

# Integration erneuerbarer Energien und dezentrale Energieversorgung – Aufbau von Versorgungsstrukturen mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien

Dipl.-Ing.  
Martin Hoppe-Kilpper

ISET

m.hoppe-kilpper@  
iset.uni-kassel.de

Dipl.-Phys.  
Gregor Czisch, ISET

gCzisch@iset.uni-kassel.de

Dipl.-Ing.  
Cornel Enßlin, ISET

Censsli@iset.uni-kassel.de

Dipl.-Ing.  
Kurt Rohrig, ISET

krohrig@iset.uni-kassel.de

Dr. Bernd Emonts,  
FZJ

b.emonts@fz-juelich.de

Prof.  
Werner Kleinkauf,  
GhK

wkleinkauf@  
iset.uni-kassel.de

Dr. Franz Trieb, DLR

franz.trieb@dlr.de

Frithjof Staiß, ZSW

frithjof.staiss@zsw-bw.de

## Einleitung

Unser heutiges Energieversorgungssystem wurde für die Aufgabe konzipiert, mit wenigen großen, zentralen Erzeugungsanlagen eine große Anzahl räumlich verteilter Lasten, bzw. Verbraucher zuverlässig und kostengünstig mit Energie zu versorgen. Diese Aufgabe wurde in Europa noch bis vor wenigen Jahren von Versorgungsunternehmen wahrgenommen, die in geschützten, monopolistischen Märkten von der Energieerzeugung und -übertragung bis hin zur -verteilung an den Endkunden für die gesamte Versorgungskette zuständig waren. Ausgelöst durch die EU-Richtlinien zur Deregulierung der Energiemärkte und nachfolgende nationale Gesetzgebungen wurde auch in Deutschland durch Aufhebung der Gebietsmonopole und die unternehmerische Trennung entsprechend den Versorgungsaufgaben erste Schritte zur Umstrukturierung unseres Energieversorgungssystems unternommen.

Ebenfalls initiiert durch gesetzgeberische Maßnahmen begann Anfang der 90-er Jahre mit dem Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) der verstärkte Ausbau zur Nutzung erneuerbarer Energien (EE) in Deutschland. Durch die erfolgreiche Kombination aus Anschluss- und Abnahmeverpflichtung zum Mindestpreis wurde für den Bereich der Windenergie der ökonomische Durchbruch in einem gesetzlich geschützten Rahmen vollzogen. Mit dem Inkrafttreten des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) im April 2000 soll diese Entwicklung weiter verstärkt und vor allem auf andere EE-Technologien ausgeweitet werden. Zusammen mit weiteren administrativen Maßnahmen zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung und zur rationellen Energieverwendung sollen damit die Grundlagen zur Erfüllung der nationalen CO<sub>2</sub>-Mindestminderungsziele und zur massiven Nutzung erneuerbarer Energien gelegt werden.

Die verstärkte Nutzung von weiträumig verteilten, zum Teil auch verbrauchernahen und dargebotsabhängigen Erzeugungseinheiten führt je nach erreichtem Durchdringungsgrad sukzessive zu einer Umstrukturierung des heute noch zentral ausgerichteten Versorgungssystems hin zu einem mehr von kleineren, dezentralen Elementen gekennzeichneten System. Insofern bedeutet "Integration" von Erneuerbaren Energien bei tatsächlicher Umsetzung der im politischen Raum diskutierten Ausbau-szenarien letztendlich eine "Transformation" des bestehenden Versorgungssystems hin zu mehr Dezentralität, das heißt zu mehr verbrauchernaher Erzeugung. Neben dieser zu erwartenden Regionalisierung der Energieversorgung wird darüber hinaus die zunehmende Erschließung großer EE-Potenziale in großen Entfernungen zu Verbrauchszentren bis hinein in andere Klimazonen eine wichtige Rolle spielen.

## Szenario einer nachhaltigen Elektrizitätsversorgung

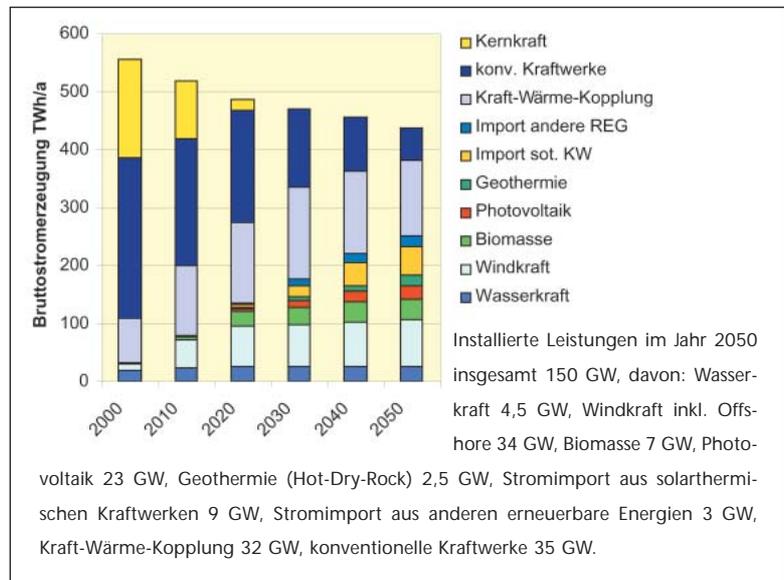
In einer deutschen Elektrizitätswirtschaft mit zukünftig sparsamerer Energienutzung und großen Anteilen regenerativer Energie kann ein ausgewogener Mix aus heimischen und importierten Energiequellen, der Kraft-Wärme-Kopplung und konventionellen Kraftwerken zu einer gut an den Bedarf angepassten Versorgung führen, ohne einzelne Ressourcen oder das Verbundnetz übermäßig zu belasten [1]. Die wenig fluktuierenden Stromanteile aus heimischer Wasserkraft, Geothermie, Biomasse und Solarstrom u.a. aus Importen überwiegen in einem solchen Verbund trotz geringerer installierter Leistung deutlich vor den stärker fluktuierenden Anteilen (Abb. 1) aus heimischer Windkraft und Photovoltaik [2,3].

