

Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien – Hybridanlagen-technik zur dezentralen, netzkompatiblen Stromversorgung

von Werner Kleinkauf
und Fotios Raptis

Überblick

Die elektrische Versorgung entlegener Gebiete und dezentraler Verbraucher stellt eine weltweite Herausforderung dar, die insbesondere Schwellen- und Entwicklungsländer betrifft. Dieser stark expandierende Markt ist heute üblicherweise noch Dieselstationen vorbehalten. Für derartige Versorgungsaufgaben eignen sich im gesamten Leistungsspektrum jedoch auch Hybridanlagen, die erneuerbare Energien wie Solarstrahlung, Wind und Biomasse verwenden. Hierzu sind Probleme der gesicherten Leistungsbereitstellung und der notwendigen Anlagendynamik zu lösen. Im Bericht wird ein Systemaufbau vorgestellt, der auf einer modularen, kostengünstigen Komponentenstruktur basiert, sich an unterschiedliche Verbrauchsanforderungen anpassen, erweitern und auch in vorhandene Versorgungsnetze einbinden läßt. Besondere Beachtung finden die verbrauchergerechte Gestaltung der Hybridtechnik und Übergänge zum Aufbau von Inselnetzen unterschiedlicher Leistungsklassen.

The power supply of remote areas and decentralised consumers is a world-wide challenge of ever increasing importance, which especially concerns developing and threshold countries. This greatly expanding market is still usually reserved for diesel stations. However, hybrid plants fed also from renewable energy sources (solar radiation, wind and biomass) are also suited for such power supply tasks over the whole power range. The technical challenge is to assure power-demand security and dynamic plant performance. A power supply structure based on a modular cost-effective component structure can be easily adapted to satisfy diverse consumer needs and can be expanded and connected to a conventional grid later. Emphasis is put on the consumer-oriented design of this hybrid technology and on the transitional stages in the construction of stand-alone grids for different power ranges.

1. Einleitung

Das stark wachsende Bewußtsein breiter Schichten der Bevölkerung für die Bedeutung der regenerativen Energien zur Lösung vielfältiger Probleme der Energieversorgung ist ein hoffnungsvolles Zeichen für die Zukunft, denn Klimaschutz sowie Umwelt- und Ressourcenschonung sind bei wachsendem Energieverbrauch Aufgaben, die weltweit großes Engagement verlangen. Etwa zwei Mrd. Menschen – ein

Drittel der Erdbevölkerung – haben heute keinen Anschluß an eine elektrische Energieversorgung. Stromversorgungssysteme, die für diesen Einsatz geeignet sein sollen, müssen sich an die lokale Verfügbarkeit der Primärenergie, die Gegebenheiten der regionalen Entwicklung und den steigenden Energiebedarf anpassen lassen.

Für die meisten Industrieländer sind Klimaschutz und Umweltschonung sowie die Schaffung von Optionen zur Minderung der Importabhängigkeit und der Verknappungsgefahr von Energieträgern wichtige energiepolitische Ziele. Zur Lösung dieser globalen Energieprobleme werden Kooperationen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern von großer Bedeutung sein. Entwicklungsländern muß der Zugang zu Techniken zur Nutzung heimischer regenerativer Energiequellen eröffnet werden.

Wie aus der in [Abbildung 1](#) dargestellten Prognose hervorgeht, wird der weltweite elektrische Energieverbrauch – entsprechend seiner Bedeutung für die Entwicklung eines Landes – stark ansteigen und sich bis zum Jahr 2010 um zwei Drittel erhöhen. Fossile Primärenergieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl werden trotz der begrenzten Vorräte selbst über das Jahr 2010 hinaus zunehmend beansprucht. Es ist offensichtlich, daß schnell begonnen werden muß, um zumindest dort eine Entlastung durch regenerative Energien zu erreichen, wo die Wachstumsmärkte liegen. In diesem Bericht werden Möglichkeiten und Methoden dargestellt, die eine umfassende Einbindung regenerativer Energien in die elektrische Energieversorgung aufzeigen. Dabei wird insbesondere auf die Elektrifizierung eingegangen, denn hier können frei vom Verdrängungswettbewerb neue Versorgungsgebiete erschlossen, Zukunftsmärkte vorbereitet und drängende Versorgungsprobleme gelöst werden.

2. Einteilung der Energieversorgungstechnik zur Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien

2.1 Stand und Perspektiven

Die elektrische Versorgung ländlicher und städtischer Gebiete in Entwick-

Prof. Dr.-Ing. Werner Kleinkauf ist Vorstandsvorsitzender des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik (ISET e.V./Kassel) und Leiter des Fachgebiets Elektrische Energieversorgungssysteme der Universität Gh-Kassel.

Dipl.-Ing. Fotios Raptis ist Mitarbeiter der Abteilung Systemtechnik und Koordinator für Hybridsysteme im ISET.

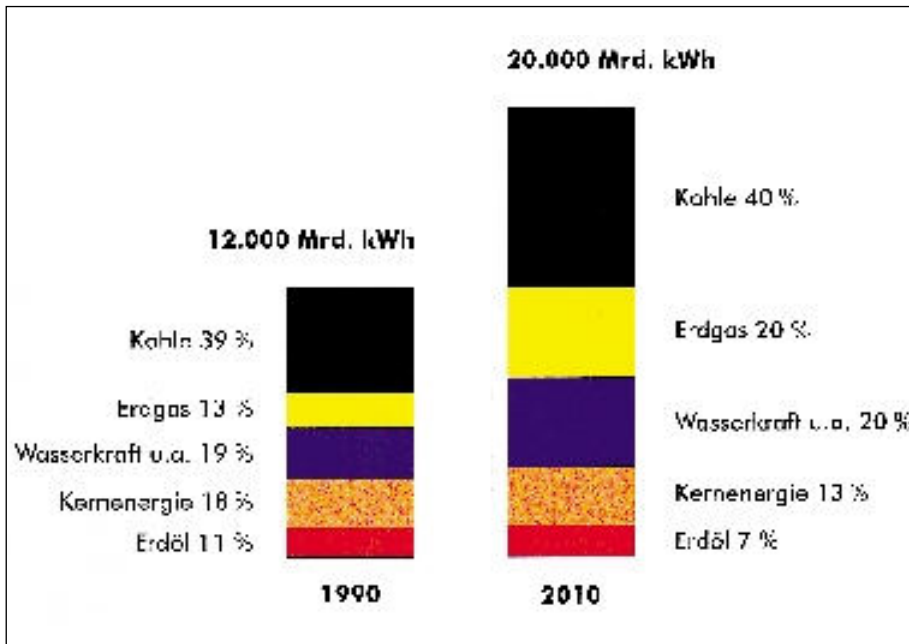
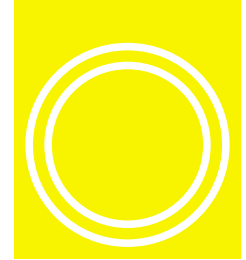
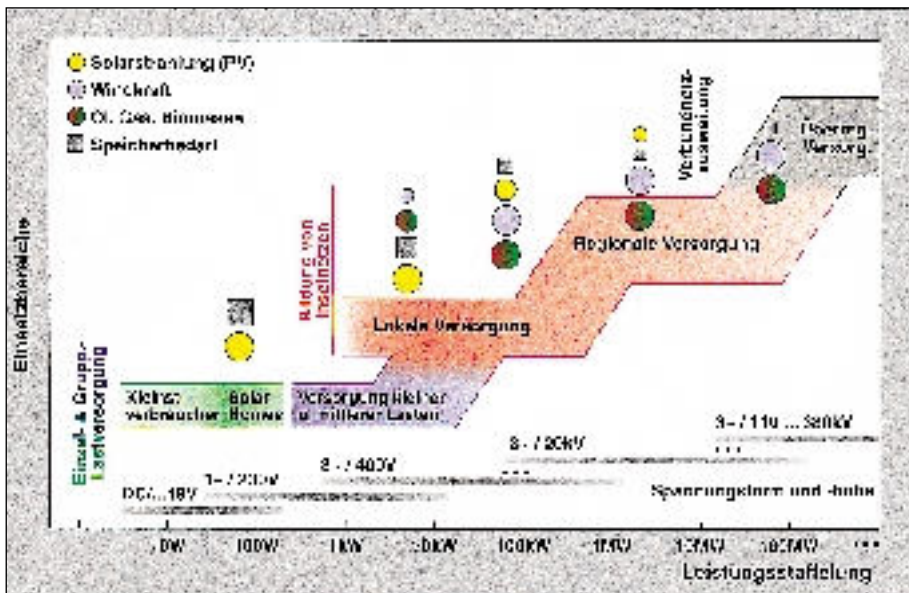


