zukunft unverändert bleiben dürfte.

Technisches Silizium, das zum größten Teil in der Aluminium- und Stahlindustrie eingesetzt wird, muss für Einsatzzwecke in der Halbleiter- oder Photovoltaikindustrie gereinigt werden. In einem ersten Schritt wird es auf Korngrößen < 0,5 mm gemahlen und in einem Wirbelschichtreaktor bei 300 bis 400 C mit HCl zu gasförmigen chlorierten Siliziumhalogeniden umgesetzt. Nach Kondensation der Wirbelschichtreaktorabgase wird hochreines Trichlorsilan (SiHCl_3) über mehrfache Rektifikation gewonnen. Im Siemens C-Prozess wird das Trichlorsilan mit Wasserstoffgas beaufschlagt und in einen Reaktor geleitet, in dem sich an über 1000 C heißen Silizium-Stäbchen halbleiterreines Poly-Silizium (EG-Si) abscheidet.

Die Produktion von halbleiterreinem Poly-Silizium wird vorteilhaft großtechnisch (ca.3000 t/a) im Chemieverbund betrieben und ist somit im stofflichen und energetischen Zusammenhang des Produktionsstandortes zu betrachten. Beispielsweise wurde das bei der Reinigung und Abscheidung anfallende Kuppelprodukt Tetrachlorsilan (SiCl_4) gemäß Konvertierungsgleichung auf die Einsatzmenge Trichlorsilan angerechnet. Mit der ausgeführten Heiß-Kühlung der Abscheidereaktoren wird Prozessdampf erzeugt, der ins Werknetz eingespeist wird; die Gutschrift für die nutzbare Abwärme führt zu einer Brennstoffsubstitution und damit zu einem rationellen Einsatz von Energie.

Der kumulierte Energieverbrauch zur Herstellung von EG-Si, Tabelle 1, wird wesentlich durch den elektrischen Energieverbrauch im Abscheidungsprozess bestimmt, dessen Abwärmenutzung aber gleichzeitig zu einer saldierten Gutschrift im Brennstoffverbrauch führt. Obwohl das Verfahren aus technischer wie energetischer Sicht noch ein Optimierungspotential besitzt, ist aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in naher Zukunft mit keinen wesentlichen Änderungen zu rechnen.

Herstellung von monokristallinen Silizium-Scheiben

Beim Czochralski- oder Tiegelziehverfahren wird das halbleiterreine Silizium im Unterdruckbereich unter Schutzgas aufgeschmolzen. Aus der Schmelze werden mit einem Keim monokristalline Stäbe mit einem Durchmesser von 130 mm und einer Länge bis ca. 1,5 m gezogen. Die runden Stäbe werden zu Säulen mit quasiquadratischer Grundfläche verarbeitet und aus diesen mit Innenloch-Sägen Scheiben mit einer Stärke von 0,45 mm gesägt. Abschließend werden die Scheiben gereinigt und getrocknet. Der energieintensive Kristallisationsprozess (ca. 50%) führen zu einem spezifischen kumulierten elektrischen Endenergieverbrauch von 505 kWh/m². Die Beiträge aus dem Vorprodukt EG-Si und dem Prozessenergieverbrauch in der Scheibenherstellung sind in etwa gleich groß und bestimmen den KEV vorrangig. Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist, sind die Werte für beide Modellfälle identisch.

Die kristallinen Technologien wurden bei unterschiedlichen Herstellern untersucht und der Fall II konnte für die monokristalline Scheibe nicht qualifiziert werden. Jedoch sind auch hier Möglichkeiten zu einer Reduktion des Energieeinsatzes durch Verbesserungen am Tiegelziehprozess und die Herstellung dünnerer Scheiben prinzipiell gegeben.

Herstellung von multikristallinen Silizium-Scheiben

Halbleiterreines Silizium wird im Unterdruckbereich unter Schutzglas aufgeschmolzen und in Kokillen gegossen, in denen es unter Temperaturführung gerichtet erstarrt. Die multikristallinen Blöcke werden mit Sägen zu Säulen mit quadratischer Zellen-Grundfläche weiterverarbeitet. Die Säulen werden mit Innenlochsägen in multikristalline Silizium-Scheiben mit einer Stärke von 0,45 mm zerteilt und abschließend gereinigt.