Auch ohne Maßnahmen zur Energiespeicherung oder zum Lastmanagement führen die Ausgleichseffekte der großräumigen Nutzung vieler unterschiedlicher Energiequellen bezogen auf die Bruttostromerzeugung nur zu geringfügigen Überschüssen. Die für die heutige Elektrizitätsversorgung typischen Grundlastkraftwerke auf der Basis von Kohle und Kernenergie werden in 50 Jahren praktisch nicht mehr einsetzbar sein.

Die sich in Deutschland aus der zunehmenden Nutzung von erneuerbaren Energien ergebende Entwicklung hin zu mehr Dezentralität wird durch die Entwicklung in der konventionellen Energietechnik mehr und mehr begünstigt. Besonders in den USA ist in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme der Marktanteile von Dieselaggregaten und Gaskraftwerken im Leistungsbereich von einigen kW bis zu einigen MW zu verzeichnen, die ebenfalls zur dezentralen, verbrauchernahen Stromerzeugung beitragen. Der Absatz dieser Kleinkraftwerkstypen wächst dort jährlich im Schnitt um 7%. Diese Entwicklung ist auch deshalb für die weitere Nutzung von erneuerbaren Energien so wichtig, weil sie in einem dezentralen Energieversorgungskonzept die für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb notwendigen Backup- und Regelungskapazitäten bereitstellen können.

## 1. Dezentrale Energieversorgung

Dezentrale Energieversorgung umfasst sowohl den netzparallelen als auch den autonomen Betrieb von kleinen, modularen Erzeugungsanlagen durch Energieversorgungsunternehmen, deren Kunden, oder aber unabhängigen Dritten [4]. Das dezentrale Konzept unterscheidet sich dabei grundlegend vom zentralen Versorgungsansatz. Die Erzeugungseinheiten können nämlich auch direkt am Verbrauchsort betrieben werden und damit entweder zur unmittelbaren Bedarfsdeckung eines zugeordneten Verbrauchers oder aber zum Nutzen des gesamten dezentralen Versorgungssystems beitragen. Zukünftige Versorgungssysteme werden zunehmend daran gemessen werden, inwieweit ein effizienter, ökonomischer Betrieb, der den Forderungen der Nachhaltigkeit



genügt, möglich ist. Im Detail sollten zukünftige Versorgungssysteme folgende Anforderungen erfüllen:

- zuverlässiger und kostengünstiger Betrieb
- hohe Effizienz hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Ressourcenverbrauch
- Möglichkeit zur regionalen Nutzung erneuerbarer Energien
- modulare Erweiterbarkeit
- kurze Planungs-, Genehmigungs- und Errichtungszeiten

Abbildung 1 Nachhaltigkeits-szenario des DLR zur Stromerzeugung in Deutschland.

### 1.1 Netzstruktur

Auch bei dezentraler, verbrauchernaher Energieversorgung werden zukünftig auch weiterhin Übertragungsnetze auf Höchstspannungsebene die Stromversorgung der Regionen und Städte sicherstellen. Obwohl es auch Verteilungsnetze auf Mittel- oder Niederspannungsebene geben kann, wird das Übertragungsnetz für einen Ausgleich zwischen entfernteren Regionen sowie für Stromimporte aus dem Ausland seine Bedeutung behalten. Denn nur durch eine elektrische Verbindung – auch über längere Distanzen – können die regionalen Ressourcen an erneuerbaren Energien umfassend genutzt werden. So müssen schon heute zeitweilig Windleistungen aus den deutschen Küstengebieten mit Hilfe des Übertragungsnetzes in andere Regionen transportiert werden. Dabei wird in Schwachlastzeiten

bei gleichzeitig hohen Windgeschwindigkeiten aus dem schleswig-holsteinischen Mittelspannungsnetz ins vorgeschaltete Übertragungsnetz zurückgespeist. Würde man auf diese Möglichkeiten verzichten, müssten zwangsläufig die Windenergieanlagen abgeregelt werden, mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Auslastung. Wenn die immensen Offshore-Potenziale in Nord- und Ostsee erschlossen werden, ist jedoch eine Auslastungsreduzierung ökonomisch praktisch ausgeschlossen. So sieht ein Szenario des Bundesumweltministeriums (BMU) vor, bis zum Jahr 2030 mit ca. 25 GW installierter Windleistung rund 16% des deutschen Stromverbrauchs allein aus Offshore-Windenergie zu decken.

Diese Leistungen können nur dann effektiv genutzt werden, wenn sie auch in die Verbrauchszentren, z. B. an Rhein und Ruhr, transportiert werden. Wenn es gelingt, den Offshore-Ausbau mit dem Abbau konventioneller Erzeugungskapazitäten am Übertragungsnetz zu synchronisieren, lassen sich neue Leitungskapazitäten vermutlich reduzieren.

