



Kostenreduktion durch neue PV-Systemtechnik

M. Meinhardt, G. Cramer
SMA Regelsysteme GmbH
Hannoversche Straße 1-5, 34266 Niestetal
Tel.: (0561) 95 22-0, Fax: (0561) 95 22-100
e-mail: meinhardt@sma.de

1 Einleitung

Das größte Hindernis bei der Verbreitung und Markteinführung der netzgekoppelten photovoltaischen Energienutzung sind die hohen Investitionskosten für die Solarmodule und die PV-Systemtechnik. Um von aktuellen förderpolitischen Rahmenbedingungen unabhängig zu werden und die Mechanismen des Marktes für die Photovoltaik nutzbar zu machen, ist eine Kostenreduktion um mindestens 50 % innerhalb der nächsten 10 Jahre notwendig. Dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn sowohl die Investitionskosten für Solarmodule und Systemtechnik (z. B. Wechselrichter, Befestigung, Verkabelung), als auch die Kosten für Planung, Montage und Wartung weiter reduziert werden. Die positive Entwicklung der Vergangenheit und das Preisniveau in verwandten Industriesektoren deuten darauf hin, dass dieses Ziel erreichbar ist.

Ziel des vorliegenden Artikels ist es, Wege aufzuzeigen, die in der Zukunft zu einer Reduktion der Kosten der PV-Systemtechnik und insbesondere der Wechselrichterkosten führen können. Die Basis dafür stellt eine Analyse der Faktoren und Mechanismen, die zur bisherigen Kostenreduktion geführt haben, dar. Als Ausgangspunkt werden die aktuelle Kostenstruktur von PV-Anlagen und die Wechselrichterkosten dargestellt.

2 Aktueller Stand der Kosten für netzgekoppelte PV-Anlagen

2.1 Verringerung der Investitionskosten ist der Schlüssel zur Wirtschaftlichkeit

Das wichtigste Kriterium für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist das Verhältnis von Stromgestehungskosten und Einspeisevergütung. Die Mindesthöhe der Einspeisevergütung ist über das EEG für die nächsten Jahre festgelegt. Die jährlichen Kosten für den Betrieb der Anlage (z. B. Wartung, Versicherung) werden meist mit wenigen Pro-



zent der Investitionskosten abgeschätzt /Knaupp00/ und können damit gegenüber den aus den Investitionskosten resultierenden Finanzierungskosten nahezu vernachlässigt werden. Damit sind die Stromgestehungskosten bei konstantem Energieertrag näherungsweise proportional zu den Investitionskosten zur Errichtung der PV-Anlage. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf Wege und Maßnahmen zur Verringerung der Investitionskosten insbesondere der PV-Wechselrichter.

2.2 Aktuelle Kostenstruktur einer Hausdach-Anlage

Wie in Abb. 1 zu sehen ist, sind die spezifischen Anlagenkosten (DM/kWp) bekanntermaßen stark von der Anlagen-Nennleistung abhängig und können von 16 TDM/kWp bei kleinen Anlagen bis zu 10 TDM/kWp bei großen Anlagen (> 20 kWp) schwanken (Stand 1998).

Hausdach-Anlagen stellen den überwiegenden Anteil der in Deutschland installierten PV-Leistung dar. Entsprechend der Größe der Dachfläche von Privathäusern ergibt sich eine Häufung der Anlagenleistung zwischen 1 kW und 5 kW. Im Sinne einer repräsentativen Untersuchung konzentriert sich der vorliegende Beitrag auf die PV-Systemtechnik zum Einsatz in PV-Anlagen im Leistungsbereich unter 5 kW.

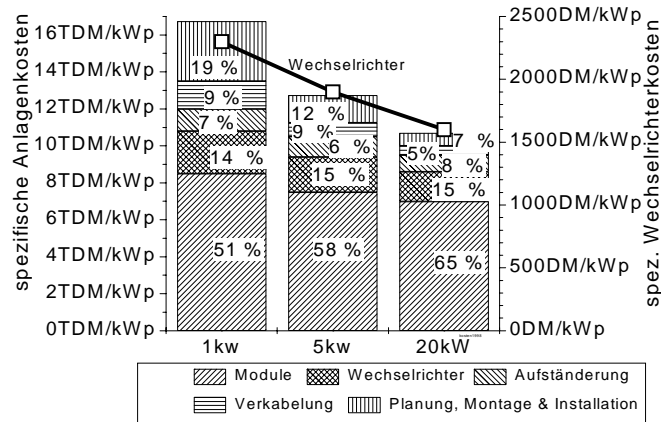


Abb. 1: Typische Kostenaufteilung netzgekoppelter PV-Anlagen von 1 kW bis 20 kW (Preise ohne Mehrwertsteuer) /Bine98/



2.3 Wechselrichterkosten

Die Aufteilung der spezifischen Anlagenkosten in Abb. 1 zeigt, dass der Anteil der Wechselrichterkosten bei netzgekoppelten Anlagen unabhängig von der Anlagenleistung annähernd konstant bei ca. 15 % der Gesamtkosten liegt. Als leistungsspezifische Wechselrichterkosten sind in /Bine98/ zwischen 2300 DM/kWp bei einer 1 kW-Anlage und 1900 kWp bei einer 5 kW-Anlage angegeben.