Für den Fall II wurden folgende technologische Verbesserungen berücksichtigt. Eine Mehrkammeranlage mit einer Blockgröße von 200 kg, gegenüber 22,4 kg im Fall I, führt zu einem geringeren spezifischen Prozessenergieverbrauch und höherer Materialausbeute im Kristallisationsprozess. Durch den Einsatz von Drahtsägen können Scheiben mit einer Stärke von 0,2 mm und mit geringerem Verschnitt gesägt und somit der Materialeinsatz an EG-Si weiter gesenkt werden. Das Ergebnis in Tabelle 1 zeigt, dass sich der kumulierte Energieverbrauch durch diese Maßnahmen drastisch reduziert.

Herstellung von monokristallinen Solarzellen

Auf dem Weg zur opto-elektrisch funktionierenden Solar-Zelle durchlaufen die monokristallinen Silizium-Scheiben folgende Prozesssequenzen:

- Damage-Ätzung (nasschemisch)
- Texturierung (nasschemisch)
- Phosphorglas-Ablösung (nasschemisch)
- Dotierung
- Kontaktierung (Siebdruck/IR-Ofen)
- Zellentest

Da viele Verfahren, wie z.B. die Gasphasendiffusion, durch einen hohen Grundlastverbrauch gekennzeichnet sind, beeinflusst die Kapazitätsauslastung der Fertigungseinrichtungen den Prozessenergieverbrauch wesentlich. Demzufolge wurde im Fall I ein Einschichtbetrieb und im Fall II ein Vierschichtbetrieb zugrundegelegt. Der Prozessenergieverbrauch lässt sich auf diese Weise auf 30% des Wertes im Fall I senken. Der Anteil des Hilfsenergieverbrauchs für Beleuchtung, Klimatisierung etc. liegt in der gleichen Größenordnung wie der des Prozessenergieverbrauchs. Eine Aufteilung der Anteile am KEV kann aus Bild 2 (Fall I) (Abbildung nicht im Netz verfügbar) und Tabelle 1 entnommen werden. Herstellung von multikristallinen Solarzellen ist etwas umfangreicher im Vergleich zur monokristallinen Zelle:

- Damage-Ätzung (nasschemisch)
- Texturierung (nasschemisch)
- Oxid - Ätzung (nasschemisch)
- Phosphorglas - Ablösung (nasschemisch)
- Dotierung (Gasphasendiffusion)
- Kontaktierung (Siebdruck/R-Ofen)
- H-Passivierung (Glimm - Entladung)
- AR - Beschichtung (Vakuum - Aufdampfung)
- Zellentest

In der graphischen Darstellung in Bild 3 (Fall I) (Abbildung nicht im Netz verfügbar) sind die Anteile des spezifischen Energieverbrauchs, aus der Silizium - Scheibe, aus den sonstigen Einsatzstoffen und den Betriebsmitteln am kumulierten Energieverbrauch zur Herstellung von multikristallinen Solarzellen zu erkennen. Aufgrund der noch vergleichsweise geringen Durchsatzmengen können die energetischen Aufwendungen für die Produktionsanlagen, die für die Zellen - und Modulfertigung vorteilhaft zusammengefasst wurden, nicht vernachlässigt werden. Bei den großtechnischen Verfahrensweisen in der Silizium - Herstellung, sind sie dagegen von untergeordneter Bedeutung. Die Verwendung der 200 µm starken Silizium - Scheibe und der Übergang zum Vierschichtbetrieb führt in Fall II zur Halbierung des kumulierten Primärenergieverbrauchs (Tabelle 1).