In einem zukünftigen dezentralen Versorgungssystem werden sich für Höchstspannungs-Übertragungsnetze wesentliche Aufgabenverschiebungen ergeben:

Durch die verstärkte (regionale) Nutzung erneuerbarer Energien und anderer dezentraler Anlagen werden sich die Erzeugungskapazitäten am Mittelspannungsnetz weiterhin

tendenziell erhöhen, während die bestehenden (konventionellen) Erzeugungskapazitäten am Höchstspannungsnetz sukzessive eher abnehmen werden. Dieser Prozess wird sich vermutlich so abspielen, dass alte, ausgediente Großkraftwerke am Höchstspannungsnetz nicht mehr durch entsprechend große Einheiten ersetzt werden, sondern kostengünstige, schnell regelbare Einheiten am Mittelspannungsnetz neu aufgebaut werden. Daneben ist es durchaus denkbar, dass neu zu errichtende thermische Kraftwerke auch am Übertragungsnetz als Backup-Kraftwerke zu großen Offshore-Windparks, die gleichermaßen an das Übertragungsnetz angeschlossen sind, betrieben werden.

Hinsichtlich des Nutzungsgrads erneuerbarer Energien (EE) lassen sich bei dezentralen Versorgungskonzepten drei unterschiedliche Kategorien definieren:

- Regionen mit einem Überangebot an EE und entsprechendem Potenzial zum Export in andere Regionen
- Regionen mit einem Unterangebot an EE und entsprechender Notwendigkeit zum Import aus anderen Regionen
- Regionen mit einer nahezu ausgeglichenen EE-Bilanz

Abb. 2 skizziert ein Energieversorgungssystem mit hohem Anteil regenerativer Stromerzeugung. Es setzt sich hier neben einer Vielzahl

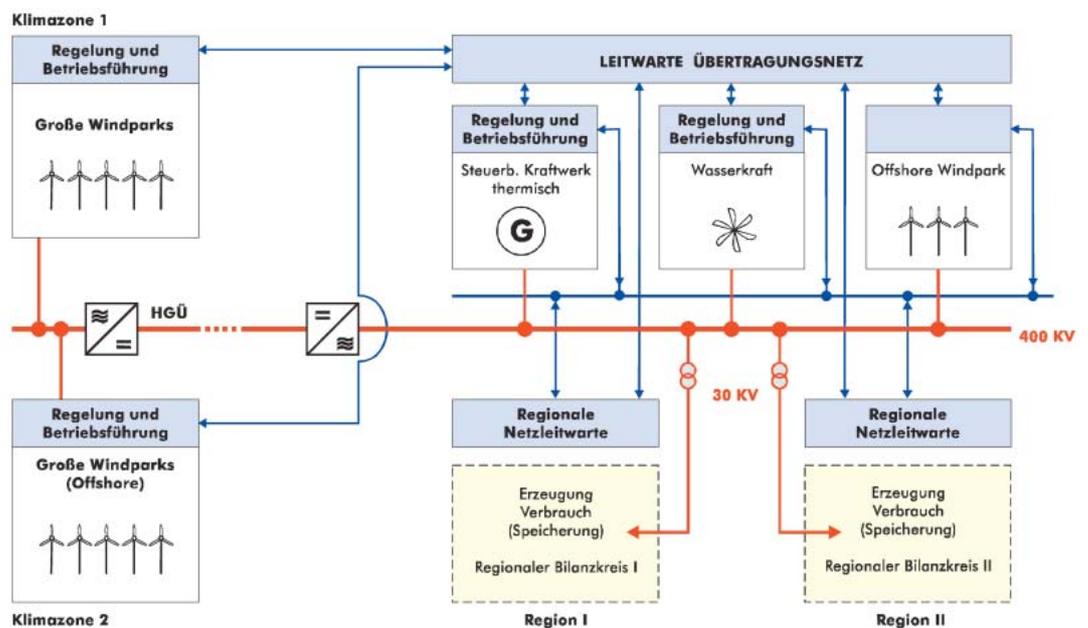


Abbildung 2  
Versorgungsstruktur  
mit hohem EE-Anteil  
(ISET)

regionaler Versorgungseinheiten auf Mittelspannungsebene ebenso aus zentralen (Backup) Großkraftwerken und Offshore-Windparks zusammen, die auch über Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) - Techniken an das Stromnetz angeschlossen sind. Auf die wachsende Bedeutung und die Aufgaben der regionalen Netzleitwarten zum Energiemanagement wird unter 4.1 näher eingegangen.

## 1.2 Regionale Versorgungskonzepte

Als zukunftsweisendes Konzept könnten in nicht ferner Zukunft für besonders geeignete Regionen eine Vollversorgung ausschließlich auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen als dezentrale Versorgungslösung realisiert werden. Diese Konzepte könnten sich zunächst auf die elektrische Energieversorgung beschränken und vorrangig Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Photovoltaik als Energiequellen berücksichtigen.

Als besondere technische Herausforderung bei einer Vollversorgung aus erneuerbaren, dargebotsabhängigen Energiequellen gilt die Leistungssicherung, wenn keine Einschränkungen an Sicherheit und Qualität der Versorgung in Kauf genommen werden sollen [5]. Diese lässt sich unter anderem durch komplementäre Backup-Kraftwerke (z. B. auf Basis von Bio-Dieselmotoren, Mikro-Turbinen oder Brennstoffzellen) oder aber durch Speichersysteme und ein intelligentes Lastmanagement erreichen.

Künftige Energieversorgungssysteme, die stark durch dezentrale Elementen geprägt sind, benötigen den Einsatz moderner Kommunikationsmittel zwischen Erzeugern, Verbrauchern und Netzleittechniken, um den Herausforderungen und Möglichkeiten gewachsen zu sein, einen wirtschaftlichen und gleichermaßen sicheren Netzbetrieb aufrecht zu erhalten.

