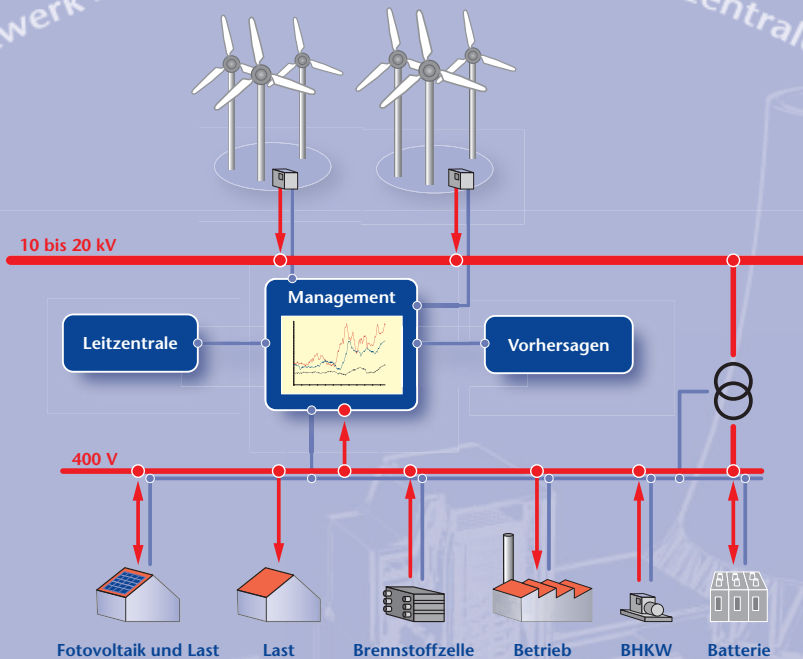


Virtuelles Kraftwerk = Dezentrale Energiestationen + zentrale Ansteuerung



Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder Realität?

Unter einem virtuellen Kraftwerk wird ein System zur Stromerzeugung verstanden, das nicht in Form eines herkömmlichen Kraftwerks existiert, aber dennoch vergleichbare oder ähnliche Möglichkeiten bietet. Das Konzept des virtuellen Kraftwerks ist untrennbar mit dezentraler Stromerzeugung verknüpft, die eine verbrauchernahe Erzeugung und Einspeisung in ein Verteilnetz verspricht. Der Beitrag fasst wesentliche Erkenntnisse aktueller Forschungs- und Entwicklungsprojekte zusammen.

Für dezentrale Erzeugungsanlagen ist die Prognostizierbarkeit und Planbarkeit der zu erwartenden Energieerträge ein wesentliches Kriterium. Insbesondere Erzeugungsanlagen auf der Grundlage erneuerbarer Energien, wie zum Beispiel Windenergie- oder Fotovoltaik-Anlagen, weisen mit Blick auf die zu erwartenden Energieerträge eine geringe Planbarkeit auf. Mit

wachsender Prognosegüte von Wetter-, Wind- oder Einstrahlungsvorhersagen steigt auch die Verlässlichkeit der Integration dieser dezentralen Anlagen in die allgemeine Stromversorgung. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis konventioneller oder biogener Energieträger verfügen großensabhängig über eine hohe Planbarkeit und Beeinflussbarkeit der disponiblen elektrischen Leis-

tung und Energieerträge. Deshalb sind sie für den Einsatz in virtuellen Kraftwerken grundsätzlich geeignet.

Konzepte, Zielvorgaben, Projekte

Das Konzept des virtuellen Kraftwerks sieht vor, dezentrale Erzeugungsanlagen informationstechnisch untereinander zu vernetzen und extern zu regeln, um

Autoren

Dipl.-Ing. **Ulli Arndt**, Jahrgang 1970, Studium des Maschinenbaus an der Technischen Universität Braunschweig und an der Universidad Politécnica de Valencia, seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) e.V. in München.

uarndt@ffe.de

Dipl.-Ing. **Serafin von Roon**, Jahrgang 1977, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin, seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter der FFE.

Prof. Dr.-Ing. **Ulrich Wagner**, Jahrgang 1955, seit 1987 Geschäftsführer der FFE, seit 1995 Wissenschaftlicher Leiter der FFE und Ordinarius für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der TU München, dort seit 2005 Dekan der Elektrotechnik und Informationstechnik.