Herstellung von monokristallinen PV - Modulen

Die monokristallinen Solarzellen werden in Modulen zu einem Verbund größerer Leistung zusammengeschlossen und gegen Umwelteinflüsse geschützt. Ausgewählte Solarzellen werden zu einer Matrix zusammengestellt und durch Lötten oder Schweißen mit Verbinderstreifen elektrisch leitend verbunden. Die Zellenmatrix wird in EVA - Folie eingebettet und zusammen mit den Abdeckungen - Frontseite : Glas, Rückseite: Al / Tedlar - Folie - unter Druck und Erwärmung zu einem Laminat gepresst. Nur im Fall I wird ein Aluminiumprofil - Rahmen mit Dichtungen montiert. Schon heute sind rahmenlose Module für den Kraftwerkseinsatz lieferbar, wie sie für den Fall II angenommen wurden. Nach der Montage der elektrischen Anschlüsse werden die fertiggestellten Module getestet. Bild 2 (Abbildung nicht im Netz verfügbar) zeigt, dass der spezifische Energieverbrauch zur Modulherstellung vernachlässigbar ist, während das Vorprodukt Solarzelle den Hauptanteil stellt, Der Beitrag der übrigen Vorprodukte wird maßgeblich vom KEV des Aluminium - Rahmens bestimmt und verringert sich erheblich beim rahmenlosen Modul im Fall II, siehe hierzu auch Tabelle 1.

Herstellung von multikristallinen PV - Modulen

Der Herstellungsprozess für multikristalline PV-Module unterscheidet sich nur in verfahrenstechnischen Details von dem für monokristalline PV-Module. Lediglich im Modulaufbau sind Unterschiede festzustellen. Anstelle der Rückseitenfolie wird die Zellenmatrix von einer Glasscheibe auch auf der Rückseite abgeschlossen; die Stärke beider Glasscheiben zusammen entspricht der Frontglasscheibe des monokristallinen Moduls. Die Rahmenkonstruktion im Fall I ist aus Edelstahl gefertigt und erweist sich energetisch günstiger als der Aluminium - Rahmen.

Im Bild 3 (Abbildung nicht im Netz verfügbar) ist erkennbar, dass auch die multikristallinen Solarzellen zum kumulierten Energieverbrauch des Moduls vorrangig beitragen. Aufgrund der Edelstahlrahmenkonstruktion fallen die kumulierten Energieaufwendungen der übrigen Modulbestandteile im Vergleich zum monokristallinen Modul geringer aus. Die Werte in Tabelle 1 enthalten die saldierten End- und Primärenergieverbrauchswert. Sie zeigen, dass unter den angegebenen Randbedingungen der flächenbezogene spezifische KEV auf die Hälfte reduziert werden kann.

Kumulierter Energieverbrauch						
kumulierter Energieverbrauch zur Herstellung von:	Modellfall	Bezugsgröße			NEV	Primärenergie
MG-Si	Fall I + II	kg	14,6	11,4	-	51,3
EG-Si	Fall I + II	kg	114,3	29,8	-	250,7
Si-Scheiben mono	Fall I + II	m ²	505	-69	-	1181
Si-Scheiben multi	Fall I	m ²	422	-57	2	994
	Fall II	m ²	196	- 2	34	534
Solar-Zellen mono	Fall I	m ²	721	47	12	1874
	Fall II	m ²	607	-30	12	1497
Solar-Zellen multi	Fall I	m ²	635	50	10	1663
	Fall II	m ²	285	32	45	809
PV-Modulen mono	Fall I	m ^{2*}	880	210	38	2496
	Fall II	m ^{2*}	664	35	28	1739
PV-Modulen multi	Fall I	m ^{2*}	716	130	30	1985
	Fall II	m ^{2*}	321	96	58	993
PV-Modulen amorph	Fall I	m ^{2*}	150	99	4	496
	Fall II	m ^{2*}	150	49	4	437

* Werte bezogen auf Zellenfläche

Tabelle 1: Spezifischer kumulierter Energieverbrauch KEV zur Herstellung von Photovoltaikmodulen