Neben Entwurf und Realisierung von dezentralen, regionalen Energieversorgungssystemen auf hohem technischen Niveau ist für den nachhaltigen Erfolg eine hohe Akzeptanz der

betroffenen Bevölkerung, der mitwirkenden privaten und industriellen Verbraucher und des den Netzbetrieb sicherstellenden Versorgers erforderlich. Dies erfordert die Erprobung von größeren, dezentralen Versorgungseinheiten als regionales Gesamtkonzept mit hohem Identifikationsgrad. Die spezifischen Ressourcen der Regionen werden zur Versorgung weitestgehend genutzt und mögliche Überschüsse könnten über den Netzverbund an andere Regionen weitergeliefert werden.

Mit derartigen Modellprojekten könnten folgende Ziele und Effekte erreicht werden:

- Nachweis der technischen, ökonomischen und sozialen Machbarkeit dezentraler Versorgungslösungen auf Grundlage erneuerbarer Energien
- Gewinnung von Erfahrungen und Erkenntnissen für die Weiterentwicklung von Komponenten und Systemen
- Verbesserung der ökonomischen Voraussetzungen beim Einsatz erneuerbarer Energien
- Demonstration und Schaufensterwirkung für in- und ausländische Nachahmungsprojekte
- Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Reduktion von Schadstoffemissionen

Bisherige Arbeiten zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen bzw. dezentraler Versorgungslösungen in energiewirtschaftlich relevanter Größenordnung beschränkten sich zumeist auf Potenzialstudien und gesamtwirtschaftliche Entwicklungs-Szenarien. Die hier vorgeschlagenen Modellprojekte sollten jedoch vorrangig die Aspekte der technischen Ausgestaltung der einzelnen Komponenten, ihres Zusammenwirkens mit einem intelligenten Energiemanagement sowie die konkrete Implementierung in größeren Regionen beinhalten.

## 1.3 Autonome Versorgungslösungen

Ein eindrucksvolles Beispiel für ein solches Modellprojekt ist die im Forschungszentrum Jülich aufgebaute und betriebene Demonstrationsanlage PHOEBUS Jülich, die Teile der

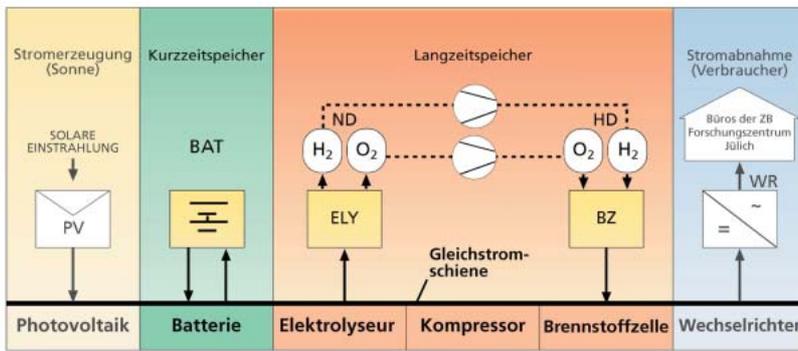


Abbildung 3 Vereinfachtes Verfahrensschema PHOEBUS Jülich

Zentralbibliothek mit Solarstrom versorgt [6,7]. PHOEBUS steht für PHOTovoltaik, Elektrolyse, Brennstoffzelle und Systemtechnik als die wichtigsten Bestandteile der Anlage. Grundlage des Anlagenkonzepts ist, über Solarzellenfelder das Sonnenlicht einzufangen und in elektrische Energie umzuwandeln. Produzieren die Solarzellen an sonnenreichen Tagen mehr Strom als unmittelbar benötigt wird, dient die überschüssige Elektrizität zur Aufladung der Batterie und darüber hinaus zur Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels eines Elektrolyseurs. Beide Gase werden in Drucktanks gespeichert und dienen als Vorrat für das sonnenarme Winterhalbjahr. Die während dieser Zeit auftretende Minderversorgung durch das Solarfeld wird dann über die stromliefernde Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle ausgeglichen.

Ein Verfahrensschema von PHOEBUS Jülich zeigt Abb. 3 Solarzellenfelder, Elektrolyseur, Brennstoffzelle und Wechselrichter sind mittels einer Gleichstromschiene miteinander verbunden. Der direkt gekoppelte Bleiakкумуляtor prägt der Gleichstromschiene seine Spannung auf und stabilisiert das System. Der Wechselrichter versorgt die Verbraucher mit 230 V Wechselspannung. Um trotz der Fluktuationen zwischen Energieertrag und -verbrauch eine ganzjährige, vollautomatische und ununterbrochene Versorgung zu gewährleisten, bedarf es einer computergestützten Steuerung, dem sogenannten Energiemanagement [8]. Es ermittelt selbstständig den jeweiligen Ladungszustand der Batterie, startet die Elektrolyse, wenn z. B. die Sonne über einen längeren Zeitraum intensiv einstrahlt oder nimmt zu einem anderen Zeitpunkt die Brennstoffzelle

in Betrieb, wenn z. B. die dann benötigte Energie die gerade verfügbare Sonnenenergie übersteigt.

Mit der in Jülich installierten Anlage kann anschaulich gezeigt werden, dass eine netzungebundene Energieversorgung unter hiesigen Witterungsverhältnissen prinzipiell machbar ist. Die Betriebserfahrungen haben sogar zu einer Reihe von Ansätzen geführt, die Energiebilanz sowie die technische Ausführung des Langzeitspeichers zu verbessern.

## 2. Nutzung von großen, lokalen EE-Potenzialen

Neben der verbrauchernahen, regionalen Nutzung erneuerbarer Energien, sollten darüber hinaus auch die ausgesprochen großen EE-Potenziale an den Standorten genutzt werden, an denen keine unmittelbaren Verbraucher vorhanden sind. Dies gilt sowohl für die Nutzung der EE-Potenziale im europäischen wie im außereuropäischen Raum (z. B. im Sonnen-gürtel Afrikas) als auch für die Offshore-Windenergie in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ)<sup>1</sup>.

