

# **Entwicklung der Stromrichtertechnik zur Netzanbindung von PV-Anlagen**

## **1 Einleitung**

In den 80-er Jahren wurden mit Hilfe von Forschungs- und Demonstrationsanlagen die physikalischen und technischen Grundlagen des Betriebes von Photovoltaikanlagen erprobt. Für die Konzeption alltagstauglicher Anlagen mussten zusätzlich noch einige technische und soziale Randbedingungen erarbeitet werden. Im Gegensatz zum stets kontrollierten Betrieb von Forschungsanlagen mit geschultem Bedienungspersonal muss der Alltagsbetrieb vollautomatisch erfolgen und von elektrotechnischen Laien qualitativ beurteilbar sein.

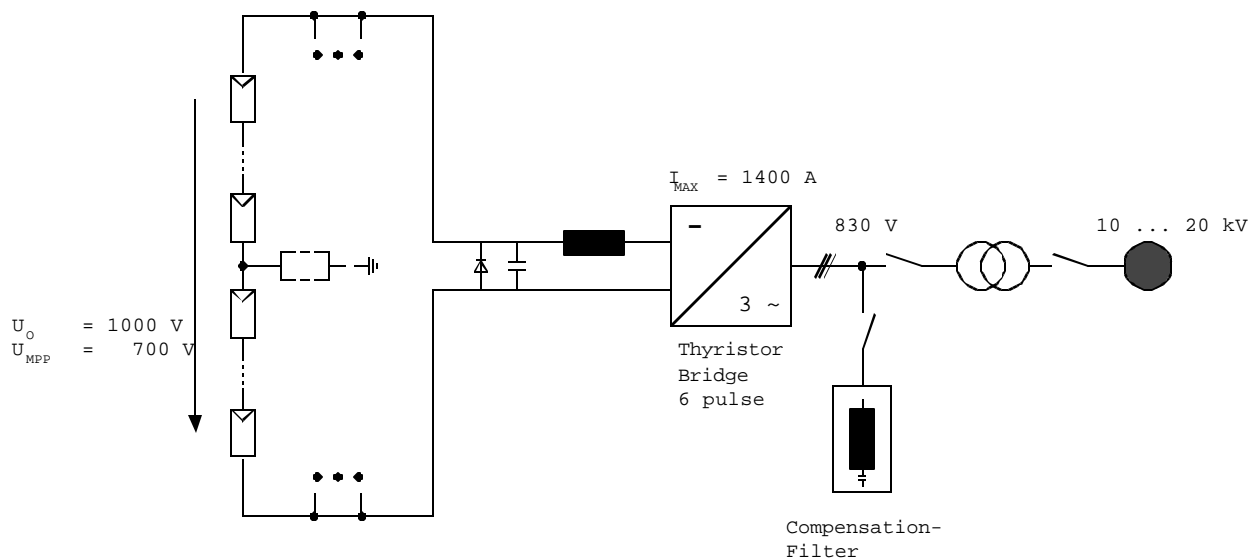
Der nachfolgende Artikel zeigt die einzelnen Innovationsschritte vom Beginn der Netzanbindung von Photovoltaikanlagen bis zum aktuellen Stand der Technik auf. Ausgehend von diesen Erfahrungen wird zurzeit an der Entwicklung der zukünftigen Wechselrichtertopologie gearbeitet. Das Ziel ist, die mit der modularen Systemtechnik eingeleitete drastische Reduktion der Anlagenkosten konsequent fortzuführen.

## **2 Innovationen der WR-Technologie im letzten Jahrzehnt**

### **2.1 Netzgeführte Wechselrichter**

Bei den Forschungs- und Demonstrationsanlagen in den 80-er Jahren wurden zur Netzkopplung der Photovoltaik-Generatoren (Leistungsbereich meist oberhalb 20 kWp) zunächst netzgeführte PV-Stromrichter eingesetzt. Die Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer PV-Anlage mit einem Thyristor-Stromrichter zur Einspeisung

über einen Transformator in das Mittelspannungsnetz. Die Sammlung der elektrischen Energie erfolgt hier auf der DC-Seite mit einer Vielzahl von parallel geschalteten Strings, die detailliert nur mit erheblichen Aufwand überwacht werden können. Diese aus der Antriebstechnik bewährten und sehr robusten netzgeführten Thyristor-Wechselrichter erforderten allerdings einen erheblichen Aufwand an Filtertechnik zur Reduzierung der Netzurückwirkungen und des Blindleistungsbedarfs, so dass die heutigen Netzanschlussbedingungen bezüglich des Oberschwingungsgehaltes und der Blindleistung mit dieser Topologie kaum erfüllbar sind.



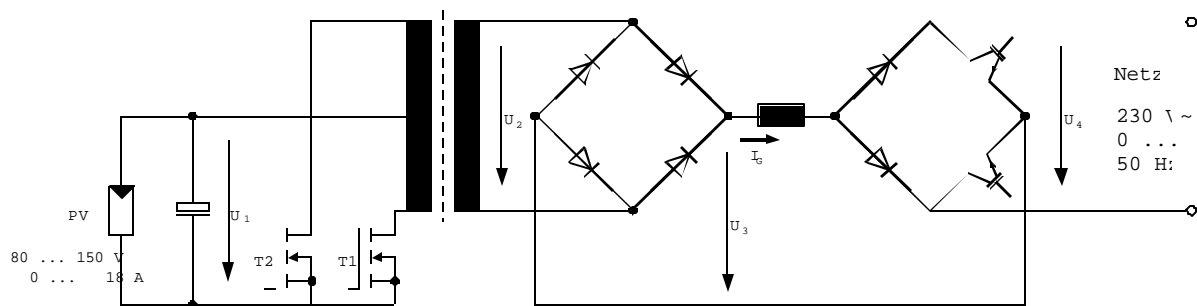
**Abb. 1:** Prinzipschaltbild eines netzgekoppelten Thyristor-Stromrichters einer PV-Anlage