Herstellung von amorphen PV - Modulen

Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine industrielle Fertigung für amorphe PV - Module in der Bundesrepublik existierte, mussten sich die Untersuchungen auf die fortgeschrittenen Planungsunterlagen für eine Pilotfertigung (1 MWp/a bei Einschichtbetrieb, 2,5 MWp/a bei Dreischichtbetrieb) stützen. Belastbare Anhaltswerte über den zu erwartenden Energieverbrauch wurden über die geplanten Anschlussleistungen unter Verwendung von Gleichzeitigkeitsfaktoren ermittelt. Die "Zellenfertigung" ist bei der amorphen Technologie integrierter Bestandteil der Modulfertigung. Auf der Frontglasscheibe des Moduls werden dünne (<1µm) Schichten Silizium abgeschieden, die eine amorphe Struktur besitzen. Dazu werden Silan (SiH₄) und andere Prozessgase verwendet.

Die wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung eines amorphen PV - Moduls können zusammengeschrieben werden:

- Strukturierung der transparenten, leitenden Oxidschicht auf der Frontglasscheibe
- Abscheidung der amorphen pin - Schicht
- Sputtern der Rückseitenelektrode
- Strukturierung der Rückseitenelektrode
- Rückseitenschutz mit Siebdruck
- Trennen der Substrate auf Modulgröße
- Einkapseln
- Modultest

Die Strukturierung dient dabei zu Herstellung von seriell verschalteten "Einzelzellen" zur Erhöhung der Modul - Ausgangsspannung. Das beschichtete Glassubstrat wird unter Verwendung von Kleb - und Kunststoffen mit einem Stahlblech ohne Rahmung zum Laminat verbunden. In der graphischen Darstellung ,im Bild 4 (Fall I), wird deutlich, dass der Prozess - und Hilfsenergieverbrauch in der Modulfertigung ca. 50% des kumulierten Endernergieverbrauchs ausmacht. Die energetischen Aufwendungen für die amorphe Schicht (Silan) sind aufgrund des sehr geringen Materialeinsatzes vernachlässigbar. Weiterhin fällt auf, dass der KEV des verwendeten Stahlblechs den größten Anteil am KEV der Vorprodukte und Einsatzstoffe stellt. Für die Adaption der Planungswerte auf die Modellfälle wurde daher für den Fall II die Verwendung eines Ersatz - Materials unterstellt, das zu einer Verringerung im kumulierten Brennstoffverbrauch führt, siehe Tabelle 1.

Der flächenbezogene spezifische Prozess- und Hilfsenergieverbrauch zur Herstellung von amorphen PV-Modulen liegt in der gleichen Größenordnung wie in der Zellen- und Modulfertigung kristalliner PV-Module.

Kumulierter Energieverbrauch von photovoltaischen Kraftwerken

Der KEV photovoltaischer Kraftwerke setzt sich aus dem KEV der PV-Module als wesentlichem Bestandteil und den übrigen Komponenten wie Aufständering, Verkabelung, Leistungselektronik etc. zusammen. Wichtig für die energetische Gesamtbewertung von Energieerzeugungsanlagen ist die leistungsbezogene Angabe des kumulierten Primärenergieverbrauchs. Anknüpfend an die letzten drei Abschnitte über PV-Module können die entsprechenden Werte des kumulierten Primärenergieverbrauchs der untersuchten Modultechnologien für die Modellfälle aus Tabelle 2 entnommen werden.

Struktur des Si-Basis-materials	Modellfall	*1) [%]	KEV Modul [kWh / kWp]	KEV Kraftwerks-komponenten [kWh / kWp]	KEV Summe Kraftwerk [kWh / kWp]	EF ²⁾ Ta = 1000 h/a ³⁾ [-]	EF ²⁾ Ta = 2000 h/a ⁴⁾ [-]
mono	Fall I	14	17500	3000	20500	2,8	5,6
multi	Fall I	12	16500	3500	20000	2,9	5,7
amorph	Fall I	6	8000	5300	13300	4,3	8,6
mono	Fall II	15,5	11000	1200	12200	4,7	9,4
multi	Fall II	13,5	7500	1500	9000	6,4	12,7
amorph	Fall II	8	5500	2000	7500	7,6	15,3

