

# Vereinfachung photovoltaischer Systemtechnik durch neue Stromrichterkonzepte

von Dirk Schekulin,  
Peter Zacharias  
und Johanna Myrzik

## Überblick

Zur Vereinfachung der photovoltaischen Systemtechnik ist eine starke Modularisierung der einzelnen Komponenten zwingend erforderlich. Ziel ist hierbei die wechselstromseitige Kopplung des Gesamtsystems. Das zentrale Bindeglied zwischen der vorzugsweise photovoltaischen Erzeugung der elektrischen Energie und den Wechselstromverbrauchern stellt der Wechselrichter dar. Gerade im Bereich der Wechselrichtertechnik existiert ein großes Innovationspotential in vielerlei Hinsicht. Einerseits findet auf der Bauelementeseite eine rasante Entwicklung hin zu immer günstigerem Verhalten statt, andererseits bieten neue Topologien für Wechselrichter weitere Freiheitsgrade wie z.B. Bauvolumen- und Gewichtsreduktion. Schließlich läßt sich durch konsequente Optimierung der jeweiligen Topologie in Verbindung mit dem realen Verhalten der Bauelemente ein Maximum an Wirkungsgrad und Stromqualität bei geringen Kosten erzielen.

For simplification of photovoltaic systems technology, a modular architecture of all system components is required. Final goal is the AC-coupling between all system components. The inverter is the central component between photovoltaic electricity generation and AC-loads. A broad innovation potential exists particularly in the field of inverter technology. On the one hand, power electronic components are rapidly developed today towards more favorable operating characteristics, on the other hand new circuit topologies of inverters open up additional scope for improvements such as volume and weight reductions. Finally, with a consequent optimization of these topologies and taking the real physical behavior of the power components into account, maximum efficiency combined with high quality of the feed-in current is achievable at low costs.

ergaben sich schnell Fortschritte. Leider stellte diese wichtige Systemkomponente immer wieder die Schwachstelle in der Gesamtanlage dar. Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich in der erst kurzen Produkterfahrung der Hersteller und in der Komplexität der Geräte. Mit dem Übergang zu größeren Stückzahlen bei steigender Anwendung der PV-Technik sind hier bereits wesentliche Verbesserungen im Bereich Zuverlässigkeit, Herstellungskosten und Baugröße erreicht worden. Wesentliche Fortschritte sind insbesondere in Richtung einer Vereinfachung der Systemtechnik durch eine stärkere Modularisierung zu erwarten. In diesem Zusammenhang bieten neue Stromrichter-Topologien in Kombination mit immer günstigerem Bauelementverhalten sowie der Optimierung des Gesamtsystems ein großes Innovationspotential. Im nachfolgenden Beitrag werden systematisch die Möglichkeiten in diesem Bereich erörtert und einige praktische Ergebnisse vorgestellt.

## 2. Modularisierung der PV-Systemtechnik

Um bei PV-Stromversorgungsanlagen eine breite Anwendung zu erreichen, müssen die Kosten wesentlich reduziert werden. Hierzu kann die Gesamtsystemtopologie in besonderer Weise beitragen. Durch Systeme, die aus einfach aneinanderreihbaren modular aufgebauten Komponenten bestehen, kann man in vielfältiger Weise auf eine Verringerung der Kosten hinwirken. Zunächst ist durch die größere Stückzahl gleichartiger Module mit standardisierten Schnittstellen eine Reduktion der Selbstkosten durch die Anwendung effektiverer Fertigungsmethoden in Verbindung mit günstigeren Einkaufspreisen möglich.

Gleichzeitig wird jedoch auch der Gesamtsystempreis drastisch dadurch reduziert, daß sich der Systementwurf deutlich vereinfacht, wenn zusammenschaltbare standardisierte Baugruppen und Komponenten zur Verfügung stehen. Durch die damit verbundene Eigenschaft der Erweiterbarkeit solcher Systeme wird ein kostengünstiger Einstieg bei einer geringen Systemgröße möglich, mit der Option auf Vergrößerung der Leistungsfähig-

## 1. Einleitung

Im Rahmen des Bund-Länder-1000-Dächerprogramms wurden weltweit erstmals im größeren Maßstab kleine netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen auf Hausdächern installiert und erprobt. So entstand – zumindest kurzzeitig – ein großer Bedarf nach Systemkomponenten, was einen enormen Entwicklungsschub auf diesem Gebiet bewirkte. Insbesondere bei Wechselrichtern zur Netzeinspeisung der photovoltaisch erzeugten Energie

Dipl.-Ing. Dirk Schekulin ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart.

Dr.-Ing. Peter Zacharias ist Leiter der Abteilung Systemtechnik am Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET), Kassel.

Dipl.-Ing. Johanna Myrzik ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Elektrische Energieversorgungssysteme an der Universität Gesamthochschule Kassel (GhK), Kassel.

keit des Systems bei entsprechendem Bedarf und finanziellen Möglichkeiten. Dies hat auch positive Wirkungen auf die Akzeptanz dieser PV-Systemtechnik und somit auf eine schnellere Verbreitung.

Der Ansatz einer modularen Systemtechnik beinhaltet aber auch, daß durch die notwendige Standardisierung des Verhaltens an den Schnittstellen für den Informations- und Energieaustausch eine Austauschbarkeit der Produkte verschiedener Anbieter möglich ist. Ein Umstand der sich gleichfalls günstig auf die Preisgestaltung für den Anwender auswirkt. Dies betrifft sowohl die Kosten, die bei der Errichtung anfallen, als auch jene während des Betriebes einer Anlage [1] [2].