Abbildung 1: Prognosen zur Entwicklung des weltweiten jährlichen Stromverbrauchs, aufgeteilt nach Primärenergieträgern

Abbildung 2: Einteilung der Energieversorgungstechnik zur Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien - Energieträger, Einsatzbereiche und Trends



lungsländern (EL) und Schwellenländern (SL) erfolgt heute vorwiegend

- zentral über die Ausweitung von Verbundnetzen,
- dezentral über regionale Inselnetze sowie
- lokal durch die Versorgung netzferner Verbraucher und Lastgruppen.

Hohe Investitions- und Wartungskosten, die durch große Distanzen und niedrigen Energiebedarf entstehen, sind Gründe, die eine großflächige

Elektrifizierung über Verbundnetze behindern. Der Aufbau von Versorgungssystemen mit zentralen konventionellen Kraftwerken kam – trotz starker Subventionen im Energiesektor – nur schleppend voran und trug zusätzlich zur heutigen Verschuldung in den EL bei.

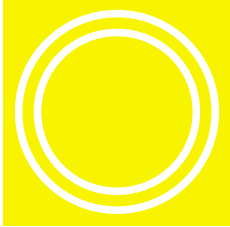
Für die Versorgung entlegener Gebiete werden heute vorwiegend Dieselgeneratoren in unterschiedlichen Leistungsbereichen von einigen kW bis zu einigen MW eingesetzt. In [2] wird

die gesamte installierte Dieselleistung in den EL mit ca. 45 GW angegeben. Auf dezentral angeordnete Einheiten entfallen davon etwa 15 GW. Zu beachten sind hier vor allem Prognosen über den Neubau und Ersatz von Dieselaggregaten mit insgesamt mehr als ebenfalls 15 GW bis zum Jahr 2000.

Die mögliche Anwendungsbreite der regenerativen Energien zur Stromversorgung in EL und SL erstreckt sich, wie **Abbildung 2** zeigt, von der Versorgung alleinstehender Verbraucher und Lastgruppen über die Elektrifizierung lokaler, kommunaler und regionaler Strukturen durch Bildung und Ausweitung von Inselnetzen bis hin zur Ankopplung an überregionale Verbundnetze. Die unter Beachtung technischer und wirtschaftlicher Potentiale vorgenommene Einteilung in Einsatzbereiche enthält Schätzungen der Anwendungspotentiale verschiedener Energieträger für die unterschiedlichen Leistungsklassen. Auf die Einbindung regional durchaus bedeutungsvoller Kombinationen großer Leistung mit Techniken zur Nutzung der Wasserkraft und mit solarthermischen Verfahren wurde hier zur Vereinfachung der Kombinationsmöglichkeiten verzichtet.

Bei der Versorgung von Kleinst- und Kleinverbrauchern hat sich die Photovoltaik in den letzten Jahren etabliert. Mit PV-Modulen, Batterien und Laderegeln aufgebaute „Solar Home-Systeme“ im Leistungsbereich bis ca. 100 W zählen zu den am breitesten eingeführten Anwendungen. Darüber hinaus ergeben sich gerade dort, wo die Dieseltechnik hohe Kosten, technische Defizite und logistische Probleme aufweist, zahlreiche Anwendungsgebiete für die Versorgung von Kleinverbrauchern im Leistungsbereich bis ca. 10 kW, z.B. photovoltaisch gespeiste Pumpen. Zur Bereitstellung größerer Leistung sind bei entsprechend günstigen Bedingungen häufig Windkraft- oder Biomasseanlagen wirtschaftlich besonders interessant.

Generell stellt die dezentrale Elektrifizierung lokaler, kommunaler und regionaler Strukturen durch Bildung und Ausweitung von Inselnetzen weltweit ein Einsatzpotential dar, das eine großmaßstäbliche Einführung der regenerativen Energien verspricht. Der An-



wendungsbereich erstreckt sich von der lokalen Inselnetzversorgung kleiner Gewerbebetriebe und kommunaler Einrichtungen mit Mindestleistungen im kW-Bereich bis hin zur Versorgung städtischer Gebiete und industrieller Regionen in der Größenordnung von einigen 100 MW.

Infolge der großen Anwendungsbreite von Hybridversorgungssystemen haben bisherige Untersuchungen aus dem Bereich der Energie- und Systemanalyse zwar generelle und regionalspezifisch wertvolle, jedoch zur Festlegung von typischen Auslegungsgrößen und verwendungsgerechten Standardkomponenten leider keine hinreichenden Informationen gebracht. Daran ist zu erkennen, daß für eine umfassende technische Umsetzung des Entwicklungspotentials ganzheitliche, systemtechnisch geeignete Konzepte benötigt werden. Hier können konsequente Ansätze zur modularen Gestaltung von Hybridanlagen sowie eindeutige, meist funktionsbedingte Einteilungen der zu verwendenden Komponenten entscheidende Hilfe leisten. Die anwendungsorientierte Skalierung der Technik in **Abbildung 2** läßt unter Berücksichtigung der üblichen Energieübertragungs- und allgemeinen Netzgestaltungsprinzipien auch typische Bereiche und Übergänge der bevorzugt eingesetzten Spannungsform und -höhe erkennen.

Der Umfang, den regenerative Energien bei entsprechender Gestaltung der Anlagentechnik zukünftig auch zur Einspeisung in Verbundnetze leisten können, wird von großer Bedeutung sein. Neben der längst etablierten Wasserkraft mit Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen bis in den GW-Bereich werden hier vor allem die Beiträge der mit Biogas befeuerten Verbrennungskraftmaschinen und der Windkraftanlagen großer Leistung sowie der solarthermischen Großkraftwerke eine besondere Rolle spielen.

