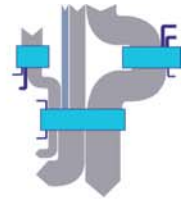


# Ganzheitliche Analyse von zukünftigen Photovoltaik-Systemen



Lebenszyklusinventare ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken

## 1 Abstract

Die Nebenkosten von PV-Anlagen (Modulrahmung, Aufständerung, Wechselrichter), Betriebsmittel und Hilfsenergie verursachen bei allen betrachteten PV-Techniken über 50 % des gesamten KEAs (Kumulierter Energieaufwand). Eine Optimierung des Systems bezüglich energetischer Amortisationszeit ist somit nicht allein durch die Verbesserung der Modulherstellung zu realisieren. Vor allem bei den Wechselrichtern, die mit 20 % (für a Si) bis 25 % (für sc Si) zum gesamten Primärenergieaufwand beitragen, ist noch deutliches Verbesserungspotenzial bezüglich der Lebensdauer vorhanden. Durch eine Erhöhung der Lebensdauer der Wechselrichter auf 10 Jahren, reduziert sich der Anteil für die Herstellung des Wechselrichters am gesamten KEA auf etwa 14 % (sc-Si).

Auch die Aufständerung, mit einem Anteil im Bereich von 12 und 20 % für sc Si- bzw. a Si Systeme, verursacht durch ihre große Menge an Aluminiumbauteilen einen hohen KEA. Zusammen mit dem Einsatz von rahmenlosen Modulen sollten hier Befestigungsmöglichkeiten gefunden werden, die auf der einen Seite zu kurzen Montagezeiten führen und dennoch eine einfache Wartung ermöglichen, andererseits aber auch nicht die Quantität und Qualität der verwendeten Bauteile beeinträchtigt.

Wie gezeigt werden konnte, bewirkt allein der Übergang zu rahmenlosen Modulen eine Reduktion der energetischen Amortisationszeit von 2,3 bis 4,9 Monaten. Die Aluminiumrahmen haben einen Anteil von 10 bis 15% am KEA.

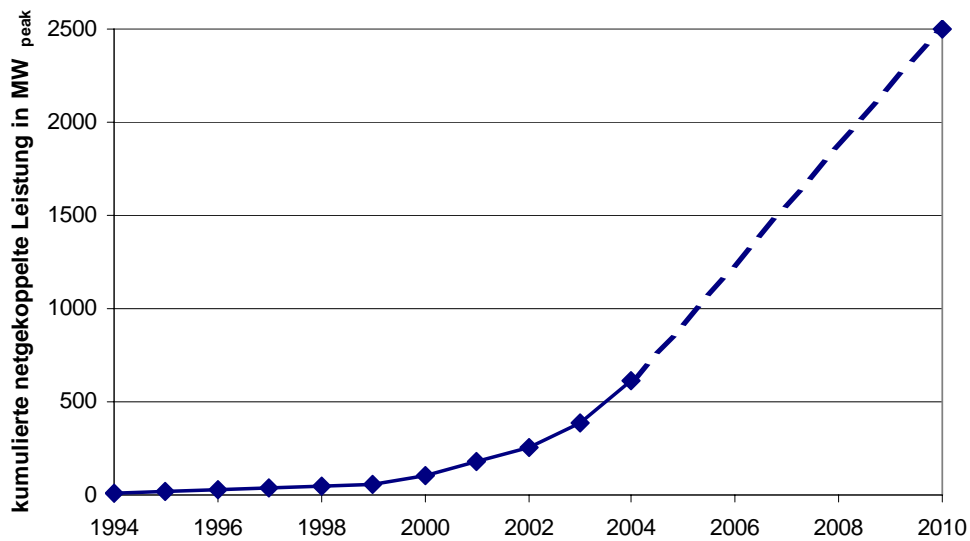
Des weitern konnte gezeigt werden, dass eine I/O-Analyse für sehr kostenintensive Produktionsanlagen ungeeignet ist und hier eine konservative validierte Abschätzung zu deutlich realitätsnäheren Ergebnissen führt.

Als wesentliches Fazit kann somit festgehalten werden, dass Optimierungsbemühungen sich im Sinne eines nachhaltigen Einsatzes von PV-Systemen zusätzlich auch auf den Bereich der Nebenkosten beziehen sollten

## 2 Allgemeiner Kontext und Zielsetzung

Im Rahmen eines vom BMWA geförderten Verbundprojektes wurden zukünftige Technologien zur Bereitstellung elektrischer Energie im Jahr 2010 detailliert untersucht. Ein Schwerpunkt der Studie war die ganzheitliche Analyse von zukünftigen Photovoltaik-Systemen, die gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wurde.

