

# Stromversorgung mit erneuerbaren Energien – Dezentrale Strukturen und modulare Systemtechnik –

## Überblick\*

Um dem Sektor Stromverbrauch und seinen hohen globalen Wachstumsraten nachhaltig gerecht zu werden, müssen erneuerbare Energieträger zukünftig verstärkt Beiträge zur Lösung dieser Versorgungsaufgabe leisten. Die Verfügbarkeit von vielseitig verwendbarem Wechselstrom ist dabei für die Entwicklung eines Landes von besonderer Bedeutung.

Ausgehend von üblichen Wechselstromstandards, werden Techniken zur Stromversorgung mit erneuerbaren Energien beschrieben, die sowohl zur Integration in Stromnetze und deren Ausweitung als auch zum Aufbau von separaten Stationen und Inselnetzen geeignet sind. Es wird eine einfach zu entwerfende Anlagenstruktur vorgestellt, die aus verschiedenen Komponenten zur Energieaufbereitung und Speicherung besteht. Sie ist systemgerecht aus modular zu erweiternden und kostengünstig zu produzierenden Bausteinen der Stromversorgung und zugehöriger Kommunikationstechnik zusammengesetzt.

Beispiele zeigen die verbrauchergerechte Gestaltung und den Entwurf von Hybridsystemen und die kostengünstige Wartung dezentral aufgestellter Systeme.

## 1. Einleitung

Wandel zu mehr Nachhaltigkeit kennzeichnet seit einiger Zeit die Energiewirtschaft in den Industrieländern und greift auch auf Schwellen- und Entwicklungsländer über. Diese Situation eröffnet eigentlich beste Möglichkeiten, bisherige Gepflogenheiten und Verhaltensweisen

auch hinsichtlich ihrer langfristigen Eignung zu überprüfen.

Die derzeit laufende Liberalisierung der Energiemärkte erfüllt diese Anforderung nur begrenzt oder erschwert sogar teilweise Fortschritte, die der Nachhaltigkeit im Bereich Energieversorgung dienen. Neben den Faktoren Ökonomie und Versorgungssicherheit müssen auch Ressourcen-, Umwelt- und Klimaverträglichkeit beachtet werden. Auf breite Zustimmung stößt prinzipiell auch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, da sie zumindest langfristig in der Lage ist, wesentliche Beiträge zur weltweiten Energieversorgung zu leisten und aus Gründen der Nachhaltigkeit auch leisten muß [1].

Die Frage, welche Maßnahmen diesen Vorstellungen zum Wandel in der Energieversorgung am ehesten gerecht werden, wird jedoch sehr unterschiedlich beantwortet. Zweifellos bedarf es energiepolitischer Rahmenbedingungen, die in den Wettbewerb um Märkte Zukunfts- und Vorsorgeaspekte auf nationaler, europäischer und globaler Ebene einbringen. Weiterhin müssen natürlich geeignete Umwandlungstechniken zur Nutzung erneuerbarer Energiepotenziale zur Verfügung stehen. Diese Energiewandler sollen sowohl den Anforderungen der Verbraucher, den besonderen Eigenschaften der Primärenergie (Sonnen-, Windenergie usw.), der Eingliederung in bestehende Versorgungssysteme sowie den ökologischen und ökonomischen Bedingungen gerecht werden.

Im vorliegenden Bericht wird auf entsprechende Strukturen und technische Fähigkeiten von Anlagen und Komponenten zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen eingegangen.

Prof. Dr.-Ing.  
Werner Kleinkauf  
Universität Gh Kassel  
Wilhelmshöher Allee 73  
D-34119 Kassel  
wkleinkauf@iset.uni-kassel.de

### Co-Autoren:

Dr. Bruno Burger,  
ISET

Dipl.-Ing.  
Günther Cramer,  
SMA Regelsysteme  
GmbH  
Hannoversche Str. 3  
D-34266 Niestetal

Dipl.-Ing.  
Oliver Haas  
Universität Gh Kassel  
Wilhelmshöher Allee 73  
D-34119 Kassel

Dipl.-Ing.  
Philipp Strauß  
ISET

\* Die in diesem Artikel dargestellten Ergebnisse und Erkenntnisse gehen aus Arbeiten hervor, die vom BMBF bzw. BMWi/BEO, der EU und SMA Regelsysteme GmbH gefördert wurden.

Dabei konzentrieren sich die Ausführungen auf Systeme zur Stromversorgung, den weltweit wohl am stärksten steigenden Energiesektor (s. Abb. 1). Denn Verfügbarkeit elektrischer Energie ist aufgrund ihrer vielseitigen Verwendbarkeit für die Entwicklung und die Wettbewerbsfähigkeit eines Landes unverzichtbar.