Die Auswertung einer Marktübersicht für PV-Wechselrichter (Endkundenpreise) /photon00/ in Abb. 2 zeigt, dass die dort angegebenen Einzelstückpreise eine große Streuung aufweisen. Beim Vergleich der leistungsspezifischen Wechselrichterkosten von Abb. 1 (DM/kWp) und Abb. 2 (DM/kW_{AC}) ist zu berücksichtigen, dass aus Gründen der Ertragsoptimierung der Wechselrichter oft nur auf 80 % der PV-Generatorleistung ausgelegt wird ($P_{WR,AC,nenn} = 0.8 \cdot P_{gen,nenn}$) und dadurch die auf die Generatorleistung (kWp) bezogenen Kosten im Mittel um ca. 20 % niedriger sind.

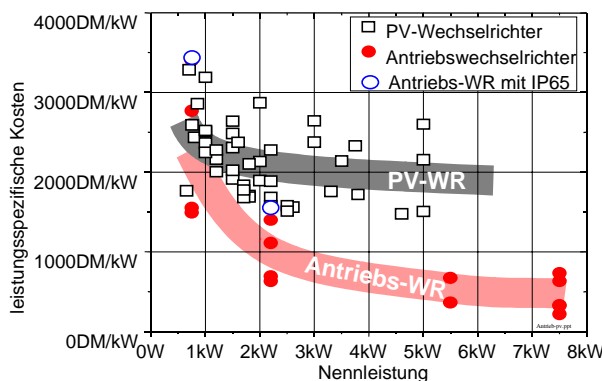


Abb. 2: Vergleich der leistungsspezifischen Kosten von Antriebswechselrichtern (inkl. Filter) (DM/kW_{mot}) und PV-Wechselrichtern (DM/kW_{AC}) (Endkunden-Einzelstückpreise inkl. Mehrwertsteuer)

Zum Vergleich von PV- und industriellen Frequenzumrichtern ist in Abb. 2 das Ergebnis einer Markterhebung für Antriebswechselrichter dargestellt. In den Preisen der Antriebswechselrichter sind die Kosten für Filtermaßnahmen zum Erfüllen der für Grenzwerte für Störaussendung nach den EMV-Normen EN 50081-1 und EN 50081-2 enthalten. Die leistungsspezifischen Kosten der Antriebswechselrichter sind teilweise um mehr als 50 % niedriger als bei PV-Wechselrichtern.

Sowohl bei PV- als auch bei Antriebswechselrichtern machen, wie auch in anderen Industriezweigen, die Herstellkosten oft nur einen geringen Anteil des Endkundenprei-



ses aus. Aufgrund der gewährten Rabatte können bei hohen Stückzahlen die Preise zudem erheblich niedriger liegen.

3 Ziele der Kostenreduktion bei PV-Wechselrichtern

3.1 Konsequenzen der degressiven Vergütung nach EEG für die Wechselrichter-kosten

Als konkreter Meilenstein auf dem Weg der zukünftigen Preisreduktion ist absehbar, dass bis Ende 2005 eine Kostenreduktion der gesamten Anlagenkosten um ein Fünftel notwendig ist, um mit der degressiven Vergütung (Reduktion um 5 % per anno) nach dem EEG Schritt zu halten. Wie in Abb. 3 dargestellt ist, wird die Vergütung in 5 Jahren nur noch 81 % der heutigen Vergütung betragen.

Daher müssen die PV-Wechselrichter innerhalb der nächsten 5 Jahre mindestens 20 % günstiger werden.

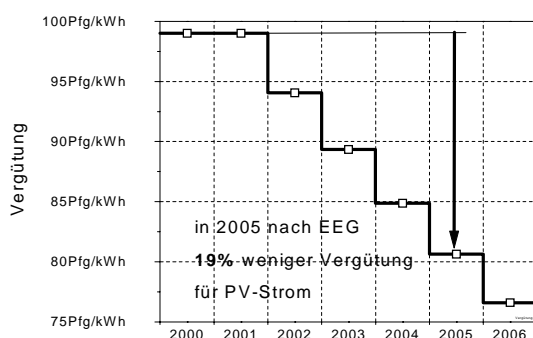


Abb. 3: Entwicklung der Vergütung für eingespeisten PV-Strom nach EEG

3.2 Die PV-Wechselrichter müssen mit der Preisentwicklung der Solarmodule Schritt halten

Alle nachfolgenden Überlegungen basieren auf der weiterhin positiven Entwicklung des weltweiten PV-Marktes. Der durch das Inkrafttreten des EEG bedingte sprunghafte Anstieg der installierten Leistung im Jahre 2000 um mehr als 100 % wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit in diesem Maße nicht fortsetzen. Jedoch kann nach /Maycock00/ in den nächsten 3 Jahren zumindest von Steigerungsraten der jährlich in Deutschland installierten PV-Leistung von 20 % bis 50 % ausgegangen werden. Der Weltmarkt für



netzgekoppelte PV-Anlagen wird sich entsprechend dieser Prognose alle 5 Jahre verdoppeln (2005 ca. 200 MWp/a, 2010 ca. 400 MWp/a).

Der Weltmarkt für PV-Module entwickelt sich im allgemeinen stetiger als die nationalen Märkte mit einer jährlichen Steigerungsrate von ca. 20 %. Laut /Maycock00/ wird dies zu einer Reduktion der Modulpreise um 46 % bis 2005 und um 60 % bis 2010 (bezogen auf 1999) führen.