Projektname Beteiligte	Laufzeit	Anlagen und Leistung	Vernetzung, EMS	Ziele
VK Stadtwerke Unna, EUS, ABB New Ventures	seit 2001, Ende 2004 Start des VK-Betriebs	5 BHKW, 1 Wasserkraftwerk, 1 Fotovoltaikanlage, 2 Windparks, Jahresproduktion: 26 GWh/a	Prognose-, Leit- und Automatisierungssysteme	Optimierung der Energieerzeugung in Abhängigkeit der technischen Möglichkeiten, der prognostizierten Verbraucherlast und der Einkaufskonditionen; Verbesserung der Prognosegüte
VFCPP Vaillant, Plug Power Holland (NL), Cogen Europe (BL), Institut Superior Technico (P), TEE, DLR, Sistemas de Calor (SP), Gasunie (NL), E.on Ruhrgas, E.on Energie, EWE	2001 bis 2005	31 Brennstoffzellen mit je 4,6 kW(el.) vom Typ Vaillant-Euro-2	Funkrundsteuerung, Vorgabe von Fahrplänen	Erprobung der Vernetzung von Brennstoffzel- len als virtuelles Kraftwerk; Notwendigkeit zur bidirektionalen Kommunikation
Dispower mehr als 30 europäische Partner	2002 bis 2006 Ersteinsatz 2005	1 Fotovoltaikanlage mit 30 kW(peak), 1 BHKW mit 40 kW(el.), 1 Batteriebank mit 100 kW für 1h	Steuereinheit und komponentenspezifische Interface-Einheiten	Reduktion der Spitzenlasten und der Leistungskosten, Simulationsprognose 35 %
PoMS ISE				
KonWerl Energiepark 2010 Steag-Saar-Energie, Siemens, Kreis Soest, Stadt Werl, TWS, GWS	seit 2002	1 Windenergieanlage mit 1,8 MW, 1 Fotovoltaikanlage mit 22 kW(peak), 1 Biomasse-BHKW mit 500 kW(el.), 1 Brennstoffzelle (geplant), 1 Batteriespeicher	DEMS (Siemens)	Ermittlung der kostenoptimierten Kurzfristeinsatzplanung für alle Erzeuger- und Verbrauchereinheiten in Verbindung mit der Möglichkeit von Regeleinrichtungen auf schaltbare Lasten
Edison EnBW, Stadtwerke Karlsruhe, EUS, ZSW, ISE, Alstom, Görlitz Computer- bau, Amtec, EVB, Uni Paderborn, Uni Karlsruhe, Exide, Siemens, Uni Magdeburg	1999 bis 2003	1 PEM-Brennstoffzelle mit 250 kW(el.), 2 BHKW, 2 Batteriecontainer, je 100 kW für 1h, 1 PEM-Brennstoffzelle mit 2 kW(el.), 1 Gleichstromkopplung mit 2 MVA	DEMS (Siemens) Kommunikation mittels PLC-Technologie	Clusterung von dezentralen Erzeugern, Speichern und Lasten kleiner Leistung zu regelbaren bzw. prognostizierten markt- und vertragsfähigen größeren Einheiten
PEM-Oberhausen EUS, Fraunhofer Umsicht, Alstom, MWV Energie, E.on Engineering, AEG SVS Power Supply Systems, Uni Dortmund	1999 bis 2003	1 PEM-Brennstoffzelle mit 210 kW(el.), 1 Mikrogasturbine mit 100 kW(el.), 1 Gasmotor mit 470 kW(el.), 1 Kältemaschine mit 60 kW(th.)	Autarke Controller, Netzwerk mit globalem Energiemanagement	Entwicklung von Erzeugungsfahrplänen und Belastungsoptimierung der Netzbetriebsmittel, Bereitstellung/Kompensation von Blindleistung, Bereitstellung von Sofortreserve und lokale Bereitstellung von Premium Power
VK Harz/Eichsfeld Harz Energie, IEE (TU Clausthal), Stadt Goslar, Orlovski	seit 2004	150 Mini-BHKW, Notstromaggregate, kleine Wasserkraftwerke mit insgesamt 5 bis 7 MW sowie abschaltbare Lasten	Funk, Telefon, Internet	Wirtschaftliche und technische Optimierung der Energieversorgung durch Vermeidung von Leistungsspitzen der Stromversorgung
PERN dena, EnergieRegion Nürnberg, Fraunhofer IIS, enwiko, Siemens, E.on Energie, RMD Consult, etz, VDI/VDE/IT	2005 bis 2006 ¹⁾	noch nicht definiert	noch nicht definiert	Optimierte Integration dezentraler und regenerativer Erzeuger in bestehende Versorgungsnetze
Virtuelles Regelkraftwerk Steag Saar Energie, 22 Anlagenbetreiber	seit 2003	Industrielle und kommunale KWK- oder Spitzenlastkraftwerke ab 1 MW(el.), insgesamt 400 MW(el.)	Internet	Teilnahme am Regelleistungsmarkt auch für Anbieter mit elektrischen Leistungen unter- halb von 30 MW ermöglichen