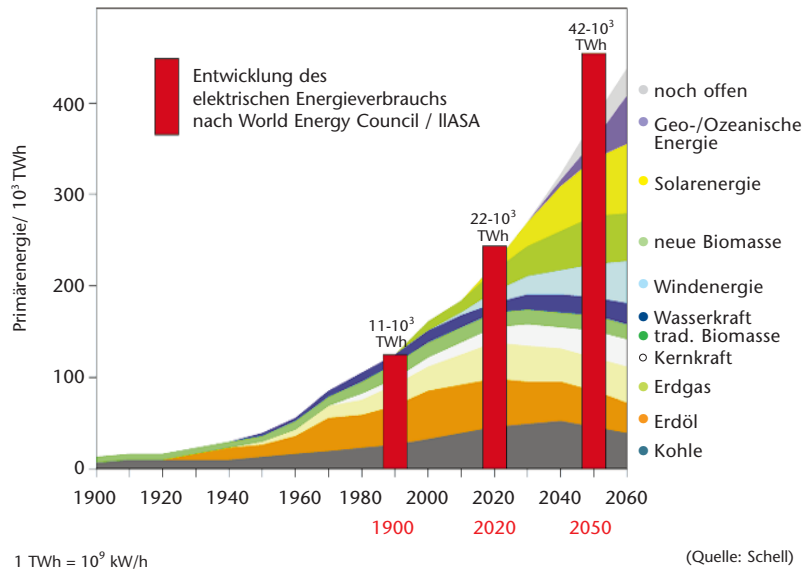


Abbildung 1  
Denkbare Entwicklung des Weltprimärenergieverbrauchs

Die hier beispielhaft herausgegriffene Prognose (vergl. auch [1]) der weltweiten Steigerung des Stromverbrauchs von derzeit 14.000 TWh auf 22.000 TWh in 2020 und auf 42.000 TWh in 2050 beruht überwiegend auf den Wachstumsraten in Schwellen- und Entwicklungsländern. Zur Verminderung der damit verbundenen Umweltbelastungen sowie zur Förderung sozialer und ökonomischer Entwicklung und Erschließung neuer Märkte kommt der Anwendung regional verfügbarer, erneuerbarer Energiequellen große Bedeutung zu.

## 2. Standards zur Stromversorgung

Der Einsatz erneuerbarer Energiequellen wird wesentlich erleichtert, wenn bewährte technische Standards des Aufbaus und der Erweiterung von Stromversorgungssystemen so weit wie möglich übernommen oder so angepaßt werden, daß keine Einschränkungen bei der Verwendung hinzunehmen sind.

## 2.1 Vorzüge des Wechselstroms

Die weit überwiegende Anzahl elektrischer Geräte ist zugeschnitten auf einen Anschluß an eine sinusförmige ein- oder dreiphasige Wechselspannung nahezu konstanter Höhe und Frequenz. Dies wird sich auch in Zukunft nicht ändern, denn die üblichen Charakteristika und Standards haben folgende, positive Eigenschaften:

- Wechselspannung allgemein ist leicht transformierbar in unterschiedliche Spannungshöhen (im Gegensatz zur Gleichspannung).
- Sinusförmige Wechselspannung hat eine elektrodynamisch unveränderbare Kurvenform trotz differenzierender bzw. integrierender Baugruppen und Übertragungssysteme.
- Symmetrische, dreiphasige Wechselspannung hat einen zeitlich konstanten Leistungsfluß (vergleichbar mit Gleichspannung) geeignet zur Energieübertragung (mittlerer und großer Leistungen) und zur Versorgung von rotierenden Maschinen.
- Nahezu konstante Spannung u. Frequenz sind unverzichtbare Bedingungen für den Anlagenparallel- und Netzverbund-Betrieb. Übliche Werte im Haushalts- und Kleingewerbebereich sind: 230 V / 400 V (einphasig / dreiphasig, + 6%, -10%, bzw. ± 10%), und 50 Hz (± 1%).

Je nach zu übertragender Leistung und zu überbrückender Entfernung werden andere Spannungsebenen verwendet. Gleichstromsysteme sind dagegen nur zur Energieversorgung mit sehr kleinen Leistungen oder für den Transport bzw. die Übertragung extrem großer Leistungen (z. B. Hochspannungs Gleichstromübertragung (HGÜ) im Giga-Watt-Bereich) von Bedeutung.

## 2.2 Bausteine zum Aufbau von Wechselstromsystemen

Autonome Versorgungssysteme können zu Inselnetzen zusammengefaßt oder an Verbundnetze angeschlossen werden. Dazu ist es sinnvoll, die verschiedenen Anlagen hinsichtlich ihrer Aufgaben und Eigenschaften in drei Klassen einzuteilen:

1. Sogenannte netzbildende Elemente müssen in der Lage sein, die geforderte Leistung abzudecken und zusätzlich vorgegebene Werte für Frequenz und Spannung exakt einhalten.
2. Von netzspeisenden Elementen zur Spannungs- und Frequenzstützung wird erwartet, daß sie geregelt Wirk- und/oder Blindleistung (notwendig zur Spannungshaltung) liefern.
3. Das Gesamtversorgungssystem muß schließlich so ausgelegt sein, daß von einfachen netzspeisenden Elementen zur Energielieferung unregelmäßige Wirk- und Blindleistungsbeiträge eingebracht werden können.

Das Zusammenwirken von mehreren Versorgungssystemen zu einem Anlagenverbund läßt sich, wie bei der Netzregelung üblich, dann über Kennlinien (Statiken) gestalten. Diese Statiken dienen der Lastaufteilung sowie der Frequenz- und Spannungshaltung, z.B. entsprechend der Primär-Regelung von Netzen. Daneben sind auch spezielle Regelungsalgorithmen für den Parallelbetrieb von Anlagen anzuwenden bzw. müssen noch auf die gerätetechnischen Gegebenheiten – insbesondere bei leistungselektronischen Einheiten – zugeschnitten werden [2].

## 3. Strukturen und Klassifizierung der Technik

Die Anwendungsbereiche von erneuerbaren Energien zur Wechselstromversorgung können in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- Einspeisung in Netze und
- Übernahme von Elektrifizierungsaufgaben.

Anlagen zur Stromerzeugung mit erneuerbaren Energiequellen müssen Eigenschaften besitzen,

die grundsätzlich zur Versorgung von elektrischen Geräten benötigt werden, dazu gehören:

- übliche gerätetechnische Anschlußwerte, d.h. sinusförmige Wechselspannung konstanter Höhe und Frequenz,
- lastgerechte Dynamik und Leistungsverfügbarkeit,
- ausbaufähige Anlagentechnik und
- angemessener Preis.