Das ISET hat deshalb frühzeitig begonnen, Schritte in Richtung Entwicklung modularer Komponenten für die PV-Systemtechnik zu unternehmen. Ein erstes Ergebnis war der PV-String-Wechselrichter, der in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner entwickelt wurde. Dieser weist bereits wesentliche Merkmale der angestrebten Technik auf:

- konsequente AC-seitige Kopplung aller Leistungskomponenten,
- eigensicherer Betrieb ohne zentrale Steuerung als Grundeigenschaft,
- Möglichkeit der Fernüberwachung, -steuerung und Diagnose,
- einfache Systemerweiterung,
- geringer Montage- und Wartungsaufwand,
- günstiges Preis-/Leistungsverhältnis

Da bis zu einer konsequenten Modularisierung der gesamten PV-Systemtechnik noch eine Anzahl von steuerungs- und regelungstechnischen Problemen zu lösen sind, wurden am ISET zwei Testanlagen errichtet. Diese gestatten die Untersuchung des Systemverhaltens von modular aufgebauten einphasigen und dreiphasigen Hybridversorgungssystemen, in denen neben der Solarenergie auch noch andere erneuerbare Energiequellen und Energiespeicher genutzt werden.

Alle Systemkomponenten sind über einen „Energiebus“ gekoppelt und ggf. über einen Informationsbus mit einer zentralen Koordination verbun-

den (siehe Abbildung 5 in [8]). Diese – bei kleineren Systemen nicht notwendigerweise vorhandene – übergeordnete Koordination weist entsprechendes Angebot und Nachfrage der Energie den einzelnen Komponenten im Netz Aufgaben zu und koordiniert im Sinne eines Lastmanagements die Leistungsabgabe. Hierfür ist ein spezielles Regelverhalten der Komponenten am Netz erforderlich sowie ein standardisierter Informationsaustausch. Beides sind Aufgaben, an denen z. Z. am ISET mit großer Intensität gearbeitet wird.

### 3. Entwicklungspotential durch neue Bauelemente

Durch Neuentwicklungen im Bereich aktiver und passiver Bauelemente ergeben sich neue Möglichkeiten zur Volumen- und Kostenreduktion in der PV-Systemtechnik. Generell hat die extrem angestiegene Verwendung leistungselektronischer Bauelemente in der Automatisierungstechnik und im Heimbereich zu einer großen Bauelementevielfalt bei drastischer Preisreduktion geführt. Dies betrifft praktisch alle Bereiche leistungselektronischer Komponenten. Damit wird es dem Entwickler immer leichter, das für seinen Anwendungsfall beste Bauelement auszuwählen.

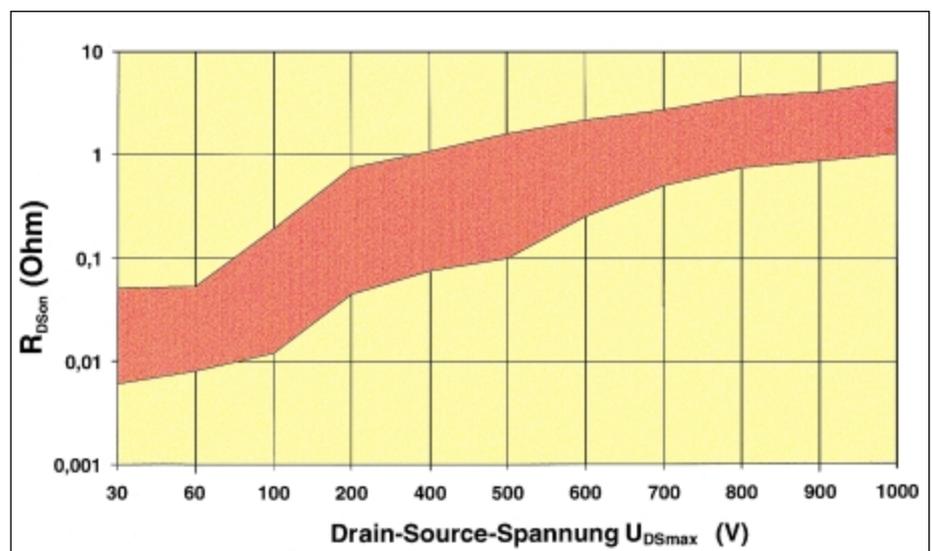
Bei den aktiven leistungselektronischen Bauteilen ist eine deutliche Verbesserung der Parameter hin zum „idealen“ Schalter zu verzeichnen. Für kleinere Leistungen bis in den Kilowattbereich stehen mittlerweile MOS-

FET's zur Verfügung, die außerordentlich geringe Durchlaßverluste mit hoher Sperrfähigkeit verbinden (Abbildung 1). Damit stehen Schalter zur Verfügung, die geringe Schaltverluste und geringe Durchlaßverluste aufweisen, so daß bei hohen Schaltfrequenzen eine sehr starke Reduktion der Bauvolumen der Systemkomponenten erreicht werden kann. Dies beruht einerseits auf geringen abzuführenden Verlustleistungen und andererseits auf der mit steigender Frequenz geringeren Baugröße der passiven Bauelemente [3].

Aber auch für den Leistungsbereich bis zu einigen 10 kW haben sich neue Entwicklungen im Halbleiterbereich ergeben. Hier sind die IGBT's in Trench-Technologie zu nennen, die gegenüber den vorangegangenen Generationen einen um ca. 40 % reduzierten Durchlaßspannungsabfall verfügen. Diese Bauelemente – zunächst nur für Spannungen bis 200 V in Batteriesystemen entwickelt – sind zwischenzeitlich auch mit maximalen Spannungen von bis zu 1000 V herstellbar. Die im Vergleich zu MOSFET's hohen Schaltverluste konnten bei verschiedenen Herstellern ebenfalls reduziert werden, so daß auch mit IGBT's Schaltfrequenzen bis 50 kHz erreichbar sind.