BHKW: Blockheizkraftwerk; EMS: Energiemanagementsysteme; PEM: Polymer-Elektrolyt-Membran; VK: Virtuelles Kraftwerk; ¹⁾ Machbarkeitsstudie mit anschließender Konzeptumsetzung

weitere, über die verbrauchsnahe Versorgung hinausgehende energiewirtschaftliche Aufgaben übernehmen zu können. Diese Aufgaben definieren das jeweilige Betriebskonzept des virtuellen Kraftwerks. Unter dem Schlagwort des virtuellen Kraftwerks sind in Deutschland in letzter Zeit zahlreiche Projekte realisiert bzw. begonnen worden. Beispiele für derartige Projekte sind in der **Tabelle 1** aufgeführt.

Die meisten Projekte werden von mehreren Partnern gemeinsam realisiert. In diesem Bereich engagieren sich große Energieversorgungsunternehmen, Stadtwerke, Anlagenhersteller, Systementwickler und Forschungsinstitute. Es werden in der Regel nur wenige Anlagen, vorrangig Mikro-KWK-, Fotovoltaik- und Windenergieanlagen, und teilweise elektrische Speicher (zum Beispiel Batterien) zusammengeschlossen. Zielvorgaben neben der Untersuchung des Anlagenverhaltens sind:

- die Erprobung der Anforderungen an die Kommunikation,

- die Optimierung der Integration von regenerativer Erzeugung in das Versorgungsnetz,
- die Belastungsoptimierung der Netzbetriebsmittel,
- die lokale Bereitstellung sogenannter Premium Power,
- die Vermeidung von Lastspitzen und
- die Verbesserung der Prognostizierbarkeit.

Die Auswertung bereits abgeschlossener und noch laufender Projekte zu virtuellen Kraftwerken in Deutschland zeigt, dass das Konzept noch nicht die Marktreife erlangt hat und weitere Forschung und Entwicklung notwendig ist. Einerseits liegt dies neben den eingesetzten Technologien, zum Beispiel der Brennstoffzelle (Prototypstatus), an den teilweise teuren Kommunikationslösungen. Andererseits sorgen die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dafür, dass eine Realisierung der Projekte nur mit Fördergeldern und in den meisten Fällen nur zeitlich begrenzt möglich ist. Die durch den Zusammenschluss gebündelten

Tabelle 1

Übersicht aktueller und bereits abgeschlossener Projekte zu virtuellen Kraftwerken.

elektrischen Leistungen erreichen außerdem meistens keine energiewirtschaftlich relevante Größe. Die Projekte sind auch nicht darauf ausgelegt, als Konkurrenz zu bestehenden Strukturen zu fungieren. Vielmehr sollen Erfahrungen im laufenden Betrieb über Anlagen und Energiemanagementsysteme gewonnen werden.

Eine Ausnahme bildet das virtuelle Regelleistungskraftwerk der Steag Saar Energie AG, Saarbrücken, das als funktionierendes Geschäftsmodell betrachtet werden muss. Die in diesem Verbund organisierten Erzeugungsanlagen mit elektrischen Leistungen von deutlich mehr als 1 MW entsprechen weniger der eingangs getroffenen Definition dezentraler Energieerzeugungsanlagen eines