## 2.2 Selbstgeführte Wechselrichter (Transistor-Stromrichter)

Die Übergangsphase vom Forschungsbetrieb hin zum Alltagsbetrieb wurde am Anfang der 90-er Jahre durch Förderprogramme auf Landes- und Bundesebene (insbesondere das 1000-Dächer-Programm) unterstützt. Hier wurden kleinere komplette

Photovoltaikanlagen für den kostengünstigen Netzparallelbetrieb im für private Haushalte interessanten Leistungsbereich von 1 bis 5 kWp erprobt und qualifiziert.

Erstmalig wurden kompakte PV-Wechselrichter zur Netzeinspeisung im Leistungsbereich von 1,5 bis 5 kW entwickelt. Zur Verringerung der Baugröße und der Wandlerverluste wurden diese als so genannte selbstgeführte, hochfrequent getaktete Zentralwechselrichter ausgeführt. Die eingesetzten neueren Transistortechnologien (MOSFET, IGBT) vermieden den insbesondere bei den Thyristor-Wechselrichtern notwendigen hohen Filteraufwand bei der Netzeinspeisung. In den Anfängen der netzgekoppelten Zentralwechselrichter stand neben einer hohen Effizienz insbesondere die Erhöhung der Betriebszuverlässigkeit im Mittelpunkt der Entwicklungstätigkeit.



**Abb. 2:** Prinzipschaltbild des Zentralwechselrichters PV-WR 1800 von SMA

Diese Generation von PV-Anlagen basierte noch auf der Parallelschaltung von Strings zur Leistungserhöhung. Die Sammlung auf der Gleichstromseite mit dem separaten und kostenaufwändigen DC-Verteiler hat allerdings im praktischen Einsatz eine Reihe gravierender Nachteile aufgezeigt.

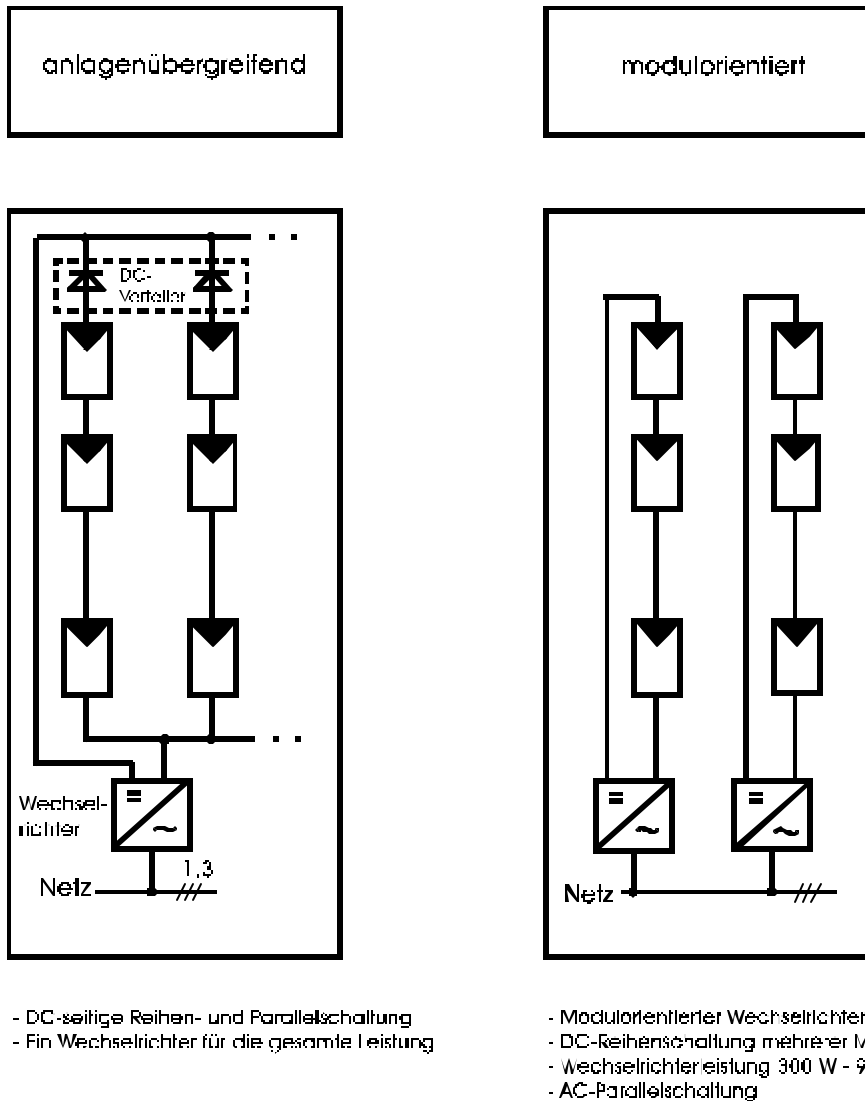
- Hohe Kosten für aufwändige erd- und kurzschlussichere Leitungsverlegung (lichtbogensicher, Plus und Minus getrennt, abgeschirmt),
- Wirkungsgradminderung durch gegenseitige Modulbeeinflussung und Teilabschattungen,

- hoher Aufwand bei der Schalt- und Schutztechnik (mit Unterbrechern, Dioden in jedem String, zusätzliche Klemmen usw.).