Durch die Entwicklung neuer magnetischer Materialien wurden weitere Möglichkeiten geschaffen, höhere Schaltfrequenzen in der Stromrichter-technik einzusetzen oder durch eine höhere magnetische Aussteuerbarkeit

Abbildung 1: Durchlaßwiderstand von MOSFET's verschiedener Bauart



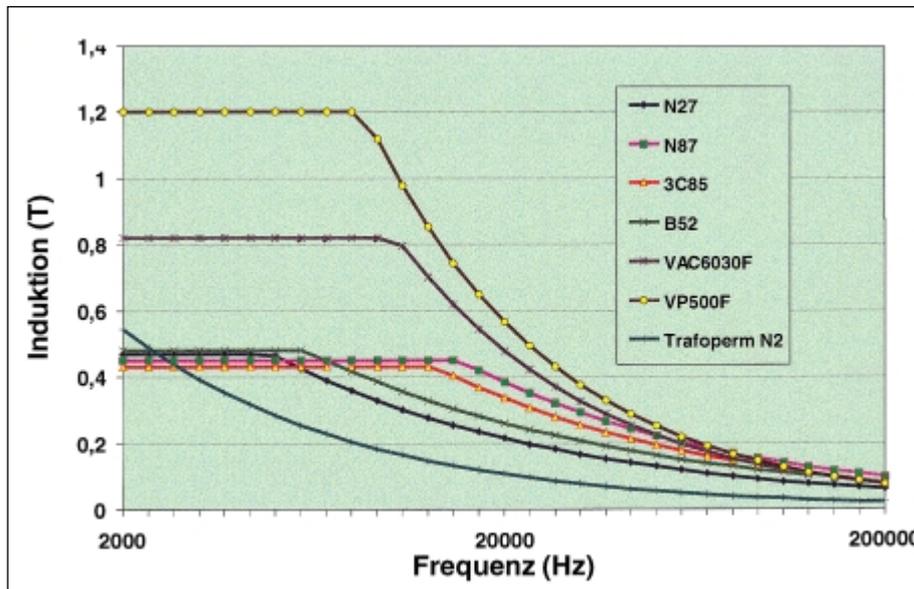
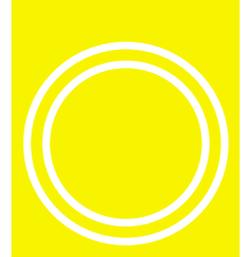


Abbildung 2: Magnetische Aussteuerbarkeit neuer weichmagnetischer Werkstoffe

eine Volumenreduktion bei gleicher Schaltfrequenz zu erreichen. In [Abbildung 2](#) wird dies verdeutlicht. Dem „klassischen“ Leistungsferrit N27 sind die neueren Entwicklungen auf dem Gebiet der Ferrite verschiedener Hersteller gegenübergestellt (N87, B52 und 3C85). Diese sind offenbar bei gleichen spezifischen Kernverlusten magnetisch wesentlich höher aussteuerbar.

Besondere Neuerungen haben sich im Bereich der metallischen weichmagnetischen Materialien ergeben. Mit dem amorphen Material VAC6030F und dem nanokristallinen Material VP500F werden bedeutend geringere Verluste erreicht als bei dem lange bekannten Trafoperm N2 mit einer vergleichbaren Bandstärke von 25 m. Durch die erheblich höhere Sättigungsinduktion stehen damit Materialien zur Verfügung, die im Frequenzbereich bis 20 kHz eine Kernvolumenreduktion von mehr als 50 % gegenüber Ferriten ermöglichen. Durch die guten HF-Eigenschaften verbunden mit Permeabilitäten von 50000...130000 lassen sich mit diesen Materialien auch Bauelemente für Filter mit sehr geringen Abmessungen realisieren. Diese Bauelemententwicklungen begünstigen und ermöglichen eine immer komplexere Integration von Funktionseinheiten in der PV-Systemtechnik. Sie eröffnen damit rationelle Fertigungsmöglichkeiten und ein weiteres Potential zur Preisreduktion.

#### 4. Neue Wechselrichtertopologien für die modulare PV-Systemtechnik

##### 4.1. Motivation für Innovationen

Um die obengenannten Vorteile modularer PV-Anlagen nutzen zu können, werden Einheiten kleiner Leistung benötigt. Für die PV-Energieaufbereitung werden daher Wechselrichter kleiner Leistung erforderlich. Bei herkömmlicher PV-Zellentechnik liegt daher die Generatorspannung häufig weit unterhalb des Netzniveaus, so daß zur Spannungsanpassung zur Zeit vor allem zwei Stromrichterkonzepte verfolgt werden:

- Pulswechselrichter zur Erzeugung der Wechselspannung mit 50 Hz-Transformator zur Spannungsanpassung
- DC-Wandler zur Spannungsanpassung und Polwender zur Erzeugung der Wechselspannung

Bei der ersten Variante ist vor allem der schwere und große Transformator nachteilig, bei der zweiten Variante der hohe Schaltungsaufwand und schlechtere Wirkungsgrad.

Im folgenden Kapitel soll das Entwicklungspotential innovativer Wechselrichter aufgezeigt werden. Diese Wechselrichter haben tief-/hochsetzende Eigenschaften und benötigen kein weiteres Element zur Spannungsanpassung, was eine kleinere und

leichtere Bauweise und ebenso einen einfachen Schaltungsaufbau zur Folge hat. Diese Wechselrichtertopologien weisen einen hohen Wirkungsgrad auf; ein Einsatz neuer Materialien ist hier besonders interessant.

##### 4.2. Herleitung innovativer Wechselrichtertopologien

Aufbauend auf den konventionellen Pulswechselrichter (PWR) lassen sich mit Hilfe der Netzwerktheorie Wechselrichter entwickeln, die eine im Vergleich zur Netzspannung niedrigere Solargeneratorspannung auf das Netzniveau anpassen können. Der grundlegende Gedanke bei der Herleitung soll mit [Abbildung 3](#) erläutert werden.

