



Prof. Dr. Christian Jänig
Stadtwerke Unna GmbH

Dezentrale Energiesysteme als Konsequenz des Klimawandels

**Grundlagen und Strukturen
Virtueller Kraftwerke**



Gliederung

I. Einführung

II. Ausgangssituation

1. Der „energiewirtschaftliche Tetraeder“ – die Quadratur des Kreises?
2. Veränderungen der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen
 - 2.1 Das ökologische Gesetz des („energiewirtschaftlichen“) Kapitalismus
 - 2.2 Die Unfähigkeit des marktdogmatischen Liberalismus zur Generierung einer ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit
 - 2.3 Technologische „Quantensprünge“ im Bereich der regenerativen Energieerzeugung
 - 2.4 Die (R)Evolution der Informationstechnik

III. Paradigmenwechsel zu dezentralen Energiesystemen auf Grund sich verändernder gesellschaftspolitischer, ökonomischer und ökologischer Rahmenbedingungen

1. Grundstrukturen dezentraler Energiesysteme
2. Smart Metering
3. Smart Poly Grids
 - 3.1 Stromnetze als monovalente Smart Grids
 - 3.2 Gasnetze als monovalente Smart Grids
4. Das Konzept des „Virtuellen Kraftwerkes“
 - 4.1 Die Konzeption des „intelligenten Lokalen Energiemanagementsystems“
 - 4.2 Regelungstechnische Strukturmerkmale
 - 4.3 Informationstechnologische Strukturmerkmale
5. Das Leitprojekt „Virtuelles Kraftwerk“ in Unna
 - 5.1 Grundlagen
 - 5.2 Die derzeitigen Regelungssysteme
 - 5.3 Die Regelungsstruktur des „Virtuellen Kraftwerkes“
6. Zusammenfassung

I. Einführung

Durch die Liberalisierung der Energiemärkte auf der Grundlage der GATT-Verträge sollte neben der „Zerschlagung“ der Monopolstrukturen – die in Deutschland allerdings erst als Folge des (Reichs-)Energiewirtschaftsgesetzes von 1936 entstanden sind – im Bereich von Erzeugung und Verteilung auch der Markteintritt neuer, bisher „energieferner“ Akteure erreicht werden. Grundlage war hierbei die (nationalökonomische) Liberalismustheorie, der gemäß sich auf liberalisierten Märkten auf Grund der Wettbewerbs- und Konkurrenzsituation automatisch „marktgerechte“ Preise einstellen werden – „der Markt wird es schon richten“. Das Scheitern dieses theoriebasierten Ansatzes zeigt sich allerdings schon allein in der Notwendigkeit, eine restriktive gesetzliche Regulierung zu installieren.

Plakativ kann für das Scheitern dieses marktdogmatischen Liberalismus¹ angeführt werden:

- der nationalökonomisch ausgerichtete marktdogmatische (Neo-)Liberalismus enthält (zwangsläufig) kaum Mechanismen und Instrumente für globalisierte Wettbewerbsmärkte
- die im nationalökonomisch fundierten Neo-Liberalismus unterstellten idealtypischen Annahmen und Grundbedingungen sind im realen Wettbewerbsmarkt nicht existent²
- die wirtschafts- und gesellschaftspolitisch notwendigen Steuerungsmechanismen führen anstelle einer Deregulierung zu einer Re-Regulierung und konterkarieren somit die (theoretischen) Grundbedingungen des Liberalismus
- die unterschiedlichen Machtverhältnisse der einzelnen Marktakteure führen zu einer Oligopolisierung anstelle der angestrebten vollkommenen Konkurrenz (K. Marx hatte mit seiner „Ergebnisvorhersage“ für die Entwicklung des Kapitalismus zur Oligopolisierung wohl Recht, nur beschrieb er den falschen Weg...)

Dies führte sowohl bei der EU als auch im Rahmen der bundesdeutschen Liberalisierung des Energiemarktes zu oligopolistischen Erzeugungsstrukturen, so dass beispielsweise die Volatilität der Strompreise an der EEX weniger das Resultat des Wettbewerbsgeschehens auf dem Erzeugungsmarkt als vielmehr das Ergebnis oligopolistischer Strukturen sind – bekanntlich besitzen die „großen 4“ Kraftwerksbetreiber in Deutschland ca. 85 % der relevanten (Groß-)Kraftwerkskapazität³.

Mittlere und kleinere, vor allem kommunal ausgerichtete Energieversorger können sich im Rahmen marktwirtschaftlicher Gegebenheiten aus dieser Erzeugungsabhängigkeit nur dadurch lösen, dass sie

- gemeinschaftlich Mittellastkraftwerke (vor allem auf GuD-Basis) errichten und betreiben, um hierdurch Einfluss auf ihre Strombezugskosten zu nehmen
- den sowohl ökologisch (Klimawandel) als auch technologisch/ökonomisch induzierten Paradigmenwechsel von zentralen zu dezentralen Energiestrukturen als Chance begreifen und aktiv unterstützen

¹ vgl. Jänig (2004), Wissensmanagement, Berlin, Heidelberg etc. 2004, S. 40 ff

² vgl. die Ausführungen in Abschnitt II, 2.2

³ Diese Struktur wird durch die Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke weiterhin zumindest für die nächsten beiden Jahrzehnte zementiert.

- durch die lokal dominierte Kundenbindungsführerschaft anstelle einer Kosten- oder Preisführerschaft ihre Stärken zum Einsatz bringen und somit nachhaltig ihre „Überlebensfähigkeit“ bewahren⁴
- anstelle der „monolithischen“ Energie-Kilowattstunde „angereicherte“ Energiedienstleistungen vermarkten, um dem Kundenwunsch nach Komplexitätsreduzierung entsprechen zu können.

Vor allem die sich im Klimawandel manifestierte Verschwendung von Rohstoffen, Materialien sowie fossilen Energieträgern erzwingt den Wandel vom fossilen zum solaren Energiezeitalter, da sich ansonsten die Schere zwischen der global und (derzeit auch noch) lokal steigenden Energienachfrage einerseits sowie der Endlichkeit fossiler Energieressourcen andererseits irreversibel öffnet.

Diese „holzschnittartigen“ Thesen sollen nachfolgend näher erläutert werden.

II. Ausgangssituation

1. Der „energiewirtschaftliche Tetraeder“ – die Quadratur des Kreises?

Um die Vereinbarkeit bzw. Unvereinbarkeit von Ökonomie und Ökologie zu kennzeichnen, wird häufig das Bild von der „Quadratur des Kreises“ bemüht und damit ein sich konterkarierendes Verhältnis postuliert. Des Weiteren wird der Begriff der „Nachhaltigkeit“ sowohl von Ökologen als auch Ökonomen ge- bzw. teilweise auch missbraucht – daher erscheint dieser Begriff in der medialen, öffentlichen Wahrnehmung als ambivalent. Ungeachtet dessen sind zwangsläufig sowohl eine „nachhaltige Ökonomie“ als auch die ökologische Nachhaltigkeit in erheblichem Maße interdependent. Dies gilt nicht nur für die globale Sichtweise, sondern vor allem auch für den lokalen Bereich – analog zum klassischen Motto des „Global denken – lokal handeln“.

„Bricht“ man diese Interdependenzen auf die Energieversorgung herunter, so haben wir es eigentlich mit einem dreidimensionalen Vektorraum bzw. Tetraeder zu tun, der durch die Dimensionen „**Marktliberalisierung** bzw. Globalismus“, „**Ökologie**“ und „**Dezentrale Energiesysteme** bzw. -konzepte“ definiert wird. Der Vektor „Ökologie“ soll hierbei durch die Kriterien „rohstoffsparendes Wirtschaften“ bzw. „Ressourceninputoptimierung“ charakterisiert werden, während der „Globalismus“ als wirtschaftliche Dimension der Globalisierung durch „Marktliberalisierung“ und „(R)Evolution der Informationstechnologie“ gekennzeichnet ist. Aus diesem Kontext heraus resultiert dann letztlich der Paradigmenwechsel von zentralen zu „dezentralen Energiesystemen“ als dritter Vektor. Insgesamt ergibt sich somit ein „energiewirtschaftlicher Tetraeder“ oder auch Trilemma (vgl. Abb. Nr. 1). Letzteres soll im Folgenden im Hinblick auf seine Inhalte und Auswirkungen „spotlichtartig“ beschrieben werden.

⁴ vgl. Jänig (2004) a. a. O., S. 360 ff

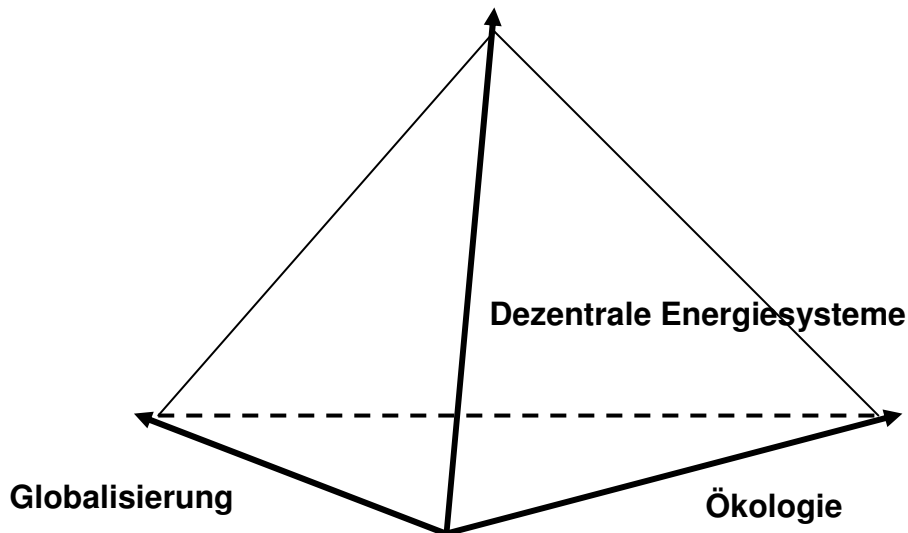


Abb. Nr. 1: „Energiewirtschaftlicher Tetraeder“

2. Veränderungen der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen

2.1 Das ökologische Gesetz des („energiewirtschaftlichen“) Kapitalismus

Unbestritten wurde bisher die Energie- und Rohstoffsicherung meistens mit der Erschließung neuer Quellen bzw. Ressourcen gleichgesetzt. Auch die bisher praktizierte sog. „Umweltpolitik“ fokussierte fast ausschließlich auf die **Schadstoffproblematik**, nicht jedoch auf die **Ressourcenproblematik**: Die Verringerung der Schadstoffemissionen wurde im Sinne eines „Reparaturbetriebes“ durch den Einsatz neuer Technologien bzw. Verfahren erreicht – diese implizierten jedoch einen zusätzlichen Ressourcenverbrauch und damit eine zusätzliche, nachhaltige Beeinträchtigung. Der hierdurch in der Vergangenheit ausgelöste und sich – bei unverändertem Verhalten – noch verstärkende Stress, dem unser Planet unterliegt, muss zwangsläufig zu irreversiblen Änderungen führen. Dieser Stress basiert sowohl auf dem hohen Ressourcenverzehr der Rohstoffe als auch fossiler Energien und des Wassers. Allein durch Verzicht, Reduktion energieintensiver Verfahren sowie Effizienzerhöhung kann nachhaltig dem Klimawandel nicht Einhalt geboten werden.

Umwelt bzw. Klimaschutz wird in der breiten Öffentlichkeit vor allem auf die Umweltverschmutzung (CO₂ etc.) fokussiert. Die größte umweltpolitische Herausforderung ist nicht so sehr das Verschmutzungsproblem, sondern der exponentiale Anstieg der Rohstoff-, Energie- und Materialflüsse, bedingt durch Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum. Erforderlich ist es daher, insgesamt intelligent mit den begrenzten Rohstoffressourcen unseres Planeten umzugehen. Dies bedeutet, dass beispielsweise Verbrauchsgüter vollständig biologisch abbaubar sind. Dies bedeutet auch, dass – analog zum geschlossenen abfallfreien Verwertungssystem der Erde – sich die Gebrauchsgüter quasi endlos weiter verwenden lassen: cradle to cradle – von der Wiege bis zur Wiege und nicht zur Bahre. Diese Problematik zeigt sich beispielsweise am Rebound Effekt: Ein einzelner Computer verbraucht aufgrund der Effizienzerhöhung weniger

Energie als vor 20 Jahren – durch die weltweit steigende Leistungsfähigkeit, Anwendungs- und Nutzerzahlen wird sich deren Energieverbrauch bis zum Jahre 2030 dennoch verdreifachen. Das aus der neoklassischen Wirtschaftstheorie stammende Postulat eines Zuwachses bzw. einer Verbesserung der jeweiligen Technologien zur Problemlösung verkennt, dass es **keine technische Lösung** für das Problem der Ausbeutung begrenzter Ressourcen gibt. Bislang ist der Mensch das einzige Element des Systems Erde, das – teilweise hochgiftigen – nicht verwertbaren Abfall produziert: So „beherbergt“ beispielsweise ein TV-Gerät 4.360 schädliche Chemikalien. Diese Schadstoffe werden durch neue Technologien in Qualität und Quantität reduziert – jedoch durch den zusätzlichen Einsatz begrenzter Ressourcen. Beispielhaft sei hierfür auch der Abgaskatalysator angeführt: Die Reduzierung schädlicher Stickoxide erfolgt aufgrund einer exponentialen Verbrauchszunahme des endlichen Rohstoffes Platin.

Verstärkt wird dieser Trend zwangsläufig noch durch die Bevölkerungszunahme, vor allem in der sog. Dritten Welt – die Weltbevölkerung hat sich zwischen 1950 und 1990 verdoppelt und wird sich bis zum Jahre 2050 nochmals verdoppeln (bei einer optimistischen Einschätzung der ergriffenen Maßnahme zur Geburtenkontrolle). Da letzterer Prozess eine inhärente Eigendynamik besitzt und kaum noch im Verlauf der kommenden drei Generationen wesentlich zu beeinflussen ist, muss der Energieverbrauch pro Kopf der Weltbevölkerung auf ca. 1,5 kW (= 13.000 kWh p. a.) reduziert werden⁵. Dies würde eine Reduzierung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen auf ca. 2,5 – 3,5 t pro Kopf der Weltbevölkerung im Jahr implizieren⁶. Die sich hieraus ergebende Grundbedingung, nämlich **niedrigere Schadstoffemissionen bei gleichzeitiger Reduzierung des Ressourcenverzehrs** zu erreichen, wurde jedoch bisher noch nicht gelöst⁷. Dies führt zu einer „Plünderung unseres Planeten“ als Ergebnis der von E. v. Weizsäcker als „ökonomisches Zeitalter“ gekennzeichneten letzten beiden Jahrhunderte. Gegenstand bzw. Fokus des sich hieran anschließenden „ökologischen Zeitalters“ muss es daher sein, Modelle und Konzeptionen zur Überwindung dieser vorgeblich ökonomischen Sachzwänge zu entwickeln und deren Ergebnisse in Form ökologischer Systeme, Verfahren, Handlungsanweisungen und ganzheitlicher Denkstrukturen umzusetzen. Diesbezüglich ist – analog zur Natur – ein vernetzter, systemischer bzw. holistischer Denkansatz zwingend erforderlich: Die Natur funktioniert prinzipiell wie ein vernetztes, holistisches System, bei dem alle Subsysteme bzw. Systemelemente direkt oder indirekt miteinander verbunden sind – sowohl bei der „Produktion“ als auch der „Entsorgung“. Aus diesem Grund gibt es im natürlichen Kreislauf auch keine „Abfallprobleme“, da die „Reststoffe“ bzw. der Output eines Elementes als Input von einem anderen wiederum genutzt bzw. verarbeitet werden. Das anthropogene Handeln greift allerdings in dieses System ein und beeinträchtigt dessen Ultrastabilität – mit weitreichenden, zerstörerischen Folgen. Aus ökonomischer Sicht lässt sich hieraus das **„ökologische Gesetz des Kapitalismus“** ableiten: Nicht vom Ressourcenverbrauch des Planeten Erde, sondern von den Zinsen dieser Ressourcen zu leben. Nur dann erwachsen sowohl den Entwicklungsländern als auch den nachfolgenden Generationen jene ökonomisch-ökologischen Handlungsräume, die diese benötigen. Für den Energiebereich impliziert dies

⁵ - in den USA beträgt er derzeit 11 kW und in der BRD 6 kW

⁶ bei derzeit 20,9 t in den USA und 13,3 t in der BRD

⁷ vgl. v. Weizsäcker, E. U., Lovins, A. B., Lovins, L. H. (1995), Faktor 4 - Doppelter Wohlstand, halbiertes Verbrauch, München 1995

die Generierung einer sowohl ökonomisch als auch ökologisch nachhaltig ausgerichteten Energieerzeugung, -verteilung und -verwendung. Ungeachtet des Wissens über diese allgemein be- und anerkannten Daten, Informationen und Erkenntnisse wird dennoch fast permanent hiergegen verstoßen.

2.2 Die Unfähigkeit des marktdogmatischen Liberalismus zur Generierung einer ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit

Eine der Ursachen für dieses scheinbar irrationale Verhalten ist darin zu sehen, dass die Nationalökonomie im Rahmen der **globalen Liberalisierung** nur noch in geringem Maße eine „erklärende Funktion“ bzw. axiomatischen Charakter besitzt und daher kaum Handlungsempfehlungen geben sowie wirkungsrelevante Methoden und Instrumente zur Verfügung stellen kann – obwohl sie strukturell ein axiomatisches System repräsentiert: Auf der Basis von Grundbedingungen bzw. -annahmen werden deduktiv-logisch im aristotelischen Sinne „allgemeingültige“ Schlussfolgerungen abgeleitet. Grundlage des marktdogmatischen Liberalismus ist hierbei die Prämisse, dass der „Markt“ per se zu Gleichgewichtszuständen führt, wobei inhärent unterstellt wird, dass

- alle Marktteilnehmer über quantitativ und qualitativ vollständige Informationen bzw. vollständiges Wissen verfügen
- alle Marktteilnehmer ein einheitliches und eindeutiges Wertesystem beachten und akzeptieren; dieses unterliegt weder einem kurz- bis mittelfristigen Wandel, noch versuchen die Marktteilnehmer, die einzelnen Werte bzw. deren Präferenzen zu beeinflussen (z. B. diejenigen der Nachfrager im Rahmen der Werbung)
- sich alle Marktteilnehmer bei wirtschaftlichen Entscheidungen immer „rational“ im Sinne des „homo oeconomicus“ verhalten
- im Rahmen des Marktgeschehens sich immer die Besten durchsetzen (quasi ein Wirtschaftsdarwinismus); da sich jedoch Wohlstand und finanzielle Ressourcen „vererben“ und sich hierdurch wirtschaftliche Macht aggregiert, ist die jeweilige Ausgangsbasis für die Marktakteure ungleich und impliziert wirtschaftliche Ungleichheiten bzw. Ungerechtigkeiten.