Diese Aussage wird unterstützt durch die Ankündigung von Solarmodulherstellern, die Kosten für Solarmodule bis zum Jahre 2010 um 50 % zu reduzieren /Markt&Technik00/.

Um mit dieser prognostizierten Preisentwicklung der Solarmodule mithalten zu können, müssen die Kosten für PV-Wechselrichter bis zum Jahre 2010 um mindestens 50 % reduziert werden.

3.3 Zielsetzung von SMA Regelsysteme GmbH

SMA Regelsysteme GmbH als Marktführer bei PV-Wechselrichtern hat sich zum Ziel gesetzt, den leistungsspezifischen Werksabgabepreis für PV-Wechselrichter innerhalb der nächsten 5 Jahre zu halbieren. Dass dieses ehrgeizige Ziel erreicht werden kann, zeigt unter anderem der Vergleich mit den Kosten von Antriebsstromrichtern.

4 Faktoren der bisherigen Kostenreduktion in der PV-Systemtechnik

4.1 Bisher erreichte Kostenreduktion

Die Gesamtkosten für PV-Anlagen haben sich in den letzten 10 Jahren um mehr als ein Drittel von ca. 25 TDM/kWp auf 15 TDM/kWp reduziert (/Knaupp00/). Der Kostenanteil einer PV-Anlage, der auf den Wechselrichter entfällt, ist dabei annähernd gleich geblieben.

In Abb. 4 ist die Preisentwicklung grafisch dargestellt, wobei die in der Literatur angegebenen DM/W_{AC} -Preise in DM/W_p ($DM/W_p = 0.8 DM/W_{AC}$) umgerechnet wurden. Man erkennt, dass von 1991 bis heute die Kosten für 2 kW-Wechselrichter fast um die Hälfte von 3750 DM/kWp auf 2000 DM/kWp reduziert werden konnten. Für die Wechselrichter anderer Leistungsklassen wurden ähnliche Kostenreduktionen erreicht.

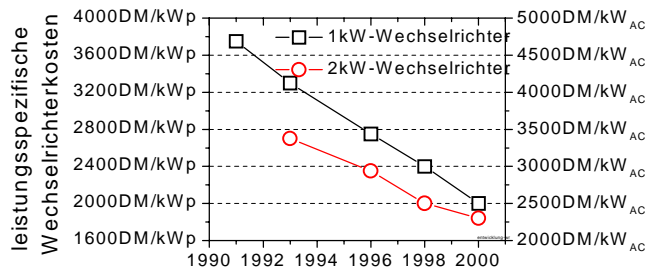


Abb. 4: Historische Entwicklung der Kosten für PV-Wechselrichter
 /Leuchner91/, /Lutz93/, /Lutz96/, /bine98/, /photon00/

4.2 Überblick über die bisherigen Faktoren zur Kostenreduktion

Um Maßnahmen für eine zukünftige Kostenreduktion zu erarbeiten, ist eine Analyse der Faktoren und Mechanismen, die die bisherige Kostenreduktion ermöglicht haben, sinnvoll. Beispiele für Kostenreduktionen, die durch Innovationen in der PV-Systemtechnik ermöglicht wurden bzw. werden, sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Zusammenfassend lassen sich folgende wichtige Faktoren angeben:

- Steigerung der Stückzahlen
- Einführung von Anlagenkonzepten optimiert für die Anforderungen der Photovoltaik
- Erhöhung der Wechselrichter-Nennleistung
- Verwendung innovativer Wechselrichter-Topologien insbesondere zur Verbesserung des Wechselrichterwirkungsgrades

**Tabelle 1: Beispiele für Innovationen in der PV-Systemtechnik als Faktoren für die Verringerung der PV-Anlagenkosten**

Einführung von	Kostenreduktion bei	Faktor/ Maßnahme
1991, Serienfertigung von PV-Wechselrichtern (z. B. PV-WR 1500)	Verringerung der Herstellkosten bzw. Wechselrichter-Materialkosten. „Höhere“ Wechselrichterstückzahlen machen größere Entwicklungsinvestitionen möglich.	Steigerung der Stückzahlen
1991, elektronische Kommunikation mit dem Anlagenbetreiber	Das Betriebsverhalten der Anlage ist verbessert durch automatisierte Anlagenüberwachung. Durch die erhöhte Verfügbarkeit werden Störungen <u>frühzeitig</u> erkannt und behoben. Der leistungsspezifische Energieertrag steigt. Der gleiche Energieertrag kann mit kleinerem Solargenerator erzielt werden. Indirekte Kostenreduktion.	kostengünstig verfügbare Technologie
1995, modulatorientiertes Anlagenkonzept (z. B. String-Wechselrichter Sunny Boy)	Durch das modulatorientierte Anlagenkonzept werden die Installationskosten verringert (Arbeitszeit und Material des Installateurs).	neues Anlagenkonzept
1995, modulatorientiertes Anlagenkonzept	Die detailliertere Anlagenüberwachung ermöglicht ein <u>selektives</u> Erkennen und Beheben von Anlagenfehlern und Störungen. Gleicher Energieertrag bei kleinerem Solargenerator. Indirekte Kostenreduktion.	neues Anlagenkonzept
1998, Trafolose (String-) Wechselrichter	Der höhere europäische Wirkungsgrad der transformatorlosen Wechselrichtertopologie führt zur indirekten Kostenreduktion: gleicher Energieertrag bei kleinerem Solargenerator.	neue WR-Topologie
1999, String-Wechselrichter größerer Nennleistung	Verringerte leistungsspezifische Wechselrichter-Materialkosten durch Reduktion des leistungsunabhängigen Kostenanteils (z. B. Betriebsführungs- und Systemsteuerungsrechner, Fehlerstromschutzschalter).	Erhöhung der WR-Nennleistung
2001, Multi-String-Konzept	Das neue Anlagenkonzept (modulatorientierte DC-Steller und gemeinsame WR-Brücke) nutzt die Gerätebaugruppen rationeller und verringert dadurch die Wechselrichtermaterialkosten.	Erhöhung der WR-Nennleistung, neues Anlagenkonzept
2001, „Quiet DC-Rail“-Schaltungskonzept	Geringerer Aufwand für EMV-Filter durch näherungsweise Eliminierung des Wechselspannungsanteils der Solargenerator-Erde-Spannung bei transformatorlosen Wechselrichtern.	neue WR-Topologie