Dennoch konnten mit dieser Technologie erstmalig auch kleinere Anwendungsbereiche erschlossen und ein ausgezeichneter Standard der Serienproduktion photovoltaischer Systemkomponenten realisiert werden. Je nach Einsatzart, Standortverhältnissen und kalkulatorischem Ansatz lagen die damit erreichten Systemkosten (Wechselrichter, Verkabelung, Verteilung, Generator usw.) photovoltaischer Stromerzeugung bei ca. 1 - 2,50 DM/kWh.

## **2.3 Modulare PV-Systemtechnik führt zum String-WR mit galvanischer Trennung**

Wie die Preisentwicklung kompletter PV-Anlagen zeigte, betrug der Kostenanteil, der auf Systemkomponenten und Projektierung einer netzgekoppelten Solaranlage entfiel, teilweise bis zu 50%. Eine allein auf die Senkung der Produktionskosten der PV-Module ausgerichtete Strategie reichte nicht mehr aus. Vielmehr mussten zur Anlagenverbilligung gerade auf der Seite der Systemtechnik intelligentere Wege beschritten werden. Dies war die Motivation zur Entwicklung eines modularen Konzepts der Systemtechnik, die Anfang der 90er-Jahre vom Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), IEE (U-Gh Kassel) und SMA begonnen wurde. Das Resultat dieses durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Projektes war der so genannte String-Wechselrichter, der 1995 von SMA unter dem Namen „Sunny Boy 700“ in den PV-Markt eingeführt wurde. Die wesentlichen Vorteile eines string-orientierten Wechselrichterkonzeptes wurden rasch erkannt und dementsprechend von fast allen PV-Wechselrichter-Herstellern übernommen.



**Abb. 3:** Die Vorteile der Stringtechnologie gegenüber zentralen PV-Systemen

Der String-Wechselrichter ist nur noch für eine Reihenschaltung von PV-Modulen ausgelegt. Die bisher notwendigen, teuren Gleichstromverteilungen und die Gleichstromhauptleitungen wurden damit überflüssig. Der modulorientierte Wechselrichter ermöglicht eine Leistungsmaximierung durch die Maximum Power Point Regelung, kurz MPP-Tracking, jeweils für eine kleine Modulgruppe (1 String). Die hier verwendete modulare Systemtechnik, d.h. die in der Energieaufbereitungskette möglichst frühzeitige Umsetzung der PV-Gleichspannung in Wechselspannung brachte eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem zentralen WR-Konzept:

- ❑ Vereinfachung (bei Entwurf und Installation) und deutliche Kostenreduzierung von PV-Anlagen,
- ❑ Wegfall der Gleichstrom-Sammelleitungen und Reduzierung auf die Reihenschaltung mit geringem Strom,
- ❑ Kopplung der Modulgruppe auf der Wechselspannungsebene mit bewährter Installationstechnik,
- ❑ einfache nachträgliche Erweiterbarkeit von PV-Anlagen,
- ❑ Wegfall der Parallelschaltung von Strings, daher keine Verluste durch Fehlanpassungen (Mismatching),
- ❑ individuelles MPP-Tracking für jede Modulgruppe,
- ❑ einfachste Diagnose über die Funktion jeder Modulgruppe.

Der Erste auf dem Markt erhältliche String-WR Sunny Boy 700 wurde mit galvanischer Trennung zwischen der Gleichstrom- und der Wechselstromebene ausgeführt. Der notwendige Leistungsübertrager dient dabei nicht nur zur galvanischen Trennung, sondern auch zur Spannungsanpassung an das Energieversorgungsnetz. Mit dem Transformator ist aber auch ein Wirkungsgradverlust von 2 bis 3 % verbunden. Die leistungsunabhängigen magnetischen Verluste führen zu einem geringeren Teillastwirkungsgrad.

## **2.4 String-WR ohne galvanische Trennung**

Eine Wirkungsgradverbesserung bei den Wechselrichtern bzw. des Gesamtsystems ist von großer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage. Bei der Annahme einer Wirkungsgradsteigerung der Systemtechnik um etwa 1 % errechnet sich eine Investitionskostenersparnis der Gesamtanlage von ebenfalls ca. 1 % bei gleichem Ertrag. Dies bedeutet eine Wirkungsgradverbesserung des Wechselrichters um 3 % und spart ca. 400,- DM pro 1 kWp-Anlage.

Die Wirkungsgradoptimierung der String-WR mit galvanischer Trennung im Bereich von 1 kW Nennleistung stößt bei ca. 93 % maximalem und 91,3 % europäisch gewichtetem Wirkungsgrad an die wirtschaftlichen Grenzen. Eine weitere Wirkungs-

gradsteigerung gelingt dann nur noch unter Einsatz unverhältnismäßig hoher Mehrkosten.