Hier ist zunächst der konventionelle PWR dargestellt. Er ist unterteilt in zwei Vierpole, die jeder für sich einen bidirektionalen Tiefsetzsteller darstellen. Dabei besitzen die Filterdrosseln L21 und L22 die gleichen Werte und da sie in Reihe liegen, bildet ihre Summe den Gesamtwert der benötigten Filterinduktivität des PWR. Bezeichnet man den Zweig, in dem die beiden Leistungsschalter S11 u. S12 (bzw. S21 und S22) liegen als Eingang E11 u. E12 (bzw. E21 u. E22) des Vierpols und die Seite mit der Filterinduktivität als Ausgang A11 u. A12 (bzw. A21 u. A22), so läßt sich durch Parallelschaltung der Eingänge und durch Reihenschaltung der Ausgänge beider Vierpole bezüglich der Wechselstromlast die Topologie des PWR erzeugen. Da der PWR aus zwei Tiefsetzstellern zusammengesetzt ist, kann bei maximalem Tastverhältnis als maximale Ausgangsspannung nur seine Eingangsspannung am Ausgang anliegen.

Neben dem Tiefsetzsteller gibt es noch fünf weitere bidirektionale DC-Wandler. Vier dieser Wandler haben tief-/hochsetzende Eigenschaften und sind ebenso in [Abbildung 3](#) zusammen mit ihren potentialgetrennten Varianten aufgeführt [4]. Besonders interessant sind der Zeta- und Cuk-Wandler. Betrachtet man diese als Vierpole, dann können sie wie beim PWR in einer Parallel-Reihen-Schaltung verknüpft werden. Eine solche Wechselrichtertopologie aus Zeta-Wandlern ist in [Abbildung 4](#) dargestellt. Dieser Wechselrichter kann durch sein tief-/hochset-

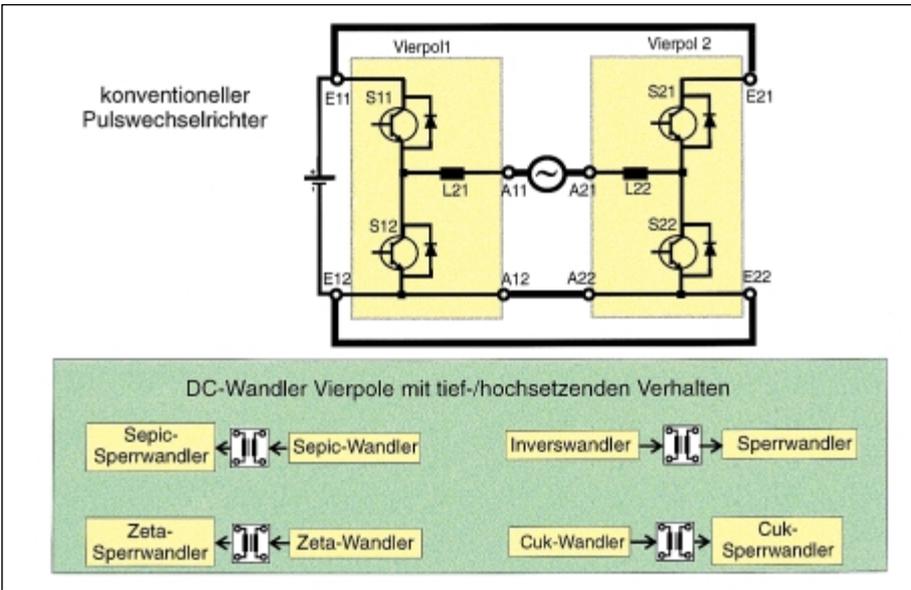
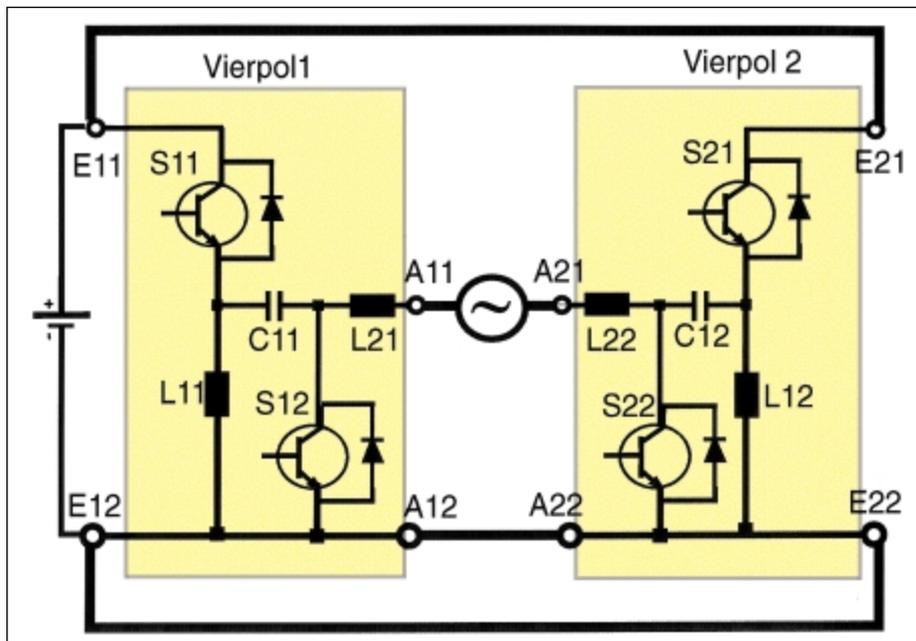


Abbildung 3: Herleitung neuer Wechselrichtertopologien: Jeder Zweig des PWR stellt einen bidirektionalen Tiefsetzsteller dar. Diese können auch als Vierpole beschrieben werden. Neue Wechselrichtertopologien erhält man, wenn an Stelle der Tiefsetzsteller tief-/hochsetzende DC-Steller eingesetzt werden.