Die marktdogmatische Theorie des Liberalismus negiert somit den Einfluss der Marktteilnehmer sowie deren subjektive, egoistische Nutzenvorstellungen und -erwartungen: Die Präferenzen der Beteiligten als auch deren Handlungsmöglichkeiten zur Marktbeeinflussung sind nicht unabhängig voneinander und gleichen sich dadurch aus, sondern aggregieren sich clusterweise und determinieren hierdurch die Marktpreise bzw. -mechanismen (z. B. im Kapital- bzw. Finanzmarkt). Des Weiteren wird die Marktebene eines Produktes häufig nicht durch den „freien Wettbewerb“, sondern durch Werbung, Marketing, Macht und Manipulation bestimmt; hierdurch wird das Axiom des „Manchester-Liberalismus“, die freie und rationale Wahl und damit „vernünftige Entscheidung“ des Verbrauchers, gegenstandslos bzw. sogar ad absurdum geführt. Zynisch und überpointiert könnte formuliert werden, dass durch die Globalisierung im Sinne des marktdogmatischen Liberalismus die Markt- durch eine Macht-wirtschaft ersetzt wird. Daher ist ohne Wettbewerbsordnung sowie **regulierende Instanzen** der Schutz der Wettbewerbsteilnehmer (Marktteil-

nehmer) vor Kartellen sowie dem Missbrauch von wirtschaftlicher Macht und Marktbeherrschung durch übermäßige Konzentration nicht gewährleistet. Ein funktionsfähiger Leistungswettbewerb wird somit unterbunden, der Paradigmenwechsel von der Wahlfreiheit zum Wahlzwang geschieht. Der „freie Markt“ intendiert somit eher einen Marktanarchismus, der weder Kontraktfreiheit noch rechtliche Prinzipien grundsätzlich garantieren kann. Ursache hierfür ist, dass dieser marktdogmatische Liberalismus quasi „technokratisch“ eine Marktwirtschaft auf der Basis „rationaler“, mathematischer Axiome, Algorithmen und Regeln unterstellt und deshalb angeblich keiner Regulierung von „außen“ bedarf: ethische Werte, Normen etc. werden durch Zahlen und Algorithmen ersetzt. Übersehen wird dabei, dass Volkswirtschaften auch durch qualitative Faktoren definiert und determiniert werden, beispielsweise durch kulturelle und sozial geprägte Vor- und Einstellungen sowie Verhaltensweisen und dem „richtigen“ Verhältnis von Individualismus und Solidarität sowie Eigennutz und Gemeinwohl. Traditionelle Wertesysteme werden von einigen wenigen missachtet und intendieren aufgrund des Vertrauensverlustes auch ökonomische und soziale Verwerfungen sowie gesellschaftspolitisch bedenkliche Veränderungen. Gesellschaftspolitische und soziale Normen und Werte sowie die Normen des Kapitalismus sind nicht mehr kongruent, sondern haben sich diametral entwickelt und konterkarieren sich inzwischen.

Letztlich entsteht im marktdogmatischen Liberalismus die Wertschöpfung durch die Inanspruchnahme von vier Ressourcen: dem Arbeitsvermögen, dem Kapitalvermögen, dem Naturvermögen sowie dem Gesellschaftsvermögen – bei der Verteilung der Ergebnisse dieser Wertschöpfung werden allerdings die Kapitalgeber eindeutig bevorzugt. Die Marktmechanismen und daraus resultierenden Marktpreise können somit kein „neutrales Institut“, das zum Gleichgewicht führt, sein – sie führen vielmehr zum Ungleichgewicht bzw. zur Instabilität, die durch staatliche Reglementierungen verhindert werden muss⁸. Der Wettbewerb allein kann daher per se – wie von einer prästabilisierenden Harmonie durchzogen – nicht zur Verwirklichung gemeinwohlorientierter Ziele führen; Wettbewerb und Gemeinwohl sind vielmehr dichotome Elemente⁹. Zur Durchsetzung der Zielsetzungen des Gemeinwohls bedarf es daher instrumentell der staatlichen Regulierung – entweder in Form der Durchgriffsregelung oder einer „kooperativen Wirtschaftslenkung“.

Diese theorieimmanente Kritik gilt insbesondere gegenüber dem marktdogmatischen (Neo-)Liberalismus, da die globalisierten Rahmenbedingungen bzw. Ordnungssysteme (z. B. in Form von GATT oder WTO) im darwinistischen Sinn die (betriebs-)wirtschaftliche Optimierungsentscheidung zwischen mehreren Optionen fokussieren und dadurch u. a. das Prinzip der Subsidiarität konterkarieren. Der marktdogmatische Liberalismus ist zwangsläufig nicht in der Lage, Rahmenbedingungen bzw. Marktordnungen für den Globalismus zu definieren, da er auf singulären, individuellen bzw. egoistischen Interessen und Logiken basiert und zu uniformen Marktstrukturen führt. Er kann somit per se keine Regelungsinstanzen für die kapitalistisch-darwinistischen Prozesse des Globalismus generieren. Globalisierte Märkte optimieren ausschließlich die ökonomische Allokation; sie bedürfen somit aus gesellschaftspolitischer bzw.

⁸ vgl. Soros, G. (1997), Die kapitalistische Bedrohung, in: DIE ZEIT Nr. 4, 52. Jg., S. 25 ff, Hamburg 1997 sowie Jänig (2004), a. a. O

⁹ vgl. Hermann, E. (1997), Binnenmarkt-Richtlinien für Strom und Gas - Gestaltungsspielräume und Tendenzen bei einer Umsetzung in den EU-Mitgliedsstaaten, Berlin 1997

-ethischer Sicht sozialer, kultureller, ökologischer und damit politischer Rahmenbedingungen. Letztere können aufgrund der derzeitigen Erfahrungen nur als Vorgaben aufgrund des Primats von Politik und Ethik erfolgen – beispielsweise im Rahmen einer neuen „Weltordnung“ auf der Grundlage der sozialen Marktwirtschaft mit ökologischer Ausrichtung.

Diese systemimmanente Natur der Marktwirtschaft erfordert daher auch, dass das aus nationaler Sicht zu sehende wirtschaftspolitische „magische Viereck“ (Wachstum, Arbeitslosenquote, Inflationsquote, Staatsverschuldung) durch ein **global gültiges „magisches Viereck“** mit den Achsen „Bevölkerungswachstum“, „Ressourcenverbrauch“, „Wirtschaftswachstum“ und „gesellschaftspolitisch-soziale Entwicklung“ ergänzt bzw. ersetzt werden muss. Im Hinblick auf die Ressource „Energie“ ist es daher nicht verwunderlich, wenn namhafte Wissenschaftler feststellen, dass

„das verschwenderische Energiewirtschaftssystem der Ersten Welt, wie es sich seit der Technisierung entwickelt hat, (...) nicht mehr zukunftsfähig [ist] und (...) nicht auf die Dritte Welt übertragen werden [darf]. Die Zeit drängt, umgehend die ökologische Umsteuerung sowohl der Industrie- wie der Agrargesellschaften einzuleiten. Nur eine ökologische Marktwirtschaft wird die Stoff- und Energieflüsse auf ein umweltverträgliches Maß einschränken und umweltschädliche Stoff- und Energieumsätze weitgehend vermeiden können.“¹⁰

Dies erfordert allerdings, den Begriff der „**Nachhaltigkeit**“ zu erweitern: Dies impliziert die langfristige Ausbalancierung der sozialen, ökonomischen, ökologischen und kulturellen Aspekte der Gesellschaft im Rahmen des Prozesses einer „Dematerialisierung“ durch die signifikante Erhöhung der (kognitiven und materiellen) Ressourcenproduktivität.

2.3 Technologische „Quantensprünge“ im Bereich der regenerativen Energieerzeugung

Als Konsequenz „energietechnologischer Quantensprünge“ schließlich hat sich in den vergangenen beiden Jahrzehnten – größtenteils auch bedingt durch nationalstaatliche Subventionen und Programme – ein **technologischer „Quantensprung“** bei den Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung bzw. zur elektro-thermischen Verwertung nachwachsender Rohstoffe vollzogen. Beispielhaft seien die Windkraft- und Photovoltaikanlagen sowie Kraft-Wärme-Kopplungssysteme zur Nutzung von Gruben- und Biogas als auch in den Bereichen Holzvergasung, -verschmelzung und -verbrennung angeführt. Nicht vergessen werden dürfen in diesem Zusammenhang auch die Brennstoffzellen- sowie die Wasserstofftechnik, auch wenn erstere erst in ca. 10 Jahren und letztere in ca. 40 Jahren ihren (markt-) wirtschaftlichen Durchbruch erzielen werden. Derartige Erzeugungssysteme sind – vor allem vor dem Hintergrund des EEG bzw. KWKG – wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber der Energieerzeugung in zentralen Großkraftwerken. Anhängern des markt-dogmatischen Liberalismus bzw. Ordoliberalismus mag und kann diese Subvention ein „Dorn im Auge“ sein – dies erscheint allerdings als ideologische Phantomdiskussion, da damit jede staatliche Unterstützung des F+E-Bereiches bzw. spezifischer Marktsegmente und Technologien (einschließlich aller Facetten der Informations- und Gentechnologie beispielsweise) sowie alle ordnungspolitischen Maßnahmen in Frage zu

¹⁰ Bach, W. (1996), Energie und Klima, in: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 7, 1996, S. 30 - 40

stellen wären. Bekanntlich lehnen die marktwirtschaftlichen Akteure in „sonnigen Zeiten“ jeden staatlichen Eingriff ab, während bei „Schlechtwetterperioden“ nationalstaatliche Interventionen verlangt werden.

2.4 Die (R)Evolution der Informationstechnik

In den beiden letzten Jahrzehnten wurden sowohl in den USA als auch im deutschsprachigen Raum die traditionellen Produktionsfaktoren „Arbeit, Kapital und Boden“ bzw. „Men, Machine, Material and Money“ durch die Faktoren Information bzw. Wissen¹¹ ergänzt. Letztere wurden jedoch anfangs nur in ihrer quantitativen Ausprägung im Gegensatz zu den qualitativen Dimensionen der ersteren gesehen. Die Entwicklung sowohl der hardwaretechnischen Komponenten sowie der Netztechnologien als auch der entsprechenden Applikationen führten jedoch zur **Instrumentalisierung und Operationalisierung des Faktors „Information“**, um hierdurch anstelle der früher angestrebten Komplexitätsreduzierung die Erhöhung von **Flexibilität und Adaptionfähigkeit** erreichen zu können. Somit mutiert die Informationstechnik zu einer Kernkompetenz als technologischer Basis für Planungs- und Steuerungssysteme. Nur durch diese Instrumentalisierung und Operationalisierung der Information im Rahmen eines Informations- und Wissensmanagements ist es möglich, die mit dezentralen Energieversorgungskonzepten verbundene Zielsetzung nachfragefokussierter Planungs-, Erzeugungs- und Verteilungsstrukturen zu erreichen und somit andere Wertschöpfungsprozesse zu generieren.

Die Evolution der Informationstechnik ermöglicht somit die systemische Integration dezentraler Erzeugungseinheiten in ein **dezentral strukturiertes, nachfragefokussiertes Energiekonzept bzw. -system**. Die Zielsetzung hierbei besteht darin, zentrale und dezentrale Erzeugungseinheiten **nachfrageabhängig** dergestalt „intelligent“ miteinander zu vernetzen, so dass **integrierte, durchgängige Energie- und Informations- sowie Kommunikationsstrukturen** einerseits die Optimierung von der Erzeugung über Übertragung und Verteilung bis zum Endverbrauch ermöglichen und andererseits den Energieverbrauch an die momentan verfügbare (zentrale und dezentrale) Erzeugerleistung nach ökonomischen und ökologischen Kriterien ausrichten und unter der Berücksichtigung physikalischer Gegebenheiten in den bestehenden Netzverbund integrieren können. Diese zentrale Bedingung dezentraler Energiestrukturen impliziert fast zwangsläufig das Vorhandensein entsprechender Informationstechnologien bzw. eines intelligenten **Informations- und Wissensmanagements**.

Aufgrund dieser „holzschnittartig“ skizzierten Veränderungen der Rahmenbedingungen der Energiewirtschaft wird sich in den nächsten 10 – 20 Jahren auch auf Grund des Klimawandels der Paradigmenwechsel von zentralen zu dezentralen Energiesystemen vollziehen.

¹¹ Hierbei wird Wissen als mehrdimensionale Verknüpfung mehrerer Informationen sowie der sich anschließenden zielgerichteten (objektorientierten) Analyse, Bewertung und Anwendung verstanden – vgl. Jänig (2004), S. 129 ff.

III. Paradigmenwechsel zu dezentralen Energiesystemen auf Grund sich verändernder gesellschaftspolitischer, ökonomischer und ökologischer Rahmenbedingungen

1. Grundstrukturen dezentraler Energiesysteme

Die in Monopolzeiten entwickelte und heute noch weitgehend bestehende Philosophie bzw. Ideologie der nationalen Energieversorgung fokussiert überwiegend darauf, mittels großer Kraftwerkseinheiten zentral die Grund-, Mittel- und Spitzenlast zu erzeugen und über Hochspannungsnetze zu den Lastschwerpunkten zu übertragen, dort zu transformieren und über Mittel- bzw. Niederspannungsnetze bis zum Endverbraucher zu verteilen. Diese zentralistisch-hierarchische, erzeugungsdominierte Struktur beinhaltet sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf den jeweiligen Verteilungsebenen jeweils für sich getrennte, eigenständige Regelungssysteme, die überwiegend ökonomisch fokussierte Erfahrungswerte bzw. -quoten berücksichtigen, wobei das Sicherheits- und Reserveredenken im Vordergrund steht.

Diese **angebotsorientierte** Erzeugung und Übertragung hatte bis vor kurzem einerseits ihre Berechtigung aufgrund der sich hieraus ergebenden günstigeren Kostenstrukturen (sog. economies of scale) im Rahmen demarkierter Gebiets- bzw. Monopolstrukturen. Die implizit zu Grunde liegende „Angebotsorientierung“ basierte andererseits darauf, dass aufgrund des Fehlens der notwendigen Informations- und Kommunikationstechnologien und -strukturen die Vielzahl der Endverbraucher bei ihrem individuellen und unkorrelierten sowie nicht koordinierten energetischen Abnahmeverhalten weder direkt erfasst noch „geregelt“ werden konnten. Infolgedessen mussten große Kraftwerksleistungen zentral vorgehalten werden, um sowohl extreme Lastspitzen „auffangen“ als auch die Reserveleistung für Störfälle vorhalten zu können.

In den letzten zwei Jahrzehnten sind allerdings dezentrale, kleinteilige Erzeugungssysteme – teilweise auch aus ökologischen Gründen heraus – zur technologischen „Marktreife“ weiterentwickelt worden: neben der „lokalisierten“ Kraft-Wärme-Kopplung (Motoren-BHKW, Microgasturbine, Brennstoffzelle etc.) sind hier vor allem Windenergieanlagen, kleinere Wasserkraftwerke, Erzeugungseinheiten auf der Grundlage von Biomasse sowie die Photovoltaik zu nennen. Aufgrund dieser ökologisch und/oder ökonomisch induzierten Entwicklung muss davon ausgegangen werden, dass die Energieerzeugung mit einem entsprechend hohen Anteil fluktuierender Quellen dezentrale Strukturen annehmen wird. Dies führt zwangsläufig zu einer Verlagerung der Systemführung und Überwachung auf die unteren Netzebenen und erfordert daher die „intelligente“, informationstechnologisch gestützte Einbindung und Steuerung dieser dezentralen Einheiten im Rahmen dezentraler Energiekonzepte¹².

Der sich hierdurch ergebende Paradigmenwechsel kann „plakativ“ mit dem Wandel von

der zentralen, angebotsorientierten Energieversorgung von „**oben nach unten**“¹³ mit getrennten, jeweils für sich geregelten Erzeugungs- und Verteilungsstrukturen

zur

¹² dieser Begriff darf nicht mit dem Objekt der in den 80er Jahren geführten Diskussion über „Energieversorgungskonzepte“ verwechselt werden

¹³ bezogen auf die Spannungsebenen

dezentralen, nachfragefokussierten Energieversorgung „**von unten nach oben**“ bei gleichzeitiger Optimierung dezentraler und zentraler Erzeugung sowie dezentralem Verbrauch auf der Grundlage hierarchischer, vermaschter Regelkreissysteme unter Berücksichtigung ökonomischer **und** ökologischer Parameter

gekennzeichnet werden. Die sich hierbei ergebende integrale Mischstruktur erfordert die Existenz „intelligenter, lokaler Energiemanagementsysteme (sog. Virtuelle Kraftwerke)“. Die „plakative“ Zielsetzung hierbei lautet, die Energie dort zu erzeugen, wo sie verbraucht wird bzw. vice versa. Hierdurch soll die Energieeffizienz sowohl der konventionellen als auch der regenerativen Erzeugungsanlagen durch die Verbrauchsoptimierung bzw. -regelung erhöht werden. Dies bedingt ein kategorisiertes und kaskadiertes „Clustering“ sowohl der Erzeugungs- als auch der Verbrauchsanlagen. Die Bildung dieser Cluster erfolgt unter Berücksichtigung der jeweiligen energiewirtschaftlichen Bedeutung sowie der jeweiligen kurz- bzw. mittelfristigen Beeinflussbarkeit¹⁴. Diese Entwicklung kann auch als „back to the roots“ charakterisiert werden, da die Stromversorgung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch lokale Erzeugungseinheiten sowie dazugehörige Verteilnetze geprägt wurde. Erst nach dem Ende des 1. Weltkrieges wurden diese „lokalen Inseln“ auf nationaler Ebene miteinander vernetzt, der sich dann ab 1950 die internationale Verflechtung auf der Höchstspannungsebene anschloss. In sog. „netzfernen“ Gebieten existieren allerdings auch heute noch dezentrale Inselsysteme – gekennzeichnet durch Hybridstrukturen aufgrund der Einbindung regenerativer Erzeugungsanlagen. Durch eine Vernetzung dieser „Inselsysteme“ entstehen per se dezentrale Energiekonzepte bzw. -systeme. Zwar bestehen derzeit noch unterschiedliche Zeitvorstellungen, wann frühestens oder spätestens dezentrale Energiekonzepte bzw. -systeme ihre „Marktreife“ erlangen werden – der „publizierte Trend“ unterstellt allerdings den Zeitraum zwischen 2015 und 2030¹⁵.