2.2 Vorgehensweise

In **Abbildung 3** ist eine Vorgehensweise zur Entwicklung von Versorgungsstrukturen mit folgenden Ausbaustufen [1] dargestellt:

- lokal (z.B. zur Versorgung von Einzelanlagen),

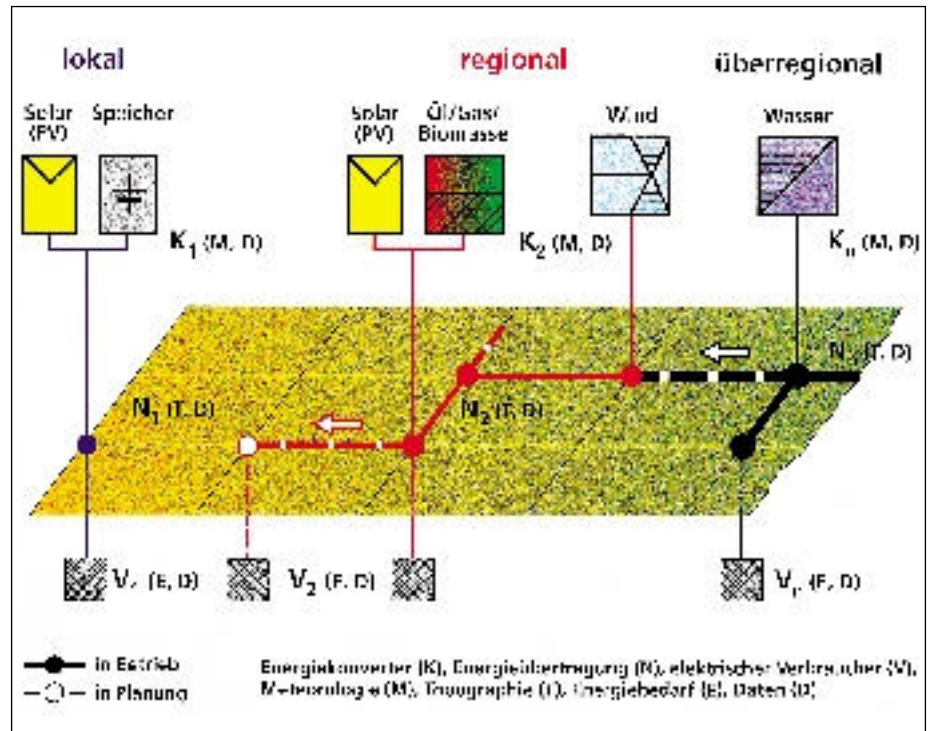


Abbildung 3: Entwicklung von Versorgungsstrukturen zur Elektrifizierung – Dezentrale Anlagentechnik

- regional (z.B. Inselnetze zur Versorgung von kommunalen Einrichtungen, Wirtschaftsbetrieben usw.) sowie
- überregional (Anbindung an das Verbundnetz).

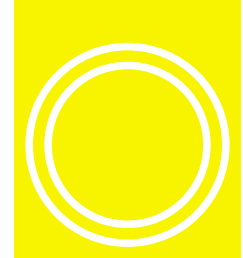
Um verbrauchergerechte Elektrifizierungskonzepte mit regenerativen Energien erstellen und auf ökonomische Weise Versorgungsaufgaben lösen zu können, sind fallspezifische Informationen notwendig. Hierzu zählen:

- Lokale und regionale meteorologische Bedingungen;
- Kenntnisse über Verbrauchs- und Bedarfsstrukturen, über geforderte Energie und Leistung sowie Prognosen zur zukünftigen Entwicklung;
- topographische Daten, Energieübertragungsstrukturen und Netzausweitungsmöglichkeiten;
- Angaben über elektrische Eigenschaften (Nenndaten, Betriebsverhalten, Dynamik) vorhandener und neu integrierbarer Versorgungsanlagen;
- Kosten der Anlagen, der Energieübertragungssysteme sowie Betriebskosten und lokale Vergütungsarten.

Die Möglichkeiten zur Kopplung von Inselnetzen und zur Anbindung an das Verbundnetz setzen eine Reihe von

technischen Anforderungen an den Systemaufbau voraus. Inselstrukturen sollten daher von Anfang an netzanschlussfähig konzipiert und aufgebaut werden. Dies hat positive Auswirkungen auf die Beschleunigung der Vernetzung und insbesondere auf die anfallenden Kosten im gesamten Versorgungsumfeld. Letzteres ist u.a. auf die Reduzierung des Planungs-, Installations- und Wartungsaufwandes durch Verwendung von standardisierten Komponenten, Netzaufbautechniken und Regelungsverfahren zurückzuführen. Darüber hinaus gibt eine netzkompatible Gestaltung von Versorgungssystemen wertvolle, allgemeingültige Richtlinien für den Bau von Komponenten.

Eine umfassende Ausweitung der dezentralen Elektrifizierung führt dann automatisch zur Vernetzung, wenn diese technischen Anforderungen eingehalten und die maßgebenden wirtschaftlichen sowie fallspezifischen Randbedingungen im betreffenden regionalen Umfeld erreicht werden. Generell bleibt festzuhalten, daß die Netzkompatibilität als Grundvoraussetzung für eine freizügige, expansionsfähige Entwicklung und kostengünstige Vernetzung lokaler und regionaler Strukturen zu betrachten ist.



2.3 Aufgaben der Systemtechnik

Die Auseinandersetzung mit bisherigen Elektrifizierungsprogrammen, siehe u.a. [3], weist deutlich darauf hin, daß für eine erfolgversprechende Elektrifizierung sowohl ganzheitliche Vorgehensweisen als auch ausgereifte, standardisierte und verbrauchergerichte Systemtechniken erforderlich sind. Hier ist eine Fülle von Detailproblemen zu berücksichtigen (s. Abbildung 4). Während die Aufgaben der Energiewandlung, -aufbereitung, Regelung und Betriebsführung auf der Komponentenebene einzuordnen sind, beschäftigt sich die Systemebene mit der Erarbeitung ganzheitlicher Systemlösungen und Vorgehensweisen. Dies muß unter Beachtung vielschichtiger Umfeldrahmenbedingungen wie Markt, Einsatzpotentiale, Politik, Ökonomie, Umwelt usw. geschehen.

Von großer Bedeutung ist auch die Einbindung lokaler Entscheidungsträger und Anwender in der projektvorbereitenden Phase, bei der Systemaus-