5 Kostenreduktion durch Optimierung des Wechselrichterwirkungsgrades

In der Vergangenheit war die Maxime bei der Entwicklung von PV-Wechselrichtern: „Je höher der (europäische) Wechselrichterwirkungsgrad um so besser“, damit ein möglichst hoher energetischer und finanzieller Ertrag erzielt wird. Motiviert war dies insbesondere durch die hohen Kosten für die Solarmodule. Wenn man beispielsweise in einer 2,5 kWp-Anlage einen transformatorlosen Wechselrichter mit 3 % höherem Wirkungsgrad einsetzt (z. B. Sunny Boy 2000), kann man zum Erreichen des gleichen Energieertrages einen um mindestens 500 DM günstigeren Solargenerator (mit 3 % kleinerer Nennleistung) installieren.

Als Folge wird bei heutigen PV-Wechselrichtern in vielen Fällen ein hoher Aufwand (bis fast an die physikalischen Grenzen) getrieben, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Gleichzeitig führt dies dazu, dass die PV-Wechselrichter im Vergleich zu industriellen Frequenzumrichtern unverhältnismäßig groß und schwer werden, da aufgrund der relativ niedrigen Schaltfrequenz große magnetische Bauelemente mit großen Kern- und Kupferquerschnitten eingesetzt werden müssen. Mit zunehmendem Wirkungsgrad wird daher eine Wirkungsgraderhöhung immer kostspieliger und unwirtschaftlich. Dies wird verdeutlicht durch die in Abb. 5 dargestellte grobe Abschätzung des Zusammenhangs zwischen Wechselrichterwirkungsgrad und Wechselrichterkosten.

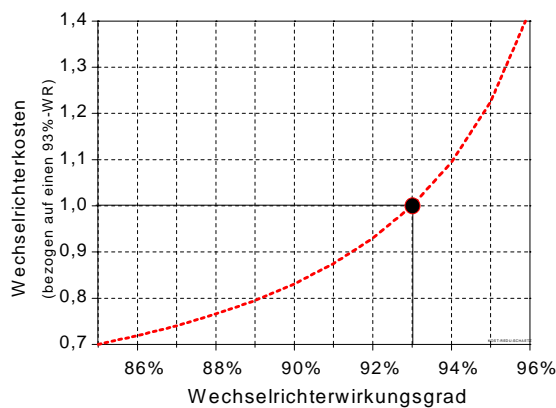


Abb. 5: Zusammenhang zwischen europäischem Wechselrichterwirkungsgrad und Wechselrichterkosten bezogen auf die Kosten eines 93 %-PV-Wechselrichters (Schätzung)

Wie auch die Gegenüberstellung von Antriebs- und PV-Wechselrichtern in Kapitel 7 zeigt, wird mit einer Verringerung des Wirkungsgrades eine Reduktion der Wechselrichterkosten erzielt. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn für den PV-



Anlagenbetreiber die eingesparten Finanzierungskosten aufgrund des günstigeren Endkundenpreises des Wechselrichters größer sind als die durch die Wirkungsgradverringern bedingte Verminderung des Stromeinspeiseerlöses.

Am Beispiel eines 5 kW-Wechselrichters mit einen Wirkungsgrad von 93 % sind in Abb. 6 die Folgen einer Wirkungsgradreduktion für die jährlichen Stromeinspeiseerlöse und die aus den Investitionskosten resultierenden jährlichen Finanzierungskosten abgeschätzt. Es zeigt sich, dass bis zu einem Wirkungsgrad von maximal 86,5 % die Einsparung durch die reduzierten Wechselrichterkosten größer sind als die Verluste durch den verminderten Energieertrag (basierend auf der für 2005 prognostizierten Vergütung von 81 Pfg/kWh). Das bedeutet, dass ausgehend von einem 93 %-Wechselrichter der Wirkungsgrad um bis zu 6,5 % reduziert werden kann, ohne daß die Stromgestehungskosten im Vergleich zum Einsatz eines teuren 93%-Wechselrichters ansteigen.