Hierdurch werden die „klassischen Infrastrukturen“ – auf zentraler Erzeugung sowie dezentralem (lokalen) Verbrauch basierende Verteilnetzstrukturen – durch die **intelligente, informations- und kommunikationstechnische Vernetzung von Erzeugung, Verteilung und Verbrauch** unter Einbeziehung wissensbasierter Informations- und Kommunikationsnetzwerke und -systeme qualitativ verbessert. Des Weiteren wird das Dezentralitätsprinzip neben der Erzeugerebene auch auf die Ebene der Koordinierung und Steuerung der Verteilung und des Verbrauchs transformiert. Im Vergleich zu den bisherigen „klassischen“ Versorgungsstrukturen ergibt sich hierbei ein zusätzlicher Aufwand für Bereitstellung, Transport und Verarbeitung der benötigten Daten und Informationen, der jedoch **informationstechnologisch** realisierbar ist. Voraussetzung hierfür ist, dass die Versorgungs- und Informationsstrukturen modular konzipiert und erweiterbar sein müssen, um flexibel an sich ändernde Rahmenbedingungen auf Erzeuger-, Verteilungs- und Verbraucherebene angepasst werden zu können. Durch eine derartige vollständige Aggregation von Energieerzeugung, -transport und -verteilung einerseits sowie Daten- und Informationserhebung, -transport und -verarbeitung andererseits wird die systemische, ganzheitliche Strukturierung dezentraler Energiekonzepte bzw. -systeme gewährleistet. Aus „hierarchischer Sicht“ optimiert sich hierbei auf der unteren Ebene jedes dezentrale Energiesystem mit den Komponenten Erzeugung, Verteilung und Verbrauch zunächst im Rahmen eines eigenständigen Regelkreissystems selbst, in dem die Prognosen von Verbrauch und Erzeugung in Verbindung mit dem Erzeugungs- und Lastmana-

¹⁴ vgl. Bitsche, R., Feldmann, W., Aumayr, G. (2002), Virtuelle Kraftwerke - Einbindung dezentraler Energieerzeugungsanlagen, in: etz 2002, Nr. 9, S. 16 - 23

¹⁵ vgl. Guterl, F. (2002), The Energy Squeeze, in: Newsweek Nr. 14, Vol. CXXXIX, S. 50 – 54, New York 2002

gemeint zeitgleich erfolgen und gegenseitig optimiert bzw. abgeglichen werden. Ergänzend hierzu wird auf horizontaler Ebene zwischen mehreren dezentralen Energiesystemen der Überschuss oder der Bedarf an Energie unter Berücksichtigung der steuerbaren Last- und Erzeugungsstrukturen sowie unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Kriterien vertragsbasiert ausgeglichen (vgl. Abb. Nr. 2).

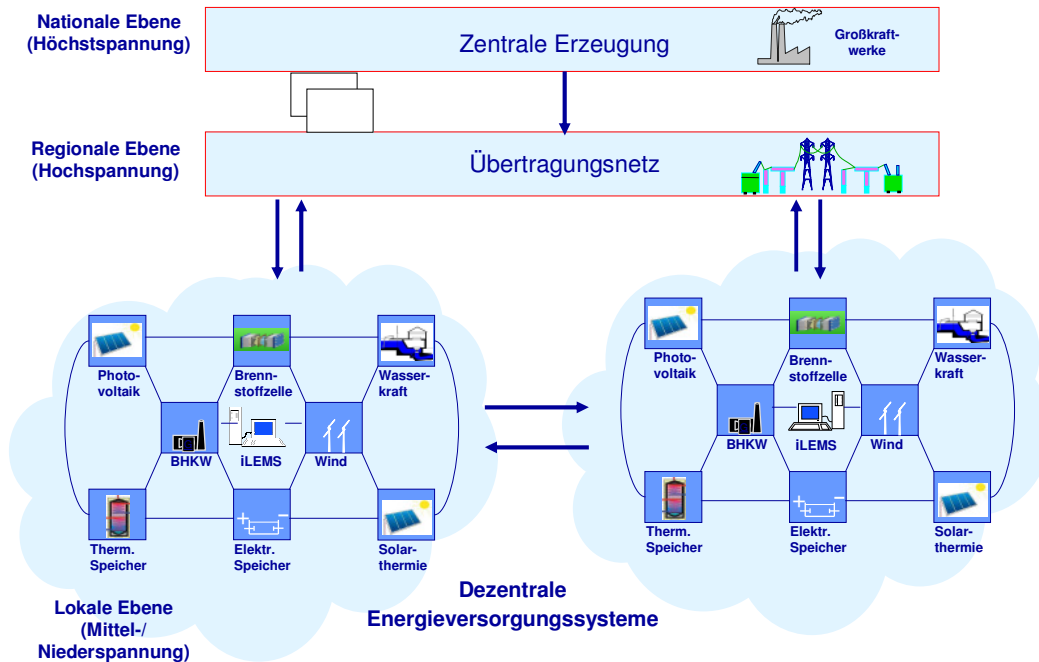


Abb. Nr. 2: „Intelligente“ Integration dezentraler Energieversorgungssysteme

Energieüberschüsse oder -defizite, die auf diese Weise nicht dezentral auf dieser (lokalen) Ebene der dezentralen Energiesysteme horizontal ausgeglichen bzw. verteilt werden können, werden auf die nächsthöhere, regionale Hochspannungsebene (110 kV) auf Basis exakter Lastgänge und Bezugsfahrpläne eingespeist bzw. abgerufen. Dies bedingt, dass in den dezentralen Systemen Verfahren bzw. Instrumente zur Verbrauchsbeeinflussung, Versorgungssicherheit und Reservehaltung involviert sind. Im Hinblick auf die Reservehaltung differenziert man hierbei zwischen der **positiven Reservestrategie** (kostenoptimale Steigerung der Eigenerzeugung bzw. Lastverringerung sowie Nutzung der Reserververträge) sowie der **negativen Reservestrategie** (kostenoptimale Verringerung der auf dem Energiemix basierenden Eigenerzeugung bzw. Lastzuschaltung sowie Lieferung im Rahmen von Export-(Liefer-)Verträgen). Hierbei werden durch das **intelligente, lokale Energiemanagementsystem** (sog. Virtuelles Kraftwerk) des dezentralen Energiesystems sowohl die generell verfügbare Systemreserve als auch die Minutensystemreserve online und zeitaktuell unter Berücksichtigung von Grund-, Mittel- und Spitzen- sowie Überschreitungslast optimiert. Im Fokus des lokalen Energiemanagementsystems steht somit die optimale Online-Abgleichung des Energiebedarfs an die dezentral verfügbare Erzeugerleistung sowie den aus der jeweils gewählten Reservestrategie resultierenden Handlungsmöglichkeiten des Energiebezuges aus zentralen Erzeugungseinheiten. Die sich hierbei ergebenden Handlungsalternativen im Rahmen des Erzeugungs-/Lastmanagements werden unter Berücksichtigung ökonomischer (kostenoptimierender) sowie ökologischer Kriterien (Schonung fossiler Ressourcen) simuliert und bewertet. Im Normalfall schließlich sind die diesbezüglich erforderlichen Erzeugungseinheiten für Grund- und Reserverlast auf der hierarchisch dritten (nationa-

len) Ebene angesiedelt und speisen in das Höchstspannungsnetz ein. Insgesamt ergibt sich hierdurch die aufgezeigte, hierarchische Struktur auf der Grundlage horizontal und vertikal integrierter sowie „intelligenter“ dezentraler Energiesysteme (-konzepte). Die hierdurch realisierbare **intelligente Integration** dezentraler und zentraler Erzeugungseinheiten bzw. -systeme im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung ermöglicht zum einen auf der Grundlage von Kosten-/Nutzenbewertungen die ökonomisch sinnvolle Einbindung dezentraler Erzeugungssysteme in das Gesamtsystem der Energieversorgung. Dies erfordert jedoch neue Formen und Strukturen der Systemintegration sowie andere Reserve- und Versorgungssicherheitsstrategien. Sie ermöglicht zum anderen die notwendige „Effizienzrevolution“, die sowohl durch vermindertes Wachstum des Energieverbrauchs als auch des Primärenergieeinsatzes charakterisiert ist¹⁶ – dies führt zwangsläufig zur Reduzierung der Schadstoffemissionen sowie zur Schonung fossiler Primärenergieträger und somit zur Anwendung des anfangs angeführten „ökologischen Gesetzes des Kapitalismus“.

Sowohl die effiziente Einbindung dezentraler (regenerativer) Erzeugungssysteme als auch deren Optimierung im Hinblick auf das beeinflusste Verbraucherverhalten erfordert neben der intelligenten Steuerung (**Virtuelles Kraftwerk**) die ganzheitliche Aggregation der Energieverteilnetze (sog. Smart Grids). Da der Verbrauch von elektrischer und thermischer Energie sowie Wasser situativ interdependent ist, müssen somit alle Verteilnetze im Kontext gesehen, geregelt und strukturiert werden (sog. **Smart Poly Grids**). Des Weiteren ist die gegenseitige Abhängigkeit von Erzeugung und Verbrauch nur dann effizient ökologisch und ökonomisch zu optimieren, wenn sowohl umfassende Daten und Informationen vorliegen als auch durch entsprechende Steuer- und Regelimpulse an die Verbrauchseinrichtungen deren Abnahmeverhalten beeinflusst werden kann (sog. **Smart Metering**).

Ein dezentrales (regeneratives) Energiesystem basiert somit auf folgenden Grundelementen:

- Smart Metering
- Smart Poly Grids
- Virtuelle Kraftwerke (lokale, intelligente Energiemanagementsysteme)

Diese Komponenten repräsentieren somit ein vermaschtes, hierarchisches Regelkreissystem zur optimierten sowie ökologisch und ökonomisch effizienten Steuerung der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs (vgl. Abb. Nr. 3).

¹⁶ vgl. von Weizsäcker et al (1995)

Dezentrales Energiesystem

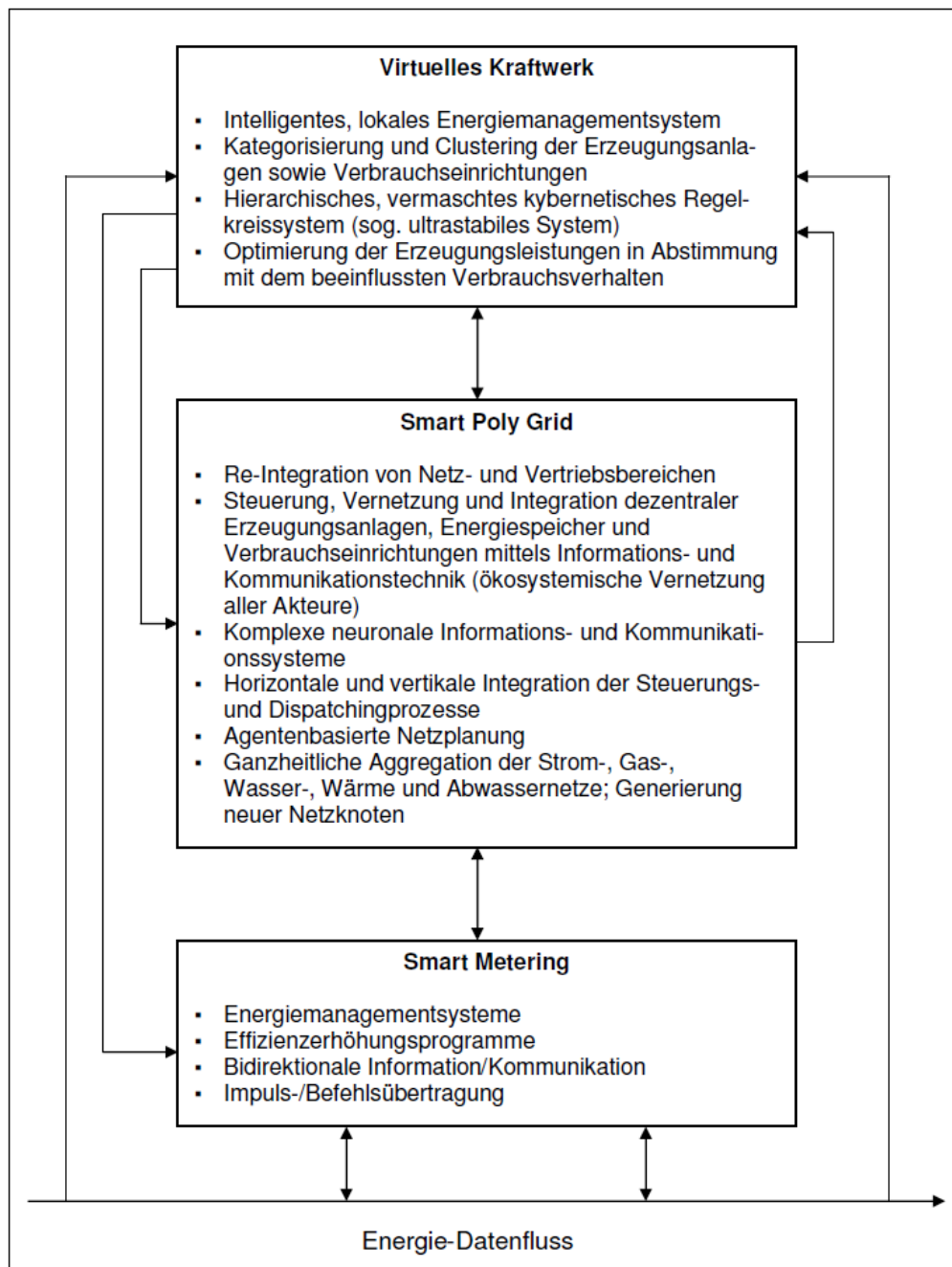


Abb. Nr. 3: Hierarchisch vermaschtes Regelkreissystem des dezentralen Energiesystems

Als Fazit kann festgehalten werden, dass dezentrale Energiesysteme somit ihren Fokus ausrichten auf

- die Vernetzung, Aggregation und zentrale Steuerung dezentraler Stromerzeugungsanlagen, um disponible zentrale Kraftwerksleistung ökonomisch und ökologisch nachhaltig zu ersetzen
- die integrierte und intelligente Einsatzoptimierung unterschiedlicher dezentraler Erzeugungseinheiten und somit die regelungstechnische Aggregation sowie ökonomische und ökologische Optimierung auf lokaler Ebene

- das kategorisierte und kaskadierte „Clustering“ sowohl der Erzeugungs- als auch Verbrauchsanlagen
- die Anpassung des Energieverbrauches an die momentan verfügbare (regenerative) Erzeugerleistung
- die Transformation statischer Netzstrukturen und -konzepte in intelligente Smart Grids
- die Erhöhung der individuellen Energieeffizienz bei den Endverbrauchern durch den Einsatz intelligenter Mess- und Steuerungssysteme

Durch eine derartige Vernetzung, Integration und Steuerung dezentraler Erzeugungsanlagen, Speichermedien sowie Verbrauchsanlagen durch Informations- und Kommunikationstechnologien wird eine ökosystemische Vernetzung aller Akteure erreicht.

2. Smart Metering

Deutlich wurde aus den bisherigen Ausführungen, dass die Effizienz dezentraler Energiesysteme auf der Abstimmung bzw. Anpassung von regenerativer Erzeugung sowie dem Verbrauchsverhalten basiert. Hierbei kann die Beeinflussung des Verbrauchsverhaltens zum Einen **prelial** erfolgen, d. h. mittels entsprechender Anreiz- bzw. Pönalisierungsstrategien. Vorstellbar wäre allerdings auch, die Verbrauchseinrichtungen direkt durch Steuerungs- und Regelungssysteme zu beeinflussen.

Unabdingbare Voraussetzung hierfür sind jedoch intelligente Mess- und Steuerungssysteme beim Endverbraucher (sog. Smart Metering). Grundlage hierbei sind sog. **Smart Meter**, d. h. kommunikationsfähige Zähler, die auf elektronischem Wege Verbrauchsdaten bidirektional und permanent übertragen, um das Informationsdefizit hinsichtlich des Verbraucherverhaltens zu reduzieren. Parallel müssen diese Daten aufbereitet und visualisiert werden, um auf der Verbraucherseite Verhaltens- und Kostentransparenz zu schaffen. Des Weiteren müssen sie automatisierte, standardisierte Lastmanagementprogramme beinhalten, um situativ die gezielte Verschiebung von Lasten zu ermöglichen. Dies erfordert neben einer transparenten und proaktiven Informationspolitik gegenüber dem Verbraucher vor allem das Angebot zeit- und lastvariabler Preisstrukturen, Produkte sowie Tarife. Ergänzt werden muss dies durch das Angebot energienaher Dienstleistungen. Letztendlich führt dies wieder zu einer ganzheitlichen, aggregierten Kooperation von Vertrieb und Netz – somit auch zu einer Veränderung der derzeitigen regulatorischen Rahmenbedingungen und Sichtweisen. Nicht übersehen werden dürfen diesbezüglich die momentan noch bestehenden gravierenden Datenschutz- und Datensicherheitsprobleme: Der ständige Daten- und Informationsfluss sowie die gezielte Steuerung der Verbrauchsanlagen über öffentliche Netze (Mobilfunk, Festnetz, Internet) ermöglicht den unbefugten Zugriff Dritter auf die involvierten Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen¹⁷.

Angemerkt sei abschließend, dass sich die gesetzlich vorgegebene Infrastrukturquote von 80 % bis zum Jahr 2020 nur dann realisieren lässt, wenn dem Kunden ein wirtschaftlicher Mehrwert (z. B. Energiekostenreduzierung, integrierte Energieprodukte, periphere Dienstleistungen (sog. Smart Home als intelligente

¹⁷ Der gegen ein Betriebssystem von Siemens zur Steuerung von Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen gerichtete Virus Stuxnet hat dieses Gefährdungspotenzial Anfang Oktober 2010 eindringlich aufgezeigt.