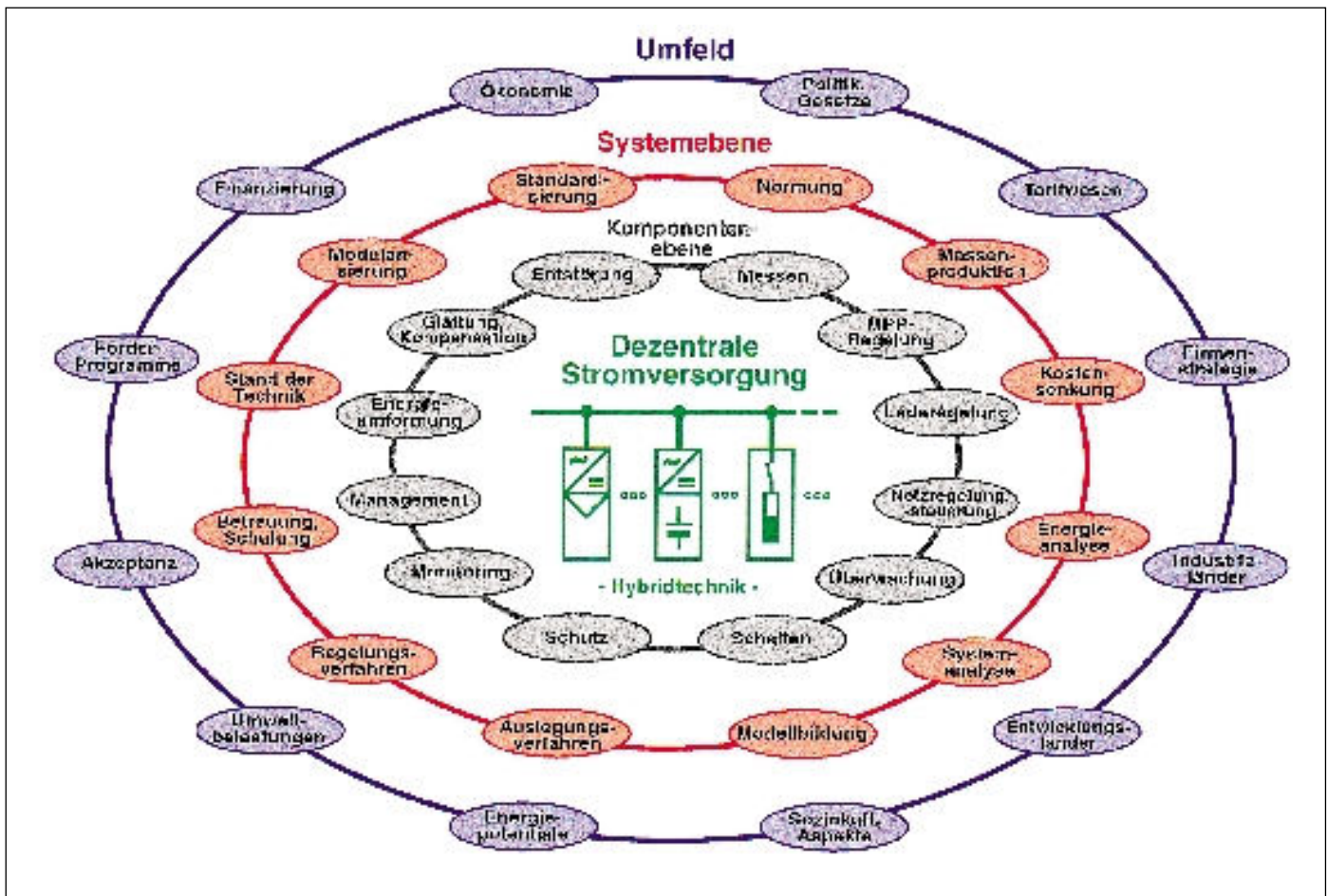
legung bis hin zur Betriebsphase und Wartung der Anlagen. Entscheidende Wirkung auf eine effiziente Nutzung eines Versorgungssystems haben die jeweiligen Betreiber, zu denen Kommunen, Kooperativen, Elektrizitätsunternehmen, private Betriebe usw. gehören können. Den infrastrukturellen Maßnahmen sind u.a. auch Schulung sowie Aufbau lokaler Wartungs- und Produktionsmöglichkeiten für Teilsysteme zuzurechnen. Der Einsatz von Anlagen und Komponenten in EL und SL stellt darüber hinaus hohe Anforderungen an betriebstechnische Eigenschaften, wie Zuverlässigkeit, wartungsarmer Betrieb, einfache Bedienbarkeit sowie robuster Aufbau bei unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen und hohen äußeren Beanspruchungen.

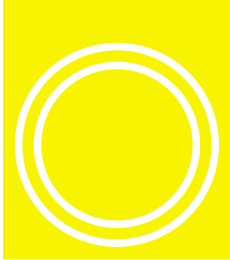
Kernaufgabe und Grundvoraussetzung einer großmaßstäblichen Einführung regenerativer Energien bleibt die Entwicklung und Sicherstellung einer ausgereiften, standardisierten, verbrauchsgerechten und wirtschaftli-

chen Systemtechnik. So setzt ein wesentlich erweiterter Einsatz von Hybridsystemen mit großem regenerativen Energieanteil die Erhöhung der Systemzuverlässigkeit sowie die Anpassungsfähigkeit der Technik bezüglich der Anwendungsvielfalt und des Energie- bzw. Leistungsbedarfs voraus.

Hybridversorgungssysteme werden heute jedoch noch einsatzfallspezifisch konzipiert, als Unikat ausgelegt und gebaut. Daher bilden die Kosten des Engineering und der Systemtechnik einen wesentlichen Anteil der Gesamtkosten. Im Vergleich zu konventionellen Energieversorgungssystemen ist deshalb der Planungs-, Installations- und Instandhaltungsaufwand für Hybridsysteme mit regenerativen Energien unverhältnismäßig hoch. Gerade hier liegen erhebliche Potentiale zur Kostensenkung durch Standardisierung der Systemtechnik. Bei steigender Komplexität einer Hybridanlage – z.B. durch die Einbindung verschiedener Energiequellen – kommt der Systemgestaltung und der regelungstech-

Abbildung 4: Kriterien zur verwendungsgerechten Gestaltung dezentraler Stromversorgungssysteme





nischen Abstimmung der Versorgungskomponenten wachsende Bedeutung zu.

3. Aufbau von Versorgungsstrukturen und Gestaltung von Hybridsystemen

Typischerweise besitzen Anlagen zur Gewinnung elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien aufgrund der schwankenden Leistungsangebote und der hohen Nutzeranforderungen eine komplexe Struktur. Im Vergleich zum gesteuerten Einsatz von speicherbaren, hochkonzentrierten fossilen und nachwachsenden Rohstoffen birgt die Nutzung diskontinuierlich verfügbarer Primärenergieträger eine vielschichtige Problematik in sich. Man steht damit vor der schwierigen Aufgabe, Systeme zur Umsetzung regenerativer Energien ökonomisch und verbrauchergerecht zu gestalten.

3.1 Modularer, funktionsgegliederter Systemaufbau

Der Systemaufbau beeinflusst maßgeblich die Flexibilität, Funktionstüchtigkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit von komplexen Anlagen.

Um Hybridsysteme netzkompatibel zu gestalten, sind hohe, der konventionellen elektrischen Versorgung äquivalente Anforderungen an das Betriebsverhalten wie Frequenz- und Spannungshaltung sowie Oberschwingungsgehalt zu stellen. Üblicherweise wird in der Energieversorgung der Nennwert der Frequenz auf $\pm 1 \dots 6\%$ und der Nennwert der Spannung auf $\pm 10\%$ bei maximal 8% Klirrfaktor gehalten, damit die Funktion der Versorgung gewährleistet ist. Größere Toleranzbereiche sind jedoch in leistungsschwachen Inselnetzen üblich und vertretbar; überregionale Verbundnetze setzen insbesondere bei den Frequenztoleranzen engere Grenzen.

Eine wesentliche Vergrößerung des Anwendungspotentials von Hybridsystemen ist funktionsbezogen zweifellos dann zu erreichen, wenn die Anlagenkonzeption auf einfache Weise sowohl Leistungserhöhung als auch Dynamikanpassung zulässt. Eine modulare Gerätetechnik, die aufgabenspezifisch gegliedert ist, z.B. Einhaltung der Parameter zur Netzbildung, dynamisch

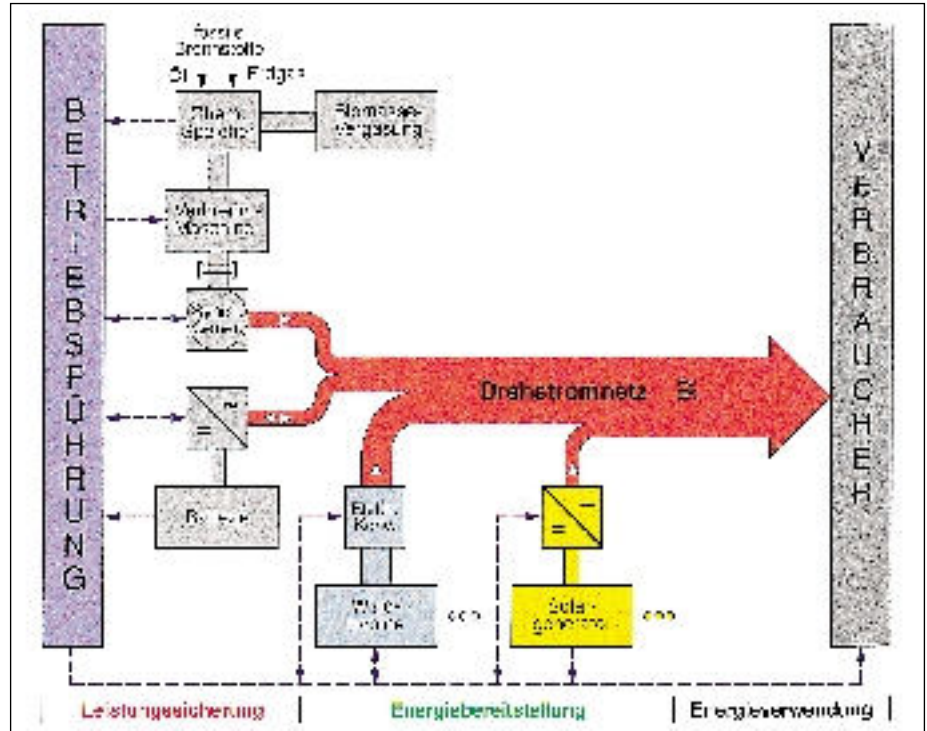


Abbildung 5: Hybridsystem mit Einbindung erneuerbarer Energien – Funktionen und Energieflüsse