Nicht galvanisch getrennte Wechselrichterkonzepte versprachen durch den Wegfall des Transformators eine Wirkungsgradsteigerung von bis zu 3 % und eine spezifische Preisreduktion gegenüber bisherigen Wechselrichtern mit Potentialtrennung. Die galvanische Verbindung zwischen dem PV-Generator und dem öffentlichen Netz warf aber bei der Entwicklung neue sicherheitstechnische Aspekte auf. Da der Schutz gegen indirektes Berühren durch eine Isolationsüberwachung des Solargenerators beim transformatorlosen Konzept nicht ausreichend ist, musste das vorhandene Schutzkonzept um eine allstromsensitive Fehlerstromerkennung wie inzwischen nach DIN VDE 0126 erweitert werden. Der Wechselrichter überwacht dabei selbstständig den Differenzstrom und trennt die Verbindung zum Netz innerhalb von 200 ms nach Erkennen eines Ableitstromsprunges beliebiger Form von mehr als 30 mA.

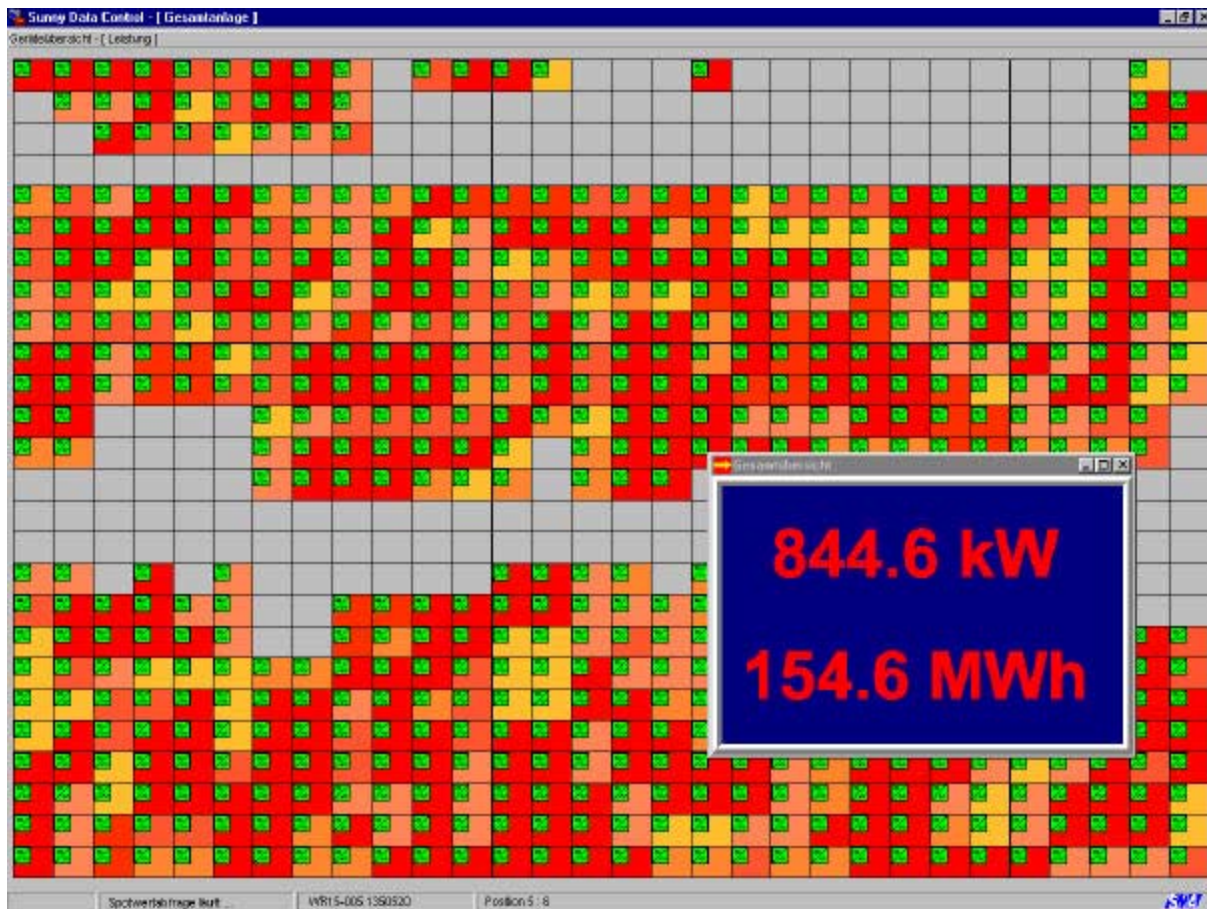


**Abb. 4:** Ende 1996, der erste transformatorlose String-WR (Sunny Boy 1500) mit integriertem allstromsensitiven Fehlerstromschutzschalter

Dieses wohl zurzeit modernste Wechselrichter-Konzept (Sunny Boy 1500, Testsieger der Stiftung Warentest, Heft 09/99) hat nicht nur neue Maßstäbe hinsichtlich höchster sicherheitstechnischer Ansprüche in der Photovoltaik gesetzt, sondern auch die Stringtechnologie für PV-Anlagen im Megawatt-Bereich qualifiziert. So zeigt zum Beispiel die Abb. 5 das Übersichtsbild der 1 MW Photovoltaikanlage in Herne mit allen 569 String-Wechselrichtern. Die Verteilung der Wechselrichtersymbole auf dem Monitor spiegelt die Modul- und Stringanordnung auf dem Dach der Fortbildungsakademie Mont Cenis in Herne wider und verdeutlicht einen der Vorteile der modularen Systemtechnik. Die Anlagenüberwachung erlaubt auf einfache Weise die Auflösung der Betriebsdaten bis auf den einzelnen String. Über eine Farbcodierung kann der Anlagenbetreiber den Betrieb jedes einzelnen Strings mit dem dazugehörigen Wechselrichter auf einen Blick beurteilen und Fehlfunktionen erkennen. Zentrale Wechselrichter



ter-Konzepte dagegen können dies nur mit einem erheblichen Aufwand an Messtechnik und den damit verbundenen enormen Mehrkosten erreichen.