Nach Abb. 5 könnten mit dieser Wirkungsgradreduktion die Wechselrichterkosten um ca. 25 % verringert werden. Aufgrund der höheren zulässigen Verluste kann ein solcher 86,5 %-Wechselrichter mit einer höheren Schaltfrequenz betrieben werden, was sich positiv auf das Gewicht und die Baugröße auswirkt.

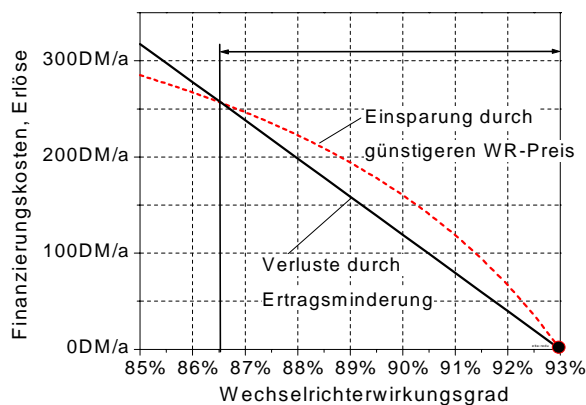


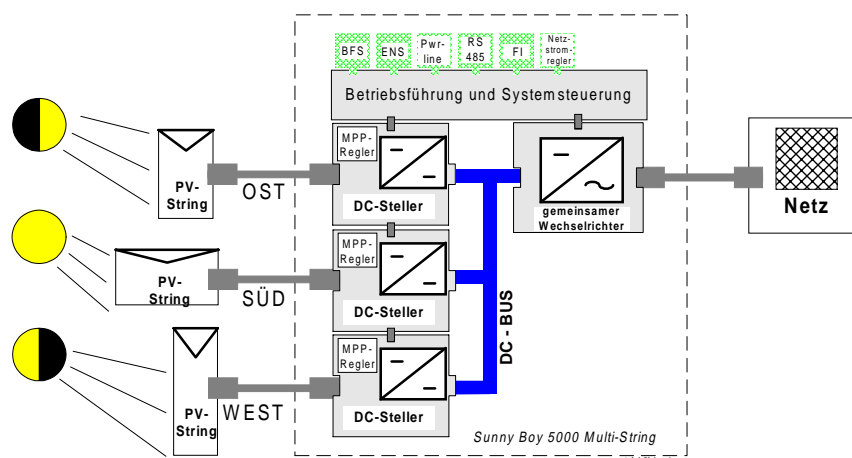
Abb. 6: Abschätzung zum Einfluss der Wirkungsgradverminderung auf die jährlichen Finanzierungskosten (=Einsparung) und den jährlichen Stromeinspeiseerlös (=Verluste) (Bezugsgröße: WR-Kosten = 1900 DM/kWp bei $\eta_{\text{Euro}} = 93\%$, $P_{\text{nenn}} = 5$ kW, Vergütung 81 Pfg/kWh, Annuität 10 %)



6 Kostenreduktion in der PV-Systemtechnik durch Einführung des Multi-String-Wechselrichters

6.1 Das Multi-String-Konzept

Als Beispiel für eine aktuelle Innovation im Bereich der PV-Systemtechnik mit der Konsequenz einer Kostenreduktion wird das in /Greizer99/ bereits angekündigte Konzept des neuentwickelten Multi-String-Wechselrichters in Abb. 7 kurz vorgestellt.



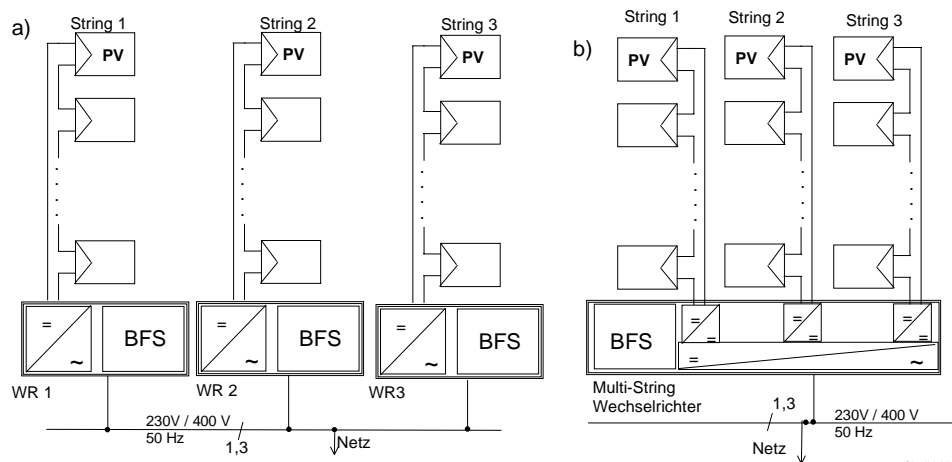
**Abb. 7: Blocksaltbild eines Multi-String-Wechselrichters
(am Beispiel des neuen Sunny Boy 5000 Multi-String)**

Beim Multi-String-Wechselrichter werden mehrere Strings über modular erweiterbare und MPP-geregelte Gleichspannungswandler (DC-Steller) über einen DC-Bus an eine gemeinsame einphasige Wechselrichterbrücke angeschlossen.

Jeder DC-Steller und damit auch jeder String erhält seinen eigenen MPP-Regler. Dadurch wird unabhängig von den örtlichen Rahmenbedingungen ein optimaler Energieertrag der PV-Anlage erreicht.