sche oder mittelfristige Leistungssicherung usw., eröffnet auch die Möglichkeit eines schrittweisen Ausbaus der Anlage. Im speziellen Einsatzfall kann dann durch Modifikationen im Aufbau eine Fülle von Anpassungs- und Optimierungsaufgaben gelöst werden.

Grundsätzlich lassen sich bei der Gestaltung von Hybridsystemen die drei Aufgaben

- Energiebereitstellung,
- Leistungssicherung und
- Energieverwendung

definieren, denen je nach Eignung unterschiedliche Komponenten zuzuordnen sind. Wie aus [Abbildung 5](#) zu entnehmen ist, können zur Energiebereitstellung Wandler unterschiedlicher regenerativer Energieformen – wie z.B. Windkonverter und in beliebigen Leistungsgrößen skalierbare PV-Generatoren – eingesetzt werden. Um die geforderte Leistungssicherung zu gewährleisten, sind Speicherkomponenten notwendig. Entsprechend ihres dynamischen Verhaltens und ihrer Speicherkapazitäten werden rotierende Massenspeicher im Sekundenbereich, Batterieaggregate im Tagesbereich und Verbrennungskraftmaschinen oder zukünftig Brennstoffzellen im

mittel- und langfristigen Zeitbereich – auch für saisonübergreifende Aufgaben – eingesetzt.

Statische und rotierende Lasten - mit oder ohne Möglichkeiten des Lastmanagements – sowie Komponenten des Verteilernetzes gehören zum Bereich der Energieverwendung. Hierbei sind stabilisierende Eigenschaften wie z.B. Netzstützungsbeiträge von rotierenden Lasten nicht zu vernachlässigen.

Erst bei genügend hohem Modularisierungsgrad ist eine anwendungsgerechte Systemauslegung und wirtschaftliche Lösung der jeweiligen Versorgungsaufgabe möglich. Die in [Abbildung 6](#) dargestellte prinzipielle Gliederung und Modularisierung von Hybridsystemen – bestehend aus Bausteinen und Verbindungsebenen – bietet eine Struktur, die sukzessiv zur Standardisierung, Normung, Massenproduktion und Kostensenkung von Komponenten und gesamten Anlagen führt.

Der Grundansatz der hier verwendeten modularen Gestaltung von Hybridsystemen beruht auf der ausschließlich parallelen Kopplung aller Komponenten nach den weltweit üblichen Wechsel-/ Drehstromstandards, z.B. von 230/400 V, 50 Hz, die als Vorausset-

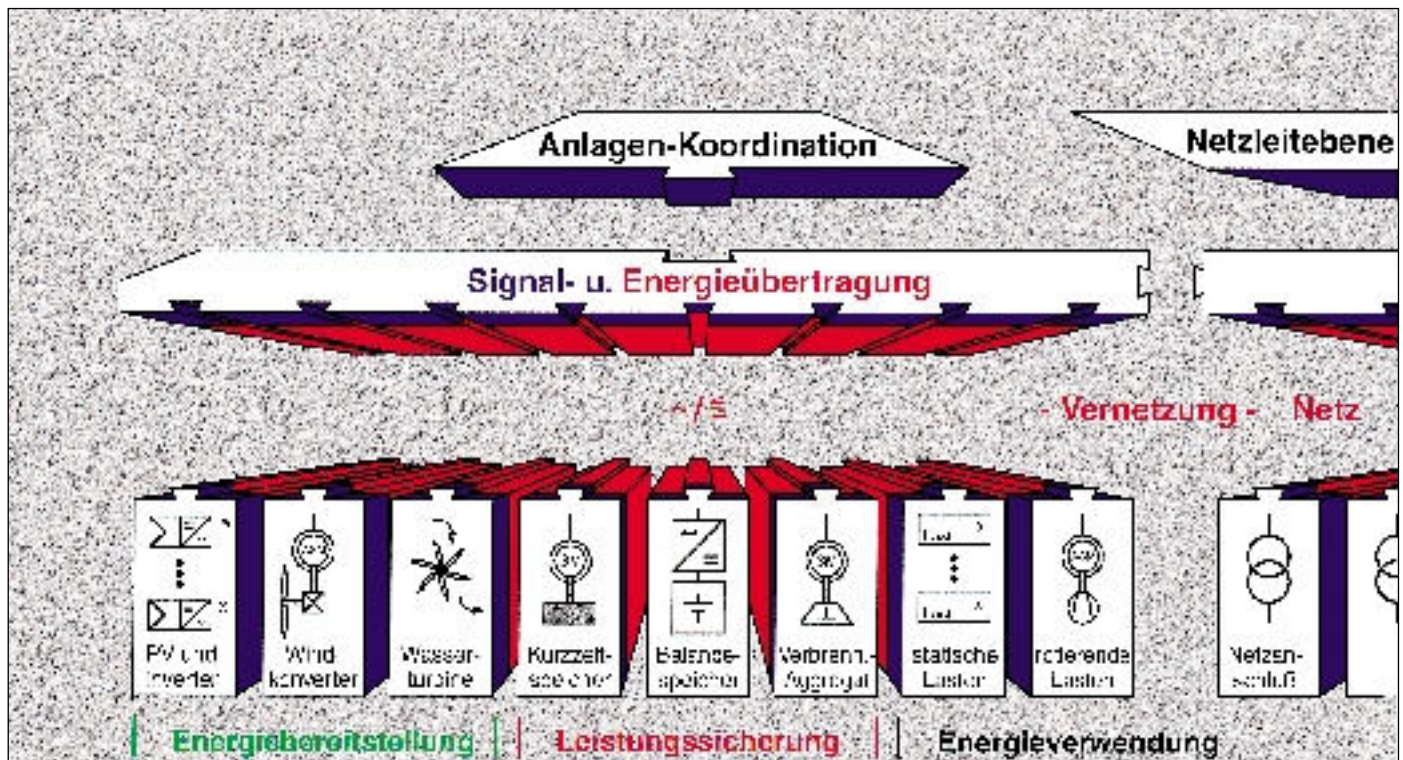
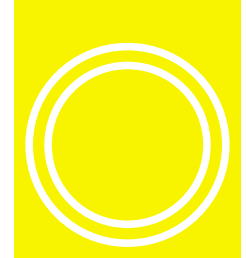


Abbildung 6: Modulare Hybridtechnik zur Stromversorgung – nach Funktionen geordnetes Baukastenprinzip

zung für eine einfache Netzanbindung einzuhalten sind. Bei Versorgungsaufgaben höherer Leistung, die mehrere Spannungsebenen zur Energiesammlung und -übertragung erfordern, sollten Spannungshierarchien (siehe Abbildung 2) befolgt und Standard-Netzkonfigurationen als Planungsbasis verwendet werden.