1) bezogen auf Zellenfläche

2) primärenergetisch bewertete Nettoerzeugung, Lebensdauer = 20 a

3) Standort Bundesrepublik Deutschland

4) Standort in klimatisch günstigen Breiten

Tabelle 2: Kumulierter Primärenergieaufwand KEV und Erntefaktoren für PV-Module bzw. PV-Kraftwerke einschließlich Netzankopplung

Die zugrundegelegten Modul-Nennwirkungsgrade beziehen sich im Fall I auf heute in der Bundesrepublik hergestellte kristalline Module. Eine weitere Erhöhung der für den Fall II angenommenen Wirkungsgrade kristalliner Module ist nicht auszuschließen, während die angegebenen Wirkungsgrade amorpher Module unter dem Gesichtspunkt der Langzeitstabilität eher skeptisch beurteilt werden müssen. Die energetischen Aufwendungen zur Erstellung der übrigen Kraftwerkskomponenten können über den KEV des Materialeinsatzes zuverlässig abgeschätzt werden. Der KEV für Beton, Baustahl, Profilstahl, Kunststoffe und Kupfer für Kabel, Leistungselektronik u.a. ist bekannt. Die Prozessenergie für Montage und Transport ist demgegenüber im Vergleich zum KEV der Module vernachlässigbar. Für den Fall I wurden die Aufwendungen anhand von Demonstrations-Kraftwerken, wie beispielsweise Pellworm oder Neunburg vorm Wald, mit einer üblichen Nennleistung von 300 kWp ermittelt. Durch Optimierung der Aufständering, Verkabelung und der Leistungselektronik ist auch auf diesem konventionellen Teilgebiet noch eine Verringerung des Materialeinsatzes gegeben, wie die Werte für den Fall II zeigen, die sich auf Planungen von PV-Kraftwerken der "nächsten Generation" mit einer Nennleistung von 1500 kWp beziehen.

In diesem Zusammenhang ist der Einfluss des Modulwirkungsgrades auf sämtliche flächenproportionalen Anteile der Materialeinsätze hervorzuheben, wie der Vergleich des KEV von erforderlichen Kraftwerkskomponenten für die untersuchten Technologien deutlich zeigt.

Energetische Amortisationszeiten und Erntefaktoren

Die existierenden Definitionsmöglichkeiten werden in (1) diskutiert und abgegrenzt. Der Erntefaktor ist definiert als der Quotient aus der Nettoenergieerzeugung in der Lebensdauer einer energieerzeugenden Anlage und dem kumulierten Primärenergieverbrauch für die Herstellung der Anlage, der Betriebsmittel und der Betriebsstoffe. Erntefaktor und Gesamterntefaktor sind für photovoltaische Kraftwerke betragsmäßig gleich, sofern der Betriebsenergieverbrauch (Solarstrahlung) mit Null bewertet wird, da seine Nutzung keine Ressourcenminderung bedeutet. Für die Angabe der Erntefaktoren in Tabelle 2 wurde die primärenergetische Bewertung der Nettoerzeugung gewählt. Aus der Jahresnutzungsdauer T_a multipliziert mit der Kraftwerksnennleistung errechnet sich die jährliche Nettoerzeugung. Die gewählten Werte beinhalten sämtliche Verluste, wie Temperatureinfluss und Verschmutzung der Module, Wechselrichterverluste etc. und sind typisch für Einstrahlverhältnisse in der Bundesrepublik oder in klimatisch günstigeren Breiten, beispielsweise Afrika. Die Ergebnisse in Tabelle 2 weichen gegenüber den in früheren Veröffentlichungen (1),(2),(3) auf der Basis von Schätzungen genannten Werten ab.