Betriebskonzepte virtueller Kraftwerke

■ Primärenergieeinsparung

Mit Hilfe einer externen Regelung von KWK-Anlagen kann versucht werden, Primärenergie im Vergleich zum allein wärmegeführten Betrieb von KWK-Anlagen einzusparen. In einer diesbezüglichen FfE-Studie konnte gezeigt werden, dass sowohl das gebäudeoptimierte als auch das zentral gesteuerte virtuelle Brennstoffzellen-Kraftwerk trotz konservativ angesetzter Wirkungsgrade der Brennstoffzellenanlagen nahezu denselben Primärenergieverbrauch aufweist wie die Referenzvariante mit Brennwertechnik (Wärme) und GuD-Kraftwerk (Strom). In der Simulation ergeben sich jedoch nur marginale Unterschiede zwischen wärmegeführten Brennstoffzellenanlagen und den als virtuelles Kraftwerk betriebenen, identischen Brennstoffzellenanlagen [1].

■ Peak-Shaving

Das Peak-Shaving-Konzept sieht vor, die Erzeugung dezentraler Anlagen in Zeiten einer hohen elektrischen Gesamtlast zu erhöhen, um die durch konventionelle Kraftwerke zu deckende Last zu reduzieren. Das wirtschaftliche Potenzial dieses Konzepts wird durch die Strompreise und die disponible elektrische Leistung der dezentralen Erzeugungsanlagen zu diesen Zeitpunkten bestimmt. Durch einen Einsatz von Wärmespeichern kann die Erzeugungscharakteristik in gewissen Grenzen vom dezentralen Energiemanagementsystem verändert werden, indem die Wärmeerzeugung über den betrachteten Zeitraum verschoben wird. Nach dem Peak-Shaving-Konzept ist es daher interessant, die elektrische Leistung der KWK-Anlagen in Zeiten einer hohen elektrischen Gesamtlast und somit hoher Preise an der Strombörse zu erhöhen, um im Gegenzug die Leistung in Zeiten einer geringen elektrischen Last zu vermindern. Für die Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials ist die Verteilung der Spotmarktpreise über den Tag interessant. Im Jahr 2004 wurden im Mittel die höchsten Preise während der Mittags- und der frühen Abendstunden erzielt – mit lokalen Maxima in der Zeit von 11:00 bis 12:00 Uhr und von 18:00 bis 19:00 Uhr. Die mittleren Preise für die Stunde von 11:00 bis 12:00 Uhr waren im Mittel um das 2,5fache so hoch wie die Preise von 3:00 bis 4:00 Uhr.

■ Lastflussoptimierung

Ähnlich wie beim Peak-Shaving-Konzept zielt die externe Regelung beim Konzept der Lastflussoptimierung auf die Reduktion der Spitzenlast ab. Während sich das Peak-Shaving-Konzept nur indirekt an der elektrischen Gesamtlast in Form tageszeitabhängiger Strompreisschwankungen orientiert, ist beim Konzept der Lastflussoptimierung der Lastfluss in einem bestimmten Netzbereich die bestimmende Größe. Im Rahmen einer weiteren FfE-Studie wurde eine Siedlung mit 120 Gebäuden simuliert, in denen je eine KWK-Anlage (Brennstoffzelle) zum Einsatz kommt. Die Studie kam zum Ergebnis, dass der Einsatz der dezentralen Erzeugungssysteme zu einer Reduktion der Netzbelastung um etwa die Hälfte und zu einem Rückgang der extern gelieferten elektrischen Arbeit um etwa zwei Drittel führen kann. Dabei wurden eine 100 %-Verfügbarkeit und eine ausreichende Leistungsdynamik der Brennstoffzellen vorausgesetzt. Die Spannungshaltung im Netz wird durch die dezentrale Erzeugung

verbessert, da der Spannungsabfall auf den Leitungen verringert wird. Theoretisch wären somit größere Stromkreislängen oder geringere Kabelquerschnitte möglich, was in der Praxis aus Standardisierungsgründen nur zu geringen Kosteneinsparungen führen dürfte. Darüber hinaus müssten hierzu noch Betreibermodelle ausgearbeitet werden, um die Verteilung der möglichen Wertschöpfungspotenziale zwischen den Akteuren zu klären [2].