Vernetzung der im Haushalt befindlichen Verbrauchseinrichtungen) etc.) angeboten wird. Allein die Visualisierung des haushaltsspezifischen Stromlastganges erfreut nur Technikfreaks – der „normale“ Privatkunde wird auch bei (kostenpflichtigen) Applikationen auf seinem Handy – nur ein geringes Interesse an der Information „der Kühlschrank verbraucht gerade Energie“ haben¹⁸. Dieser „Normalo“ wird sicherlich auch nicht die durch Lastverschiebungen eingesparten 10 kWh spontan an der Strombörse meistbietend versteigern wollen ... Allein die bisher gängigen Zeitzonepreisstrukturen mit einer Verbrauchsverlagerung in lastarme (Nacht-)Zeiten analog zum klassischen HT-/NT-Zähler wird das Beharrungsvermögen der Kundengewohnheiten nicht beseitigen können.

3. Smart Poly Grid

Während vor einigen Jahren der Begriff Smart Grids als Synonym für monovalente Energienetze verstanden wurde, wird unter „Smart Poly Grids“ mittlerweile die ganzheitliche Aggregation und Strukturierung aller Ver- und Entsorgungsnetze als strategischer Ansatz verstanden. Eine derartige Betrachtungsweise beinhaltet somit die gesamten Wertschöpfungsketten von der Erzeugung bzw. Exploration über sämtliche Spannungsebenen bzw. Druckstufen; sie berücksichtigt konsequenterweise auch die Entsorgungssysteme und -anlagen, da deren energetische Komponenten ebenfalls einbezogen werden müssen. Smart Poly Grids repräsentieren somit einen systemischen Ansatz, um die Ziele Versorgungssicherheit, Ressourcen- und Material- sowie Energieeffizienz ganzheitlich vor der Zielsetzung der Emissionsreduzierung klimaschädlicher Gase zu aggregieren und zu optimieren – dies ist daher schon beim Systemdesign zu berücksichtigen. Durch die hiermit verbundene ökosystemische Vernetzung aller Akteure werden sich die derzeitigen urbanen Strukturen wesentlich verändern – die **postfossile, solare Stadt** wird generiert.

Holzschnittartig können folgende Kernelemente definiert werden:

- intelligente Nutzung aller Ressourcen (Effizienzerhöhung)
- Technologieoffenheit
- maximale Prognosequalität der involvierten Energiemanagementsysteme
- Generierung neuer Netzknoten durch die ganzheitliche Aggregation der Gas-, Strom-, Wärme-, Wasser- und Abwassernetze
- horizontale und vertikale Integration der Steuerungs- und Dispatchingprozesse
- Involvierung (neuer) Markt-, Produkt- und Dienstleistungsmodule
- Generierung von „virtuellen Unternehmen“ durch die Kooperation spezifischer (Teil-)Leistungsanbieter (economies of scope)
- komplexe, neuronale Informations- und Kommunikationsstrukturen bzw. -systeme
- Re-Integration der Netz- und Vertriebsbereiche

¹⁸ Zynisch angemerkt: Es sei denn, er will das (Verbrauchs-)Verhalten seines Lebenspartners kontrollieren ...

Smart Poly Grids erreichen ihre vollständige Wirkung allerdings nur dann, wenn alle Akteure bzw. Komponenten (IT-Systeme, Kommunikationsnetze, Verbraucher, Energiehändler, Netzbetreiber, Regulierungsbehörden, gesellschaftspolitische Gruppe, Legislative etc.) in enger, wechselseitiger Abstimmung „an einem Strang ziehen“ werden, ohne den Fokus auf (verständliche) egoistische Einzelinteressen zu legen. Eine derartig abgestimmte, ganzheitliche Vorgehensweise impliziert jedoch auch, dass die Regulierungsbehörden innovative, flexible Lösungen sowie neue Geschäftsmodelle trotz der regulierten Marktbedingungen ermöglichen. Dies erfordert letztlich auf der legislativen Ebene die Abkehr von den derzeitigen Unbundling-Vorgaben (Netzbetreiber und Energiehändler bzw. Produktanbieter sind als symbiotische Einheit zu sehen) sowie die Anerkennung der Kosten für neue Strukturen bei der Berechnung der Netznutzungsentgelte.

3.1 Stromnetze als monovalente Smart Grids

Grundlage ist die Aggregation der physikalischen Übertragungsnetze (Mittel- und Niederspannung) durch die Einbindung „neuronaler“ Informations- und Kommunikationssysteme. Hierdurch wird die Einsatzoptimierung der jeweils ökologisch und ökonomisch besten regenerativen (dezentralen) Erzeugungseinheiten unter Berücksichtigung der spezifischen, situativen System- und Ressourcenverfügbarkeit generiert (sog. best of bread). Neben der Optimierung des (Aus-)Nutzungsgrades regenerativer Erzeugungsressourcen sowie der Gewährleistung einer ausreichenden Versorgungsqualität kann des Weiteren die punktuell und situativ eventuell notwendige Vergrößerung der Netzübertragungskapazität durch die gezielte Installation und Integration dezentraler Erzeugungseinheiten vermieden werden.

Holzschnittartig repräsentieren Smart Grids auf der Verteilungsebene somit ein intelligentes System, dass

- die Steuerung, Vernetzung und Integration dezentraler Erzeugungsstrukturen, Speicher und Verbraucher mittels IT ermöglicht
- die Zielsetzung beinhaltet, auf Grundlage transparenter, energie- und kosteneffizienter Betriebsführung die Optimierung von Energieerzeugung und -verbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu realisieren
- die Basis für ein ökonomisch und ökologisch nachhaltiges, effizientes dezentrales Energiesystem ist – die heutigen (fossilen) Netzstrukturen genügen den Anforderungen der volatilen regenerativen (dezentralen) Energieerzeugung nicht mehr
- alle Akteure ökosystemisch miteinander vernetzt
- die derzeitigen urbanen Strukturen der postfossilen Stadt verändert.

3.2 Gasnetze als monovalente Smart Grids

Grundlage auch hier ist die ganzheitliche Aggregation der physikalischen Transport- und Verteilungsnetze unterschiedlicher Druckstufen sowie deren „Überlagerung“ durch intelligente Informations- und Kommunikati-

onsnetze. Im Gegensatz zu den Stromnetzen müssen hierbei jedoch auch unterschiedliche Gasqualitäten (H- bzw. L-Gas) sowie Gasarten (z. B. Biomethan, Wasserstoff) berücksichtigt werden. Diese werden an unterschiedlichen Stellen in das vermaschte Leitungsnetz eingespeist und generieren hierdurch unterschiedliche Abrechnungsqualitäten und -kriterien auf Grund der thermischen Preisstellung. Des Weiteren entstehen hierdurch bidirektionale, unterschiedliche Gasflüsse über alle Netzebenen und Druckstufen hinweg. Dies führt zwangsläufig zu Veränderungen der Netztopologie sowie der Funktionalität der Netzelemente (z. B. Reglerstationen, Druckerhöhungsstationen, Speicher etc.).

4. Das Konzept des „Virtuellen Kraftwerks“

Durch den vorstehend erläuterten Paradigmenwechsel zu dezentralen Energiekonzepten und -systemen mit dementsprechenden Erzeugungs- und Verteilungsstrukturen wird zwangsläufig auf der unteren, lokalen Ebene eine doppelte Strukturveränderung impliziert:

- „intelligente“ Verteilnetzstrukturen
- eine ökonomisch und ökologisch optimierte Struktur integrierter, dezentraler Erzeugungs- und Speichereinheiten bei gleichzeitiger Steuerung des Verbraucherverhaltens.

Zu „Monopolzeiten“ wurden die hierarchischen, vermaschten Verteilnetze unter dem Gesichtspunkt der Versorgungssicherheit als „Einbahnsystem“ mit entsprechenden Redundanzen konzipiert: Von der Erzeugungseinheit „Großkraftwerk“ wurde die elektrische Energie über die Verbundebene in die Verteilnetze eingespeist und dort „monodirektional“ zur „Steckdose des Endverbrauchers“ transportiert. Durch die zunehmende Installation und Integration dezentraler Erzeugungseinheiten – fast ausschließlich auf der Nieder- und Mittelspannungsebene – sind zwangsläufig bidirektionale Netzstrukturen sowie Informations- und Kommunikationsnetze zur Optimierung des Last- und somit auch Verbrauchsmanagements (Energietransfer) erforderlich. Zielsetzung ist somit die wirtschaftliche und ökologische Integration dezentraler und erneuerbarer Energie-Erzeugungsanlagen in bestehende Versorgungsstrukturen im Rahmen der Verlagerung von Funktionen und Aufgaben konventioneller (Groß-)Kraftwerke auf die dezentralen Energieerzeuger im Mittel- und Niederspannungsnetz. Die – auch vor dem Hintergrund der Marktliberalisierung erforderlichen – Kostenvorteile derartiger Strukturen resultieren aus

- der Einsatzoptimierung der jeweils ökonomisch und ökologisch nachhaltig wirkenden dezentralen Erzeugungseinheiten unter Berücksichtigung der spezifischen System- und Ressourcenverfügbarkeit zur Reduzierung der Bezugsleistung aus dem Übertragungsnetz (d. h. von Großkraftwerken)
- der Vermeidung punktuell erforderlicher Vergrößerungen der Transportkapazität des Verteilnetzes vor dem Hintergrund einer gezielten Installation und Integration dezentraler Erzeugungseinheiten.

Hierdurch gelingt es einerseits, dem sich aus der Marktliberalisierung ergebenden „Wettbewerbsdruck“ Stand halten zu können. Andererseits kann der aus dem Benchmarking der Netznutzungsentgelte resultierende Kostendruck im Be-

reich des Netzbetreibers (Erweiterungsinvestitionen, Instandhaltung etc.) zumindest teilweise kompensiert werden. Diese Kostenreduzierung wird zum einen dadurch ermöglicht, dass – zumindest auf der Mittelspannungsebene – eine teilweise Abkehr von dem „n-1-Prinzip“ erfolgen kann, da die Energieerzeugung quasi „hinter dem Gartenzaun“ des Verbrauchers erfolgt, so dass die „klassischen“ Redundanzgründe (z. B. Ausfall eines Umspannwerkes als zentraler Einspeisung) an Dominanz verlieren. Zum anderen verringern sich die Netzkosten auf Grund der möglichen Reduzierung der Transportkapazitäten (d. h. der Querschnittsdimensionierungen der Kabel) vor dem Hintergrund der bidirektionalen Energieflussrichtungen. Des Weiteren kann eine Reduzierung der „Kosten des Gesamtsystems“ sowohl durch die Optimierung der jeweiligen Reservehaltung als auch durch eine Verringerung zusätzlicher Kapazitätserweiterungen auf der Höchst- und Hochspannungsebene realisiert werden. Die Summe dieser Faktoren impliziert zwangsläufig ein „Umdenken“ auf der „philosophischen Metaebene“ der Versorgungssicherheit und führt zu der eingangs angesprochenen pretialen Steuerung des Netzbetriebsmanagements. Im Rahmen eines derartigen **„Asset Managements“** – verstanden als Management des gesamten Lebenszyklus (lifecycle) der Netzbetriebsmittel – soll die langfristige Optimierung von Entgelterwartung, Kostenstruktur und Risikomanagement im Rahmen einer elektrizitätswirtschaftlich rationellen Betriebsführung realisiert werden. Im Fokus steht dabei die Bereitstellung von Übertragungs- bzw. Verteilungskapazitäten bei entsprechender Qualität des sicheren Netzbetriebes sowie der Frequenz- und Spannungshaltung. Das hierbei zu Grunde liegende strategische Asset Management fokussiert auf die Optimierung von Investitionen und Instandhaltung unter Berücksichtigung der durch interne und externe Marktpreise definierten Rentabilität. Module einer derartigen Strategie sind u. a.

- Strategieentwicklungs- und -umsetzungsprozesse unter Einbeziehung der Methodik der Balanced Scorecard
- Investitions- und Instandhaltungsmanagement im Sinne einer risikoorientierten, optimierten Ressourcenallokation auf Grundlage informationstechnologischer Systeme (z. B. OPTIMINST)¹⁹
- Vertrags- und Auftragsmanagement
- Operatives Betriebsführungsmanagement
- Konzeption und ständige Weiterentwicklung des zur Prozessdurchführung erforderlichen Risikomanagements.

Voraussetzung hierfür ist ein „intelligentes“ Netz- und Energiemanagementsystem mit entsprechenden Informations- und Kommunikationssystemen und -strukturen auf lokaler Ebene, das die dezentrale Erzeugung, die aus dem Verbundnetz bezogene Leistung sowie die jeweiligen Netz- und Verbrauchslasten mit der Zielsetzung minimaler ökonomischer und ökologischer Gesamtkosten regelt bzw. steuert. Neben der hierzu erforderlichen Lastmanagementsoftware mit Simulations- und Optimierungsberechnungen ist des Weiteren ein Informations- und Wissensmanagementsystem (Energiedatenmanagement, Business Intelligence System, Data Warehouses, Auswertetools etc.) unter Einbeziehung der Internettechnologien sowie (falls technologisch möglich) mobiler Funknetze, der Powerline-Kommunikation etc. erforderlich. Die Informations- bzw. Kommunikationskomponenten ermöglichen des Weiteren, den angeschlossenen End-

¹⁹ OPTIMINST ist ein von EUS, dem Lehrstuhl für elektrische Energieversorgung an der Universität Dortmund sowie den Stadtwerken Unna GmbH entwickeltes Programm zur Realisierung eines risikoorientierten Instandhaltungsmanagements mit der Möglichkeit der Simulation verschiedener Instandhaltungsstrategien

verbrauchern zusätzliche Dienstleistungen anzubieten. Ein derartig konzipiertes „intelligentes, lokales Energiemanagementsystem“ kann daher mittels der Module „Prognose“, „Einsatzplanung/-simulation“ und „Online-Optimierung“

- die Energieerzeugungs- bzw. -bezugskosten minimieren
- den Netznutzungsgrad durch die Vermeidung punktueller Überbelastungen optimieren
- den (Aus-)Nutzungsgrad regenerativer Energieressourcen maximieren.

Die durch das dezentrale Energieversorgungskonzept fokussierte **integrierte und „intelligente“ Einsatzoptimierung unterschiedlicher dezentraler Erzeugungseinheiten** repräsentiert letztlich ein „**virtuelles Kraftwerk**“, d. h. die regelungstechnische Zusammenfassung sowie ökonomische und ökologische Optimierung dezentraler Erzeugungsanlagen sowie die Beeinflussung (Steuerung) des Energieverbrauches auf lokaler Ebene im Rahmen eines dezentralen Energiesystems. Es generiert Tagesprognosen seiner (potenziellen) Erzeugungsvfügbarkeit im Viertelstunden- bzw. Minutenraster und bekommt auf dieser Grundlage einen dementsprechenden Leistungsfahrplan vorgegeben, der durch die Online-Optimierung so exakt wie möglich „abgefahren“ wird. Hierdurch wird dieses Mixtum aus dezentralen, verteilten sowie heterogenen Erzeugungs- und Speichereinheiten als „virtuelle große Erzeugungseinheit“ analog zur Fahrweise eines Großkraftwerkes betrieben, da die dezentral verteilten Erzeugungsanlagen mit der Zielsetzung, ein vorher definiertes sowie situativ anzupassendes Erzeugungsprofil („Fahrplan“) abfahren zu können, zentral gesteuert bzw. geregelt werden. Aufgrund der Heterogenität der Erzeugungseinheiten sowie des jeweils zu Grunde liegenden spezifischen Primärenergieeinsatzes ergeben sich zwangsläufig lineare und stochastische „Fahrplanbedingungen“, die die Fahrplangestaltung und -simulation sowie das „Abfahren“ des Fahrplanes gegenüber demjenigen eines realen Großkraftwerkes schwieriger machen.

Großräumig verteilte, dezentrale KWK-Anlagen (Verbrennungsmotoren, Expansionsmotoren, Turbinen, Kohlevergasung/-verschmelzung, Brennstoffzellen etc.) ermöglichen – unabhängig vom jeweiligen Primärenergieeinsatz (fossile oder nachwachsende Rohstoffe) – häufig lineare Fahrplangestaltungen unter der Berücksichtigung einer ökologischen und energetischen Optimierung. Problematischer wird dagegen die fahrplanmäßige Integration von regenerativen Erzeugungssystemen auf Wind- und Sonnenbasis aufgrund ihrer stochastischen Verfügbarkeit und Leistungsbereitstellung. Die Integration eines derartigen regenerativen, fluktuierenden Erzeugungsangebotes erfordert die strukturierte Generierung eines Erzeugungsfahrplanes, der regelbare sowie zu- und abschaltbare und nicht beeinflussbare (nur prognostizierbare) Komponenten enthält. Nur hierdurch ist es möglich, diese stochastisch sich verhaltenden Erzeugungskapazitäten auf der Grundlage entsprechender Betriebs- und Reservestrategien zu „linearisieren“ und unter Einbeziehung von Prognose- und Simulationsverfahren sowie korrespondierender Leistungsfahrpläne als „virtuelle Erzeugungseinheit“ in das dezentrale Energieversorgungssystem bzw. -konzept zu integrieren sowie netzverträglich unter Berücksichtigung der Blindleistungsregelung zu implementieren. Dies führt andererseits zwangsläufig sowohl zu einer wesentlichen Steigerung der energiewirtschaftlichen und ökologischen Effizienz der regenerativen Energieerzeugung als auch zur Erhöhung der Energieeffizienz des Gesamtsystems.