Abbildung 4: Neue Wechselrichtertopologie aus bidirektionalen Zeta-Wandler. Jeder Zeta-Wandler wird als Vierpol aufgefaßt, die bezüglich der Eingänge E parallel und der Ausgänge A in Reihe geschaltet werden. Die tief-/hochsetzenden Eigenschaften des Zeta-Wandlers werden durch die Elemente C1 und L1 erreicht.



zendes Verhalten die kleine Solargeneratorspannung in eine sinusförmige Wechselspannung wechselrichten und an das Netzniveau anpassen, ohne einen Transformator oder einen weiteren Stromrichter zu benötigen. Zur Erzeugung der sinusförmigen Lastspannung können diese Wandler mit den gleichen Verfahren analog zum PWR angesteuert werden [2,5].

#### 4.3. Realisierung eines Labormusters

Für eine Nennleistung von 600 W wurde ein Labormuster eines Zeta-Wechselrichters aufgebaut. Es wurden zunächst 1200 V IGBTs und für die Induktivitäten Ferrite verwendet. Die Generierung der sinusförmigen Ausgangsspannung erfolgt über ein 3-Punkt-Verfahren, um zum einen

Schaltverluste und zum anderen die pendelnde Leistung zwischen Last und Gleichspannungskreis zu reduzieren. In [Abbildung 5](#) ist die gemessene Wirkungsgradkennlinie dargestellt. Das Labormuster wurde zunächst überdimensioniert. Da Leistungshalbleiter ab einer Klasse 600 V eingesetzt werden können, wurde der Wirkungsgrad unter der Verwendung von 600 V MOSFETs für diesen Laboraufbau berechnet und ebenfalls in [Abbildung 5](#) dargestellt. Mit dem Zeta-Wechselrichter können Eingangsspannungen bis zum 5-fachen ohne wesentliche Wirkungsgradeinbußen hochgesetzt werden [2] [5].

Das Labormuster hat gezeigt, daß mit dem Zeta-Wechselrichter eine kleinere kompaktere Bauform und eine Gewichtsreduzierung auf ein Viertel gegenüber einem konventionellen PV-Wechselrichter der gleichen Leistungsklasse erreicht werden kann. Dem liegt vor allem die Einsparung von magnetischen Materialien zugrunde. Der Wirkungsgrad liegt im gleichen Bereich zum vergleichbaren konventionellen PV-Stromrichter und ist durch den Einsatz neuer Materialien noch leicht nach oben hin ausbaubar. Es hat sich gezeigt, daß die oben genannten Anforderungen an modulare PV-Stromrichter mit dem Zeta-Wechselrichter erfüllt werden können.

#### 5. Optimierung thermischer Eigenschaften und elektrischer Kenngrößen

Der letzte Schritt bei der Umsetzung einer bestimmten Schaltungstopologie ist die Optimierung der gesamten Anordnung unter Einbeziehung der Eigenschaften der Energiequelle und der Energiesenke. Abgesehen von meist stark unterschiedlichen Impedanz- und Dynamikverhältnissen, ergeben sich insbesondere bei modulintegrierten Kleinwechselrichtern erhöhte Anforderungen an die Temperaturfestigkeit. Je nach Einbauverhältnisse treten hier Umgebungstemperaturen von mehr als 60°C auf. Weiterhin sind gerade bei verteilter Energieaufbereitung mit modulintegrierten Wechselrichtern die wechselstromseitigen Kenngrößen in Hinblick auf mögliche Netzrückwirkungen von zentraler Bedeutung.

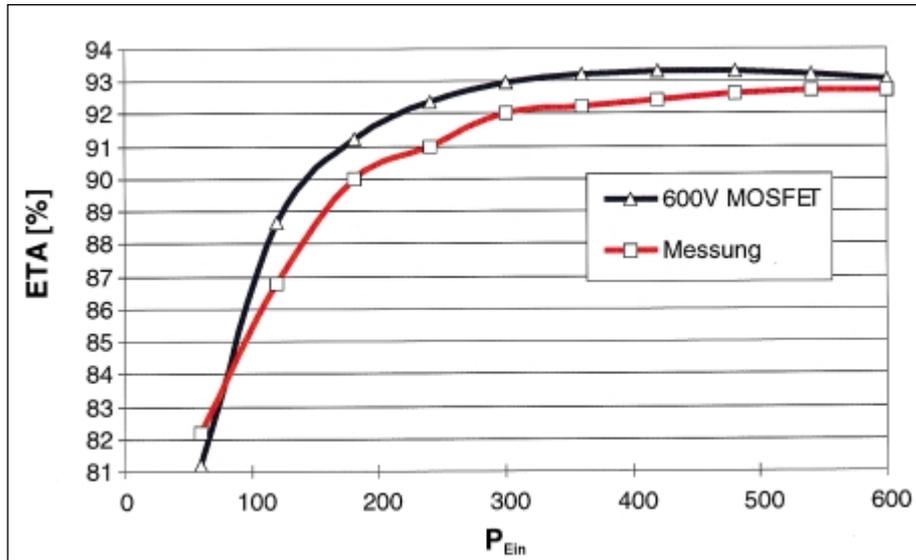
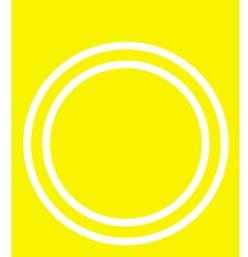
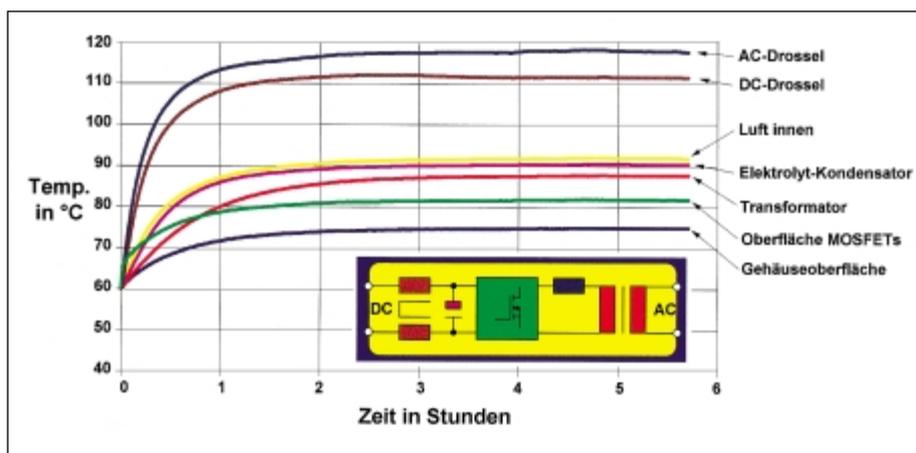
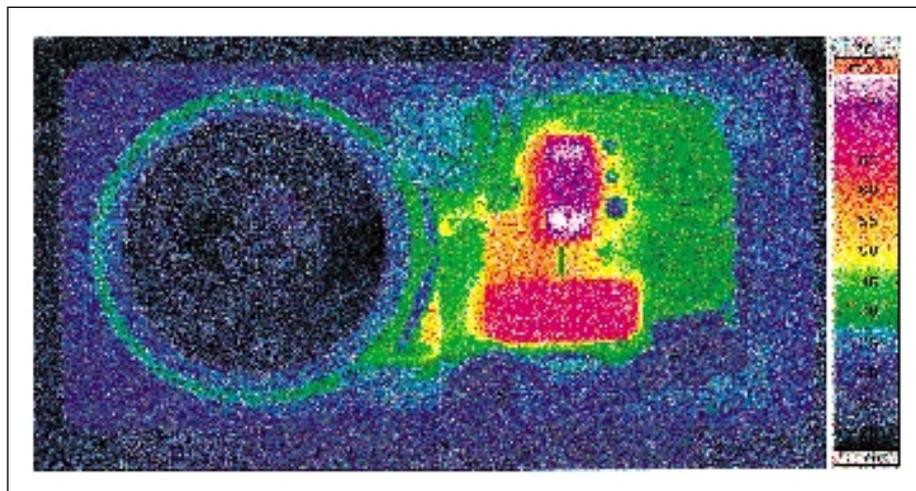