■ Alternative zum Kraftwerksneubau

Durch die technischen, ökonomischen und insbesondere die politischen Rahmenbedingungen ändern sich die Kriterien bei der Investitionsentscheidung im Kraftwerksmarkt grundsätzlich. Die Politik befürwortet explizit den Ausbau von KWK-Anlagen, wie die Ziele und die Bestimmungen des KWModG zeigen. Der Ausbau dezentraler KWK-Anlagen könnte somit einen Beitrag zur Deckung der Kapazitätslücke leisten, die sich aus dem Ersatz von veralteten Kraftwerken und den Kernenergieausstieg abzeichnet. Da mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen eine zeitnahe, kostenproportionale und am Bedarf orientierte Erweiterung des Kraftwerksparks möglich ist, könnten diese Anlagen auch für Energieversorgungsunternehmen interessant werden. Wenn im Mikro-KWK-Bereich installierte Leistungen von mehr als 500 MW erreicht werden sollten, die mit der Größe eines konventionellen Großkraftwerks vergleichbar sind, werden die Unternehmen daran interessiert sein, Mikro-KWK-Anlagen in die Kraftwerkeinsatzplanung zu integrieren und weitere Wertschöpfungspotenziale zu erschließen. Hierbei könnte das virtuelle Kraftwerk ein mögliches Konzept sein.

■ Virtuelles Regelleistungskraftwerk

Ein vielversprechendes Betriebskonzept könnte auch die Bereitstellung von Regelleistung durch dezentrale Erzeugungsanlagen sein. Die Erwartungen, die auf dieses Konzept gesetzt werden, beruhen einerseits auf der hohen Dynamik, mit denen eine Vielzahl von KWK-Anlagen auf eine mögliche Anforderung durch den Übertragungsnetzbetreiber, wegen des modularen Aufbaus und des möglichen guten Teillastverhaltens innovativer Technologien, wie der Brennstoffzelle, reagieren können. Andererseits scheinen die wirtschaftlichen Potenziale bei diesem Konzept besonders hoch zu sein, da sowohl Erlöse für die Leistungsvorhaltung, als auch für den Leistungsabruf erwirtschaftet werden. Im Rahmen der Forschungsinitiative „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“ werden an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft Einsatztauglichkeit und -potenziale kleiner KWK-Anlagen für den Betrieb als virtuelles Regelleistungskraftwerk untersucht [3]. Im Rahmen des zugehörigen Projektes KW21-E2 werden an einem Prüfstand des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München messtechnische Untersuchungen durchgeführt. Der Prüfstand bietet die Möglichkeit, die Anforderungen der Gebäude ebenso wie die Einsatzkriterien nach Vorgaben realitätsnah abzubilden. Die messtechnischen Analysen liefern die Basis für die Simulation eines virtuellen Regelleistungskraftwerks.

virtuellen Kraftwerks. Die KWK-Anlagen und Spitzenlastkraftwerke in der Industrie erfüllen zwar die Bedingung der verbrauchsnahe Erzeugung. Die im virtuellen Kraftwerk zusammengeschlossenen kommunalen Kraftwerke speisen in der Regel jedoch in Versorgungsnetze ein, die nicht mehr dem Anspruch einer verbrauchsnahe Verteilung genügen.

In einigen der Projekte wird auch der sogenannte netzgekoppelte Inselbetrieb untersucht. Hierbei wird das Zusammenspiel von mehreren dezentralen Energieerzeugungsanlagen mit Speicher im abgeschlossenen Netz optimiert. Die Unabhängigkeit vom allgemeinen Stromnetz ist allerdings nur dann gegeben, wenn die Spannungs- und Frequenzhaltung trotz eines Netzausfalls auf einer höheren Netzebene gewährleistet werden kann.

Darüber hinaus gibt es Anwendungen, bei denen eine zuverlässige Energieversorgung gefragt ist. Dazu gehören zum Beispiel Rechenzentren, Sendeanstalten, Banken, Versicherungen und ähnliche Objekte. Im Gegensatz zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV), bei der wartungsintensive Akkumulatoren die Anfahrlücke bis zum Hochlaufen eines Notstromdiesels schließen, liefern KWK-Anlagen permanent sogenannte Premium Power. Deren Bereitstellung wird teilweise als ein Ziel von virtuellen Kraftwerken angegeben. Weder der netzgekoppelte Inselbetrieb noch die Bereitstellung von Premium Power entsprechen den eingangs definierten Merkmalen eines virtuellen Kraftwerks. Aus ökologischer und energiewirtschaftlicher Sicht bieten virtuelle Kraftwerke Vorteile, wenn mit ihnen Primärenergie und CO₂-Emissionen im Vergleich zu einem Referenzsystem eingespart werden können. Zu den wichtigsten Zielen und Betriebskonzepten virtueller Kraftwerke gehören [1 bis 3]:

- Primärenergieeinsparung,
- Peak-Shaving,
- Lastflussoptimierung,
- Alternative zum Kraftwerksneubau,
- Bereitstellung von Regelleistung.