3.2 Regelung und Betriebsführung

Die Anlehnung regelungstechnischer Konzepte an verbreitete und standardisierte Verfahren in der konventionellen Energieversorgung [5] ist für eine netzkompatible Gestaltung von Inselnetzen vorteilhaft. Bei Drehstromaufbauten sollte die Leistungsaufteilung möglichst über Frequenz-/ Wirkleistungs- und Spannungs-/ Blindleistungsstatiken erfolgen, während in einphasigen stromrichter-dominierten Netzen kleiner Leistung, die meist ohne rotierende Speicherkomponenten auskommen müssen, die Berücksichtigung von vereinfachten Steuerverfahren, z.B. mit Spannungsstatiken, tolerierbar ist.

Der häufig räumlich verteilte Aufbau regenerativer Energiewandler erfordert eine überwiegend komponentenorientierte Betriebsführung. Die gesamte Umsetzung der Anlagenführung ist

prinzipiell dezentral zu halten und nur bei übergreifenden Aufgaben zentral zu koordinieren. Die in den Bereich der Komponenten zu integrierenden Betriebsführungseinheiten übernehmen dabei spezifische Steuerungs-, Regelungs- und Überwachungsaufgaben wie MPP¹-Einstellung, Batterieladeregulierung sowie Regelungsbeiträge zur Netzbildung und ermöglichen den sicheren Parallelbetrieb am Netz.

Typische komponentenübergreifende Betriebsführungsaufgaben sind Netzüberwachung, regelungstechnische Koordination der Komponenten, Monitoring und Maßnahmen zur Betriebsoptimierung. Üblicherweise werden derartige Aufgaben zentral von einer übergeordneten Koordinationsstelle ausgeführt. Diese in **Abbildung 6** dargestellte Anlagen-Koordinationsstelle entscheidet über Schaltmaßnahmen und übernimmt Parametereinstellungen für die Leistungsbeiträge der Komponenten. Sie bestimmt den Einsatz der Komponenten, die netzbildende Frequenz und Spannung regeln oder netzstützend Wirk- und Blindleistung bereitstellen. Darüber hinaus

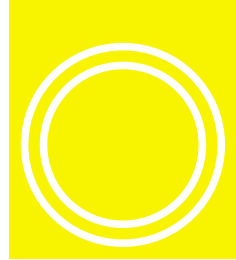
¹ MPP = maximum power point = Betriebspunkt höchster Leistung

überwacht und steuert die Koordinationsstelle die Betriebszustände der Anlage wie Anfahren, Normalbetrieb, Abfahren, außer Betrieb setzen und leitet Maßnahmen bei Toleranzüberschreitungen ein.

Neben der Standardisierung der Leistungsankopplung und den anzuwendenden Regelungsarten ist eine Festlegung im Bereich der Kommunikation erforderlich, um die in Abbildung 6 dargestellte Modularisierung zu realisieren. Aus diesem Grund arbeitet ISET zusammen mit Herstellern und Forschungsinstituten an der Entwicklung von geeigneten Standards für Komponentenschnittstellen. Letzteres macht u.a. die Integrationsfähigkeit von Produkten verschiedener Hersteller in ein Hybridsystem aus [6][7].

4. Entwurf dezentraler, netzkompatibler Anlagentechnik

Aus den in Abschnitt 2 beschriebenen Systemanforderungen und den in Abschnitt 3 erläuterten Technologien lassen sich zugeschnittene Systemlösungen zur weltweiten Elektrifizierung herleiten. Während die Niederspannungstechnik eher für lokale Anwendungen mit einer kleinen Versor-



gungsfläche und Leistung geeignet ist, sind üblicherweise Mittelspannungsebenen zur Versorgung regionaler Gebiete erforderlich.

4.1 Hybridsysteme kleiner Leistung

Hybridsysteme kleiner Leistung in Niederspannungstechnik eignen sich vorwiegend zur Versorgung netzferner, privater oder öffentlicher Einrichtungen mit geschlossener, eng abgegrenzter Struktur sowie zur lokalen Versorgung netzferner Ansiedlungen und kleiner Ortschaften.

Abbildung 7 stellt eine Vorgehensweise zur Basiselektrifizierung kleiner Ortschaften mit geringem Entwicklungsgrad dar. Neben z.B. batteriegestützten kleinen Versorgungseinheiten zur Beleuchtung auf Gleichstrombasis, die sog. konsumtive Anwendungen darstellen, sind Anlagen erforderlich, die eine ländliche handwerks- und industriell-orientierte Entwicklung hervorrufen können. Wirtschaftsbetriebe wie Werkstätten und Bauernhöfe sowie gemeinschaftliche Einrichtungen wie Wasseraufbereitungs-, Kranken- und Polizeistationen stellen Inselnetz-Versorgungsziele mit einer Mindestleistung im kW-Bereich dar. Die Inselnetzversorgung umfaßt auch zahlreiche Anwendungen hoher Leistung wie große Telekommunikationsstationen, Bahn-, Transportzentren, militärische Einrichtungen usw. Je nach Einsatzfall und geforderter Leistung bietet sich hier die ein- und dreiphasige Niederspannungstechnik an. Die Versorgung netzferner Einrichtungen und Zentren initiiert oft eine lokale Ausbreitung der Elektrifizierung und erfordert daher ausbaufähige Versorgungsanlagen.

Bei Anwendungen in Ortschaften mit elektrischer Basisversorgung erfolgt der Ausbau mit regenerativen Energien analog zu der oben beschriebenen Vorgehensweise, möglicherweise unter Einbeziehung der vorhandenen Netzstrukturen. Streng modular aufgebaute Hybridsysteme kleiner Leistung, wie in [Abbildung 8](#) zugeschnitten auf PV- und Batterietechnik oder in [Abbildung 6](#) verallgemeinert dargestellt, werden z.Z. als Pilot-Anlagen in einphasiger und Drehstrom-Niederspannungstechnik vom ISET gemeinsam mit Partnern aus Industrie und