4.1 Die Konzeption des „intelligenten lokalen Energiemanagementsystem“ (Virtuelles Kraftwerk)

Die Integration und Aggregation sowie Koordination der spezifischen Fahrpläne der jeweiligen Module eines „virtuellen Kraftwerks“ geschieht durch ein **intelligentes lokales Energiemanagementsystem**. Plakativ fasst es die dezentralen Erzeugungen und Lasten in sog. „Clustern“ mit gleichen Einflussgrößen bzw. Parametern zusammen und generiert durch Prognose-, Simulations- und Optimierungssysteme sowohl deren Planbarkeit als auch deren Regelungsfähigkeit. Einbezogen werden hierbei zwangsläufig auch Speichersysteme, um stochastische Erzeugungsstrukturen auf der Grundlage wahrscheinlichkeitstheoretischer Aussagen zu „linearisieren“ bzw. deterministisch zu gestalten und somit zu beeinflussbaren bzw. zu planbaren und somit kontrahierungsfähigen Leistungsprofilen mit dem Ziel einer vertragsbasierten Vermarktungsfähigkeit zu gelangen. Das hierzu erforderliche Datenmodell ist allerdings auf Grund der (fast) beliebig großen Anzahl an dezentralen Erzeugungseinheiten und beeinflussbaren Verbrauchern im Rahmen einer individuellen Modellierung vor dem Hintergrund der verfügbaren Rechnerkapazitäten (derzeit) noch nicht realisierbar. Deshalb bietet sich das sog. „Clustering“ an, bei dem die Vielzahl der Module bzw. Einheiten durch eine Modellkomponente abgebildet wird. Deren Parameter (Eigenschaften) sind allerdings dynamisierbar (variabel) und basieren auf statistisch begründeten Annahmen und Prognosen zur Potenzialabschätzung (sowohl des Erzeugungs- als auch des Verbrauchspotenzials). Im Fokus steht hierbei der Vergleich zwischen einem statischen „Referenzfall“ sowie „virtuell“ zu definierenden und simulierenden dynamischen Zustandsveränderungen – letztere werden mit wahrscheinlichkeitstheoretischen „Leistungswerten“ unterlegt. Aus der Simulation dieser mehr- bzw. vielfachen Vergleichsrechnungen kann dann das ökonomische und/oder ökologische Optimum ermittelt werden. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch – wie bei jeder Simulation – auf Grund der Abstraktion und Formalisierung, dass die Genauigkeit des Ergebnisses zwangsläufig von der „Richtigkeit“ der zugrunde gelegten wahrscheinlichkeitstheoretischen Annahmen abhängt. Aus diesem Grunde kann auch keine „Blaupause“ für alle denkbaren Systemkonfigurationen erstellt bzw. erwartet werden. Vielmehr ist für jedes dezentrale Energiekonzept bzw. -system die Erstellung einer konkreten „Fallstudie“ (Systemstudie) erforderlich, die im Rahmen eines „selbstlernenden Systems“ ständig verfeinert wird. Letztendlich fokussiert eine derartige „Virtualisierung“ auf der Aggregation von Bezugs- und Erzeugungsmanagement, der Portfolioeinsatzoptimierung sowie dem dezentralen Lastmanagement einschließlich der Steuerung des Verbrauchsverhaltens sowie auf dessen Optimierung im Sinne des Gesamtsystems „dezentrales Energiesystem“. Es fokussiert somit auf Prognose, Einsatzplanung und Online-Optimierung (einschließlich der Störfalloptimierung) von Erzeugung, Speicherung **und** Verbrauch und somit auf einer ausgeglichenen Leistungsbilanz des lokalen Bilanzkreises. Wesentliche Funktionen sind daher

- Zustandsanalyse, Monitoring und Visualisierung des Gesamtsystems
- Online-Fahrplanprognose der erzeugbaren elektrischen und thermischen Leistung sowie. Speicherung
- Onlineprognose, -analyse und -beeinflussung des aktuellen Lastbedarfs (Verbraucherverhalten)

- Planung und Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen bei Toleranzbandverletzungen (z. B. zusätzlicher Bezug bzw. Einspeisung auf horizontaler und vertikaler Ebene) sowie einem „Störungsmanagement“
- Generierung von ökonomischen/ökologischen Optimierungsbandbreiten

Um eine derartige integrierte bzw. ganzheitliche lokale Optimierung sowie den vertragsbasierten Energieaustausch auf horizontaler und vertikaler Ebene realisieren zu können, ist einerseits die intelligente bidirektionale Kommunikation zwischen Erzeugungseinheiten, Speichermedien und Verbrauchern sowie andererseits ein Informations- und Wissensmanagement erforderlich. Dessen physikalischen bzw. informationstechnologischen Grundlagen sind beispielsweise terrestrische LAN/WAN sowie Wireless-Netze unter Einbeziehung von ISDN, GMS, UMTS etc. Derzeit verfügbare Schnittstellen für den Datenaustausch sind vor allem OPC²⁰ und XML²¹. Zu konstatieren ist allerdings derzeit noch ein Übergewicht proprietärer informationstechnologischer Systeme, Strukturen und Applikationen sowohl zur Steuerung der Erzeugungsanlagen als auch bei den Kommunikationssystemen, die Optimierungen oder Erweiterungen häufig unwirtschaftlich werden lassen oder gänzlich unmöglich machen. Erforderlich sind daher auf Erzeugungs-, Übertragungs- und Verbrauchsebene modular konzipierte Systeme und Komponenten, die ein sog. „Baukastenprinzip“ im Sinne einer heterogenen, aber dennoch kompatiblen Systemtechnik ermöglichen, um – basierend auf offenen Standards – eine einheitliche Energie- und Informationsübertragung zwischen den einzelnen Erzeugungs- und Verbrauchskomponenten als auch der übergeordneten Regelung zu gewährleisten: Analog zum „Informations-/Kommunikationsbus“ ist demnach auch ein „AC/DC-Energiebus“ notwendig, der die Kompatibilität zum Niederspannungsnetz und somit die – möglichst – verlustfreie Vernetzung gewährleistet. Hierbei soll der „Informations-/Kommunikationsbus“ in Form eines „Signalbussystems“ die Kommunikation zwischen den Erzeugungssystemen (Regelungsebene 1 bzw. 2), dem Lastmanagementsystem (Regelungsebene 3)²² sowie den Verbrauchern gewährleisten; als zukünftige diesbezügliche Standards bieten sich hierbei der „Europäische Installations-Bus (EIB)“ sowie die Übertragungsverfahren JINI oder U_{pre}P an²³.

Unter der Zielsetzung einer Erhöhung der Energieeffizienz muss – wie bereits ausgeführt – dieses dezentrale Energiemanagementsystem als additive Komponente des Weiteren auch Module zur Beeinflussung bzw. Steuerung des Verbrauchsverhaltens beinhalten. Da – trotz aller gesellschaftspolitischen und marketinginduzierten Anstrengungen – beim Endverbraucher noch (fast) kein ökologischer Bewusstseinswandel bzw. ein ökologisch fokussiertes Verbrauchsverhalten stattgefunden hat, erfordert dies u. a. prezial determinierte Strategien, bei denen bzw. durch deren Anwendung der Endverbraucher Kosten-(Preis-)Vorteile erhält:

- a) Verminderung unnötigen Energieverbrauchs durch rationellere Nutzung ohne Komforteinbuße

²⁰ OPC = **O**bjekt **L**inking and **E**mbedding for **P**rocess **C**ontrol

²¹ XML = **E**xtrém **M**arkup **L**anguage

²² vgl. Abb. Nr. 5

²³ vgl. Bitsch et al (2002), S. 18 ff.

- b) Senkung des individuellen Energieverbrauches durch entsprechende Energiedienstleistungen
- c) verstärkter Einsatz CO₂-ärmerer Energieträger (z. B. Erdgas)
- d) Substitution CO₂-emittierender Energieträger durch CO₂-freie Energieerzeugung (z. B. Wasser, Wind, Solarenergie, Geothermie)
- e) Verzicht auf energieintensive Dienstleistungen (z. B. Warmwasserbereitung mittels elektrischer Energie), energieintensive Produkte oder Prozesse

Die bisherigen Ausführungen in diesem Abschnitt definieren vor allem die operativen Module bzw. Komponenten des „Virtuellen Kraftwerks“. Neben diesen „taktischen“ Elementen sollte ein derartiges Konzept bzw. System jedoch auch strategische besitzen, um dynamisch und flexibel zukünftige Veränderungen zu antizipieren bzw. sich im Sinne eines ultrastabilen Systems selbständig an diese anpassen zu können. Auf „lokaler Ebene“ sind hierbei die mittel- und langfristigen Bezugsmöglichkeiten und Preisveränderungen der fossilen Energieträger (Kohle, Erdgas, Heizöl) einzu beziehen. Des Weiteren sind die Verfügbarkeiten der regenerativen Energieträger (Biomasse, Wind, Sonne etc.) unter Berücksichtigung ihrer Rahmenbedingungen (Windstärke, Sonneneinstrahlung, Klima- bzw. Wetterveränderungen sowie deren Prognosegenauigkeiten aufgrund verbesserter Modellrechnungen etc.) zu integrieren. Aus wirtschaftlicher Sicht sind hierbei nicht nur die Kosten- und Preisbestandteile zu optimieren, sondern beispielsweise auch die sich mittelfristig aus dem Handel mit Emissionszertifikaten ergebenden zusätzlichen Deckungsbeiträge zu berücksichtigen. Schließlich sind auch demographische Faktoren (Altersstruktur, Haushaltsstruktur, Bevölkerungswachstum etc.) sowie technologische Veränderungen (neue Erzeugungssysteme, Wirkungsgradverbesserung der vorhandenen Systeme etc.) zu involvieren. Hieraus ergeben sich zwangsläufig Handlungsszenarien mit unterschiedlichen Entscheidungsalternativen. Sinnvoll erscheint es daher, sog. „Korridore“ bzw. Bandbreiten zu definieren, für die jeweils spezifische Entscheidungs- und Handlungsalternativen sinnvoll bzw. andere ausgeschlossen werden. Diese „Bandbreiten“ wesentlicher Rahmenbedingungen bzw. Faktoren „fließen“ dann in die Simulationen der Systemzustände sowie deren Bewertung ein. Hierdurch soll die Ermittlung spezifischer technischer, ökonomischer und ökologischer Grenzwerte ermöglicht werden, die den Übergang von einer zur anderen Handlungsalternative (z. B. Übergang von einem fossilen Energieträger zu einem regenerativen) definieren. Erforderlich sind hierbei die Online-Simulation und der Test unterschiedlicher Strukturen und Situationen des dezentralen Energieversorgungssystems, um im Rahmen von Szenarien mit unterschiedlichen Strategien und Zielfunktionen verschiedene Konzeptalternativen beschreiben, analysieren und ökonomisch sowie ökologisch bewerten zu können.

4.2 Regelungstechnische Strukturmerkmale

Wie bereits ausgeführt und verdeutlicht wurde, erfordert sowohl das Konzept des „Virtuellen Kraftwerks“ als auch generell dasjenige „dezentraler Energiesysteme“ ein umfassendes Informations- und Wissensmanagement auf der Grundlage einer intelligenten, multimedialen Vernetzung von Bezug, Erzeugung, Verteilung und Verbrauch. Dieses muss bzw.

kann von seiner Struktur her als „**hierarchisches, vermaschtes Regelkreissystem**“ mit dem lokalen Energiemanagementsystem als „obersten Regler“ im Sinne des „controlling overlayers“²⁴ verstanden werden. Dieses – aus morphologischer Sicht – „aktive Regulationssystem“ basiert auf dem Prinzip der Regelung als „**Störungskompensation mit Rückkopplung**“ (vgl. Abb. Nr. 4). Diese Vorgehensweise soll nachfolgend im Rahmen eines kybernetischen Exkurses „holzschnittartig“ erläutert werden.

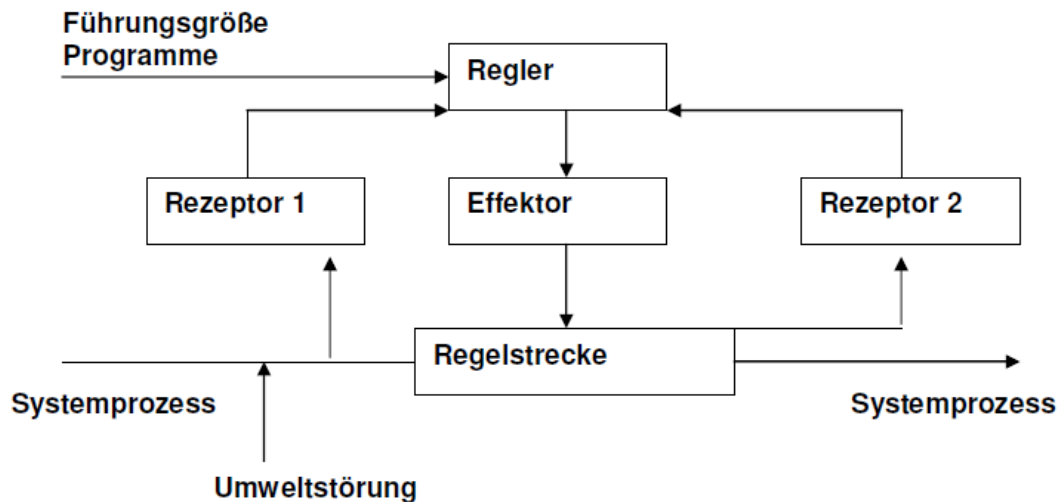


Abb. Nr. 4: Modell eines Regelkreises als Störungskompensation mit Rückkopplung

Hierbei „funktionieren“ die jeweiligen Regelkreissysteme der einzelnen BHKW-Module (Motor, Kessel, Speicher, Gasturbine, Brennstoffzelle etc.) bzw. Windenergie- oder Photovoltaikanlagen aus kybernetischer Sicht in Relation zum Gesamtsystem als Steuerungs- und Regulationssysteme niedrigerer Ordnung, die in ihrem jeweiligen Wirkungsbereich aufgrund vorgegebener „Soll-Werte“ (z. B. Betriebsstunden, Wirkungsgrad, Fahrplan etc.) „autonom“ arbeiten. Autonome (griech.: Selbstgesetzgebung) Systeme steuern bzw. regeln lateral spezifische Funktionen sowie repetitive Abläufe (Routineprozesse etc.), ohne dass Einwirkungsmöglichkeiten höherer Regelsysteme erfolgen bzw. erforderlich werden; diese Autonomie dient zur Aufrechterhaltung der sog. Homöostase (Gleichgewichtszustand wichtiger Funktionen und Bedingungen) und somit zum Erhalt einer stabilen „inneren Umwelt“. Diesbezüglich wird dem Regler laufend der tatsächliche Systemzustand (d. h. die Regelstrecke) durch den ersten Rezeptor zurückgemeldet. Auf der Grundlage vorgegebener Führungsgrößen greift der Regler dann so lange mit kompensierenden, kontrollierten Maßnahmen in den Prozessablauf der Regelstrecke ein, bis der jeweils vom „Rezeptor 2“ gemeldete Ist-Zustand mit dem Soll der Führungsgröße übereinstimmt. Im Rahmen dieser als **sekundäre Regelung** bezeichneten Störungskompensation werden Steuerstrecke und/oder Führungsgröße mit einer gewissen „Bandbreite“ ausgelegt, so dass das System bzw. der Regler auf eine spezifische Anzahl definierter Störgrößen autonom reagieren kann – auf der Grundlage von Rückkopplungen verändert das System sein Verhalten selbstständig. Nehmen die Störgrößen jedoch in qualitativer und/oder quantitativer Dimension Werte an, die außerhalb dieser Bandbreite liegen, so ist eine Störungskompen-

²⁴ vgl. Etzioni, A. (1975), Die aktive Gesellschaft, Opladen 1975 sowie Jänig, Chr. (1984), Konzeption und Implementierung eines computergestützten Informationssystems als "Geplanter Wandel" der Verwaltungsorganisation, Krefeld 1984

sation durch die sekundäre Regelung nicht mehr möglich²⁵. In diesem Fall findet eine „Rückkopplung“ mit der nächsthöheren Regelungsebene statt, die eine Abstimmung und Störungskompensation durch die zentrale Koordination der „unteren Regelungssysteme“ herbeiführt (sog. **primäre Regelung**). Ein weiterer Grund für das Auftreten und Wirken dieser Primärregelung ist auch darin zu sehen, dass sich die unteren autonomen Regelsysteme antagonistisch verhalten (können) – die Tätigkeit des einen Subsystems kann negative Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit bzw. den Regelungsprozess des anderen implizieren. Die primäre Regelung führt meistens zu Strukturveränderungen; diese können entweder aus der Umwelt initiiert (ein oder mehrere Elemente der Systemumwelt sind Teil des Reglers) oder durch das System selbst erfolgen. Im letzteren Fall spricht man von sog. adaptiven (**lernfähigen**) **Systemen**, bei denen im Rahmen der Störungskompensation die Elemente, Ressourcen und Potenziale des Systems (äquifinale Art) oder zusätzlich auch die Ziele (ultrastabile Art) verändert, d. h. angepasst werden können. Eine Vielzahl von Führungsgrößen bedingt zwangsläufig auch eine Vielzahl von hierarchischen Steuerungs- und Regelungssystemen. Dies setzt jedoch neben der Operationalisierung der Regelstrecken, d. h. der quantitativen Analyse von Informationsbeziehungen, auch eine effiziente Gestaltung der Koordinationsmechanismen voraus. Hierdurch entsteht neben dem Problem der Selbstkoordination auch das der horizontalen und vertikalen Verankerung von Informationen und Führungsprinzipien. Diese hierarchisch „vernetzten“ Steuerungs- und Regelungssysteme bedürfen somit bestimmter Mechanismen, die eine Koordination der interdependenten Regler sowie deren „Entscheidungen“ herbeiführen, um eine effiziente Störungskompensation zu gewährleisten. Interdependenz als wechselseitige Abhängigkeit bedeutet, dass die Verhaltensweisen (z. B. Entscheidungen) des einen Reglers vor- als auch nachteilige Auswirkungen auf den anderen Regler hervorrufen können. Die Koordination der Regler soll nun einen „Interessenausgleich“ herbeiführen, der im Endeffekt (theoretisch zumindest) pareto-optimal ist. Diese Koordination zwischen mehreren Reglern kann „nicht kontrolliert“ erfolgen, indem zwischen den betreffenden Reglern „Abstimmungsmechanismen“ und „-prozesse“ ablaufen, ohne dass eine übergeordnete Systemebene als Regler eines entsprechend vermaschten Regelsystems auftritt. Eine dementsprechende Störungskompensation würde auf „nicht-kontrollierten“ Rückkopplungen basieren.