**Abb. 5:** Übersicht aller 569 „Sunny Boy 1500“ der 1MW-Anlage in Herne

## 2.5 Modulstromrichter

Nach den Entwicklungsanstrengungen einiger Firmen Mitte der 90-er Jahre die PV-Stromrichter immer stärker dem Modul anzupassen, sind heute verschiedene Modulwechselrichter mit einer Leistung von 50 W bis 400 W auf dem Markt erhältlich. Die bisherigen Erfahrungen der Planer, Installateure und Betreiber zeigen jedoch, dass die Modulwechselrichter bei den üblichen PV-Anlagen zu keiner Reduktion der Sys-

temkosten geführt haben. Dies ist die Konsequenz einiger systembedingter Nachteile:

- Wirkungsgrad mit < 92 % geringer als beispielsweise String-Wechselrichter,
- keine integrierte Netzüberwachung nach VDE 0126 (ENS), d.h. zusätzliche Netzüberwachungseinheit in den meisten europäischen Ländern notwendig,
- aufwändige AC-Verkabelung bei größeren Anlagen, da jedes einzelne Modul an 230 V angeschlossen wird
- und sehr hohe Installationskosten im Reparaturfall (Demontage des gesamten Moduls notwendig).

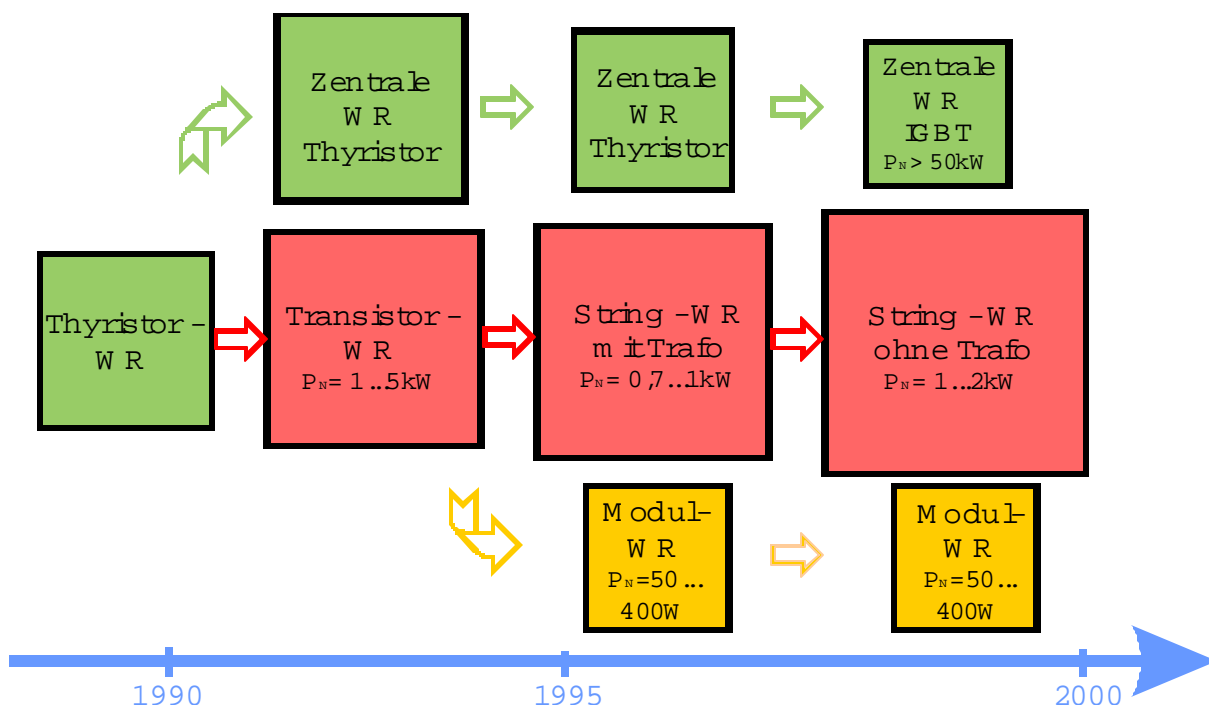
## **2.6 Erfahrungen und neue Anforderungen an aktuelle Technologiestandards der PV-Technik**

Basierend auf den zum Teil langjährigen Erfahrungen mit den beschriebenen Wechselrichter-Konzepten orientieren sich heute zunehmend die Erwartungen der Anlagenplaner, Installateure und Betreiber neben der Funktion, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Solaranlage an einer Fortsetzung der Reduktion der spezifischen Anlagenkosten. Hierzu ist zusätzlich zur Preisreduktion für die Photovoltaik-Module eine Verminderung der Systemkosten unabdingbar. Ausgehend von dem Ziel der Senkung der spezifischen Anlagenkosten stellen sich hohe Anforderungen an die Systemtechnik:

- Einfachste Planung (weiter Betriebsbereich, geeignet für alle Modultypen)
- Unkomplizierte Installation einer PV-Anlage (modularer Systemaufbau)
- Hohe Verfügbarkeit (MTBF > 100.000 Std.) zur Senkung der Betriebskosten
- Sehr hoher Umwandlungswirkungsgrad der Stromrichter:  
Eckdaten:  $\geq 93$  % Wechselrichter mit galvanischer Trennung  
 $\geq 96$  % Wechselrichter ohne galvanische Trennung
- Einfache Erweiterbarkeit der Anlage