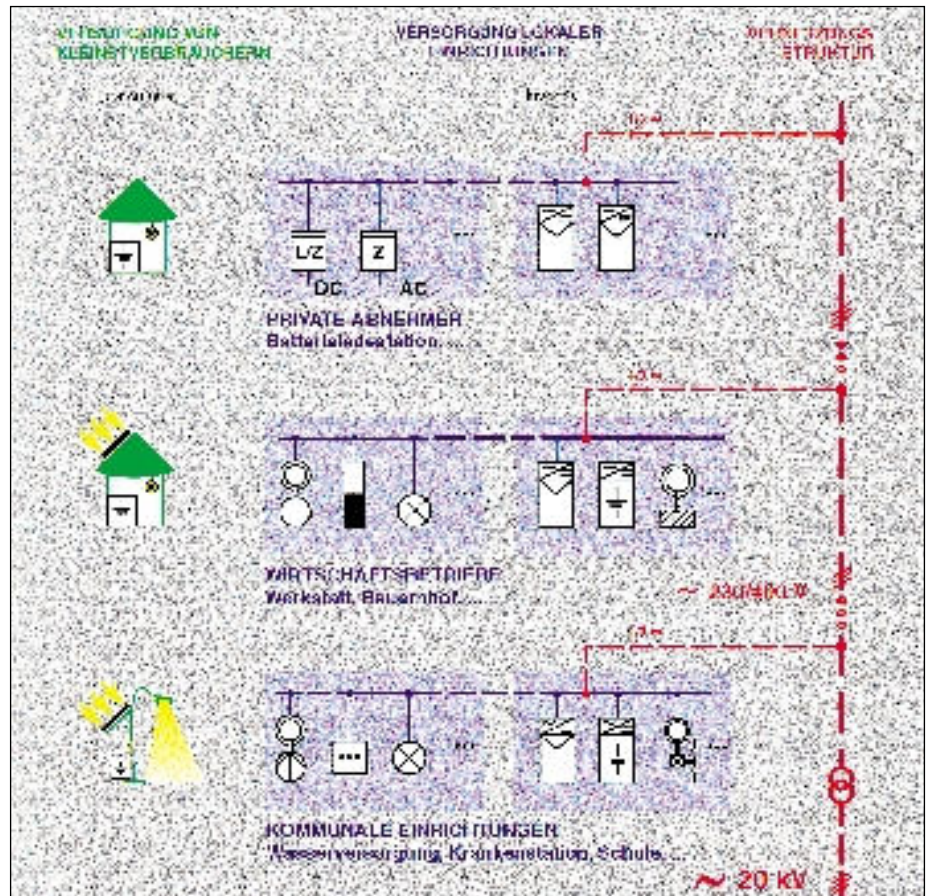
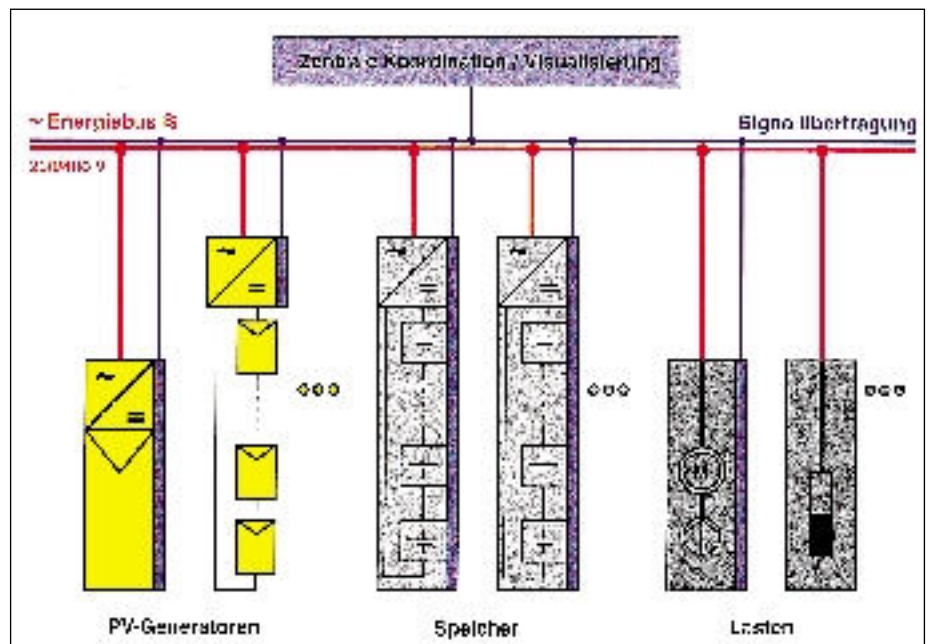


Abbildung 7: Basiselektrifizierung ländlicher Gebiete – Solar Home Standard und modular erweiterbare Struktur

Abbildung 8: Ausbaufähige PV-Inselnetzversorgung [7]

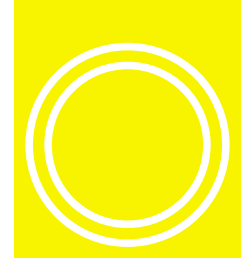


Forschung entwickelt und getestet.

4.2 Hybridsysteme mittlerer und großer Leistung

Für die Versorgung von Ortschaften

mit Gewerbe- und Industriebetrieben bieten sich beispielsweise Hybridsysteme mittlerer Leistung nach [Abbildung 9](#) an. Der kombinierte Einsatz von Windkraftanlagen bis in den MW-Bereich erlaubt insbesondere in Verbindung



mit Gas (z.B. Biogas) betriebenen Verbrennungskraftmaschinen eine vielversprechende, umweltschonende Energieversorgung. Je nach Anwendungsfall und Leistungsbedarf können hier Verbrennungskraftmaschinen mit Leistungen bis zu einigen MW zum Einsatz kommen. Während die Aufgabe der Netzbildung von Verbrennungsaggregaten übernommen wird, arbeiten die Windkraftanlagen z.B. im netzstützenden Betrieb. Das Betriebsverhalten und insbesondere die Energienutzung lassen sich durch den Einsatz drehzahlvariabler Aggregate oder die Verwendung von Kurzzeitspeichern optimieren.

Die Anwendungsbreite derartiger Hybridstrukturen erstreckt sich bis zur Versorgung städtischer Gebiete und industrieller Regionen mit installierter Kraftwerksleistung bis zu einigen 100 MW. Hier werden zur Leistungssicherung üblicherweise thermische, fossil befeuerte Kraftwerke zum Einsatz kommen. Die in [Abbildung 10](#) dargelegte Wind-Kombi-Kraftwerk-Technik reduziert erheblich den Einsatz fossiler Brennstoffe. Kombi-Kraftwerke mit hohem Wirkungsgrad (GuD-Technik), guten dynamischen Eigenschaften (Gasturbinen) und insgesamt geringen leistungsbezogenen Investitionskosten können entsprechend der lokalen Verfügbarkeit auch mit Biogasanteilen befeuert werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in Gebieten mit hoher direkter Solarstrahlung durch Einbindung von solarthermischen Kraftwerken den Einsatz fossiler Brennstoffe weiter zu senken.

Modular erweiterbare Hybridsysteme nach [Abbildung 9](#) und [10](#) erlauben eine breite Nutzung großer, lokal verfügbarer Windenergiepotentiale. Unter Beachtung der schwachen Netze in EL und SL kommen schonenden Betriebsweisen von Windkraftanlagen, die sich den Netzgegebenheiten anpassen können, besondere Bedeutung zu. So lassen sich z.B. in besonders windgünstigen Gebieten Windkraftanlagen hoher Leistung mit Blattverstellrichtungen auch auf vermindertem Leistungsniveau betreiben, was neben der Schonung der Anlagen auch zur Vergleichmäßigung der eingespeisten Leistung führt und darüber hinaus Primärregelungs-Beiträge