Für den Ingenieur stellt sich damit die Kernfrage: Wie muß die Anlagentechnik gestaltet sein, daß sie sowohl den Anforderungen der Elektrifizierung als auch der Einbindung in Versorgungsnetze gerecht wird?

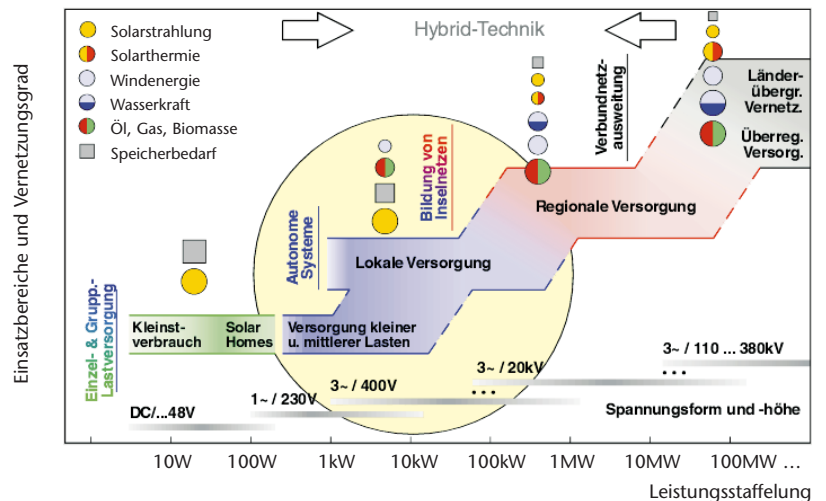


Abbildung 2  
Technik zur elektrischen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien – Energieträger, Leistungs- sowie Einsatzbereiche und Vernetzungsgrad (Ergänzung von [3])

Die elektrische Wechselstromversorgung läßt sich verbrauchsorientiert nach Leistungsklassen und Spannungsebenen staffeln (Abb. 2) [3] und reicht von der überregionalen Verbundebene mit Anlagen im 1000-MW-Bereich auf Hochspannungsniveau über regionale Vernetzung mittlerer Spannungshöhe bis hin zu lokalen Angeboten mit der Bildung von Niederspannungs-Inselnetzen und der Versorgung einzelner Lasten im unteren kW-Bereich.

Die Gleichstrombereitstellung nimmt dabei zweifellos eine Sonderstellung ein und bleibt sehr kleinen Lasten im Watt-Bereich vorbehalten, wie z.B. der Versorgung von speziellen Kleingeräten oder der Beleuchtung von kleinen Häusern oder Wohnungen in Entwicklungsländern mit sogenannten Solar-Home-Systems.

Sie setzen sich z. Zt. besonders erfolgreich durch und bilden eine Vorstufe der Elektrifizierung im konsumtiven Bereich (Licht, Radio usw.). Sie erfüllen aber nicht die Ansprüche an eine universell geeignete, ausbaufähige Stromversorgung.

Beachtet man die speziellen Eigenschaften und derzeitigen Kosten verschiedener Energieumwandlungsverfahren, dann ergibt sich, daß z.B. die Nutzung der Solarstrahlung mit photovoltaischen Zellen, die PV-Technik, vornehmlich bei kleinen Leistungen und dezentralen Anwendungen besondere Stärken hat. Natürlich muß in den meisten Fällen dann ein elektrischer Speicher, s. *Abb. 2*, eine Batterie, oder sogar ein öl- oder gasgefeuertes Aggregat ergänzt werden, um zeitlich unabhängig Leistung verfügbar zu haben. Bei steigendem Leistungsbedarf kommen dann z.B. Windenergieanlagen oder noch größere Einheiten wie solarthermische Kraftwerke und natürlich auch Wasserkraftanlagen hinzu.

Bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen spielen zwei Bereiche eine herausragende Rolle:

- die Einspeisung in vorhandene Netze sowie deren Ergänzung und
- die Bildung autonomer Versorgungsstationen, deren Erweiterung zu Inselnetzen und Übergängen zu regionalen sowie überregionalen Strukturen.

Interessante Aspekte eröffnen dabei sowohl die Erschließung großer Potenziale mit Maßnahmen zum Leistungsausgleich durch weiträumige Vernetzung (länderübergreifender Verbund: z.B. die Verbindung leistungsstarker Windparks im Süden Europas mit Wasserkraftanlagen in Norwegen [4]) als auch die Bildung von erweiterbaren, netzkompatiblen Stationen zur Elektrifizierung. Der weiträumige, durchaus vielversprechende Verbund leistungsstarker Versorgungssysteme (Wind, Wasser, Solarthermie u. a.) ist vornehmlich eine strategische Aufgabe überregionaler Versorgungsunternehmen. Er erfordert geeignete Netzstrukturen und ein speziell abgestimmtes Management, z. B. für die Windenergienutzung im Off-Shore-Bereich.

Die Gestaltung von Anlagen zur autonomen Stromversorgung und Bildung von Inselnetzen umfaßt dagegen nahezu alle Möglichkeiten der Stromversorgungstechnik allgemein und erfüllt daher auch die Voraussetzung zur Integration von Anlagen in vorhandene Netze unterschiedlicher Leistungsklassen.

Der in *Abb. 2* mit einem Kreis gekennzeichnete mittlere Bereich, die lokale Elektrifizierung entlegener Gebiete, stellt also eine besonders interessante und große Herausforderung dar. Dieser stark expandierende Markt ist heute üblicherweise noch Diesellaggregaten vorbehalten, eignet sich jedoch wegen der Dezentralität und den relativ hohen Stromgestehungskosten ausgezeichnet für den Einsatz erneuerbarer Energien.