### 2.1 Nutzung großer Offshore-Potenziale

Sollten z. B. im Rahmen der nationalen CO<sub>2</sub>-Senkungsstrategien die gewaltigen Offshore-Windenergie-Potenziale in der AWZ tatsächlich realisiert werden, so ist ein Transport über große Entfernungen und eine elektrische Anbindung ans Höchstspannungsnetz naheliegend. Diese Einspeisungen im Gigawatt-Bereich würden mittel- bis langfristig die dort bestehenden thermischen Kraftwerkskapazitäten ersetzen. Als dargebotsabhängige Energiequelle ergeben sich dann jedoch besondere Anforderungen an die Betriebsweise dieser großen EE-Kraftwerke:

- Regelbarkeit der abgegebenen Wirk- und Blindleistung sowohl durch den Kraftwerks- als auch durch den zuständigen Netzbetreiber
- direkte Eingriffsmöglichkeit in Betriebsführung, z. B. für Wartungsarbeiten

<sup>1</sup> Deutsches Hoheitsgebiet außerhalb der 12 Meilenzone

- an WEA und Netz  
(auch durch den zuständigen Netzbetreiber)
- Einsatz leistungsfähiger Prognose-Programme für zu erwartende Energielieferungen
  - optimierte Fernüberwachung und -wartung
  - Sicherstellung ausreichender Arbeits- und Lebensbedingungen für Betriebs- und Wartungspersonal (bewohnte Einrichtungen)
  - Klärung rechtlicher Probleme im Zusammenhang mit Eigentumsfragen und notwendigem externen Zugriff auf Anlagenbetrieb durch Netzbetreiber

## 2.2 Nutzung großer EE-Potenziale im interkontinentalen Netzverbund

Das Windenergieangebot ist bekanntlich großen saisonalen Schwankungen unterworfen. So befindet sich Europa klimatisch betrachtet in einer typischen Winterwindregion. Hier liegen z. B. die langfristigen Julimittelwerte der potenziellen Windstromerzeugung bei unter 40% der potenziellen Windstromerzeugung im Januar. Im Hinblick auf eine saisonal ausgeglichene Stromversorgung mit Windenergie kommen als Ergänzung besonders die Passatwindregionen Nordafrikas in Frage. Ein weitgehender jahreszeitlicher Ausgleich kann somit schon durch die großräumige Nutzung von Standorten in der selben Hemisphäre erreicht werden, da zwischen Passatwindregionen und Winterwindregionen eine deutliche Antikorrelation besteht.

In einer Studie [9] wurde die gleichzeitige Nutzung von 20 ausgewählten marokkanischen und algerischen Onshore-Gebieten sowie von 47 europäischen Offshore-Gebieten untersucht. Dabei wird angenommen, dass sich 1/3 der installierten Leistung in Nordwestafrika und 2/3 offshore in Europa befinden. Die größte Leistungsvergleichmäßigung lässt sich erwartungsgemäß bei gemeinsamer Nutzung aller 67 Gebiete erzielen. Die Summenleistung unterschreitet dabei nur noch in 2% eines Jahres 20% der Nennleistung und die niedrigste Leistung, liegt bei 12%. Werte von über 70% sind jedoch fast vernachlässigbar.

Eine gegenüber regionaler Nutzung erhöhte Minimalleistung hat zur Folge, dass der Windenergie ein größerer Teil der installierten Leistung als annähernd gesichert angerechnet werden kann. Durch den damit steigenden Kapazitätseffekt reduziert sich auch die nötige Reserveleistung aus anderen Kraftwerken. Durch eine ergänzende, großräumige Nutzung der Windenergie lassen sich demnach die dargebotsabhängigen Fluktuationen einer regionalen Erzeugung ausgleichen.

Viele Länder in Südeuropa und Nordafrika stehen heute vor der Aufgabe, ihren zukünftig steigenden Wasserbedarf bei gleichzeitig zurückgehenden Niederschlägen kostengünstig und umweltfreundlich zu decken. Solarthermische Kraftwerke können dort zur sauberen und kostengünstigen Erzeugung von Strom und Trinkwasser dienen. Kern solcher Anlagen ist eine Dampfturbine, die mit Dampf aus konzentrierenden Sonnenkollektoren gespeist wird. Mit Hilfe der Kraft-Wärme-Kopplung kann ein Teil des solaren Prozessdampfs zur thermischen Entsalzung von Meer- oder Brackwasser genutzt werden [10].

Die Erzeugung von entsalztem Wasser schafft bei typischen Erlösen von 1 - 1,5 Euro/m<sup>3</sup> ein wertvolles Einkommen für Solarkraftwerksprojekte. Mit den zusätzlichen Erlösen aus der Wasserentsalzung werden Stromgestehungskosten von etwa 0,04 bis 0,05 Euro/kWh erreicht, die bereits heute nahe an der Konkurrenzfähigkeit sind und zukünftig - im Gegensatz zu den Erzeugungskosten mit fossilen Energieträgern - im Verlauf der technischen Lernkurven eher fallen als steigen werden [11].

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ermöglicht den Ferntransport des Solarstroms aus solchen Kraftwerken von Nordafrika nach Mitteleuropa [12]. Die Übertragungskosten liegen im Bereich weniger Euro-Cents pro Kilowattstunde, so dass die Importkosten für Solarstrom in Mitteleuropa von heute etwas über 0,10 Euro/kWh bis mittelfristig unter 0,06 Euro/kWh erreichbar wären.