- ❑ Einspeisung in das Niederspannungsnetz an nahezu beliebigen Anschluss-  
punkten
  - ⇒ dafür notwendig: - erweiterter Temperaturbereich (-20°C bis +60°C)
  - hohe Schutzart IP 65 (geeignet für Outdoor-Anwendung)
- ❑ Kostengünstige Überwachung der Anlage (z.B. Nutzung der bereits vorhande-  
nen Netzleitung: Powerline-Kommunikation)
- ❑ Einfache Identifikation fehlerhafter Anlagenbereiche und Funktionen

In der nachfolgenden Abb. 6 sind die Innovationen der letzten Jahre noch einmal zu-  
sammengefasst. Mit der Qualifizierung der modularen Systemtechnik auch für den  
größeren Leistungsbereich erfreut sich Stringtechnologie seit Mitte der 90-er Jahre  
einer stetig wachsenden weltweiten Verbreitung.



**Abb. 6:** Überblick verschiedener Wechselrichter-Topologien und deren Entwicklungen im letzten Jahrzehnt

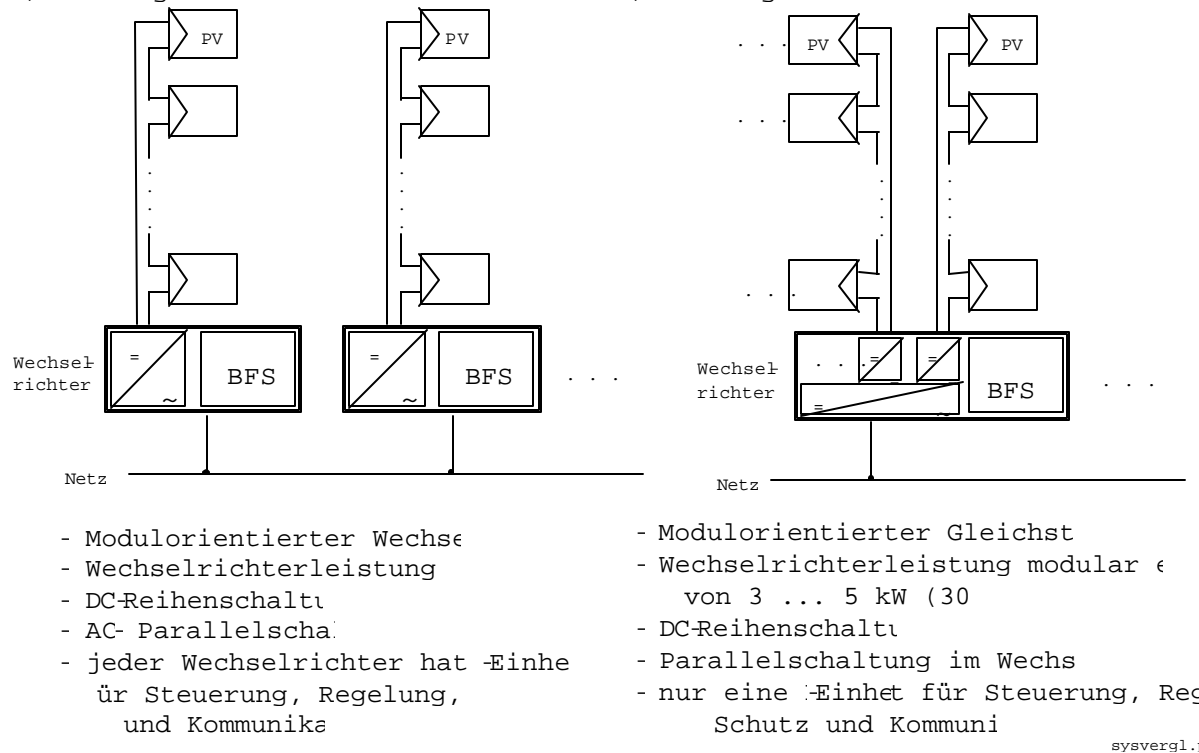
## 3 Zukünftige PV-Stromrichtertechnologie

### 3.1 Neuer Multi-String Wechselrichter

String-orientierte Wechselrichter haben sich auf Grund ihrer gravierenden technischen Vorteile auf dem Markt für netzgekoppelte Wechselrichter absolut durchgesetzt. SMA rechnet damit, dass bereits im nächsten Jahr erstmalig mehr als 15.000 „Sunny Boy“ produziert werden können.

Die Erfahrungen, die bei der Entwicklung, Produktion und dem Vertrieb dieser immer noch für industrielle Verhältnisse in relativ kleinen Stückzahlen (5.000/a bis 15.000/a) gefertigten String-Wechselrichter gewonnen werden konnten, zeigen, dass die geforderte weitere Reduktion der spezifischen Wechselrichterkosten (DM/W) ohne besonders aufwändige Entwicklung (höhere Integration) von speziellen aktiven und passiven Bauelementen vorerst nur durch eine Erhöhung der Wechselrichter-Nennleistung möglich ist. Im Leistungsbereich oberhalb von 2 kWp ist aber eine konsequente Fortführung der String-Technik auf Grund der hohen resultierenden String-Spannung nicht mehr möglich, und so stehen dem Markt zurzeit keine „reinrassigen“ string-orientierten Wechselrichter in diesem Leistungsbereich zur Verfügung. Um trotzdem Wechselrichter mit größerer Leistung einsetzen zu können, werden oft zwei oder mehrere Strings parallel geschaltet. Bei diesem Kompromiss gehen die Vorteile der String-Technologie tendenziell verloren, und die PV-Anlagen mutieren zu Anlagen mit zentraler Wechselrichter-Technologie mit all ihren Nachteilen.