## 4. Anlagen- und Kommunikationstechnik

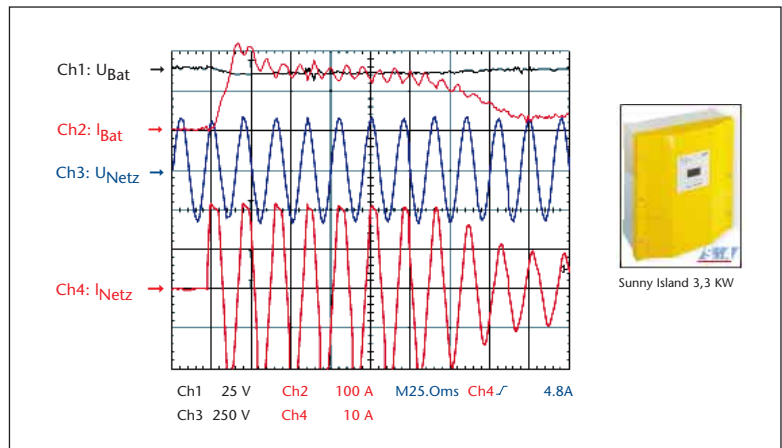
Die dezentrale Verfügbarkeit erneuerbarer Energien – insbesondere von Solar- und Windenergie – spiegelt sich auch in der Anlagentechnik und deren räumlicher Verteilung wieder. Im Verhältnis zur konventionellen Kraftwerkstechnik handelt es sich oft um verhältnismäßig kleine Leistungseinheiten, die in der Nähe zum Abnehmer (Verbraucher oder Netz) angeordnet sind. Die flächenproportional anfallende Leistung und die vielschichtigen Anwendungsmöglichkeiten geben besonderen Anlaß, über eine Anlagenstruktur nachzudenken, die sowohl den Eigenschaften der erneuerbaren Energien, den vielfältigen Einsatzbereichen als auch einer Serienfertigung gerecht wird. Besondere Vorteile sind dabei durch eine Modularisierung [5] zu erreichen, die aufgabenorientiert sein sollte, um durch Flexibilität in der Anlagengestaltung den oben genannten Standards zur Stromversorgung entsprechen zu können. Es kommt insgesamt also darauf an, eine Systemstruktur zu entwickeln, die aus miteinander kombinierbaren, kostengünstigen Bausteinen zur Wechselstromversorgung besteht.

## 4.1 Anlagentechnik

Eine einfache Kombination setzt sich z. B. aus zwei Grundbausteinen zusammen: Einem modular erweiterbaren Photovoltaikgenerator als Energielieferant zur Wechselstromerzeugung und einem Batteriemodul mit Wechselrichter zur Netzbildung (Abb. 3). Diese beiden in Großserien herstellbaren Bausteine bilden, über definierte Schnittstellen zur Energie- und Signalübertragung gekoppelt, eine Basiskonfiguration zur photovoltaischen Wechselstromversorgung.

Der Funktion des Batteriewechselrichters kommt dabei besondere Bedeutung zu, denn er hat den Netzstandard zu garantieren, die Batterie zu überwachen und zu führen sowie sich als modularer Baustein so in die Versorgungsstruktur zu integrieren, daß er den Anforderungen eines Verbundbetriebes gerecht wird. Abb. 4 zeigt in Form des Strom- und Spannungsverlaufs die Reaktion eines derartigen Wechselrichters auf die Zuschaltung einer motorischen Last. Dieser Wechselrichter wurde in Kooperation zwischen dem Solarinstitut ISET, der Universität Kassel und der Firma SMA entwickelt [6] und wird ein Kernbaustein für kleine, netzkompatible Versorgungsstationen und Inselnetze sein.

Ausbaufähig ist eine solche Modulstruktur durch Einbindung von Verbrennungsaggrega-



ten zur Leistungssicherung oder auch durch andere Stromerzeuger wie Windenergieanlagen.

Durch diese strikte, auf der Wechselstrom-Seite gekoppelte Komponentenstruktur ergibt sich eine Vielzahl von Vorteilen:

- für den Anlagenentwurf,
- die Erweiterbarkeit,
- die Sicherheit,
- Standardisierbarkeit,
- für die Möglichkeit der Qualitätssicherung
- sowie der Serienfertigung.

Damit ist ein erhebliches Kostenreduktionspotenzial verbunden.

Abbildung 4 Batterie mit Wechselrichter zur Netzbildung – Strom- (I) und Spannungsverlauf (U) beim Einschalten eines 1,5-kW Kompressors