Aus Sicht der Erzeugerländer dienen die Solarkraftwerke hauptsächlich dazu, Wasser zu entsalzen, während der größte Teil des

Solarstroms als ein in den zu erwartenden Größenordnungen nicht mehr allein regional nutzbares Nebenprodukt exportiert wird. Auf diese Weise können die riesigen Solarenergiepotenziale Nordafrikas erschlossen und sinnvoll für den globalen Klimaschutz und für die friedliche Koexistenz von Nord und Süd nutzbar gemacht werden.

### 3. Informationstechnologien in der zukünftigen Energiewirtschaft

Bereits heute ist der sichere Betrieb unseres zentralen Energieversorgungssystems ohne Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (ICT) nicht mehr denkbar. Der Übergang zu dezentralen Versorgungsstrukturen wird vermutlich von einer noch stärkeren Nutzung der IC-Technologien geprägt sein. Es ist davon auszugehen, dass dabei die Energienetze immer stärker mit den Daten- und Informationsnetzen zusammenwachsen, weil die Anzahl der Energieerzeugungsanlagen, deren aktueller Betriebszustand überwacht werden muss, stark zunehmen wird, Energiemanagement-Aufgaben (einschließlich Laststeuerung) auf regionaler Ebene weiter zunehmen und Energiemengen

in verstärktem Maße in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage an Börsen gehandelt werden. Das heißt, dass dezentrale Energieerzeugungsanlagen zunehmend über geeignete Schnittstellen verfügen müssen, um mit regionalen oder lokalen Betriebsführungseinheiten und Datenerfassungssystemen (SCADA), verteilten dezentralen Regelungseinheiten (DCS) sowie mit dem Internet bzw. einem Intranet kommunizieren zu können. Darüber hinaus sind zunehmend ICT-Lösungen im Bereich von Informationssystemen und Datenbanken, Betriebsüberwachung und Energieprognosen, Fernüberwachung und Ferndiagnose, Schalt- und Schutzeinrichtungen, Zähl- und Abrechnungswesen, sowie standortspezifische Optimierungen der Betriebsführung notwendig.

#### 3.1 Informationssysteme und Datenbanken

Leistungsfähige Informationssysteme und Datenbanken werden eine wesentliche Rolle einnehmen, um einen schnellen und sicheren Informationsaustausch zwischen Energieerzeugung, -übertragung, -verteilung und -handel zu ermöglichen. Damit werden zentrale Aufgaben zur Datenerfassung, -aufbereitung, -verarbeitung und -speicherung übernommen.

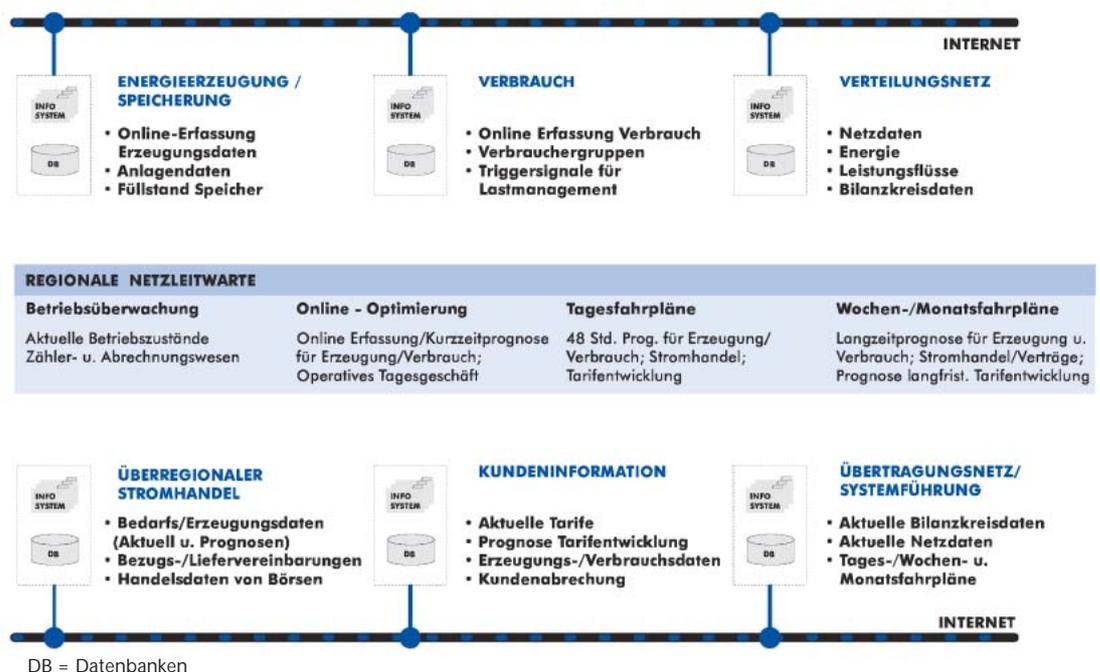


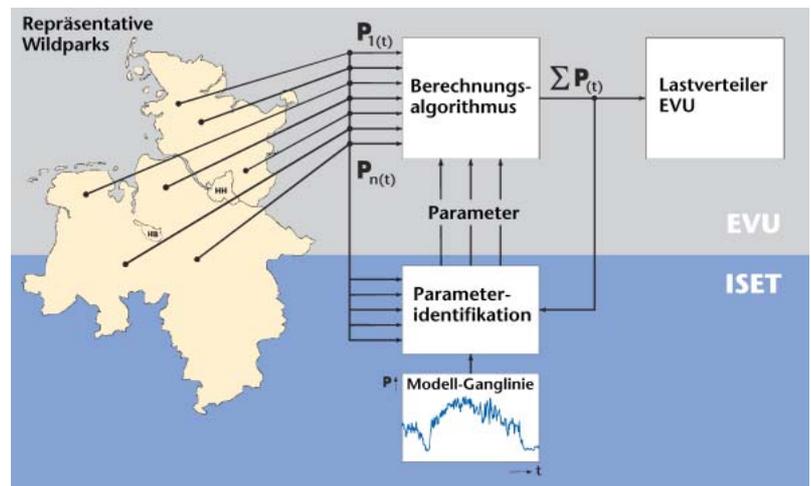
Abbildung 4 Regionale Netzleitwarte zum Energiemanagement (ISET)