Abbildung 5: Gemessene Wirkungsgradkennlinie des Zeta-Wechselrichters für 600 W (1200 V, 35 A IGBT) und für das Labormuster berechnete Wirkungsgrade unter der Verwendung von MOSFETs

Abbildung 6: Thermographie-Aufnahme eines modulintegrierbaren 100 W Kleinwechselrichters mit Niederfrequenztransformator zur Spannungsanpassung bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C und einer Eingangsleistung von 100 W. Deutlich sichtbar sind Gehäuseumrandung, Ringkerntransformator und die relativ heißen induktiven Bauelemente (rot). Die Aufnahme entstand nach einer Zeitdauer von 30 Minuten.



### 5.1. Thermische Eigenschaften

Die Optimierung der thermischen Eigenschaften eines Wechselrichters in Abhängigkeit der vorherrschenden Umgebungstemperatur ist äußerst schwierig und zeitaufwendig. Wärmeleitung, Abstrahlung und Konvektion innerhalb des Gehäuses, in dem der Wechselrichter eingebaut ist, führen in Verbindung mit den nichtlinearen, häufig gegenläufigen Verlustmechanismen der jeweiligen Bauelemente und der gewählten Topologie zu mehrdimensionalen Optimierungsproblemen. Ein mögliches Verfahren zur einfachen Untersuchung der Wärmeverteilung innerhalb eines Geräts bietet die Thermographie. Dieses Verfahren liefert eine relativ genaue Temperaturverteilung bei Geräten, in denen die Wärmeabfuhr durch Konvektion innerhalb des Gehäuses keine große Rolle spielt. Diese Einschränkung liegt hier in der Tatsache begründet, daß die Temperaturverteilung nur bei offenem Gehäuse zuverlässig ermittelt werden kann. In [Abbildung 6](#) ist eine Thermographie-Aufnahme eines in ein Solarmodul integrierbaren Kleinwechselrichters dargestellt. Bei dem untersuchten Gerät handelt es sich um ein Vorseriengerät in konventioneller Brückenschaltung mit Ringkerntransformator zur Spannungsanpassung [6].

Für detaillierte Untersuchungen liefern sensorische Messungen an den relevanten Bauteilen immer noch die besten Ergebnisse als Grundlage für die Erstellung komplexer Temperaturmodelle. Diese Modelle sind Voraussetzung für die Optimierung des Gesamtsystems. In [Abbildung 7](#) sind beispielhaft die Sprungantworten verschiedener Bauelemente des schon erwähnten Kleinwechselrichters dargestellt. Die Umgebungstemperatur betrug hierbei 60°C bei einer Nennleistungsleistung von 100 W. Die Einbaulage

Abbildung 7: Thermische Sprungantwort der relevanten Bauelemente eines 100 W Kleinwechselrichters mit Niederfrequenztransformator in stehender Einbaulage bei einer Umgebungstemperatur von 60°C. Insbesondere die große Zeitkonstante des Transformators läßt sich bei guter thermischer Kopplung der Bauelemente für transiente Überlastungen nutzen.

des Geräts ist stehend. Bemerkenswert sind die relativ großen Zeitkonstanten, insbesondere die des Ringkerntransformators. Besteht zwischen den relevanten Bauteilen eine gute thermische Kopplung, so können die großen Zeitkonstanten bei der Optimierung der Geräte bewußt dahingehend ausgenutzt werden, daß ein transienter Überlastbereich zugelassen wird. Von praktischem Nutzen ist dies bei Photovoltaik-Wechselrichtern vor allem bei starker Wolkendynamik und niedrigen Umgebungstemperaturen, weil hier große Leistungsspitzen aufgrund relativ kalter Solarmodule auftreten.