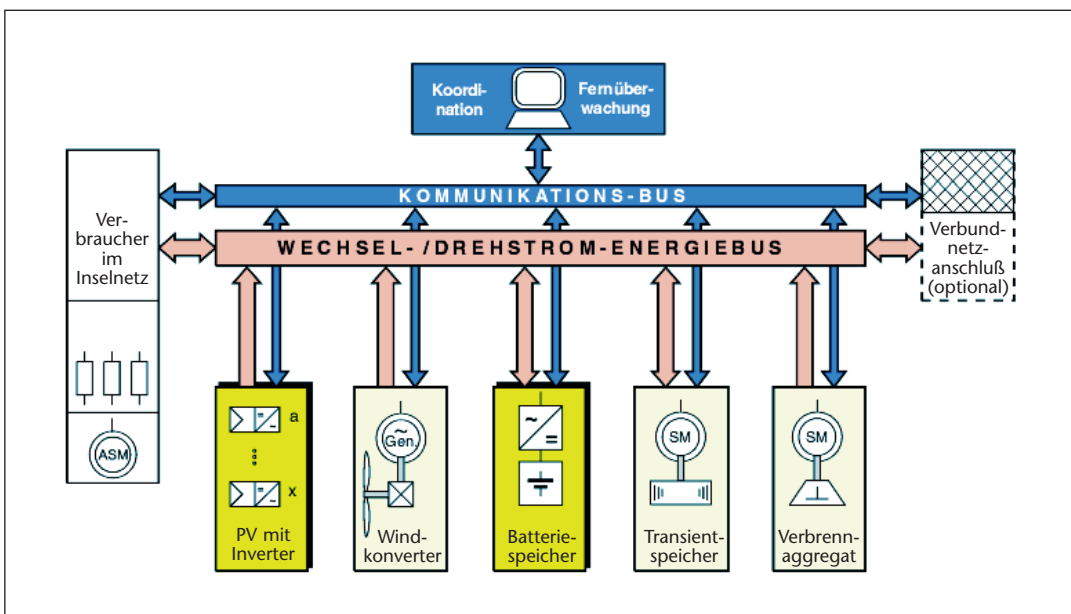


Abbildung 3 Dezentrale Stromversorgung – Modulare netzkompatible Hybridanlagentechnik mit standardisierten Systembausteinen (Stromversorgungs-Baukasten)

## 4.2 Kommunikationstechnik

Die bei den erneuerbaren Energien übliche und zu bevorzugende dezentrale Anlagentechnik erfordert neue, kostengünstige Strukturen für die Kommunikation. Aber auch die wachsenden Anforderungen an Versorgungssysteme im liberalisierten Markt führen zu einem erhöhten Kommunikationsaufwand und bedingen die Einführung intelligenter Energieverteilssysteme [7].



Abbildung. 5: Kommunikation in der Energieversorgung – Strukturen und Aufgaben

In Abb. 5 sind drei Ebenen der Kommunikation dargestellt. Neben der energieseitigen Kopplung von Anlagen über den Wechselstrom Energiebus bedarf es zur Komponenten- und Anlagensteuerung noch einer internen Kommunikations-Struktur zwischen den einzelnen Bausteinen. Auf dieser unteren Ebene der Kommunikation im Bereich der Anlagentechnik steht die Übermittlung von Schaltbefehlen und die Erfassung der Betriebsdaten von Versorgungskomponenten im Vordergrund. Dazu gehören Meldungen, über Betriebszustände sowie Netzgrößen (Spannung, Frequenz, Wirk- und Blindleistungen) und für den Anlagenbetrieb relevante Kenngrößen (z. B. Speicherinhalt, Solarstrahlung, Windstärke etc.). Wenn die Entfernung der Datenübertragung nicht zu groß ist (<1 km), können hier einfache Übertragungssysteme (sogenannte Feldbusse) zum Einsatz kommen.

Insbesondere eignen sich die standardisierten und am Markt eingeführten Installationsbusse [8], z.B. für die Integration in vorhandene Gebäudeautomationssysteme.

In dezentralen und autonomen Systemen kommunizieren die Versorgungskomponenten untereinander und mit einer lokalen Betriebsführung, die bei einem regionalen Netzverbund auch die Verbindung zur mittleren, der regionalen Ebene ermöglicht.

Bei der Entwicklung der Komponenten sollte auf die Dialogfähigkeit besonderer Wert gelegt werden. Damit sich Einheiten unterschiedlicher Hersteller auf einfache Weise miteinander verknüpfen lassen, wären auch die Standardisierung von Schnittstellen und die Definition der Leistungsfähigkeit und "Intelligenz" besonders wertvoll. Grundsätzlich sollte eine dezentral eingesetzte Versorgungsanlage so ausgelegt sein, daß sie auch ohne Signale einer übergeordneten Betriebsführung funktionsfähig bleibt.

In der mittleren Ebene, der regionalen Netzleittechnik, geht es im wesentlichen um die Übermittlung von Netzdaten an eine zentrale Netzleitstelle, das Senden von Steuerbefehlen an Trafostationen und Netzschaltstellen sowie von Sollwertvorgaben an die untergeordneten Betriebsführungen in der Komponentenebene. Während Netzschaltbefehle in der Regel ereignisgesteuert und ohne Verzögerung gesendet werden müssen, ist für die Meßdatenerfassung bereits ein 10-Minuten-Takt ausreichend. Auch die Weitergabe von Sollwerten an die Betriebsführungseinheiten der Komponentenebene erfordert keine hohe Taktfrequenz. Auf der regionalen Ebene sind für die Signalübertragung aufgrund großer Entfernungen Weitverkehrstechniken erforderlich. Typischer Weise werden hier Signalkabel, Funk- aber auch Powerline-Übertragungstechniken (Datenübertragung auf dem Schirm von Energiekabeln, Rundsteuerungssignale) eingesetzt.

In der oberen Ebene, der zentralen Netzleitstelle, stehen hauptsächlich planende und überwachende Aufgaben im Vordergrund. Dazu sind ungefähr im Stundentakt Betriebsdaten der Versorgungskomponenten notwendig.

Schalthandlungen werden in der oberen Ebene normalerweise nicht ausgeführt, stattdessen wird, durch entsprechende Parameterangaben des Netzbetriebs, die zugehörige regionale Verteilungsebene zu den Schalthandlungen veranlaßt. Aufgrund der häufig sehr großen Entfernungen kommen hier Datenfernübertragungen über Signalkabel oder Satellitenverbindungen zur Anwendung.

Die wiedergegebene Kommunikationsstruktur entspricht im wesentlichen auch den jetzigen Gegebenheiten in der Energiewirtschaft. Bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen sind jedoch verstärkt die Dezentralität und die verhältnismäßig geringen Leistungseinheiten der Stromerzeuger zu berücksichtigen. Um hier zu einer wirtschaftlichen Basis zu kommen und die Anlagen kostengünstig überwachen und Fehler erkennen sowie Komponenten warten und reparieren zu können, wird der Einsatz modernster Fernwirk- und Überwachungssysteme, z. B. von einer zentralen Leitstelle aus (Abb. 6), unerlässlich sein. Dies hat natürlich auch Auswirkungen auf die Auslegung der Anlagen und Komponenten. Sie müssen in besonderem Maße dialogfähig sein.