Aufgrund des starken Wachstums des Photovoltaikmarktes in der letzten Dekade wird für das Jahr 2010 ein Anstieg der weltweit kumulierten installierten Leistung um das Vier- bis Zehnfache ggü. 2003 prognostiziert. Schätzungen gehen von einer analogen Entwicklung in Deutschland aus.



**Abbildung 1:** Entwicklung der kumulierten netzgekoppelten Leistung in Deutschland

Derzeit wird der PV-Markt von monokristallinen (sc Si), multikristallinen (pc-Si) sowie amorphen Siliziumzellen (a-Si) dominiert. Eine ähnliche Marktstruktur wird auch künftig erwartet mit einer zunehmenden Verschiebung hin zu kostengünstigeren Systemen wie CIS und CdTe-Modulen.

Im Rahmen dieser Studie wurden PV-Anlagen mit rahmenlosen Solarmodulen, die auf sc-Si, pc-Si und a-Si basieren sowie mit CIS-Modulen untersucht. Weitere Systemkomponenten wie Wechselrichter, Aufständerung (Dachmontage und Freiflächenmontage) und Verkabelung zwischen den Modulen und zum Wechselrichter wurden ebenfalls betrachtet. In einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen einer Rahmung der Module betrachtet.

**Tabelle 1:** Rahmendaten: Dimensionierung und Bestandteile der PV-Anlagen

	sc-Si System	pc-Si System	a-Si System	CIS System
Modulwirkungsgrad	17 %	15 %	8 %	12 %
Peakleistung in kW/m <sup>2</sup>	0,17	0,15	0,08	0,12
Anlagenleistung in kW	3,12	3,12	3,12	3,12
PV-Fläche in m <sup>2</sup>	18,4	20,8	39,0	26,1

### 3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

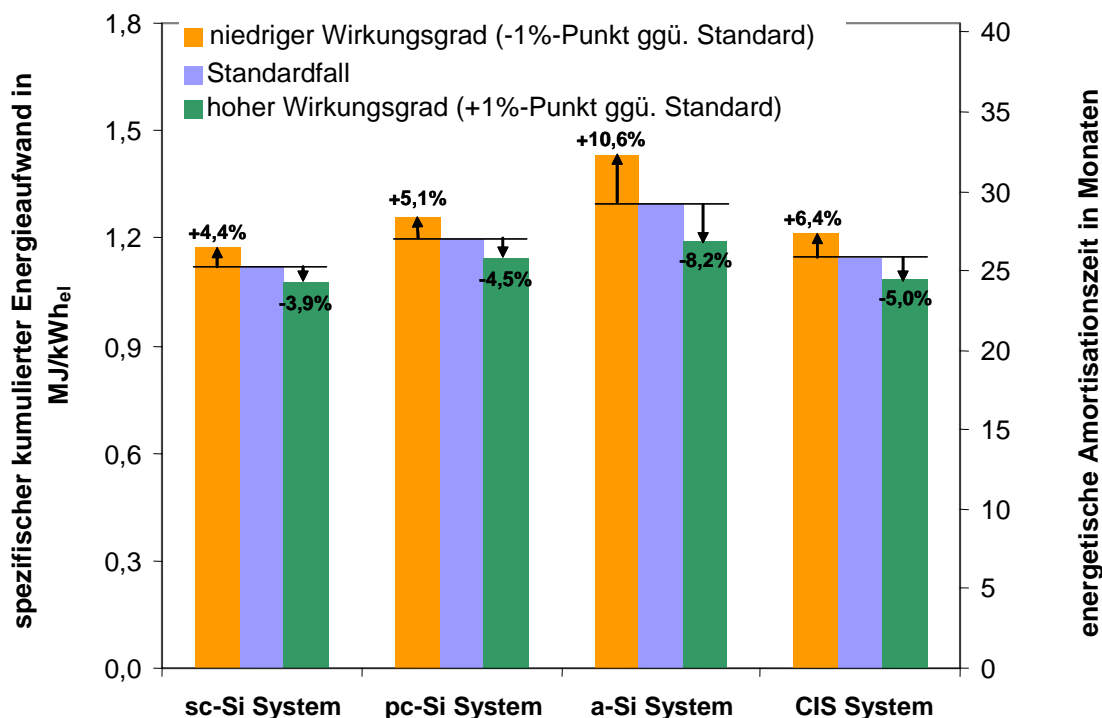
Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen PV-Systeme zu ermöglichen, wurden 3,12 kW-Anlagen konstruiert, die mit einer ganzen Anzahl von Modulen bzw. Wechselrichtern auskommen. Da für PV-Anlagen in 2010 diverse Annahmen getroffen werden müssen, wurden in einer Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen einer Variation dieser Annahmen untersucht.