Durch den Einsatz der stringorientierten MPP-geregelten DC-Steller wird ein optimaler Energieertrag der PV-Anlage, auch beim Anschluss von Strings mit stark differierenden Betriebsdaten, erreicht. Abb. 7 veranschaulicht das breite Spektrum, das durch den Multi-String abgedeckt wird: Neben Strings mit Solarmodulen unterschiedlicher Nenn-daten, Größe oder auch Solarzellentypen können auch Strings mit differierender Ausrichtung (Ost, Süd, West) sowie Strings mit unterschiedlich stark variierender Abschattung an einen Wechselrichter angeschlossen werden.

Die Einführung der String-Wechselrichter hat zu einer starken Verringerung der Systemkosten geführt. String-Wechselrichter haben sich daher auf dem PV-Markt insbesondere im kleinen und mittleren Leistungsbereich durchgesetzt, sodass in PV-Anlagen auch oftmals mehrere String-Wechselrichter eingesetzt werden.



Am Beispiel einer PV-Anlage mit 3 String-Wechselrichtern wird aufgezeigt, wie eine weitere Reduktion der spezifischen Kosten der String-Wechselrichter möglich ist. Wie anhand Abb. 8 zu erkennen ist, werden zur Senkung der Materialkosten beim Multi-String-Wechselrichter im Vergleich zu einer Anlage mit mehreren String-Wechselrichtern verschiedene Baugruppen mehrfach verwendet (wie z. B. Gehäuse, Wechselrichterbrücke, BFS inkl. Netzüberwachung, FI-Schutz oder Schaltorgane).

162



7 Vergleich von PV-Wechselrichtern und Antriebswechselrichtern

Die nachfolgende Gegenüberstellung der Eigenschaften und Funktionalitäten von Antriebs- und PV-Wechselrichtern dient gemeinsam mit dem in Kapitel 2.3 vorgestellten Preisvergleich dazu, Ziele und Grenzen für die mittelfristige Entwicklung der PV-Wechselrichter zu definieren. Die Wahl der industriellen Frequenzumrichter als Vergleichsbasis ist insbesondere aus folgenden Gründen interessant:

- Ähnliche Anforderungen an die Stromrichter bei PV- und Antriebsanwendungen
- Einsatz ähnlicher Technologien (z. B. IGBT)
- Antriebswechselrichter werden schon lange in hohen Stückzahlen mit entsprechenden Produktionstechniken gefertigt
- Der Antriebssektor ist eine traditionelle Wachstumsbranche mit zweistelligen Zuwachsraten, in dem Fördermittel kaum einen Einfluss auf die Markt- und Preisentwicklung haben

Tabelle 2 stellt die Eigenschaften von Antriebs- und PV-Wechselrichtern gegenüber. Man erkennt einerseits Ähnlichkeiten aber auch starke Unterschiede. Aufgrund der sehr großen Vielfalt, sowohl bei PV- als auch bei Antriebswechselrichtern, stellt die nachfolgende Zusammenstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern hat das Ziel, die groben Unterschiede aufzuzeigen.

Der Preisvergleich zwischen PV- und Antriebswechselrichtern in Abb. 2 zeigt, dass PV-Wechselrichter im Mittel mindestens doppelt so teuer sind wie Antriebswechselrichter. Basierend auf dem Vergleich der Eigenschaften in Tabelle 2 können dafür als Gründe unter anderem die Unterschiede in den folgenden Bereichen genannt werden:

- Funktionalität (z. B. geringerer Wirkungsgrad oder weniger Aufwand für Schutzrichtungen beim Antriebswechselrichter, Aufteilung in Grundgerät und optionalen Zusatzmodulen)
- Herstellungsverfahren bei der "Massenproduktion" von Antriebswechselrichtern
- Vertriebsstruktur (z. B. Direktverkauf von Antriebswechselrichtern)

Da diese Eigenschaften teilweise auch auf die PV-Wechselrichter übertragen werden können, besteht Grund zur Annahme, dass eine Verringerung der PV-Wechselrichterkosten um mindestens 50 % erreichbar ist. Eine Kostenreduktion auf weniger als 500 DM/W_{AC} (für ein 2 kW-Gerät) scheint jedoch mit den heute verfügbaren Technologien nicht möglich zu sein.