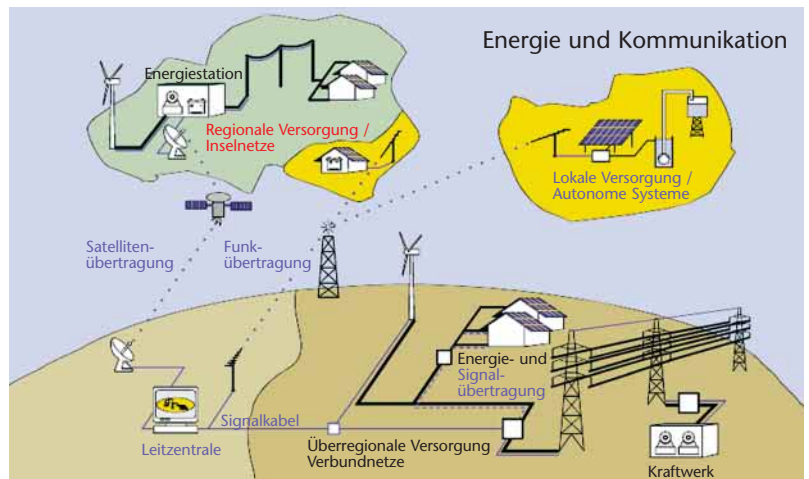


Abbildung 6  
Überwachung und Steuerung verteilter Energiesysteme

## 5. Beispiele zum Aufbau von Stromversorgungssystemen

Eine extremes Beispiel der Modularisierung stellt die 1-MW-Photovoltaik-Anlage der Fortbildungsakademie in Herne dar [9]. Insgesamt 569 auf dem Dach installierte 1,5-kW-Wechselrichter (Abb. 7) des Typs Sunny Boy der Firma SMA-Regelsysteme wandeln den Gleichstrom der nach architektonischen Gesichtspunkten

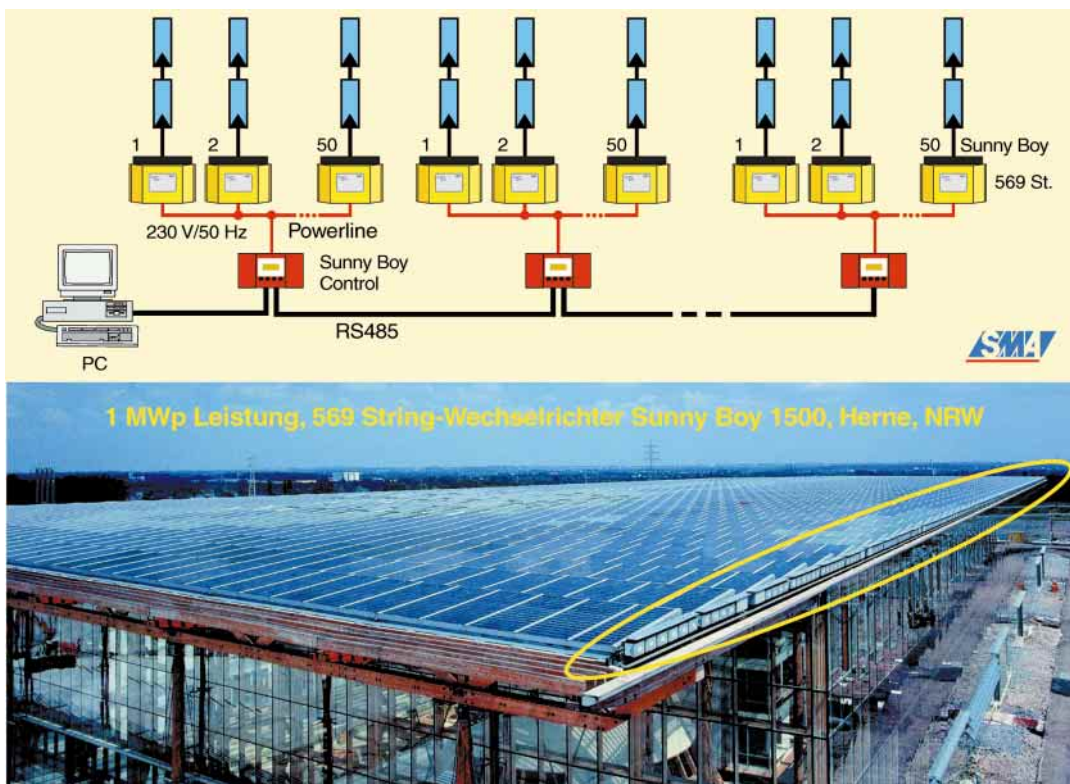


Abbildung 7  
1-MWp-PV-Anlage der Fortbildungsakademie in Herne mit Anlagenstruktur