Folgende Kriterien wurden in der Sensitivitätsanalyse detailliert untersucht:

- Einfluss des Modul-Wirkungsgrades
- Auswirkungen einer Rahmung von PV-Modulen
- Einfluss der Lebensdauer der Wechselrichter
- Bilanzierung der Hilfsenergie und Vergleich mit I/O-Analyse

#### Sensitivität „Modulwirkungsgrad“

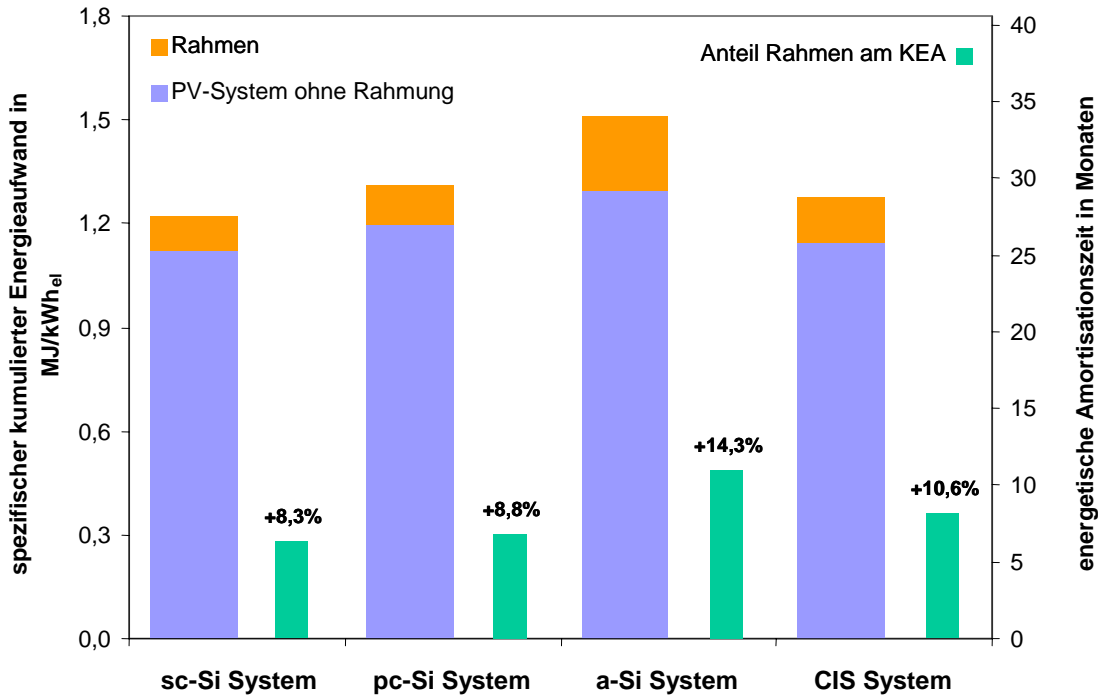
Bei der Festsetzung der erreichbaren Modulwirkungsgrade im Jahr 2010 wurden Literaturwerte oder Mittelwerte angesetzt. Dennoch variieren die Angaben hierzu erheblich, so dass in einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden soll, wie sich eine Variation des Modulwirkungsgrades auf das Gesamtergebnis auswirkt. Hierbei wird jeweils ein Fall mit einem niedrigeren und einem höheren Wirkungsgrad mit dem Standardfall verglichen.



**Abbildung 2:** Spezifischer Energieaufwand und energetische Amortisationszeiten in Abhängigkeit des Modulwirkungsgrades

**Sensitivität „Rahmung“**

Solarmodule heutiger Bauart sind zum größten Teil mit Aluminiumrahmen versehen. Es sind nur wenige Module mit Stahlrahmen oder gänzlich ohne Rahmung am Markt verfügbar. Ob die Rahmung bei zukünftigen Modulen bestehen bleibt, wird sehr unterschiedlich eingeschätzt. Für die vorangegangene Untersuchung wurde angenommen, dass in Zukunft zum Teil auch aus wirtschaftlichen Gründen (Verringerung der Herstellungskosten) auf die Verwendung eines Rahmens verzichtet wird.