Insbesondere frühere Abschätzungen für die monokristalline Technologie lagen deutlich über den heute anzusetzenden Werten. Die primärenergetisch bewerteten Amortisationszeiten der untersuchten Modellkraftwerke können für den Standort Bundesrepublik aus Bild 5 (Abbildung nicht im Netz verfügbar) entnommen werden. Für Standorte in klimatisch günstigeren Breiten mit $T_a = 2000$ h/a würden sich die Amortisationszeiten halbieren. Der kumulierte Primärenergieverbrauch für die Herstellung von photovoltaischen Kraftwerken ist unter den Bedingungen von Fall I zwischen 13000 und 21000 kWh/kWp einzuordnen und stellt die Untergrenze des KEV für den heutigen Stand der Technik dar. Für den Fall II können Werte zwischen 7000 und 12500 kWh/kWp erwartet werden, die durch technologische Verbesserungen und eine Ausweitung der Produktionskapazität in einem Zeitraum von fünf Jahren erreicht werden können.

Der Gültigkeitsbereich und die Vergleichsmöglichkeiten der Ergebnisse beschränken auf die im Rahmen der Untersuchungen getroffenen Modellannahmen, analysierte Fertigungsverfahren und die Energieversorgungsstruktur der Bundesrepublik. Es wurde versucht, ein repräsentatives Gesamtergebnis zu zeichnen. Es können sich jedoch im Einzelfall unter anderen Annahmen und mit anderen Fertigungsverfahren sowie Versorgungsstrukturen durchaus Abweichungen ergeben. Mit photovoltaischen Kraftwerken können primärenergetisch bewertete Erntefaktoren erreicht werden, die für Einstrahlverhältnisse in der Bundesrepublik im Fall I zwischen 2,8 und 4,3 und für den Fall II zwischen 4,7 und 7,6 liegen. Unter günstigeren Einstrahlverhältnissen lassen sich in Fall II Erntefaktoren bis 15 erzielen. Die daraus resultierenden energetischen Amortisationszeiten liegen für den jetzigen Stand der Technik bei sieben Jahren für kristalline und bei unter fünf Jahren für amorphe Modultechnologie.

In naher Zukunft könnten mit monokristallinen Modulen Amortisationszeiten von vier Jahren sowie mit amorphen und multikristallinen Modulen von drei Jahren erreicht werden, wie die Modellbetrachtung gezeigt hat. Bei Aufstellung in klimatisch günstigeren Breiten lassen sich die Amortisationszeiten bis zur Hälfte verkürzen. Die energetischen Aufwendungen zur Herstellung der Solarzellen überwiegen deutlich den kumulierten Energieverbrauch der Modulbestandteile und Kraftwerkskomponenten bei kristalliner Technologie. Für amorphe Technologie sind dagegen aufgrund der deutlich geringeren Wirkungsgrade höhere Aufwendungen für Modulbestandteile, Aufständigung und Verkabelung in Kauf zu nehmen.

Welche Technologie langfristig den geringsten energetischen Gesamtaufwand aufweisen wird, kann nach heutigem Entwicklungs- und Kenntnisstand nicht beantwortet werden, doch können nach den vorliegenden Ergebnissen der kumulierte Energieverbrauch und die energetischen Amortisationszeiten von photovoltaischen Systemen nicht länger als grundsätzliche Hemmnisse für ihren Einsatz zur Energieversorgung angesehen werden.

Literatur

- (1) Schaefer, H.: Erntefaktoren von Kraftwerken, Definitionsmöglichkeiten. Energiewirtschaftliche Tagesfrage, 38Jg. 1988, Heft 10, S. 812.
- (2) Jensch, W.: Vergleich von Energieversorgungssystemen unterschiedlicher Zentralisierung. IfE - Schriftenreihe, Bd. 22, 1988, Resch - Verlag, Gräfelfing.
- (3) Aulich, H. u.a.: Energierücklaufzeit. Ein Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik. Sonnenenergie, Heft 6, 1986. DGS - Sonnenenergie Verlags GmbH, München.

Die Studie wurde im Auftrag der Forschungsstelle für Energiewirtschaft erstellt und erschien erstmalig in einem Sonderdruck der "Energiewirtschaftlichen Tagesfragen".

Dipl. Ing. Gerd Hagedorn ist Mitarbeiter der Siemens AG in Erlangen.