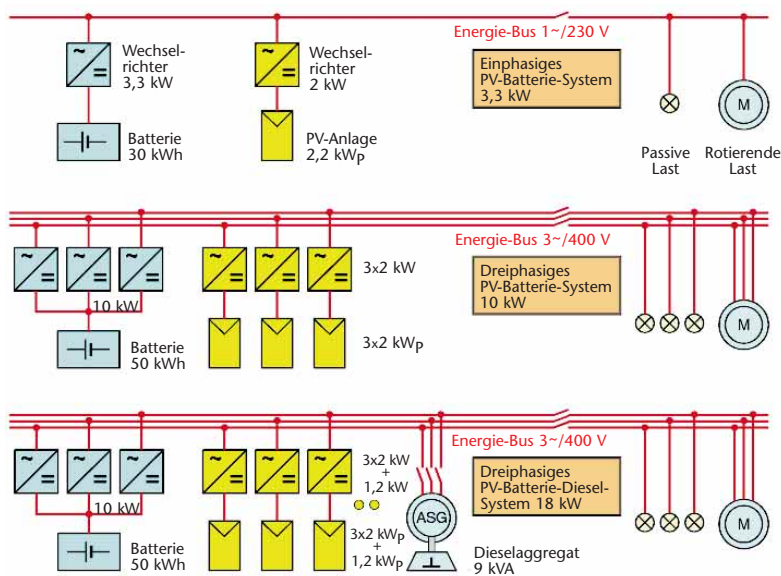


Abbildung 8  
Strukturen zur dezentralen Energieversorgung auf der griechischen Insel Kythnos

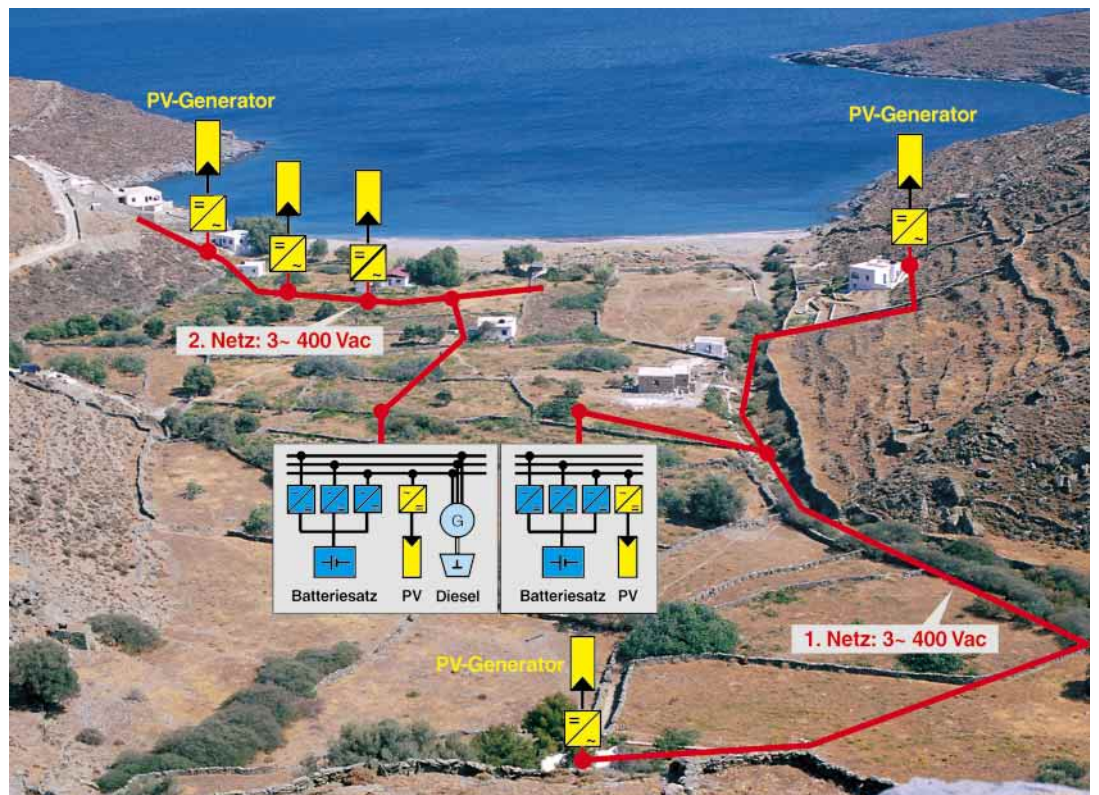
auf dem Gebäude verteilten PV-Module in Wechselstrom um und speisen ihn in das öffentliche Netz ein. Mit dieser modularen Struktur ist auch eine entsprechende sektorale Betriebsdatenerfassung und -übertragung verbunden. Die erfassten Meßdaten von bis zu 50 Sunny Boys werden gemeinsam mit der

Energie auf der Netzleitung (Powerline-Kommunikation) zu einer Einheit zur Datenaufbereitung vom Typ Sunny Boy Control übertragen und von dort an eine computerbasierte Anlagenüberwachung weitergeleitet. Insgesamt ein Projekt, das angepaßt an die flächige Energiesammlung durch Photovoltaik-Module den Vorteil einer modularen Gestaltung der Anlagensystemtechnik eindrucksvoll demonstriert.

Das zweite Beispiel greift die große, weltweite Herausforderung der Elektrifizierung entlegener Gebiete auf. Im Rahmen eines EU-Projektes werden auf der griechischen Insel Kythnos [8] drei verschiedene Versorgungssysteme aufgebaut (Abb. 8). Zwei Systeme basieren auf einer Kombination von Photovoltaik und Batteriespeicher. In ein weiteres wird zusätzlich ein Dieselaggregat integriert.

Die einphasige Wechselstromanlage versorgt einen einzeln stehenden Hof, während die beiden Drehstromsysteme (Abb. 9) jeweils ein Inselnetz bilden, in das verteilt eingespeist wird und an das 4 bzw. 7 Häuser angeschlossen sind. Die drei Anlagen werden im Herbst dieses

Abbildung 9  
Geplante Installation der dreiphasigen Anlagen in der Bucht von Gaidouromandra auf Kythnos





Jahres installiert, und schon beim Entwurf zeigte sich, welche Vereinfachungen durch die Verfügbarkeit von modular kombinierbaren Bausteinen der Energieversorgung zu erreichen sind.