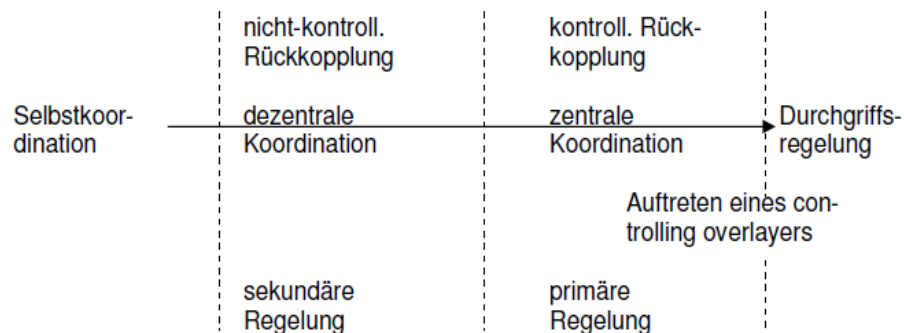
Neben dieser „Selbstkoordination“ besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass die Koordination durch ein übergeordnetes Führungssystem, dem „**controlling overlayer**“, herbeigeführt wird. Dieses Führungssystem impliziert die Existenz eines Steuerungs- und Regelungssystems höherer Ordnung, das die Koordinationsmechanismen und Entscheidungsstrukturen der niedrigeren Regelkreise „beherrscht“; der „controlling overlayer“ nimmt hierbei demnach die Funktion des übergeordneten Reglers ein. Er kann in abgestuften Formen eine Koordination der niederen Regler (-systeme) herbeiführen:

- (1) **dezentral**: durch Vorgabe von Normen, Regeln etc. sowie durch die Änderung spezifischer Randbedingungen, die das Aktionsfeld der niederen Regler begrenzen und damit deren Verhalten determinieren

²⁵ Fuchs, H. (1974), Steuerung und Regelung in betrieblichen Systemen, in: Grochla, E., Fuchs, H., Lehmann, H. (Hrsg., 1974), Systemtheorie und Betrieb, Sonderheft Nr. 3 der Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, Wiesbaden 1974

- (2) **zentral**: durch die direkte Beeinflussung der Regler niederer Systeme
- (3) **Durchgriffsregelung**: durch das direkte Eingreifen auf die Regelstrecke der unteren Regelsysteme

Stellt man die verschiedenen Koordinationsformen auf einem Kontinuum mit den Polen „Selbstorganisation“ und „Durchgriffsregelung“ dar, so wird ersichtlich, dass ein „controlling overlayer“ nicht automatisch und ständig vorhanden sein muss:



Diese kurz erläuterten „einfachen“ Steuerungs- und Regelmechanismen können in gewisser Beziehung beliebig in komplexen Steuerungs- und Regelungssystemen kombiniert werden. Hierbei spricht man von einer **Vermaschung**, d. h. die Regelgröße des einen Regelkreises repräsentiert den Sollwert (die Führungsgröße) des anderen. Diese Vermaschung kann sowohl einseitig als auch wechselseitig bestehen; hierdurch entstehen Steuerungs- und Regelungssysteme höherer Ordnung, bei denen die Steuer- bzw. Regelstrecke ein oder mehrere Steuerungs- und Regelungssysteme niedriger Ordnung umfasst. Demzufolge kann dann jede Komponente der Steuerungs- und Regelsysteme niedrigerer Ordnung zur Sollgröße des Steuerungs- und Regelungssystems höherer Ordnung werden. Letzteres wiederum kann einzelne Komponenten des Systems niedrigerer Ordnung beeinflussen oder gar dessen Kopplungsstruktur verändern. Eine derartige Störungskompensation im Rahmen vermaschter Regelkreissysteme kann im Endeffekt beinhalten, dass die Struktur des Reglers nicht von vornherein festgelegt ist, sondern sich aus den jeweiligen Störungsdimensionen ergibt.

Derartige hierarchische, vermaschte Regelungssysteme sind in der Natur häufig vorzufinden. So besitzt beispielsweise der „homo sapiens“ ein neuronales System mit vier hierarchischen Ebenen sowie jeweils spezifischen Funktionen. Das Rückenmark als unterste Ebene regelt zum einen autonom über laterale Befehlsachsen spezifische Funktionen (z. B. Herztätigkeit). Zum anderen überträgt es vertikal aufbereitete bzw. verdichtete Informationen über das sympathische Nervensystem zum Hirnstamm bzw. Mittelhirn, das als „übergeordnetes Regelungssystem“ zur Koordination verschiedener Funktionen bzw. Organe dient und deren Homöostase gewährleisten soll (z. B. Blutdruck und Herzfrequenz). Sollte eines dieser Organe in systemkritische Zustände geraten (beispielsweise eine zu hohe Herzfrequenz), so werden alle damit zusammenhängenden Funktionen und Organe „überregelt“. Gleichzeitig überträgt es vertikal (ebenfalls über das „sympathische System“) die „von unten“ stammenden Informationen

nach einer weiteren Aufbereitung („Filterung“) an das nächsthöhere Regelungssystem, dem Zwischenhirn. Dieses erhält neben diesen verdichteten Informationen des Weiteren über ein unabhängiges, redundantes System (parasymphatisches System) „ungefilterte“ Informationen von den jeweiligen untergeordneten Regelungssystemen und -prozessen. Schließlich gelangen über ein drittes Informationssystem (somatisches System) Daten aus der externen Umwelt in dieses Regelungssystem, so dass es aufgrund des übergeordneten Informations- und Wissensstandes entsprechende „Abgleiche“ vornehmen und – bei systemkritischen Abweichungen – im Rahmen der Primärregelung (zentrale Koordination) eingreifen kann. Vom Zwischenhirn gehen schließlich alle verfügbaren System- und Umweltinformationen über 32 + 12 Nervenpaare an das Großhirn als höchstem Regelungssystem, das im Rahmen willentlicher bzw. willkürlicher Entscheidungsprozesse (z. B. Denkprozesse) entweder vertikal über die untergeordneten Regelungssysteme oder direkt im Rahmen der Durchgriffsregelung auf die unteren Regelungsstrecken einwirkt (beispielsweise die „Überregelung“ im Rahmen athletischer Wettbewerbe, bei denen der Sieg auch auf Kosten von Organschäden angestrebt wird).

Diese kybernetisch-neuronalen Aussagen sollen nachfolgend an der hierarchischen Struktur des intelligenten, lokalen Energiemanagementsystems in dezentralen Energiesystemen präzisiert werden (vgl. die Abbildung Nr. 5).

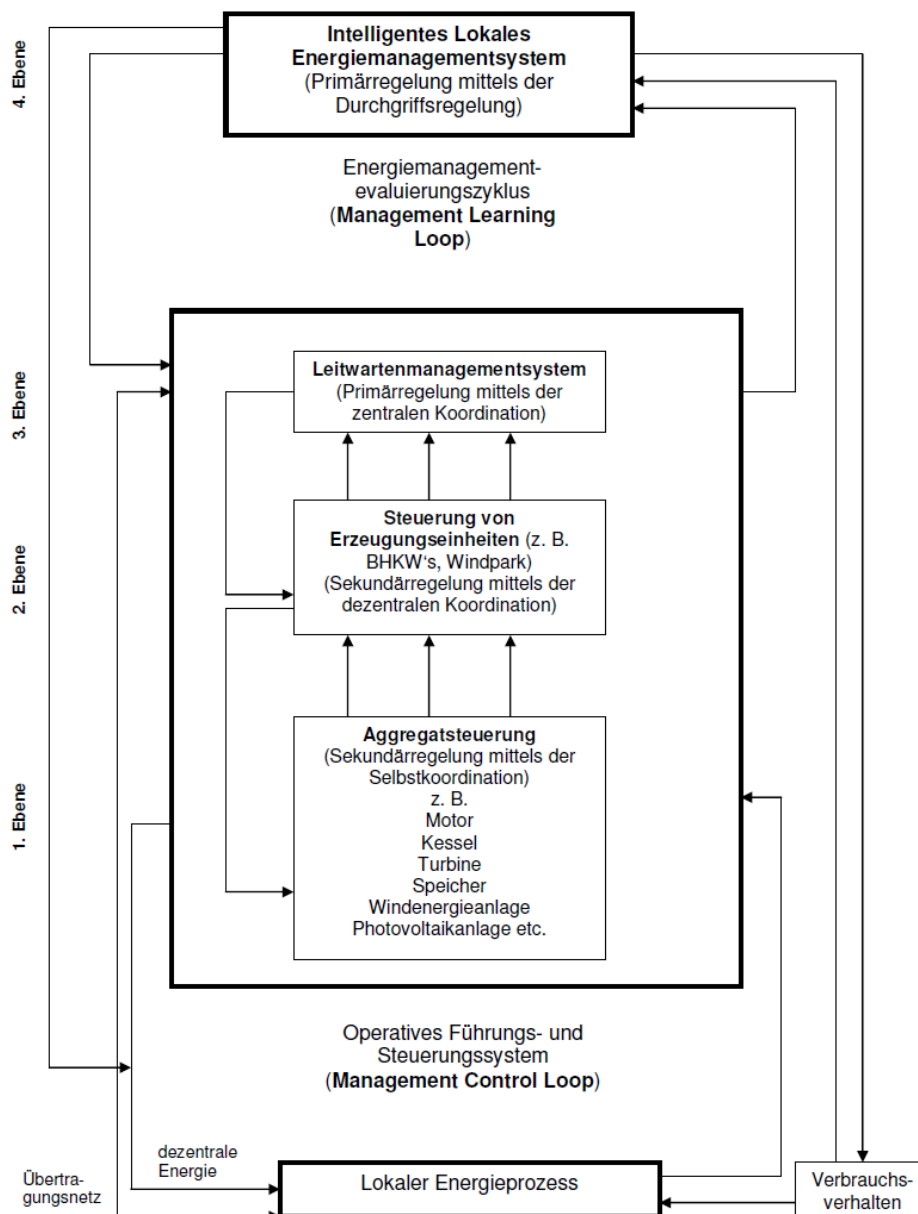


Abb. Nr. 5: Hierarchische Struktur des Regelkreissystems in dezentralen Energieversorgungssystemen

Auf der untersten Ebene befinden sich die Steuerungs- und Regelungssysteme der einzelnen Aggregate (WEA, PV-Anlage, Motor bzw. Gasturbine eines BHKW etc.). Durch die Steuerung bzw. Regelung der aggregatspezifischen Schutzfunktionen wird die „innere Homöostase“ der Einzelaggregate gewährleistet. Überlagert werden diese von dem Regelungssystem für eine Erzeugungseinheit, beispielsweise für ein BHKW (bestehend aus beliebig vielen Modulen und Komponenten) oder für einen Windpark oder eine Hybrid-Anlage (Motoren-BHKW + Expansionsmotor + Speichersystem). Hier erfolgt die technologisch-ökonomische Optimierung der Entität der jeweiligen Einzelaggregate einer Erzeugungsanlage sowie das Gewährleisten deren „inneren Homöostase“ durch die Abstimmung und Angleichung der spezifisch vorhandenen bzw. zu beachtenden Schutzfunktionen. Hierarchisch übergeordnet ist dann das Leitwarten- bzw. Lastmanagementsystem, das die einzelnen Erzeugungseinheiten „intelligent“ koordiniert sowie situativ aggregiert – in Abhängigkeit von dem unter Berücksich-

tigung des kontrahierten Energiebezuges jeweils definierten Fahrplan. Dies impliziert die ökonomische Optimierung bzw. übergeordnete Regelung der Entität der (fast) beliebigen Anzahl von Regelungssystemen auf der Ebene 2 bei einer quasi statischen Berücksichtigung von Erzeugung und Abgabe (Verbrauch) im Rahmen sog. Jahres- und Monats- bzw. Wochenfahrpläne. Zur Aufrechterhaltung der Homöostase und somit Beibehaltung der stabilen „inneren Umwelt“ erfolgt hier die erzeugungsanlagenspezifische „Feinabstimmung“, die jedoch zwangsläufig im Hinblick auf die Entität „Dezentrales Energiesystem“ nur eine Grobabstimmung sein kann. Deren jeweils situationsabhängige Feinabstimmung wird durch die 4. Regelungsebene realisiert. Dieses quasi als „controlling overlay“ fungierende „intelligente Lokale Energiemanagementsystem“ koordiniert schließlich diese Erzeugungskapazität sowie den Energiebezug in Abstimmung mit bzw. durch Beeinflussung der Energienachfrage und fungiert somit quasi als „Lastprofil-Generator“, der in Echtzeit die dynamische Erzeugungs- bzw. Bezugsstruktur mit dem Verbrauchsverhalten korreliert und letztlich die aktuelle Abnahme als Grenzwert aus fahrplanbasierter Eigenerzeugung und fahrplanbasiertem Bezug ausrichtet. Hierbei wird der aktuelle Energieverbrauch ebenfalls – soweit dies möglich ist – beeinflusst und damit gesteuert (z. B. durch abschaltbare Verträge, pretiale Preissysteme etc.). Soweit und solange keine verbrauchsindividuelle Echtzeit-Datenerfassung möglich ist, können mittels des sog. „Fuzzy-Clustering“ Standard-Lastprofile erzeugt und eingesetzt werden. Hierdurch werden die „Unschärfen“ der zu Monopolzeiten ausreichenden „Randintegral fokussierten Differenzmethode“ reduziert und somit eine signifikante Verbesserung der kurz- und mittelfristigen Lastprognose sowie der Netzausbauplanung erreicht. Des Weiteren können hierbei auch im Rahmen einer probabilistischen Netzanalyse die realen Belastungszustände des Netzes und somit das Erkennen vorhandener Kapazitätsressourcen exakter als bei der deterministischen Methode analysiert bzw. ermittelt werden²⁶. Beachtet werden muss hierbei allerdings die jeweilige „Aktualität“ der ermittelten „Standard-Lastprofile“, auf die sich beispielsweise wirtschaftliche, soziale und demographische Veränderungen auswirken können. Entscheidend ist somit die Zugrundelegung eines ausgewogenen Verhältnisses zwischen „harten“ und „weichen“ Informationen über die dem Cluster zugehörigen Einzelabnehmern. Letzteres setzt zwangsläufig die Existenz von Regelungssystemen analog zur 2. Ebene bei den Verbrauchern voraus (beispielsweise im Rahmen eines „Facility Managements“). Das Regelungssystem der 4. Ebene repräsentiert somit zumindest zwei Kernfunktionen bzw. -prozesse:

- die ereignisorientierte (situative) Regelung zum Herbeiführen bzw. Aufrechterhalten der Ultrastabilität des Gesamtsystems (Dezentrales Energiesystem)
- die langfristige technologische und ökonomische Optimierung des „Dezentralen Energiesystems“ zum Gewährleisten seiner nachhaltigen „Überlebensfähigkeit“.

Im Rahmen der ersteren Funktionalität wird kurzfristig bewusst die „innere Homöostase“ der untergeordneten Regelungssysteme der Ebenen 1 und 2 vernachlässigt, um schnell und flexibel auf momentane, situationsbedingte Diskrepanzen zwischen den Soll- und Ist-Werten des Gesamtsystems reagieren zu können. Dies trifft beispielsweise für technologisch implizierte (Betriebs-)Störungen zu. Das gilt auch für die kurzfristig mögliche Erzielung weiterer ökonomischer Deckungsbeiträge, z. B. durch den

²⁶ vgl. Tiedemann, R. (2002), Fuzzy-Clusteranalyse zur Klassifizierung von Lastganglinien. VDI-GET-Expertenseminar „Lastprofile in der leitungsgebundenen Energieversorgung“, Berlin, 24.04.2002

zusätzlichen Energieverkauf über Strombörsen, die kurzfristige Nutzung von im Vergleich zur Eigenerzeugung bzw. zum Bezug preiswerterer Regelenergie oder die vertraglich vereinbarte Lieferung von Regelenergie etc. Im Rahmen einer kurzfristig erforderlichen Reaktion (Minuten- bis Stundenbereich) erfolgt die „Durchgriffsregelung“. Bei „planbaren“ Reaktionen (Reaktionszeit > 2 Stunden) wird das Prinzip der „zentralen Koordination“ durch die Vorgabe von neuen Sollwerten für die Regler der untergeordneten Systeme angewandt.

Im Rahmen der Funktionalität „Langfristoptimierung“ des Gesamtsystems (Dezentrales Energiesystem) erfolgt die Simulation verschiedener Szenarien, um antizipativ auf sich verändernde Rahmenbedingungen (Struktur- und Preisveränderungen, Übergang zu anderen Primärenergien, sozial und demographisch bedingte Veränderungen des Verbraucherverhaltens, Veränderung der Abnehmerstrukturen etc.) reagieren zu können. Zwangsläufig müssen hierbei auch die Beeinflussungsmöglichkeiten des Verbraucherverhaltens – beispielsweise durch LCP/IRP-Instrumente, neue (Energie-) Dienstleistungen etc. – involviert werden, um die ökonomische und ökologische Ultrastabilität und somit die Nachhaltigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Deutlich wird hierbei, dass beispielhaft die Koordinations- bzw. Regelungsprozesse auf der 1. und 2. Ebene autonom durch die jeweiligen Regelungssysteme erfolgen (Sekundärregelung), ohne dass eine Rückkopplung mit der 3. Ebene erfolgen muss. Des Weiteren kann das Energiemanagementsystem als „oberstes Regelungssystem“ im Rahmen der Durchgriffsregelung direkt auf die Steuerung eines Aggregates (1. Ebene) einwirken. Die Primärregelung im Rahmen der „zentralen Koordination“ durch das Managementsystem erfolgt dann beispielsweise durch die Vorgabe von „Fahrplänen“ an die 3. Ebene (Leitwartenmanagementsystem). Letzteres wiederum kann im Rahmen der dezentralen Koordination für die Regler der 1. Ebene spezifische Parameterwerte definieren (vgl. Abb. Nr. 6).