**Tabelle 2: Gegenüberstellung von Antriebs- und Photovoltaik-Wechselrichter**

	Antriebswechselrichter	PV-Wechselrichter
Endkundenpreis (Einzelstückpreis) bei 2 kW	~1000 DM/kW Motorleistung	~ 2300 DM/kW _{AC}
Topologie	aufwendig 3phasige- Wechselrichterbrücke mit Eingangsgleichrichter ohne galvanische Trennung, Bremssteller optional	einfach meist 1-phasige Wechsel- richterbrücke mit und ohne galvanischer Trennung
Filteraufwand	gering - kleiner Zwischenkreis-Elko, optionale Zusatzfilter zur Erfüllung der EMV-Normen notwendig	hoch - großer Zwischenkreis-Elko, PV-WR erfüllen die EMV- Normen serienmäßig
Eingangsspannung	Wechselspannung 1- oder 3- phasig 110 V bzw. 400 V Eingangsspannungsbereich eines WR 1 : 1.2	Gleichspannung von 24 V bis 800 V Eingangsspannungsbereich eines WR bis 1 : 4
Schutzeinrichtung	außer Gerätesicherung keine Schutzeinrichtungen vorhan- den	ENS, Über- und Unterspan- nungs-Überwachung, inte- grierter FI, Netzrelais
Schutzart	meist IP 21 IP 65 optional	meist IP 21, IP 65 serienmäßig bei Sunny Boys
Gewicht	3 kg / kW (bei 2.2 kW)	6 bis 13 kg / kW (bei 2 kW)
Kommunikation	RS485, (antriebsspezifische Systeme: z. B. Interbus, Profi- Bus)	Seriell, RS485, Powerline- Kommunikation
Wirkungsgrad	max. 75 % bis 85 %	max. 92 % bis 96 %
Signalverarbeitung	Digitale Lage- und Drehzahl- regelung	Digitale MPP-Regelung, Netzstromregelung
Stand-by-Verluste	50 W	< 5 W
Garantie	6 bis 12 Monate	1 bis 10 Jahre



	Antriebswechselrichter	PV-Wechselrichter
Anschluss	via Schraubklemmen	via Schraubklemmen, zunehmend oft aber auch steckbar
Kühlkörper	Druckguß, oft ins Gehäuse integriert	Standard Aluprofile
Leistungshalbleiter	Integrierte Leistungshalbleiter Module (IGBT)	diskrete Halbleiter (IGBT und Mosfet)
Schaltfrequenzen	max. 12 kHz	bis zu 32 kHz /Welter00/

8 Faktoren und Maßnahmen für eine zukünftige Kostenreduktion in der PV-Systemtechnik

Wie die Beispiele in Kapitel 4 und 6 zeigen, wurde bis heute die Kostenreduktion der PV-Wechselrichter fast ausschließlich durch die Entwicklung neuer Wechselrichtertopologien (bzw. neuer Anlagenkonzepte) und die Erhöhung der Nennleistung der Wechselrichtereinheiten erreicht. Dies wird sich in der Zukunft nicht fortsetzen lassen. Mit der Einführung des Multi-String-Wechselrichters scheinen die Möglichkeiten dieser beiden Einflussfaktoren im Wesentlichen ausgeschöpft.

Nur durch das Zusammenwirken vieler Einzelmaßnahmen ist bei anhaltend positiver PV-Marktentwicklung mit entsprechenden Stückzahlen die angestrebte Kostenreduktion innerhalb der nächsten 5 Jahre möglich. Wie ein Vergleich der Funktionalitäten von PV- und Antriebswechselrichtern zeigt, besteht aber für die PV-Wechselrichter eine Vielzahl von anderen Ansatzpunkten zur Kostenreduktion, die in der Vergangenheit nicht oder nur unzureichend genutzt wurden. Exemplarisch sind folgende Maßnahmen genannt.

- **Entwicklungsschwerpunkt „Kostenreduktion“**
Durch höhere Stückzahlen und dem damit verbundenen höheren Umsatz erhalten die Wechselrichterhersteller die Möglichkeit, zusätzlichen Entwicklungsaufwand in die Anpassung der Geräte an die Anforderungen der Serienproduktion zu investieren („Design-for-Manufacturability“). Gleichzeitig werden Arbeiten an den bisherigen Entwicklungszielen Zuverlässigkeit, Wirkungsgrad, EMV und Lebensdauer vertieft.
- **Einsatz optimierter Produktionsprozesse**
Eine Optimierung der derzeit verwendeten Produktionsprozesse ist notwendig, um die Chancen bestmöglich zu nutzen, die sich durch die in Zukunft zu erwartende Erhöhung der Stückzahlen ergeben. Anregungen können durch einen Vergleich



zu Industriezweigen mit ähnlichen technischen Randbedingungen (wie z. B. Antriebswechselrichter oder USV-Anlagen) gefunden werden.

- Verwendung von Baugruppen und Komponenten mit höherem funktionalem Integrationsgrad
Für die Antriebstechnik wurde von der Leistungshalbleiterindustrie eine Vielzahl von Bauelementen mit einem hohem Grad an funktionaler Integration entwickelt, die speziell an die Anforderung der Antriebsstromrichter angepasst wurden. Als Beispiel seien die in Abb. 9 dargestellten Leistungshalbleitermodule (IPM) zu nennen. Der Einsatz dieser systemintegrierten Baugruppen führt zu einem reduzierten Aufwand bei der Entwicklung, Herstellung und Prüfung der PV-Wechselrichter. Durch die Verwendung dieser integrierten Bauelemente erhöht sich zudem die Betriebszuverlässigkeit der Wechselrichter.