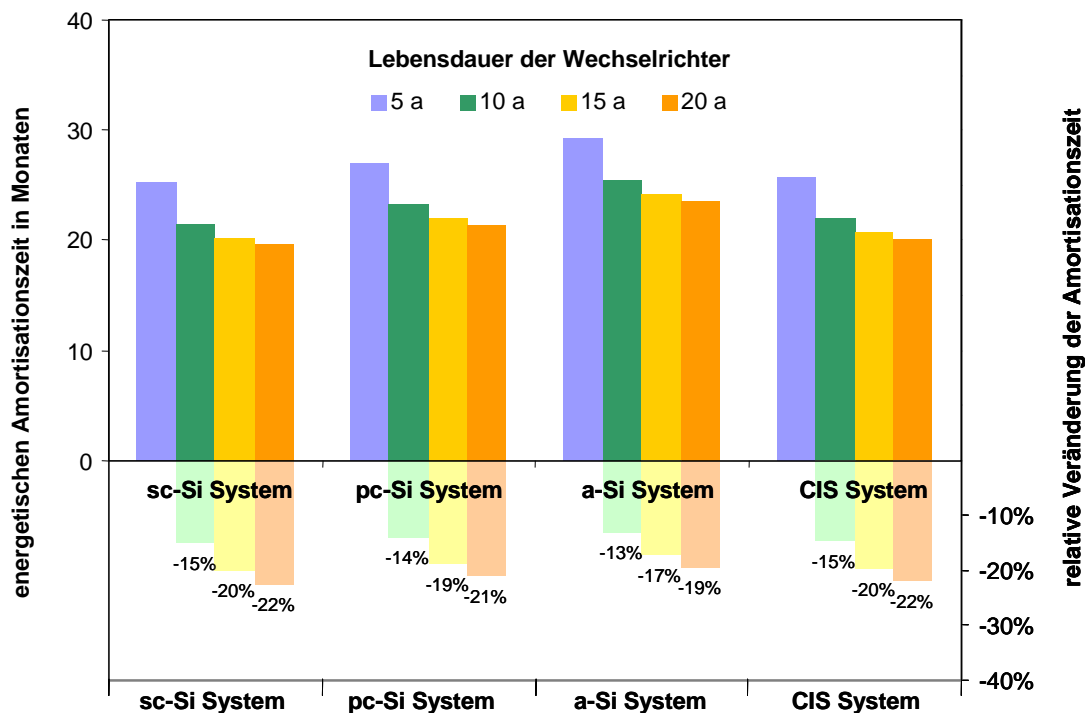


**Abbildung 3:** Spezifischer Energieaufwand und energetische Amortisationszeiten unter Berücksichtigung einer Modulrahmung

**Sensitivität „Lebensdauer des Wechselrichters“**

Die Recherche der Lebensdauer von PV-Wechselrichtern ergibt ein recht differenziertes Bild. So geben einige Hersteller an, dass Wechselrichter über die gesamte Lebensdauer der Solarmodule ohne Reparatur betrieben werden können. Bei den Garantiebedingungen (die allerdings häufig eher von juristischen und wirtschaftlichen als von technischen Überlegungen geprägt sind) werden jedoch im Regelfall nur die gesetzlichen Garantiebedingungen von 2 Jahren oder optional 5 Jahren gewährt.

Einigen Literaturquellen zufolge kann nicht davon ausgegangen werden, dass Wechselrichter die Lebensdauer von Photovoltaikmodulen erreichen, da die elektrisch Beanspruchung der Schaltung, sowie die Umgebungstemperatur einen fortwährenden Verschleiß hervorrufen.



**Abbildung 4:** Energetische Amortisationszeiten und relative Veränderungen in Abhängigkeit der Lebensdauer der Wechselrichter