Internet-Informationssysteme erlauben dabei einen Datenaustausch mit einfachen, standardisierten Protokollen und einen gleichfalls zuverlässigen Betrieb mit frei definierbaren Zugangsberechtigungen. Besonders für die folgenden Aufgabenbereiche ist der verstärkte Einsatz von internetgestützten Informationssystemen und Datenbanken zu erwarten (Abb. 4):

- Erfassung, Auswertung, Verarbeitung und Speicherung von Betriebsdaten dezentraler Erzeugungsanlagen
- Produktinformationen über dezentrale Erzeugungsanlagen zur Unterstützung von Standortoptimierung, Wartung- und Instandsetzung sowie für den Kundenservice
- internetgestützte Dienstleistungen für den Stromhandel mit tatsächlichen und prognostizierten Erzeugungsdaten
- internetgestützte Dienstleistungen für Netzbetreiber zur Unterstützung bei Kraftwerkseinsatzplanung und Netzregelung (Erzeugungsprognosen)

## 3.2 Onlineerfassung und Prognose der Energiebereitstellung

In einer von dezentralen Energieerzeugern dominierten Versorgungsstruktur werden sich zukünftig noch höhere Anforderungen an die Netzführung sowie die Planung und Bereitstellung ausreichender Kraftwerksreserven ergeben. Es wird darüber hinaus zunehmend darauf ankommen, die erforderliche Energie am Markt (u.a. am Spotmarkt) möglichst kostengünstig einzukaufen, ohne bestehende Stromlieferungsvereinbarungen zu verletzen. Für eine optimierte Erzeugungs- und/oder Bezugsplanung wird somit die möglichst genaue Kenntnis aller Parameter und Randbedingungen für die Energiebereitstellung aus unterschiedlichen Quellen sowie über die aktuelle Energienachfrage verstärkt notwendig. So wird z. B. die weitere Nutzung der Windenergie in relevanten Größenordnungen in einem dezentralen Energieversorgungssystem insbesondere auch davon abhängen, wie genau die Erzeugungsbedingungen bekannt sind [13].



### 3.2.1 Online-Erfassung der eingespeisten Windleistung

Wichtige Ausgangsgrößen für die Kraftwerkeinsatzplanung sind neben meteorologischen Parametern die aktuelle bzw. zu erwartende Last, die Verfügbarkeit der Kraftwerke, die Bilanz des Stromaustausches mit anderen Versorgungsunternehmen sowie die Berücksichtigung der notwendigen Reserveleistungen. Die Online-Erfassung der abgegebenen Leistung aller in einem Versorgungsgebiet betriebenen Windenergieanlagen (WEA) kann als genauestes Verfahren zur Gewinnung von Basisdaten zur Erzeugungsprognose angesehen werden, wobei jedoch die messtechnische Ausstattung sämtlicher WEA unter den Bedingungen in Deutschland kaum zu realisieren ist. Die Online-Ermittlung macht demnach ein Berechnungsmodell notwendig, das die Übertragung von gemessenen Zeitverläufen der Leistung repräsentativer Windparks auf die Gesamteinspeisung aus Windenergieanlagen eines größeren Versorgungsgebietes ermöglicht (Abb. 5).

So kann die aktuell eingespeiste Windleistung für das betreffende Versorgungsgebiet approximiert werden [14]. Die Messdaten der ausgewählten Windparks werden dazu über Standleitungen einer Leitwarte übermittelt. Die für den Lastverteiler online berechnete Gesamteinspeisung wird rückwirkend in regelmäßigen Abständen mit einer über Extrapolation von Wind- und Leistungsdaten

Abbildung 5  
Online-Erfassung  
der eingespeisten  
Windleistung bei der  
E.ON Netz GmbH  
(ISET)

vorausberechneten Gesamteinspeisung verglichen und mittels Parameteroptimierung fortlaufend angepasst und verbessert.

### 3.2.2 Prognose der zu erwartenden Windleistung

Für eine betriebswirtschaftlich optimierte Einbindung der Windenergie ist vor allem eine Prognose der Windleistung für den Zeithorizont der kurzfristigen Einsatzplanung von 1 bis 7 Tagen erforderlich. Diese dient im allgemeinen der Erstellung von Tagesfahrplänen für die thermischen Erzeugungsanlagen und zur Bestellung von Energiemengen (aus bestehenden Verträgen und in Zukunft zunehmend auch vom Markt). Durch eine möglichst genaue Vorhersagbarkeit der Windleistung kann deren Marktwert entscheidend erhöht werden. Der Kapazitätseffekt der Windenergie kann dann neu bewertet und durch die bessere Planbarkeit im Kraftwerksverbund vermutlich deutlich höher angesetzt werden.

Zusätzlich können die positiven Umweltauswirkungen der Windenergienutzung – die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen – durch eine gesicherte Prognose der zu erwartenden Windeinspeisung verstärkt werden. Denn sie ermöglicht, eine optimale Fahrweise und einen optimalen Einsatz der thermischen Kraftwerke, sodass die vorzuhaltende Reserveleistung minimiert werden kann. Erforderlich hierfür ist vor allem die Momentanoptimierung für den Zeitraum von 5 bis 15 Minuten, in dem die momentanen Betriebsparameter und Sollwerte für die Erzeugerwerke aufgrund der tatsächlichen Lastsituation und der tatsächlichen Energielieferung der dargebotsabhängigen Windenergie bestimmt werden.