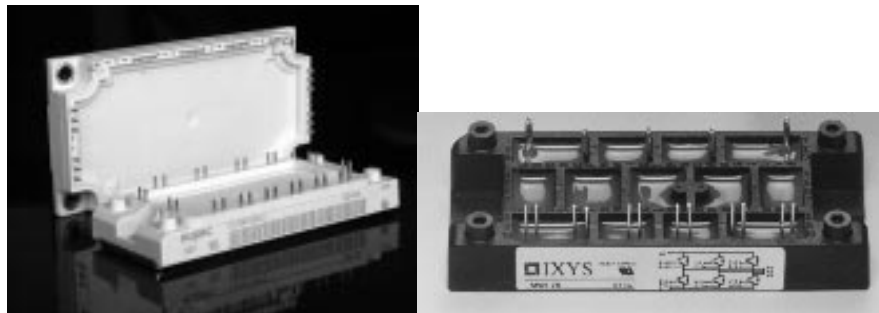


Abb. 9: Zwei Beispiele für IPM (Quelle: www.eupec.com, www.ixys.net)

- Verbesserung der Betriebszuverlässigkeit
Mit dem zunehmenden Trend zu einer Erhöhung der serienmäßigen Garantiezeiten für PV-Wechselrichter kommt der Minimierung der Gewährleistungskosten für Wechselrichterausfälle eine besondere Bedeutung zu.
- Anpassung der Funktionalität und Eigenschaften der Wechselrichter an die Kernbedürfnisse der Kunden
Hierzu ist es notwendig, dass Wechselrichterhersteller und Kunden gemeinsam die Anforderungen an PV-Wechselrichter zusammen mit der entsprechenden Rangfolge definieren. Ziel muss es sein, dem Kunden in Zukunft ein Grundgerät und optionale Zusatzmodule in Form eines Baukastensystems anbieten zu können. Diese Zusatzmodule müssen nachträglich vom Installateur nachrüstbar sein. Somit wird erreicht, dass Kunden nur für die Funktionalität bezahlen, die sie benötigen.



9 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag stellt sowohl Ziele und Grenzen der notwendigen Reduktion der Kosten der PV-Systemtechnik als auch Wege zum Erreichen dieser Ziele vor. Basierend auf der Analyse der bisherigen Preisentwicklung werden die Maßnahmen identifiziert, die in den letzten 10 Jahren zur Kostenreduktion um mehr als ein Drittel geführt haben.

Der Multi-String-Wechselrichter, der zur Zeit von SMA in Kooperation mit dem ISET entwickelt wird, wird als Beispiel für heutige Innovationen in der PV-Systemtechnik mit dem Ziel der Kostenreduktion bei gleichzeitig sehr gutem Betriebsverhalten und gesteigerter Funktionalität vorgestellt. Eine Reduktion der leistungsspezifischen Kosten um 10 % - 15 % im Vergleich zu String-Wechselrichtern kleinerer Leistung ist erklärtes Ziel.

Eine Gegenüberstellung von Antriebs- und PV-Wechselrichtern gibt viele Impulse und Ideen für weitere Maßnahmen zur Verringerung der PV-Systemtechnikkosten. Es zeigt sich, dass nur durch das Zusammenwirken vieler Faktoren und Maßnahmen die angestrebte Kostenreduktion auf 50 % bis zum Jahre 2005 möglich sein wird. Im Zentrum stehen dabei die auf die gestiegenen Stückzahlen optimierten Produktionstechniken und die Anpassung der Wechselrichterfeatures an die vom Kunden geforderte Kernfunktionalität.

10 Literatur

- | | |
|---------------|--|
| /Bine98/ | Kleine Netzgekoppelte PV-Anlagen im Breitentest, Profi Info 1/98, BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe 1998, 8 Seiten |
| /Greizer99 | Greizer, F.: Entwicklung der Stromrichtertechnik zur Netzanbindung von PV-Anlagen, 4. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Kassel, Oktober 1999, S. 78 - 90 |
| /Knaupp00/ | Knaupp, W. und Staiß, F.: Photovoltaik – Ein Leitfaden für Anwender, TÜV-Verlag, Köln 2000 |
| /Leuchtner91/ | Leuchtner, J. und Schmalschläger, T.: Solare Stromerzeugung – PV-Potential in München, Sonnenenergie 3/91, S.6 – 8 |
| /Lutz93/ | Lutz, H. - P.: Marktanalyse PV-Anlagen – Netzgekoppelte Anlagen in der Aufdachmontage, Zeitschrift Sonnenenergie 5/93, S. 6 - 7 |
| /Lutz96/ | Lutz, H. - P.: Marktanalyse PV-Anlagen – Netzgekoppelte Anlagen in der Aufdachmontage, Zeitschrift Sonnenenergie 4/96, S. 35 - 37 |



- /Markt&Technik00/ Markt&Technik-Forum: Zukunft der Fotovoltaik, Zeitschrift Markt&Technik April 2000, S. 50 - 56
- /Maycock00/ Maycock, P.: The world PV market 2000 – shifting from subsidy to „fully economic“?, Zeitschrift Renewable Energy World, Vol. 3, No. 4, Juli –August 2000, S. 59 – 74
- /Meinhardt00/ Meinhardt, M., et. al: Multi-String-Converter with Reduced Specific Costs and Enhanced Functionality, Tagungsband der Eurosun2000 Konferenz, Kopenhagen, Juni 2000 (auf CD)
- /Photon00/ Marktübersicht PV-Wechselrichter, Zeitschrift Photon, Special Netzgekoppelte PV-Wechselrichter, September 2000, S. 50 - 54
- /Welter00/ Mehr, besser, billiger – Die aktuelle Marktübersicht: Wechselrichter zur Netzeinspeisung, Zeitschrift Photon, 3/2000, S. 60 - 69

11 Anerkennung

Die in diesem Beitrag veröffentlichten Informationen zum Multi-String-Wechselrichter wurden im Rahmen eines Vorhabens erarbeitet, das vom Bundesministerium für Bildung Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0329864A gefördert wird.