## 6. Schlußfolgerungen

Um dem Gebot der Nachhaltigkeit in der Energieversorgung folgen zu können, müssen in den kommenden Jahrzehnten große Anstrengungen unternommen werden, Energie wesentlich rationeller zu verwenden und verstärkt neue Primärenergiequellen einzuführen, die den ökologischen und ressourcenschonenden Anforderungen gerecht werden. Die erneuerbaren Energien haben dabei eine führende Rolle zu übernehmen. Da dem Sektor der Stromversorgung aufgrund seiner Bedeutung für die Entwicklung eines Landes weltweit die größten Wachstumsraten vorausgesagt werden, kommt ihm besondere Aufmerksamkeit zu.

Neben den Kosten, den Finanzierungsmöglichkeiten und energiepolitischen Rahmenbedingungen wird die Struktur und Anwendbarkeit der Anlagen für die erfolgreiche Einführung von Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen ausschlaggebend sein.

Nachfolgend sind einige Bedingungen für den Einsatz erneuerbarer Energien aus systemtechnischer Sicht heraus aufgelistet. Sie betreffen sowohl die Technik an sich, als auch notwendige Maßnahmen zur Weiterentwicklung und gehen auf die Herausforderung weltweiter Elektrifizierung ein:

- Dezentrale Strukturen der Stromerzeugung und Fernwirkssysteme begünstigen den Einsatz erneuerbarer Energien.
- Die erfolgreiche Erschließung von Anwendungspotenzialen setzt das Einhalten üblicher technischer Standards (Netzkompatibilität) voraus.
- Eine modular strukturierte, dialogfähige Anlagentechnik (Bausteinprinzip)
  - erleichtert die Nutzung erneuerbarer Energiequellen,
  - ermöglicht die Erweiterbarkeit,

- verbessert die Integrationsfähigkeit (Hybridsysteme, Netze),
- vereinfacht den Betrieb und die Wartung,
- eröffnet vielfältige Anwendungen,
- fördert die Serienfertigung,
- reduziert den Entwurfsaufwand und die Herstellkosten.

Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen zur Weiterentwicklung der Systemtechnik:

- Entwicklung dialogfähiger Komponenten und Systeme nach zu definierenden Standards (Plug&Play-Technik).
- Einbindung moderner Kommunikationstechniken zur Betriebsführung Überwachung, Wartung und Integration dezentraler Anlagentechnik.
- Weiterentwicklung der Hybridanlagentechnik (Baukastenprinzip) gestaffelt nach Leistungsklassen.
- Entwicklung leistungsfähiger Regelalgorithmen für den Parallelbetrieb von Versorgungskomponenten (Stromrichtern).
- Kostenreduktion der Energieaufbereitung durch Entwicklung zugeschnittener Halbleiter zur Steuerung und Leistungsaufbereitung (große Stückzahlen).

Abschließend soll noch eine Maßnahme zur Erweiterung des Anwendungsspektrums herausgestellt werden. Der Einstieg in den Bereich der Elektrifizierung durch Konzentration auf geeignete Zielländer erfüllt die an eine zukunftssträchtige Technik zu stellenden Forderungen nach

- weltweiter Umsetzung gewonnener Erfahrungen und Fortschritte (z. B. des 100.000-Dächer-Programms) und
- Gewinnung neuer, expandierender Märkte. Mit der wachsenden Bedeutung der erneuerbaren Energien ist auch die Beschäftigung mit und in der Energietechnik wieder besonders interessant geworden und eröffnet umfangreiche Perspektiven.

## Literatur

- [1] Bundesumweltministerium  
(Herausgeber): Erneuerbare Energien und Nachhaltige Entwicklung. 2. Auflage, Berlin, Oktober 1999.
- [2] A. Engler: Regelungstechnische Aspekte des Parallelbetriebs von Stromrichtern.  
In: Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Tagungsband `99. ISET, Kassel 1999.
- [3] W. Kleinkauf, F. Raptis, O. Haas: Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien – Hybridanlagen zur dezentralen, netzkompatiblen Stromversorgung.  
In: Forschungsverbund Sonnenenergie Themen 96/97, Forschungsverbund Sonnenenergie, Köln 1997. ISSN 0939-7582.
- [4] G. Czisch, M. Durstewitz, M. Hoppe-Kilpper, W. Kleinkauf: Windenergie gestern, heute und morgen.  
In: Husum Wind 1999, Kongreßband, Wellmann & Klein, Husum 1999.
- [5] W. Kleinkauf, J. Sachau und H. Hempel: Modulare Energieaufbereitung und Anlagentechnik – Strategische Ansätze zur Gestaltung PV-gerechter Systemtechnik.  
In: Forschungsverbund Sonnenenergie "Themen 92/93", Forschungsverbund Sonnenenergie, Köln 1993. ISSN 0939-7582.
- [6] B. Burger, P. Zacharias, G. Cramer u. W. Kleinkauf: Hybrid Systems – Easy in Configuration and Application.  
In: Proceedings of the Sixteenth European Solar Energy Conference and Exhibition, May 2000, Glasgow, UK.
- [7] VDE ETG: ETG-Fachbericht Neue Kommunikationstechnologien für den Energiemarkt. VDE Verlag Berlin, Offenbach, 2000. ISSN 0341-3934.
- [8] P. Strauß, R.-P. Wurtz, O. Haas, M. Ibrahim et al.: Stand-alone AC PV Systems and Micro Grids with New Standard Power Components – First Results of two European Joule Projects "PV-MODE" and "MORE".  
In: Proceedings of the Sixteenth European Solar Energy Conference and Exhibition, May 2000, Glasgow, UK.
- [9] G. Cramer: Solarkraftwerk mit modularem Aufbau. In: Elektronik, Heft 19/1999. WEKA Fachzeitschriftenverlag, Poing 1999. ISSN 0013-5658.