a) PV-Anlage mit mehreren String-Wechselrichtern b) PV-Anlage mit einem Multi-String-Wechselrichter



**Abb. 7:** Schematische Darstellung einer PV-Anlage mit  
a) mehreren String-Wechselrichtern und b) Multi-String-Wechselrichter

Um bei Anlagen mit Leistungen größer als 2 kW trotzdem die Vorteile der String-Technologie nutzen zu können, sind bisher, wie in Abb. 7a dargestellt, mehrere String-Wechselrichter kleinerer Leistung eingesetzt worden, wodurch hauptsächlich eine Kostenreduktion auf Grund des Modularitätseffekts möglich war.

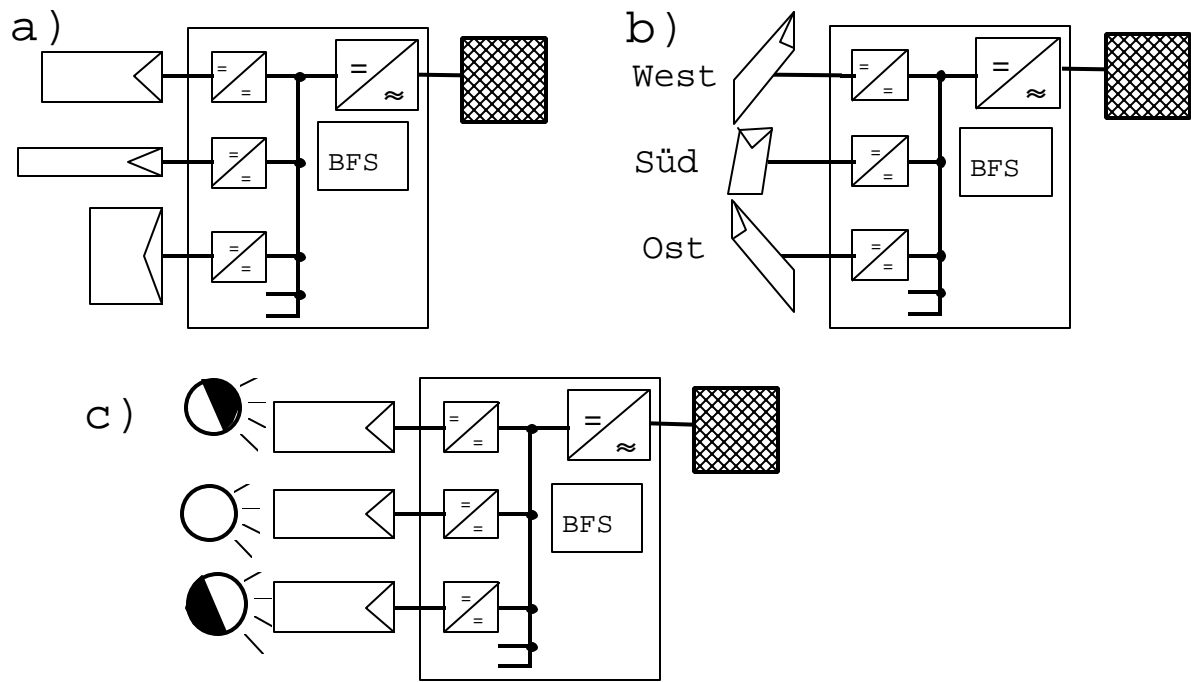
Zurzeit arbeitet ein gemeinsames Entwicklungsteam des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) und SMA an dem Projekt zur Realisierung des Multi-String-Wechselrichters. Das erklärte Ziel ist eine weitere drastische Reduktion der spezifischen Wechselrichterkosten. Wie in Abb. 7b schematisch dargestellt, sind beim Multi-String-Wechselrichter, im Gegensatz zur Verwendung mehrerer einzelner Wechselrichter, nur eine einzige Einheit für Betriebsführung und Systemsteuerung (inkl. Kommunikation) und eine gemeinsame Wechselrichterbrücke notwendig. Die Vorteile der String-Technologie können beim Multi-String-Wechselrichter trotzdem in

vollem Umfang genutzt werden, da alle Strings individuell über MPP-geregelte erweiterbare Gleichspannungswandler an eine gemeinsame Wechselrichterbrücke z.B. von 5 kW angeschlossen sind. Je nach Anzahl der Strings der PV-Anlage kann der Multi-String-Wechselrichter mit einer variablen Anzahl von Gleichspannungswandler-Modulen (DC/DC-Wandler) bestückt werden.

Mit diesem Wechselrichterkonzept der höheren Leistungsklasse entsteht ein Baustein zur Energieaufbereitung, der eine Skalierung von PV-Generatoren in größere Leistungseinheiten zulässt, ohne dass die Vorteile der kleinen 'Single-String-Wechselrichter' verloren gehen. SMA beabsichtigt den Beginn der Serienfertigung der ersten Multi-String Wechselrichter im Sommer 2000.