#### Sensitivität „Bewertung von Hilfs- und Betriebsmitteln“

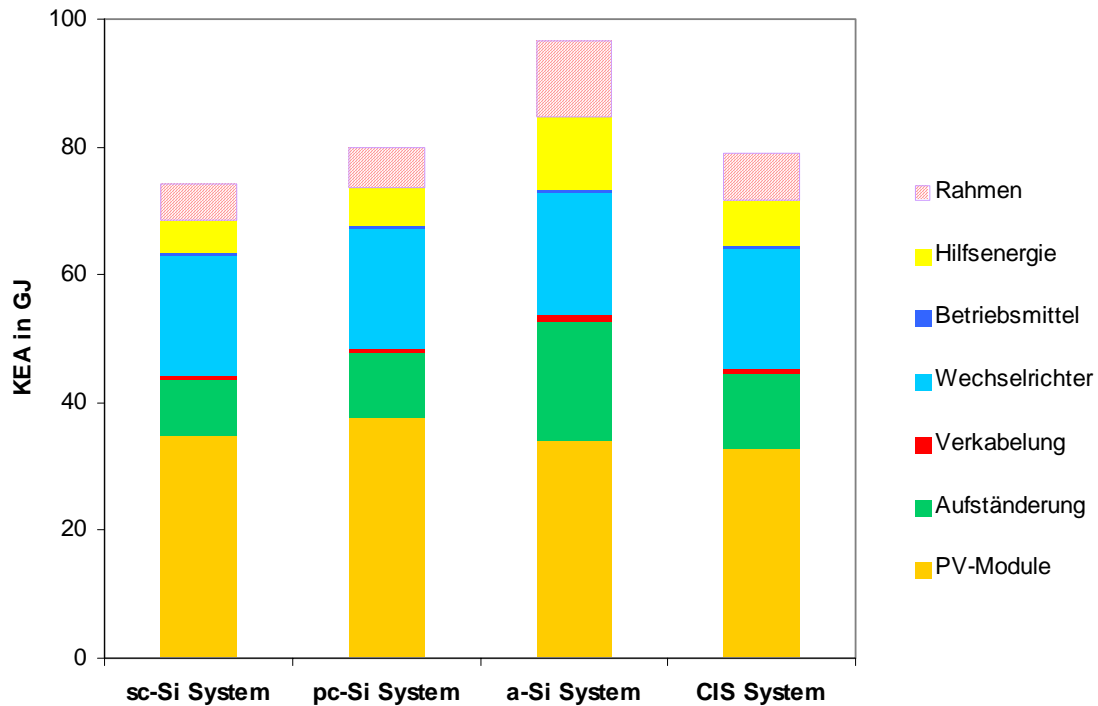
Wie sich in vielen Studien zum Thema „Ganzheitliche Bilanzierung“ gezeigt hat, können die energetischen Aufwendungen für Produktionsanlagen, Gebäude und Raumkonditionierung bei Photovoltaiksystemen einen signifikanten Anteil am gesamten KEA verursachen. Häufig sind diese Daten jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, so dass man sich zur Quantifizierung meist einer vereinfachten Abschätzung oder einer volkswirtschaftlichen Input/Output-Analysen bedient.

Vergleicht man die Ergebnisse der im Rahmen dieser Studie durchgeführten validierten Abschätzungen auf der Basis diverser Herstellerangaben, die anschließend mit Literaturangaben verglichen und mit Hersteller diskutiert wurden mit einer I/O-Analyse, wie sie in früheren Arbeiten angewandt wurde, zeigen sich erhebliche Unterschiede. So liegen die energetischen Aufwendungen für die Betriebsmittel bei der I/O-Analyse um den Faktor 25 über dem Wert, der mittels Herstellerangaben errechnet wurde. Und auch die Primärenergieaufwendungen für die Hilfsenergie werden auf mehr als das Doppelte bestimmt. So beeinflussen diese Faktoren den Gesamtenergieaufwand für das System wesentlich stärker, da sie mit 32 % einen deutlich größeren Anteil als bei der validierten Abschätzung mit 10 % haben.

#### Gesamtergebnis

Zusammenfassend und unter Berücksichtigung von Hilfs- und Betriebsmitteln sowie einer potenziellen Rahmung ergibt sich folgendes Gesamtergebnis.

Deutlich zu erkennen ist, dass selbst bei Entfall einer Rahmung die Herstellung der eigentlichen Module ca. 50% oder weniger zum KEA beiträgt.



**Abbildung 5:** Kumulierter Energieaufwand für die untersuchten 3,12 kW PV-Systeme  
 Demnach sollten Optimierungs-Bemühungen im Sinne eines nachhaltigen Einsatzes von PV-Systemen zukünftig nicht nur die eigentliche Modulherstellung betreffen, sondern auch wesentlich im Bereich der Nebenkomponten stattfinden.

Auftraggeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
Bearbeiter:	Dipl.-Phys Roger Corradini (Ansprechpartner) Dipl.-Ing. Stefan Richter  Dr.-Ing. D. Gürzenich (LEE Uni Bochum) Dipl.-Ing. R. Tryfonidou (LEE Uni Bochum)