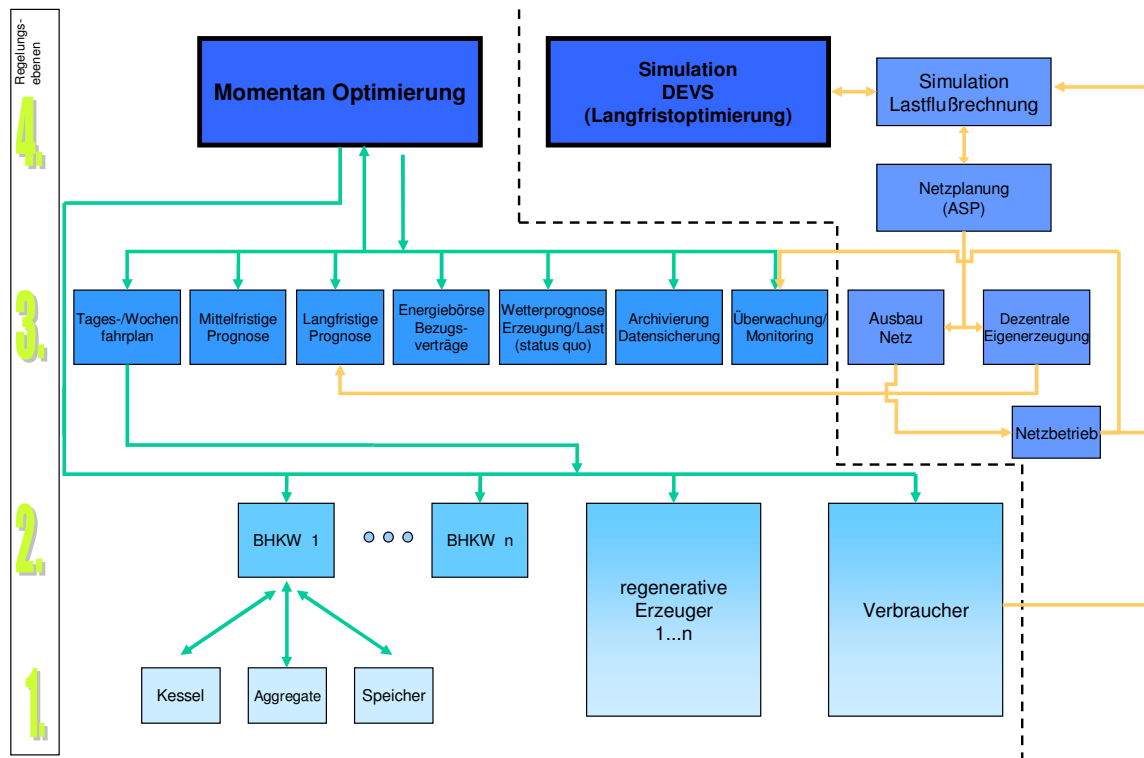


Abb. Nr. 6: Abstrahierte Darstellung der hierarchischen Regelungsstruktur des Virtuellen Kraftwerkes

Unter Einbeziehung der Triade „Daten – Informationen – Wissen“²⁷ kann konstatiert werden, dass auf der Regelungsebene 1 fast ausschließlich Daten verarbeitet werden. Auf der Ebene 2 beträgt die Relation zwischen Daten- und Informationsverarbeitung ca. 70 : 30, während sich dieses Verhältnis auf der Ebene 3 umkehrt. Auf der höheren Ebene des sog. „controlling overlayer“ (Ebene 4) erfolgt fast ausschließlich eine Informationsverarbeitung im Rahmen der ereignisorientierten Systemregelung sowie überwiegend eine Wissensverarbeitung bei der Funktionalität „Langfristoptimierung durch Simulation“.

Aus dieser „holzschnittartigen“ Skizzierung wird deutlich, dass die in sich konsistente Konzeption eines derartigen hierarchischen, vermaschten Regelungssystems für das dezentrale Energieversorgungssystem zum einen sehr komplex ist und daher einen eindeutig strukturierten, technologischen (Denk-)Prozess erfordert. Zum anderen ist es erforderlich, eine Vielzahl vorhandener „monovalenter“ und häufig informationstechnologisch inkompatibler Regelungssysteme der unteren Ebenen (beispielsweise die Aggregatsteuerungen etc.) zu einem „intelligenten“, selbstlernenden System zu aggregieren. Aus der Abb. 7 wird die Vernetzung der einzelnen informationstechnologischen (Teil-)Systeme deutlich.

²⁷ vgl. Jänig, Chr. (2004), S. 69 ff

„Virtuelles Kraftwerk“

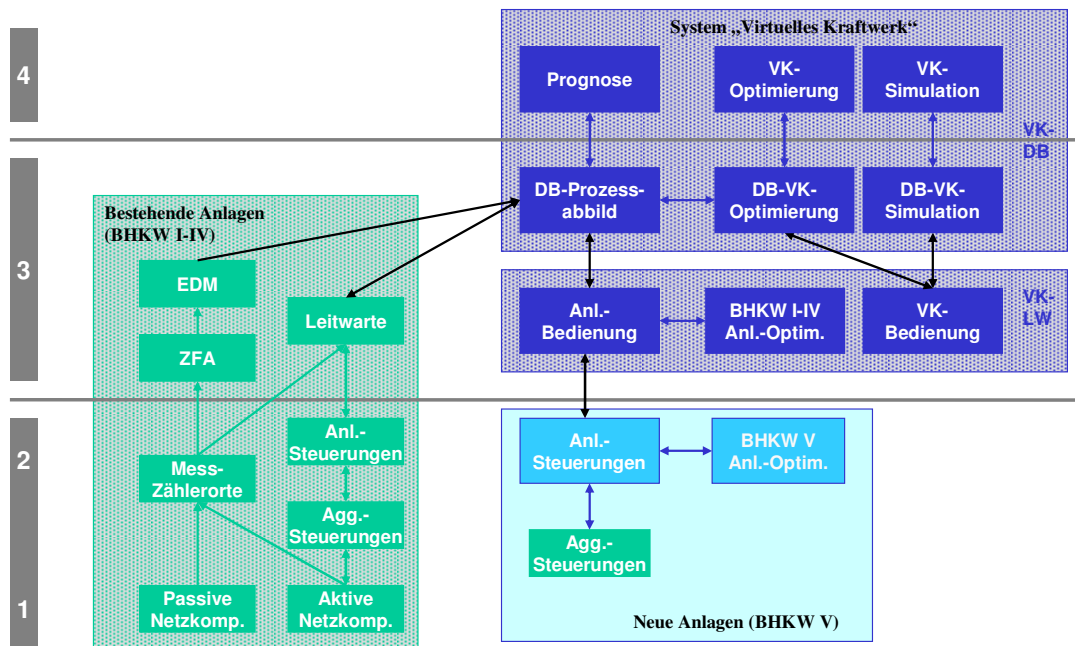


Abb. Nr. 7: Informationstechnologische Architektur des Regulationssystems „Virtuelles Kraftwerk“

4.3 Informationstechnologische Strukturmerkmale

An früherer Stelle wurde bereits deutlich, dass sowohl ein dezentrales Energieversorgungssystem als auch das für seine ökologische/ökonomische Funktionsfähigkeit zwingend erforderliche lokale Energiemanagementsystem in Form eines hierarchischen, vermaschten Regulationssystems spezifische, integrierte und durchgängige Daten- und Informationsstrukturen bzw. Kommunikationssysteme benötigt, um die vollständige und konsistente Daten- und Informationsbasis über die Einsatzoptionen aller Erzeugungsanlagen im „Online-Betrieb“ zu ermöglichen. Diese Systeme sind interdependent und parallel zur Struktur des „klassischen Verteilnetzes“ zu installieren und werten dieses dadurch qualitativ auf. Sie fungieren quasi als „Nervenbahnen“ zwischen den einzelnen Regulationssystemen sowie den jeweils angeschlossenen und zu beeinflussenden Erzeugungs-, Verteilungs- und Verbrauchseinheiten und dienen zum Transport der jeweils notwendigen Zähl- und Messdaten, Informationen sowie Steuerungsimpulse. Modellhaft kann dieses intelligente Informations- und Kommunikationssystem als **neuronales Netzwerk** mit dem Nervensystem des menschlichen Körpers verglichen werden²⁸: Zum einen steuert der Hypothalamus bidirektional über das vegetative Nervensystem (hierarchisches Regulationssystem) als autonomes System die Prozesse im menschlichen Organismus in Abhängigkeit von dem jeweiligen Belastungszustand. Ergänzend bzw. zusätzlich fließen des Weiteren verdichtete Daten und Informationen über die jeweiligen internen Systemzustände etc. über dieses System zum Thalamus sowie zum Großhirn. Letzteres erhält neben diesen vertikal übertragenen, verdichteten und somit „gefilterten“ Informationen zusätzlich über das sensorische

²⁸ vgl. Jänig, W. (1998), Vegetatives Nervensystem, in: Schmidt, R. F. (Hrsg., 1998), Neuro- und Sinnesphysiologie, 3. Aufl., Berlin/Heidelberg 1998

hängig von dieser Transport- und Transformationsfunktion werden hier spezifische Aggregatzustände bzw. „Erregungsmuster“ gespeichert, um bei definierten Abweichungen bzw. Störungszuständen autonom reagieren zu können. Parallel hierzu erhält das „lokale Energiemanagementsystem“ als „controlling overlayer“ Systemzustandsinformationen über das „sensorische System“ als Grundlage für die eigenen Steuerungs- und Regelungsfunktionen im Rahmen der primären sowie Durchgriffsregelung. Durch diese Parallelität der Informationsübertragungssysteme wird das Prinzip der Redundanz gewährleistet. Des Weiteren erhält das lokale Energiemanagementsystem Informationen aus der „Umwelt“ (Netzstatus bzw. Auslastung, Energieverbrauchsstatus etc.) ebenfalls über das „sensorische System“, so dass es durch Rückmeldungen bzw. Rückkopplungen über Informationen sämtlicher Zustände des dezentralen Energieversorgungssystems bzw. seiner sensorischen Elemente sowie über die Bedingungen der Umwelt (Energieverbrauch, Netzbezug) verfügen kann. Die im Einzelfall erforderlichen Steuerungen und Regelungen werden dann über das „somatische System“ gegenüber den untergeordneten Regelungssystemen der Ebenen 1 – 3 im Rahmen der zentralen Koordination sowie ebenfalls über das „periphere somatische System“ im Rahmen der Durchgriffsregelung realisiert (dieser strukturelle Aufbau kann schematisch der Abbildung Nr. 9 entnommen werden).

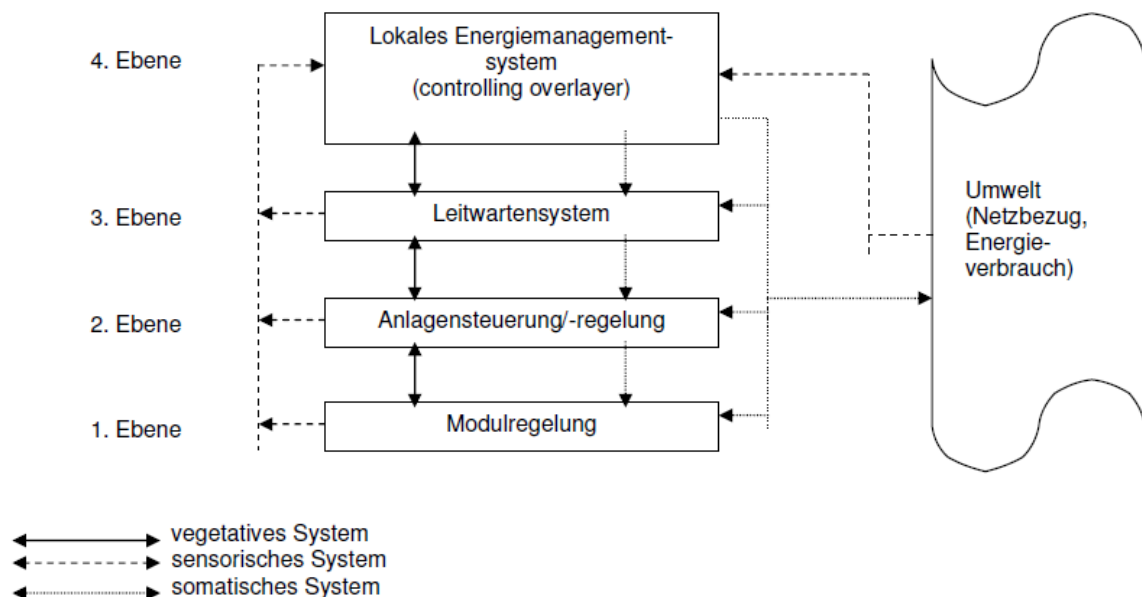


Abb. Nr. 9: Die Komponenten des „neuronalen Informations- und Kommunikationsnetzwerkes“ im Rahmen des Virtuellen Kraftwerkes

Die hierzu erforderlichen physikalischen Leitungswege bzw. Netzstrukturen müssen zwar nicht die Übertragungskapazität menschlicher Nervenbahnen (ca. 300 – 400 Impulse pro Sekunde bei 500 bis 1.000 Hertz) besitzen; deutlich wird jedoch, dass in Abhängigkeit von der hierarchischen Ebene der jeweiligen Regelungssysteme auch die Anforderungen an die physikalischen Übertragungskapazitäten des Informationssystems steigen. Sowohl aus Gründen der Redundanz wie auch aus Übertragungskapazitätsgründen ist es daher erforderlich, die angesprochenen Informations- und Kommunikationssysteme auf verschiedenen „Plattformen“ zu installieren. Während das „vegetative System“ im Rahmen der „klassischen“ Fernwirklinien realisiert werden kann, sollte das „sensorische System“ als eigenständiges Informationssystem auf hiervon redundanten

Datennetzen beruhen – beispielsweise auf der Grundlage des sog. EDM (Energiedatenmanagement), das digitalisierte Fest- und Mobilnetze sowie Intra- und Internet aggregiert. Das sog. „somatische System“ schließlich muss sich als weiteres redundantes System aufgrund der Heterogenität der zu erreichenden Anlagen bzw. Aggregate (z. B. energieverbrauchende Anlagen bei Privatkunden) auf unterschiedliche Leitungswege „abstützen“ können (Internet, Festverbindungen, Mobilfunknetz etc.).

Aufgrund dieser (fast) flächendeckenden Informationsstruktur bzw. -architektur ist das lokale Energiemanagementsystem (VK) in der Lage, seine Funktionen „Prognose und Simulation“, „operative Planung“, „Optimierung und Controlling“ sowie „Monitoring“ zu realisieren. Ohne derartige „intelligente“ sowie multimediale Informations- und Kommunikationsstrukturen einschließlich interaktiver Zähl- und Messwertübertragungen etc. ist allerdings das für dezentrale Energiesysteme zwingend erforderliche „lokale Energiemanagementsystem“ nicht realisierbar. Obwohl die zur Verfügung stehende Informationstechnik diese Aufgaben grundsätzlich lösen könnte bzw. kann, existieren zwangsläufig noch erhebliche Schwierigkeiten bei den spezifischen Problemlösungen, beispielsweise im Rahmen der Kompatibilität der individuellen Aggregat- bzw. Anlagensteuerungen, des einzubeziehenden Energiedatenmanagements sowie der häufig proprietären und heterogenen Lastmanagement- bzw. Netzführungssysteme.

5. Das Leitprojekt „Virtuelles Kraftwerk“ in Unna

1.1 Grundlagen

Aus den bisherigen Ausführungen wurde deutlich, dass ein dezentrales Energiesystem, bestehend aus heterogenen KWK-Anlagen, Brennstoffzellen bzw. Micro-BHKW's in Privathäusern, Photovoltaikanlagen unterschiedlicher Leistungsgrößen sowie Windenergieanlagen mit Nennleistungen zwischen 150 bis 1.500 kW sowohl von der Struktur, seiner Regelungsfähigkeit mittels vermaschter, hierarchischer Regelungssysteme als auch dem erforderlichen Datenmodell äußerst komplex ist. Gerade für das letztere sind beispielsweise Informationen und Daten über die Netzleistungen bzw. -lasten (Lage, Verteilung, Netztopologie), dem zu Grunde liegenden Bedarf (elektrisch, thermisch) sowie den diesen bestimmende Einflüsse (Wetter, Nutzungsarten, Saisonaleinflüsse) und die hierdurch implizierten Profile (Jahr, Woche, Tag) sowie Strukturen (schaltbar, steuerbar, unbeeinflussbar) erforderlich. Des Weiteren müssen Informationen über die Erzeugungseinheiten bzw. -ressourcen (fossil und regenerativ), deren Verfügbarkeit unter Berücksichtigung von Kopplungsprozessen sowie den ökonomischen Möglichkeiten des horizontalen Leistungsaustausches und des Bezuges aus der übergeordneten Netzebene verfügbar sein. Schließlich sind für ein effizientes lokales Energiemanagementsystem auch noch Daten und Informationen über die elektrischen und thermischen Speicherungsmöglichkeiten „online“ erforderlich. Ein derartiges Datenmodell unter Involvierung der jeweils zu Grunde liegenden komplexen Regelungs- und Steuerungssysteme quasi „auf der grünen Wiese“ zu konzipieren und in einem weiteren Schritt unter realen Bedingungen zu evaluieren, ist (fast) unmöglich. Aus diesem Grund wurde **induktiv** im

Rahmen des Leitprojektes in Unna²⁹ die anfangs bestehende sowie die geplante Erweiterung der dezentralen Erzeugungsstruktur mit den vorhandenen autonomen Regelungssystemen zu Grunde gelegt.

Im Rahmen dieses „bottom-up-Ansatzes“ wurden in einem ersten Schritt die bislang teilautonomen Regelungssysteme sowohl physikalisch (Datenleitungen) als auch regelungstechnisch miteinander vernetzt.

Im zweiten Schritt wurde das lokale Energiemanagementsystem unter Einbeziehung des vorhandenen Lastmanagementsystems als „controlling overlayer“ konzipiert, strukturiert sowie implementiert.

Im dritten Schritt wurde dann das sich hierbei ergebende „hierarchische, vermaschte Regelungssystem“ sowie das sich dahinter befindliche Datenmodell mit den Echtdateien der vorhandenen Erzeugungsanlagen evaluiert und entsprechend korrigiert bzw. angepasst. Aus informationstechnologischen (Komplexität der Programmierung) sowie realen Gründen heraus bildete dieses Datenmodell zu Beginn „nur“ die Regelung der Erzeugungs- und Netzbezugsstrukturen ohne die Komponente „Beeinflussung des Verbraucherverhaltens“ ab. Letzteres Modul kann erst dann in das Modell bzw. Konzept aufgrund seiner Interdependenz zum ersteren einbezogen werden, wenn das erstere Modul „dezentrale Erzeugung und Netzbezug“ in sich konsistent ist. Des Weiteren müssen die entsprechend digital ansteuerbaren Mess- und Zählerinrichtungen bei den Verbrauchern installiert sein.

Im letzten Schritt schließlich werden die Interdependenzen sowie Rückkopplungen dieser beiden Module im Rahmen des Gesamtsystems analysiert, getestet sowie mit Echtdateien evaluiert³⁰. Die Transformation dieses Datenmodells auf eine „höhere Ebene“ durch die Integration und Aggregation weiterer Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten ist dann auf Grund der modularen Struktur des Gesamtsystems „relativ einfach“ – einfacher auf jeden Fall, als es die deduktive Erstellung des Gesamtsystems „in einem Wurf“ sein würde.