### **3.2 Mögliche Anwendungsbereiche**

Als typische Anwendung des Multi-String-Wechselrichters ist der Einsatz in einer netzgekoppelten PV-Anlage in der Leistungsklasse oberhalb 3 kW zu sehen. Die folgenden Bilder zeigen einige mögliche Anlagenstrukturen, die unter anderem auch für die Solararchitektur neue interessante Konfigurationen bieten. In Abb. 8 sieht man am Beispiel einer 3 kW Anlage, dass die Vorteile des string-orientierten Konzepts auch hier voll zum Tragen kommen. Man erkennt, dass Strings mit Solarmodulen unterschiedlicher Nenndaten, Größe oder auch Technologie sowie auch Strings mit unterschiedlicher Ausrichtung (Ost, Süd, West) und Neigung oder Strings mit unterschiedlich starker Abschattung an einen Wechselrichter angeschlossen werden können und trotzdem jeweils in ihrem individuellen MPP arbeiten.



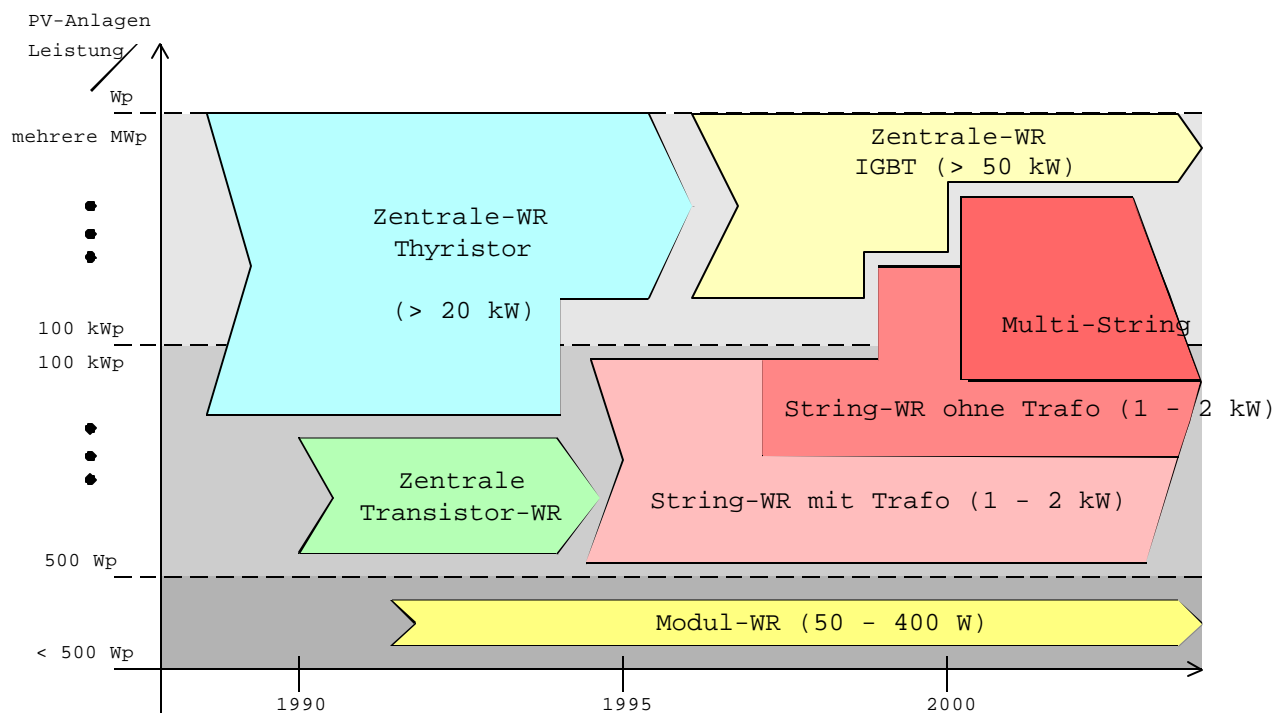
multvar.ppt

**Abb. 8:** Vorteile des Einsatzes des Multi-String-Wechselrichters in PV-Anlagen mit stark variierenden Rahmenbedingungen für unterschiedliche Strings

- a) Strings mit unterschiedlichen Nenndaten (Größe, Solarzellentyp)
- b) Strings mit unterschiedlicher Ausrichtung (West, Süd, Ost) und Neigung
- c) Strings mit unterschiedlich starker Abschattung

## 4 Trends zukünftiger PV-Anlagen

Seit dem Beginn der PV-Netzkopplung mit Forschungs- und Demonstrationsanlagen konnte ein ausgereifter technischer und qualifizierter Standard bei in Serie produzierten photovoltaischen Systemkomponenten realisiert werden. Je nach Einsatzart, Standortverhältnissen und kalkulatorischem Ansatz haben sich die Gesamtkosten einer 1 kWp Anlage im Jahr 1990 von ca. DM 25.000.-- auf heute ca. DM 12.000.-- reduziert. Wesentlichen Anteil dieser Entwicklung hatte die modulare Systemtechnik, die 1995 mit dem ersten verfügbaren Stringwechselrichter „Sunny Boy“ begann. Seitdem kommt die Stringtechnologie auch verstärkt bei Anlagen in dem Megawatt-Bereich zur Anwendung. Die konsequente Weiterentwicklung und damit die Nutzung aller bekannten Vorteile der Stringtechnologie mit einem Multi-String-Wechselrichter wird insbesondere den Aufbau größerer PV-Anlagen wirtschaftlich (Preis und Systemwirkungsgrad) noch attraktiver gestalten.



**Abb. 9:** Trends zukünftiger Stromrichtertechnologien zur Netzkopplung