### 5.2. Elektrische Kenngrößen

Außer der Maximierung des Umwandlungswirkungsgrads, der unmittelbar an die thermische Optimierung gekoppelt ist, ist die Optimierung der wechselstromseitigen Kenngrößen Klirrfaktor und Leistungsfaktor sowie des gleichstromseitigen Anpassungswirkungsgrades von großer Bedeutung. Gerade in Hinblick auf eine dezentrale Energieaufbereitung, d.h. einer Vielzahl von Wechselrichtern im Netzparallelbetrieb, ist eine weitere Reduzierung der Netzzrückwirkungen bzw. ein definiertes Verhalten der Geräte wünschenswert. Innovative Ansätze, wie eine aktive Leistungsfaktorregelung [6] oder wechselstromseitige Filter höherer Ordnung in Verbindung mit einer Zustandsregelung [7] bringen hier Vorteile. Eine weitere Möglichkeit die Stromqualität insbesondere im Teillastbereich zu verbessern, ist der Einsatz nichtlinearer Speicherdrosseln bei der Stromformung in Pulswechselrichtern. Wird eine lineare Speicherdrossel eingesetzt, so sind die Hochfrequenzanteile im netzseitigen Wechselstrom näherungsweise unabhängig von der 50 Hz Grundschwingung des Stroms. Ursache hierfür ist ein nahezu konstanter Modulationsgrad des gewählten Steuerungsverfahrens (z.B. Pulsweitenmodulation). Im Gegensatz dazu ist der Induktivitätswert von nichtlinearen Drosseln stromabhängig, so daß sich bei gleichem Steuerungsverfahren im Teillastbereich eine Verringerung des Hochfrequenzanteils im Strom ergibt. Ein weiterer Freiheitsgrad besteht bei pulsbreitenmodulierten Wechselrichtern in der systematischen Variation

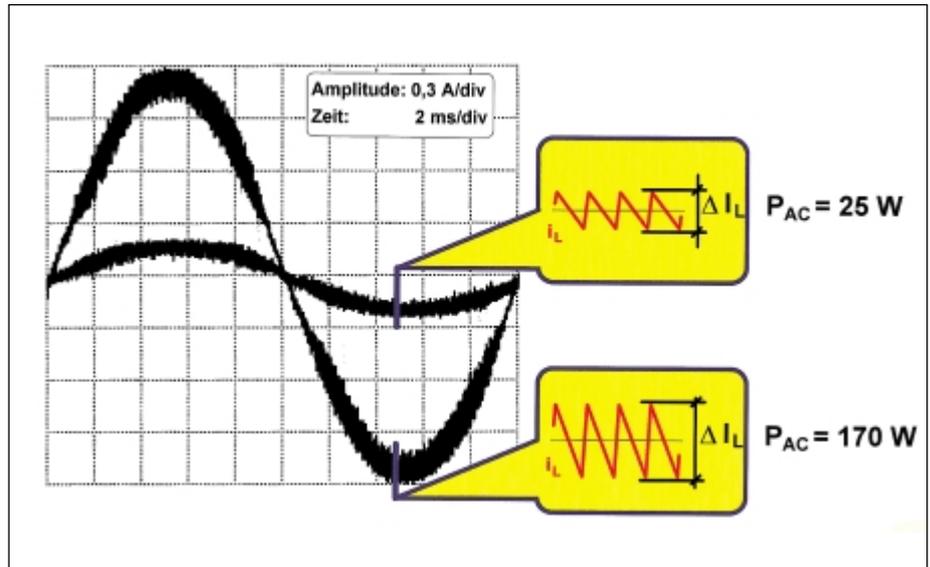
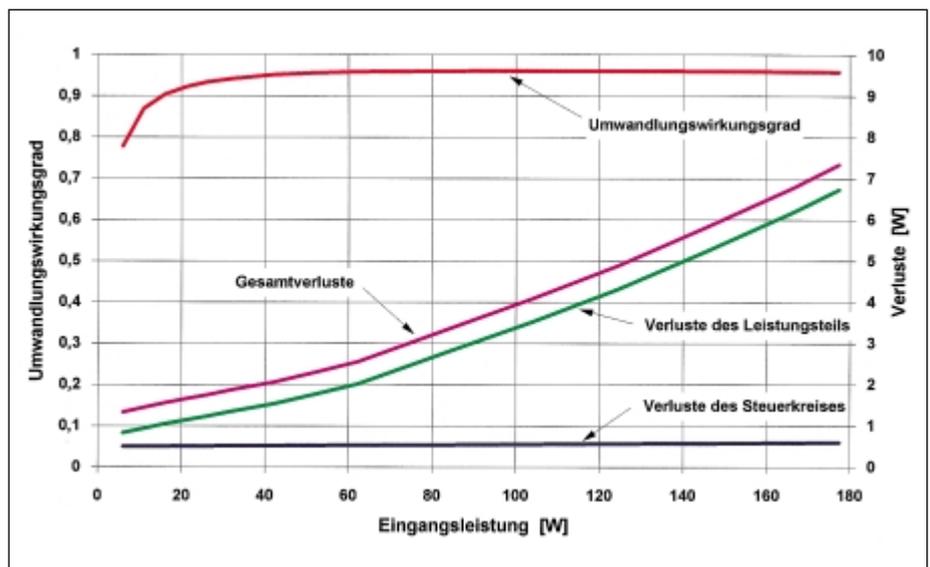


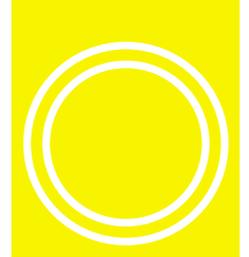
Abbildung 8: Gemessener Verlauf des eingespeisten Stroms bei Nennleistung und bei Teillast eines transformatorlosen Kleinwechselrichters für Dünnschichtmodule. Durch den Einsatz nichtlinearer Speicherdrosseln läßt sich eine Verringerung des Hochfrequenzanteils des eingespeisten Stroms im Teillastbereich erzielen. Zur Veranschaulichung wurden die Ströme bei einer stark verringerten Schaltfrequenz aufgenommen.