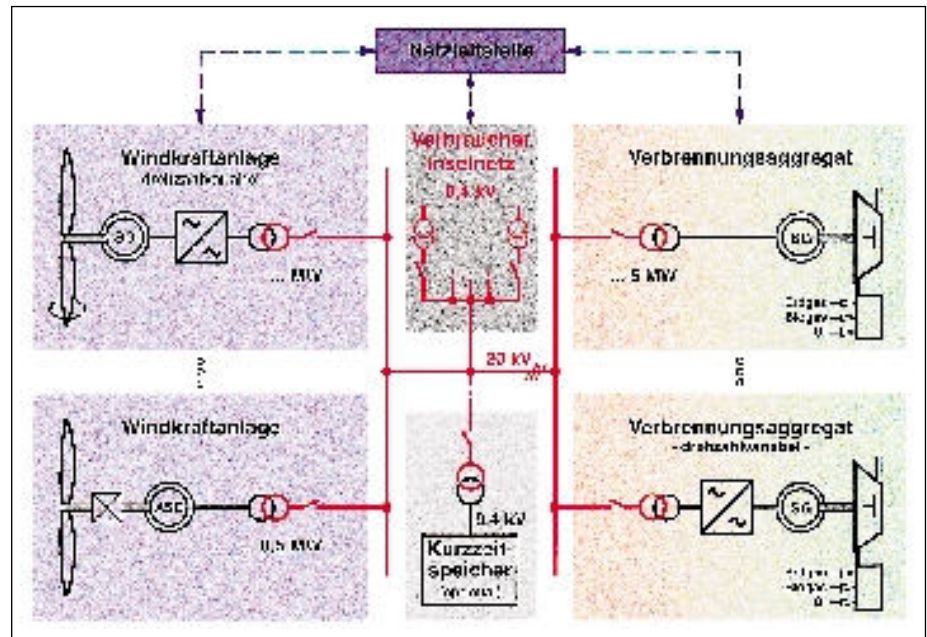
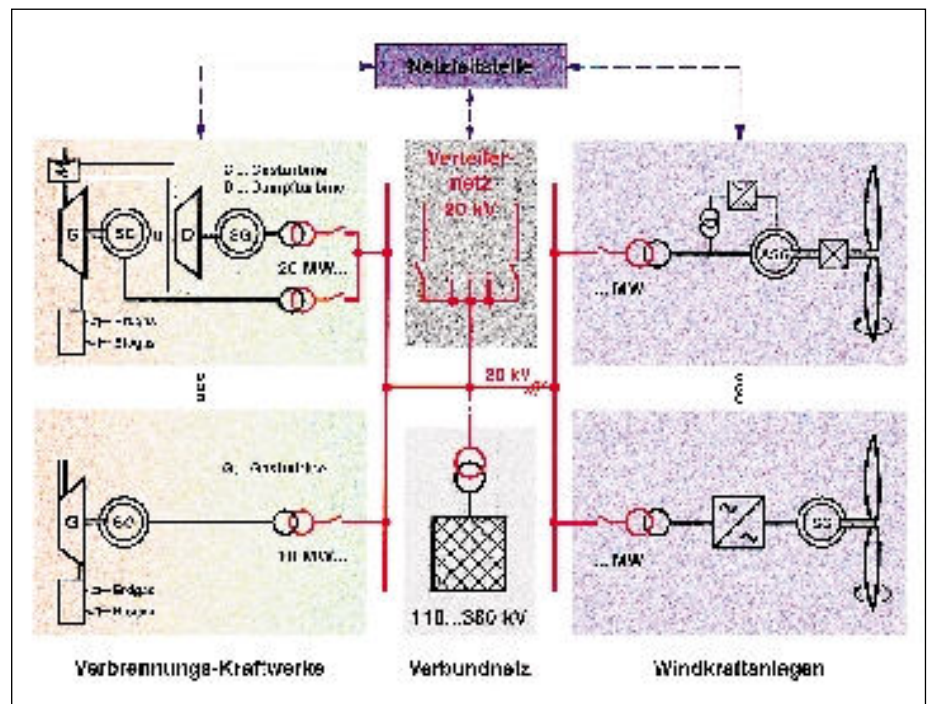


Abbildung 9: Hybridsystem mittlerer Leistung zur Versorgung von Gebieten mit Gewerbe- und Industriebetrieben – Wind-Verbrennungsaggregat-Technik

Abbildung 10: Hybridsystem großer Leistung zur Versorgung städtischer Gebiete und industrieller Regionen – Wind-Kombi-Kraftwerk-Technik

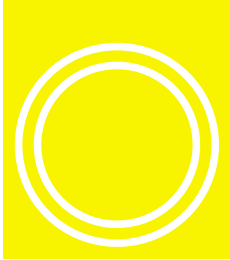


erlaubt. Derartige Betriebsweisen erhöhen u.a. die Integrationsfähigkeit von Windkraftanlagen in schwache Netze und gestatten eine fallgerechte Betriebsoptimierung.

5. Schlußfolgerungen und Ausblick

Die im Themenheft 92/93 [4] innerhalb einer ersten Entwicklungsphase (bis 1995) dargelegten programmati-

schen Planungen bezüglich einer modularen, ausbaufähigen PV-Systemtechnik konnten weitgehend umgesetzt werden. Neben den laufenden Tätigkeiten der dort ebenfalls beschriebenen zweiten Phase (ab 1995), die insbesondere Maßnahmen zur Standardisierung und Kostenreduktion umfaßt, haben sich folgende weitere wichtige Forschungsschwerpunkte herauskristallisiert:



- Entwicklung parallel betriebbarer, netzkompatibler Energieversorgungseinheiten:
 - Zugeschnittene Weiterentwicklung der Komponenten,
 - Standardisierung der Regelungs- und Betriebsführungsverfahren,
 - Gestaltung eines Hybridversorgungsbaukastens basierend auf modular erweiterbaren Energieversorgungseinheiten.
- Erstellung rechnergestützter Verfahren zur Anlagenauslegung:
 - Einbindung des komponentenorientierten Anlagenverhaltens,
 - Bewertung regionaler Gegebenheiten (Meteorologie, Versorgungsstrukturen, ...).
- Demonstration im energietechnisch relevanten Maßstab:
 - Sammlung von Betriebserfahrungen,
 - Erfassung von Kostenreduktionspotentialen,
 - Erleichterung der Markteinführung (eigene Anwendung, Schaufensterfunktion, Export).

Abschließend bleibt festzuhalten, daß Hybridanlagen - basierend auf erneuerbaren Energiequellen - in der Lage sind, alle denkbaren elektrischen Ver-

sorgungsaufgaben zu übernehmen. Die konsequente Anwendung der modularen Systemtechnik wird wesentlich dazu beitragen, daß die vorhandenen umfangreichen Kostenreduktionspotentiale genutzt werden können. Dies dient den Zielen

- Lieferung merklicher Beiträge zur Reduzierung der Energieversorgungsprobleme, der energiebedingten Ressourcenverknappung und Umweltbeeinflussung sowie der
- Schaffung von zukunftsrelevanten Beschäftigungsfeldern

durch weltweite Anwendung erneuerbarer Energien.

Literatur

- [1] W. Kleinkauf
„Photovoltaic Power Conditioning / Inverter Technology“, Proc. 10th EU PV Solar Energy Conf., Lisbon (1991)
- [2] H. Dienhart, G. Hille
„Die Bedeutung erneuerbarer Energien für die Stromversorgung abgelegener Gebiete in Entwicklungsländern“, Energiewirtschaftliche Tagesthemen 07/94 (1994) 426-431
- [3] E. Biermann, F. Corvinus, T. Herberg, H. Höfling
„Basic Electrification for Rural House-

holds“, Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn (1995)

- [4] W. Kleinkauf, J. Sachau, H. Hempel
„Modulare Energieaufbereitung und Anlagentechnik - Strategische Ansätze zur Gestaltung PV-gerechter Systemtechnik“, Themen 92/93, Forschungsverbund Sonnenenergie, Köln (1993)
- [5] W. Leonhard
„Regelung in der elektrischen Energieversorgung“, ISBN 3-519-06109-0, B. G. Teubner Stuttgart (1980)
- [6] W. Kleinkauf, F. Raptis, J. Sachau, P. Zacharias et al,
„Modular Systems Technology for Decentral Electrification - EUREC-Agency's MEGA-Hybrid Project“, Common Public. of ISET, ITER, CRES and WIP, Proc. 13th EU PV Solar Energy Conf., Nice (1995)
- [7] W. Kleinkauf, F. Raptis, P. Zacharias
„Gestaltung von Hybridsystemen - Modularisierung und Standardisierung der Systemtechnik“, 11. Symp. Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein (1996)

Erweiterbare photovoltaische Inselnetzversorgung in modularer Systemtechnik. Pilotanlage des ISET bestehend aus mehreren PV-Generatoren (je 700 W), Wechselstrom-Batteriespeichern (je 10 kWh/2,2 kW) und verschiedenen Lasten.