Ziel aktueller Forschungsarbeiten ist daher die Entwicklung, Erprobung und Demonstration eines computergestützten Modells zur Kurzzeitprognose (bis zu 48 Stunden) der Windeinspeisung für mittlere und größere Versorgungsgebiete. Damit werden sowohl Versorgungsunternehmen auf der Höchstspannungs- wie auch der Mittelspannungsebene angesprochen.

Die zu entwickelnden Modelle werden sich besonders durch folgende Eigenschaften auszeichnen [15]:

- kurze Berechnungszeit (online)
- hohe Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes in verschiedenen Versorgungsgebieten und unterschiedlichen Anwendern (Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreiber)
- hohe Genauigkeit der prognostizierten Einspeisung

## 4. Fazit

Neben der technischen Weiterentwicklung einzelner Komponenten und Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen stellt die Systemauslegung sowie die Verbesserung ihrer Integration in bestehende Versorgungsstrukturen für Elektrizität und Wärme ein wichtiges Arbeitsgebiet für Forschung und Industrie dar. Wenn Wissenschaft, Markt und Politik gut zusammenwirken kann der Ausbau zur Nutzung erneuerbarer Energien weiterhin erfolgreich vorangebracht werden.

## Literatur

- [1] Fishedick, M., Nitsch, u.a. ,  
Langfristszenarien für eine nachhaltige  
Energienutzung in Deutschland,  
Umweltbundesamt, FKZ 200 97 104  
(in Arbeit)
- [2] F. Staiß: Jahrbuch Erneuerbare Energien  
2001. Hrsg.: Stiftung Energieforschung  
Baden-Württemberg, Karlsruhe.  
Verlag Bieberstein, Radebeul 2001.
- [3] J. Nitsch, C. Rösch u.a.:  
Schlüsseltechnologien Erneuerbare  
Energien. Teilbericht im Rahmen des  
HGF-Verbundprojekts: Global zukunfts-  
fähige Entwicklung – Perspektiven für  
Deutschland. Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt, Stuttgart,  
Forschungszentrum Karlsruhe, Juli 2001.
- [4] W. Kleinkauf, F. Raptis, O. Haas:  
"Elektrifizierung mit erneuerbaren  
Energien"; in: Themenheft 96/97;  
Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS);  
Köln; 1997
- [5] C. Enßlin, M. Hoppe-Kilpper:  
"Elektrische Energieversorgung mit  
hohem Anteil dezentraler und regenera-  
tiver Stromerzeugung"; Kurzstudie im  
Auftrag des Deutschen Bundestags –  
Ausschuss für Bildung, Forschung und  
Technikfolgenabschätzung;  
ISET Kassel 2000
- [6] H. Barthels, K. Bonhoff, W. A. Brocke,  
H.-G. Groehn, G. Heuts, M. Lennartz, H.  
Mai, J. Mergel, P. Ritzenhoff: "PHOEBUS  
Jülich: An Autonomous Energy Supply  
System Comprising Photovoltaic,  
Electrolytic Hydrogen, Fuel Cell",  
Int. J. Hydrogen Energy,  
Vol. 23, No. 4, pp. 295-301, 1998
- [7] H. Janßen, W.A. Brocke, B. Emonts,  
H.-G. Groehn, G. Heuts, H. Mai,  
D. Stolten: PHOEBUS Jülich –  
Entwicklungsstand und aktuelle  
Ergebnisse, 12. Intern. Sonnenforum,  
Freiburg 2000
- [8] W. A. Brocke, P. Ritzenhoff, H. Barthels:  
Systematic Design of the PHOEBUS Jülich  
Energy Management System, Hydrogen  
Energy Process XI, Proc. 11th World  
Hydrogen Energy Conference,  
Vol. 2, pp. 1191-1196, Stuttgart 1996
- [9] G. Czisch, M. Durstewitz,  
M. Hoppe-Kilpper, W. Kleinkauf:  
"Windenergie gestern, heute und  
morgen"; Husum Wind 1999; Husum
- [10] Trieb, F., Nitsch, J., Knies, G., Strom und  
Trinkwasser aus solarthermischen  
Kraftwerken, Energiewirtschaftliche  
Tagesfragen, 51. Jg., (2001),  
Heft 6, S. 386-389
- [11] Trieb, F., Nitsch, J., Knies, G., Milow, B.:  
Markteinführung solarthermischer  
Kraftwerke - Chance für die Arbeitsmarkt-  
und Klimapolitik, Energiewirtschaftliche  
Tagesfragen, 48.Jg., Heft 6 (1998),  
S. 392-397
- [12] Rudervall, R., Charpentier, J.P.,  
Raghuveer, S., High Voltage Direct  
Current (HVDC) Transmission Systems –  
Technology Review Paper presented at  
Energy Week 2000, Washington,  
D.C., USA, March 7-8, 2000
- [13] H. Bouillon: "Windenergienutzung und  
Kraftwerkseinsatzplanung"; Kasseler  
Symposium "Energie-Systemtechnik  
1997"; ISET Kassel 1998
- [14] C. Enßlin, B. Ernst, M. Hoppe-Kilpper,  
W. Kleinkauf, K. Rohrig:  
"Online Monitoring of 1700 MW Wind  
Capacity in an Utility Supply Area"; 1999  
European Wind Energy Conference; Nice
- [15] K. Rohrig: "Online-Monitoring and Short-  
Term Prediction of 2400 MW Wind  
Power in an Utility Supply Area"; IEA  
Expert Meeting "Wind Forecasting  
Techniques"; Boulder; USA