Abbildung 9: Gemessene Verluste und Umwandlungswirkungsgrad eines transformatorlosen Kleinwechselrichters zur Integration in die Anschlußdose von Dünnschicht-Solarmodulen. Durch konsequente Optimierung der freien Parameter lassen sich hohe Umwandlungswirkungsgrade von deutlich über 95 % in Verbindung mit guter Stromqualität auch mit Wechselrichtern geringer Leistung realisieren.



der Schaltfrequenz (Mehrton-PWM). Nachteilig bei der Verwendung von nichtlinearen Speicherdrosseln zur Stromformung ist der meist notwendige Einsatz von komplexen nichtlinearen Kennfeldreglern bzw. adaptiven Reglern für die Stromformung, da sich die Regelstrecke in Abhängigkeit des fließenden Stroms laufend ändert.

Im Rahmen eines EU-JOULE-Projekts wurden am ZSW verschiedene regelungstechnische und thermische Optimierungen an einem transformatorlosen hart geschalteten Vollbrückenwechselrichter durchgeführt. [Abbildung 8](#) zeigt den gemessenen Verlauf des eingespeisten Stroms bei Nennleistung ( $170\text{ W}_{AC}$ ) und bei Teillast



( $25W_{AC}$ ) eines transformatorlosen Kleinwechselrichters für Dünnschichtmodule. Durch den Einsatz nichtlinearer Speicherdrosseln läßt sich eine Verringerung des Hochfrequenzanteils im eingespeisten Strom bei verbessertem Teillastwirkungsgrad erzielen. Zur Veranschaulichung wurde die Schaltfrequenz bei der Messung stark abgesenkt, so daß die Welligkeit des eingespeisten Strom gut sichtbar wird. Das Gerät weist ab einer relativen Ausgangswirkleistung von 10 % als herausragende Eigenschaft einen relativen Gesamtklirrfaktor (bezogen auf die jeweilige Grundschwingung) inklusive aller Hochfrequenzanteile von unter 5 % auf. [Abbildung 9](#) zeigt die gemessenen Verluste und den Verlauf des Umwandlungswirkungsgrads in Abhängigkeit der Eingangsleistung. Das Gerät besitzt einen Eingangsspannungsbereich von 370 bis 520 V und verarbeitet Eingangsleistungen bis 170 W bei erhöhter Umgebungstemperatur ( $60^{\circ}C$ ). Dargestellt sind die gemessenen Verluste des Steuerkreises, des Leistungsteils, die Gesamtverluste (Summe aus Steuerkreis und Leistungsteil) sowie der daraus resultierende Umwandlungswirkungsgrad bei einer Eingangsspannung von 400 V.

Durch den Einsatz von nichtlinearen Speicherdrosseln, variabler Schaltfrequenz und konsequenter Optimierung liegt der Umwandlungswirkungsgrad bei guter Stromqualität trotz der geringen Leistungsklasse des Wechselrichters in einem weiten Bereich deutlich über 95 %.

#### Literatur

- [1] W. Kleinkauf, J. Sachau, H. Hempel  
„Modulare Energieaufbereitung und Anlagentechnik - Strategische Ansätze zur Gestaltung PV-gerechter Systemtechnik“, Themen 92/93, Forschungsverbund Sonnenenergie (1993) 9-16
- [2] P. Zacharias, J. Sachau, A. Engler, B. Kansteiner, T. Krieger, J. Myrzik, F. Raptis, C. Schmitz, P. Strauß  
„Entwicklung von PV-Versorgungsanlagen mit modularer Systemtechnik“, 3. Zwischenbericht, BMBF Förderkennzeichen 0329549A, Kassel (1996)
- [3] P. Zacharias  
„Neue Entwicklungen in den Bereichen passive Bauelemente und Integration von intelligenten Leistungshalbleitern“, 4. Workshop Forschungsverbund Sonnenenergie, Kassel (1996), in Druck
- [4] Kwang-Hwa Liu, F. C. Lee  
„Topological Constraints on Basic PWM Converters“, Power Electronics Specialists Conf. (1988) 164
- [5] J. Myrzik  
„Innovative Ansätze zu Wechselrichter-Topologien und weichem Schalten“, 4. Workshop Forschungsverbund Sonnenenergie, Kassel (1996), in Druck
- [6] D. Schekulin, A. Bleil, C. Binder, A. Zahir  
„Entwicklung eines modulintegrierbaren Kleinwechselrichters“, Abschlußbericht, Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Förderkennzeichen: A00006594, (1996)
- [7] D. Schekulin  
„Modularer transformatorloser Wechselrichter für Inselnetze und Verbundnetz-kopplung“, 4. Workshop Forschungsverbund Sonnenenergie, Kassel (1996), in Druck
- [8] W. Kleinkauf, F. Raptis  
„Elektrifizierung mit Hybridanlagen – Einsatz erneuerbarer Energien zur dezentralen, netzkompatiblen Stromversorgung“, Themen 96/97, Forschungsverbund Sonnenenergie (1997)

*Bei komplizierten saisonalen Verschattungen auf Photovoltaik-Fassaden, wie hier während der Wintermonate am vollautomatischen Parkhaus in Chemnitz, ergeben sich bei einer dezentralen Anlagenverschaltung mit modulintegrierten Kleinwechselrichtern deutlich höhere Energieerträge als bei Anlagenverschaltungen mit zentralen Wechselrichtern (siehe Seite 28).*