Die erzeugungstechnologischen Komponenten des „Virtuellen Kraftwerks“ im Rahmen dieses dezentralen Energieversorgungssystems sind neben derzeit vierzehn KWK-Anlagen mit unterschiedlichen Leistungsgrößen sowie Erzeugungstechnologien (neben Micro-BHKW's auch erdgas- und rapsölbetriebene konventionelle Anlagen) zwei sog. „Windparks“ mit Windenergieanlagen zwischen 150 kW und 1.500 kW, eine Wasserkraftanlage, eine Microgas- und Entspannungsturbine sowie eine Vielzahl kleinerer Photovoltaikanlagen – letztere repräsentieren eine Erzeugungsleistung von derzeit 2,5 MW. Die genaue geographische Dislozierung dieser Anlagen kann der Abb. Nr. 10 entnommen werden.

²⁹ Leitprojekt im Rahmen der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW – Einsatz dezentraler Erzeugungsanlagen als virtuelles Kraftwerk im Verteilnetz eines kommunalen Energieversorgers

³⁰ diese iterative Vorgehensweise entspricht dem Modell der Bezugsrahmengenesse – vgl. Jänig (1984), Konzeption und Implementierung eines computergestützten Informationssystems als „Geplanter Wandel“ der Verwaltungsorganisation, Krefeld 1984, S. XV

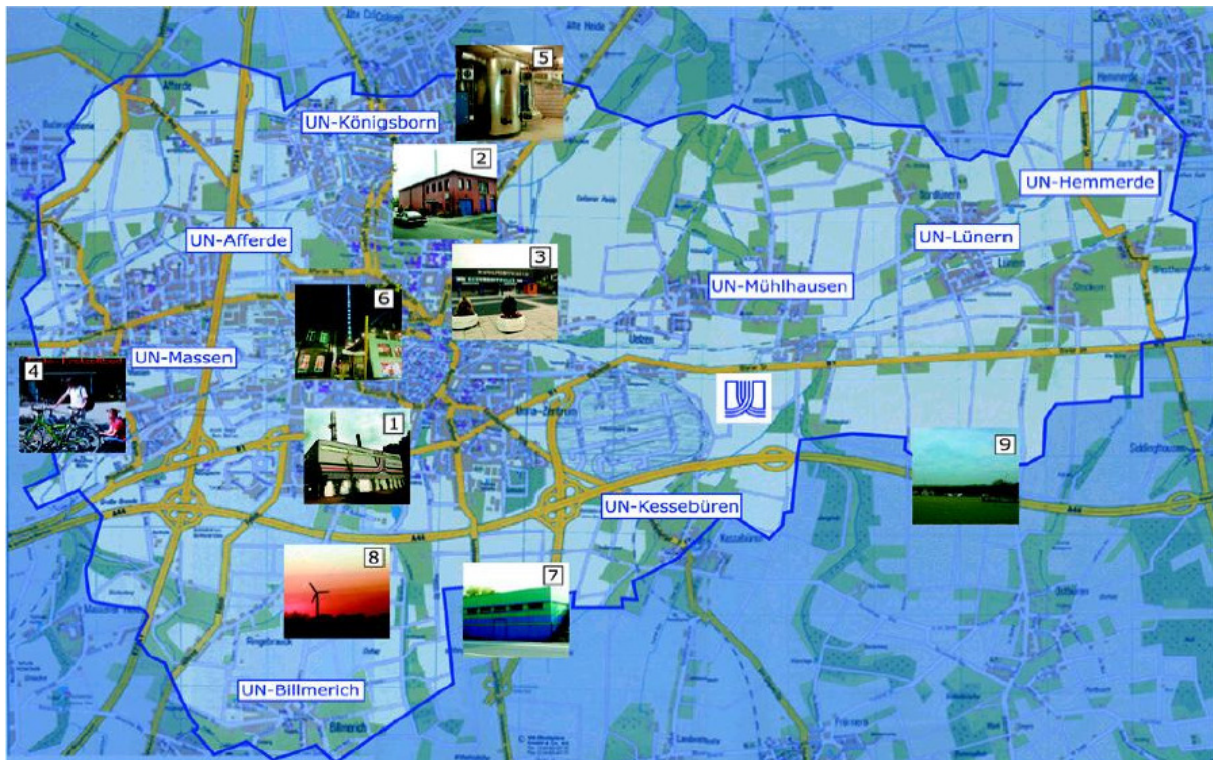


Abb. Nr. 10: Geographische Dislozierung der dezentralen Erzeugungsanlagen in Unna

5.2 Die derzeitigen Regelungssysteme

Die vorstehend aufgeführten Erzeugungsanlagen bzw. -systeme wurden früher durch autonome bzw. teilautonome Systeme geregelt. In Analogie zu der eingangs erläuterten vierstufigen Hierarchie des vermaschten Regelungssystems ergaben sich hierbei die nachfolgenden Charakteristika:

1. Ebene (Sekundärregelung als Selbstkoordination)

In den BHKW's werden die Aggregate (Motoren, Kessel, Turbine etc.) jeweils einzeln für sich überwacht und im Rahmen von Störungsanalysensystemen (z. B. TEM-Steuerung), Sicherheitsketten etc. geregelt. Ergänzt wird dies für die elektrischen Erzeugungsmodule durch automatische Netzsynchronisierungssysteme. Die Wasserkraftanlage und die einzelnen Windenergieanlagen in den Windparks sowie Microgas- und Entspannungsturbine werden ebenfalls durch autonome Einzelsysteme gesteuert.

2. Ebene (Sekundärregelung als dezentrale Koordination)

In den BHKW's befindet sich darüber hinaus jeweils ein Regelungssystem der 2. Ebene, das unter Berücksichtigung der vorgegebenen Parameter (z. B. Betriebsstunden der Einzelaggregate, Verfügbarkeit, Energieanforderung etc.) das jeweilige Gesamtsystem wirtschaftlich optimiert. Als „Steuer- bzw. Regelstrecke“ werden hierbei jeweils thermische Speicher eingesetzt. Alle Systeme sind nach den Kriterien der sog. „Sekundärregelung“ konzipiert.

3. Ebene (Primärregelung als „zentrale Koordination“)

Das sog. „Leitwartenmanagementsystem“ optimiert die Eigenerzeugung der elektrischen und thermischen Energie im dezentralen

Energieversorgungssystem unter Berücksichtigung des Abnahmeverhaltens (Netzlast) sowie der kontrahierten Bezugsmöglichkeiten (Strom- und Gasbezug). Als Regelstrecken wurden hierbei neben den spezifischen thermischen Speichern auch die thermische Speicherfähigkeit der hinter den KWK-Anlagen befindlichen Versorgungsnetze eingesetzt. Zusätzlich wurde unter Berücksichtigung ökonomischer Kriterien eine gegenseitige Optimierung der Erzeugungskosten „Wärme“ bzw. „Strom“ durchgeführt. Des Weiteren wird über das Leitwartensystem die optimierte Betriebsführung der Strom-, Gas- und Wärmenetze realisiert (im Sinne eines Smart Poly Grid). Die für Planungsaufgaben (Neubau, Ausbau etc.) erforderlichen Funktionen werden im Rahmen eines sog. „ASP-Ansatzes“³¹ online über das Internet bei einem Drittunternehmen durchgeführt.

Dieses vorhandene dreistufige Regelungssystem musste im Rahmen des Konzeptes „Virtuelles Kraftwerk“ erweitert werden. Hierbei wurden durch das im Rahmen des Projektes konzipierte und installierte Virtuelle Kraftwerk die auf den Ebenen 1 – 3 vorhandenen (teil-)autonomen Regelungssysteme aggregiert. Zusätzlich wurde das Regelungssystem der vierten Ebene konzipiert und implementiert, um als sog. „controlling overlay“ sowohl bei einer „zentralen Koordination“ als auch der „Durchgriffsregelung“ eine unter ökonomischen wie auch ökologischen Gesichtspunkten optimierte und „intelligent integrierte“ Erzeugungsstruktur des dezentralen Energiesystems unter aktiver Einbindung sowie Steuerung des Verbraucherverhaltens zu gewährleisten.

5.3 Die Regelungsstruktur des „Virtuellen Kraftwerkes“

In dem in Unna vorhandenen Leitwartenmanagementsystem waren bereits die ersten drei Regelungsebenen implementiert und funktionsfähig. In einem ersten Schritt wurde daher zusätzlich das digitale Energiedatenmanagement – quasi als „vegetatives System“ – eingebunden, damit die erforderlichen Zähl- und Messwerte sowie Daten mittels eines redundanten Systems zur Verfügung stehen. Des Weiteren wurden über diese „Ankopplung“ verbrauchsbezogene Daten und Informationen „aus der Umwelt“ d. h. von den Energieverbrauchern, erfasst, aggregiert und verarbeitet. Diese teilweise nicht gemessenen Verbrauchsinformationen konnten zu Beginn durch synthetische Lastprofile³² repräsentiert und im Datenmodell abgelegt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt wurde nach der Installation digitaler Zähl- und Messsysteme sowie der entsprechenden Datenübertragungssysteme (sog. Fernauslesesysteme) „online“ der aktuelle Verbrauch aller Abnehmer sektoral bzw. individuell gemessen sowie in den relevanten Regelungssystemen verarbeitet. Parallel dazu werden bidirektional auf der Grundlage von Simulationsberechnungen die situativ erforderlichen Steuerungs- und Regelungsimpulse zur Verbrauchsbeeinflussung übertragen.

In einem zweiten Schritt wurden die vorhandenen Simulations-Tools unter Einbeziehung dieser Daten und Informationen dergestalt weiterentwickelt, dass Prognosen sowohl über Eigenerzeugung und Energieverbrauch als auch unter Einbeziehung der vorgegebenen (kontrahierten) Bezugsfahrpläne erstellt und aufeinander abgeglichen sowie optimiert

³¹ ASP = Application Service Providing

³² vgl. die Ausführungen in Abschnitt III. 4.1

werden können. Eine wesentliche Schwierigkeit hierbei ist sicherlich die „linearisierte“ Prognose bzw. Simulation der stochastischen Erzeugungskapazitäten (z. B. Windenergie- und Photovoltaikanlagen). Hieraus resultiert letztlich die notwendige informationstechnologische Architektur (vgl. Abb. Nr. 7). In einem dritten Schritt wurden dann in dieses Simulationsmodell ökonomische Parameter (beispielsweise die fahrplanbasierenden Energiebezugskosten, die Kosten für Regelenergie bei Fahrplanabweichungen, die interdependenten Energieeinsatzkosten im Rahmen der Koppelproduktion, die börsenorientierten Deckungsbeiträge für Einspeisungen in das Übertragungsnetz etc.) sowie ökologische Rahmenbedingungen (z. B. Reduzierung der jahresbezogenen Schadstoffemissionswerte etc.) implementiert. Hierdurch wurde u. a. auch eine „regelungstechnologische“ Grundlage für den in den nächsten Jahren zu erwartenden generellen Zertifikatehandel für Schadstoffemissionen geschaffen werden. In einem vierten Schritt wurden dann verbrauchsbeeinflussende bzw. -steuernde Module involviert, um neben der Erzeugung- auch die Verbrauchsseite regeln zu können. Letzteres impliziert zwangsläufig die Schaffung einer Schnittstelle zu der vorhandenen Abrechnungssoftware, um „online“ den Rechnungserstellungsprozess realisieren zu können. Die sich hieraus insgesamt ergebenden Daten und Informationen determinieren dann letztlich die Strukturparameter für den zu generierenden Algorithmus für das Energiemanagementsystem im Rahmen seiner Funktion als „controlling overlayer“ bzw. der notwendigen Primärregelung im Sinne der Durchgriffsregelung. Die hieraus resultierenden Regelungsstufen bzw. -arten können der Abb. Nr. 11 entnommen werden.

„Virtuelles Kraftwerk“

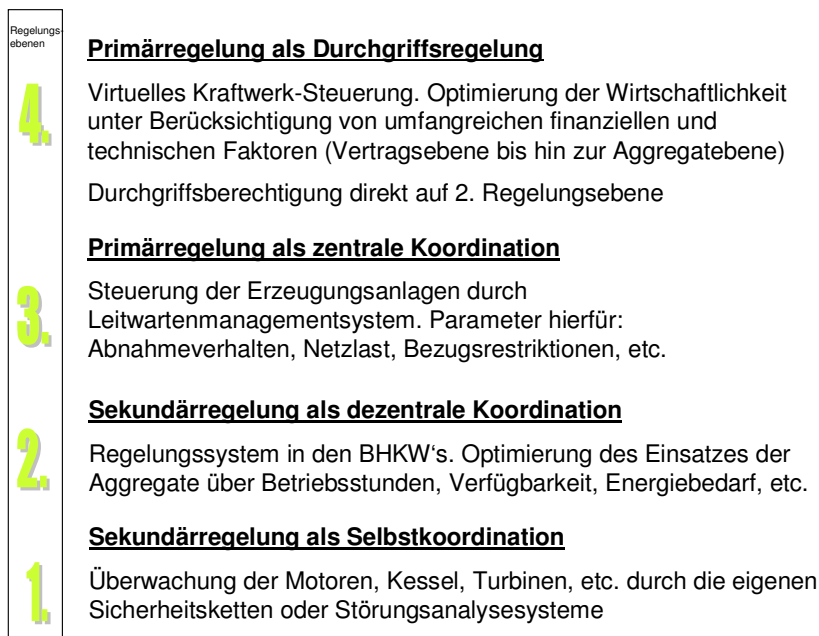


Abb. Nr. 11: Regelenergiearten im Rahmen der Primär- und Sekundärregelung

6. Zusammenfassung

Unstrittig ist, dass die einerseits durch die Globalisierung initiierten Veränderungen der ökonomischen Rahmenbedingungen als auch andererseits das durch ökologische Zwänge implizierte „ökologische Gesetz des Kapitalismus“ zu einem neuen, anderen Kontext der Energiewirtschaft und damit zum beschriebenen Paradigmenwechsel von zentralen zu dezentralen Energiesystemen führen wird. Für lokale Energiedienstleistungsunternehmen bietet sich hierdurch sowie aufgrund ihrer „lokalen“ Markt- und Kundennähe die Chance, ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit in einem ganzheitlichen und systematischen Konzept zu realisieren. „Unternehmen, die umweltstrategische Probleme, Chancen und Risiken bewusst erkennen und im Sinne einer nachhaltigen Wertsteigerung berücksichtigen sowie soziale Kompetenzen und gesellschaftspolitische Interessen als Faktoren in ihre Entscheidungsprozesse involvieren, erzielen häufig höhere Wertsteigerungsraten als andere Unternehmen: Der künftige wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens aus Sicht des Kunden hängt überwiegend von der Bereitschaft ab, sich selbst als Akteur eines „nachhaltigen Wirtschaftens“ zu positionieren. Hierunter wird die Ausbalancierung bzw. Abstimmung und Ausgleich der sozialen, ökonomischen, kulturellen, (informations-) technologischen sowie strukturellen Komponenten einer Unternehmung auf lange Sicht verstanden.“³³

Neben dieser „metaphilosophischen“ Strategieebene werden durch das Konzept des „virtuellen Kraftwerks“ – unabhängig von den ökologischen Zielsetzungen – auch ökonomische Vorteile generiert. Hier ist zum einen die Reduzierung der Kosten der „extern“ zu beschaffenden Energie sowie die Vermeidung der Netznutzungsentgelte im ÜNB-Bereich anzuführen. Des Weiteren führen die genaueren Lastgangprognosen (> 95 %) zu einer verbesserten Einsatzoptimierung sowohl der eigenen Erzeugungsanlagen als auch der Nutzung der Stromeinspeisungen aus regenerativen Erzeugungsanlagen. Zum anderen führt der gezielte und planmäßige Zubau sowie die Integration dezentraler Erzeugungssysteme im vorhandenen Nieder- und Mittelspannungsnetz dazu, dass an und für sich erforderliche Kapazitätsverstärkungen des Verteilnetzes auf Grund zusätzlicher Lastschwerpunkte (z. B. Neubaugebiete, Gewerbe- und Industrieansiedlungen) reduziert werden können – soweit sie nicht gänzlich entfallen können; aus diesem Grunde ist das Netzplanungsmodul (s. Abb. 6) ein integraler Bestandteil des Systemkonzeptes „virtuelles Kraftwerk“. Die traditionell monolaterale Netzstruktur („vom Großkraftwerk bis zur Steckdose des Endverbrauchers“) wird in eine bidirektionale transformiert.

Unabhängig von diesen „lokal“ zu generierenden betriebswirtschaftlichen Vorteilen können auch durch eine informationale und steuerungstechnische Aggregation geografisch dislozierter dezentraler Erzeugungsanlagen die Größenmerkmale (> 30 MW) sowie die Zertifizierungsanforderungen für die **Bereitstellung und Lieferung von Regelenergie** erfüllt werden. Aus den generellen Ausführungen in Abschnitt 2 sowie der Abb. Nr. 3 ist zu entnehmen, dass die „Überschussleistung“ der dezentralen (lokalen) Energiesysteme in das übergelagerte Übertragungsnetz eingespeist werden soll. Überwiegend besitzen kommunale Energieversorgungsunternehmen jedoch nicht die als Mindestgröße erforderliche freie Erzeugungskapazität (z. B. im Bereich der BHKW's), um eine dementsprechende Regelenergie kontrahieren und liefern zu können. Die Konzeption des „virtuellen Kraftwerks“ als auch das hierauf basierende regelungstechnische System (Lastmanagementsystem) kann eine (beliebig) große Anzahl geographisch unabhängiger dezentraler Erzeugungsanlagen zu einem Erzeugungssystem aggregieren und optimieren, da es „zu jeder Sekunde“ über den momentanen

³³ Jänig, Wissensmanagement, 2004, S. 467

Status der Einzelanlagen informiert ist. Des Weiteren kann es im Rahmen der Fahrplanprognose die mit spezifischen Vorlaufzeiten avisierten Leistungseinspeisungen für Regelenergie berücksichtigen und die jeweils benötigten dezentralen Erzeugungskapazitäten regelungstechnisch auf den jeweiligen Einspeisezeitpunkt sowie die benötigte Leistung „vorbereiten“ (z. B. durch Lastabwurf oder -reduzierung abschaltbarer Verbraucher, Einsatz von Notstromaggregaten, Optimierung der vorhandenen Speichersysteme etc.). Durch diese neben der lokal-fokussierten regionalen/nationalen Aggregation und Einsatzoptimierung kleinteiliger, dezentraler Erzeugungsanlagen werden zusätzliche Deckungsbeiträge generiert, die bei einer ausschließlich lokalen Betrachtungsweise der Einsatzoptimierung nicht erzielt werden können.