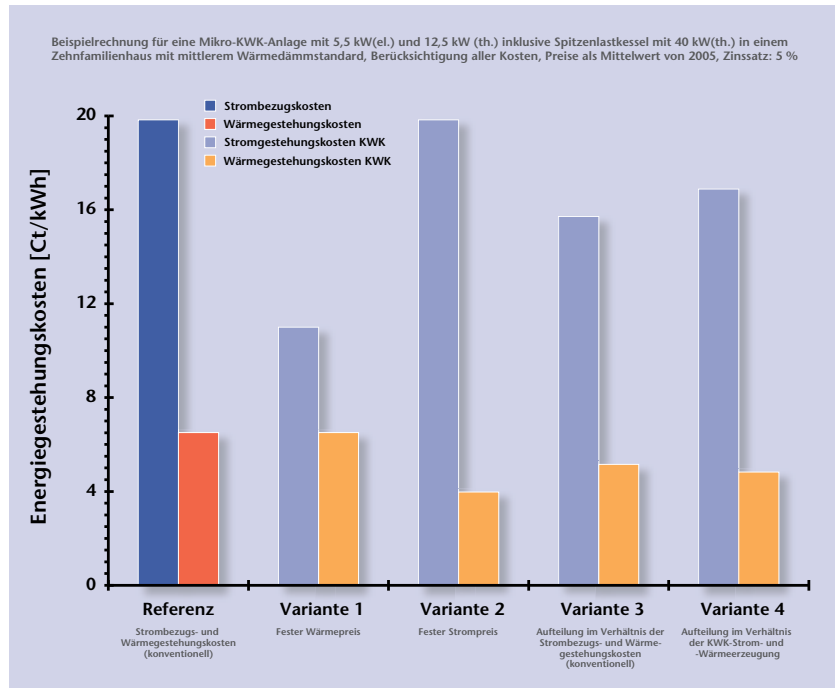


Bild 1
Energiegestehungskosten für KWK-Anlagen.

Wirtschaftliche Aspekte

Aus wirtschaftlicher Sicht müssen die Aufwendungen für das zentrale Energiemanagementsystem und die Kommunikation durch das Erschließen weiterer Wertschöpfungspotenziale, die über den Einzelanlagenbetrieb hinausgehen, mindestens ausgeglichen werden.

Bei KWK-Anwendungen gibt es keine eindeutige Methode, um die eingesetzte Energie und die Kosten auf die beiden Produkte Strom und Wärme aufzuteilen. Die unterschiedlichen Ansätze gemäß **Bild 1** ziehen entweder je eine Größe (Wärmegestehungs- bzw. Strombezugs-kosten) eines vergleichbaren konventionell versorgten Objektes heran und teilen die restlichen Kosten der anderen

Größe zu (Varianten 1 und 2). Alternativ werden die Gestehungskosten nach dem Verhältnis der konventionellen Wärmegestehungs- bzw. Strombezugs-kosten (Variante 3) beziehungsweise nach den erzeugten Energiemengen Strom und Wärme aufgeteilt (Variante 4).

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung der KWK ist die Definition der Nutzungsvariante des KWK-Stroms im Versorgungsobjekt von Bedeutung. Wie im Beispiel für die Hausenergieversorgung im Bild 1 dargestellt, liegen die Stromgestehungskosten von Mikro-KWK-Anlagen in der Regel zwischen der Einspeisevergütung von etwa 10 Ct/kWh(el.) und den Haushalts-Strombezugs-kosten von etwa 19 Ct/kWh(el.). Aus der Sicht eines KWK-Anlagenbetreibers im eigenen Versorgungsobjekt liegt das höhere wirtschaftliche Potenzial daher in der Vermeidung des externen Strombezugs. Aus der Sicht eines Energieversorgers, der einen Einfluss auf den Betrieb einer KWK-Anlage im gegebenenfalls fremden Versorgungsobjekt hat, stellt sich die

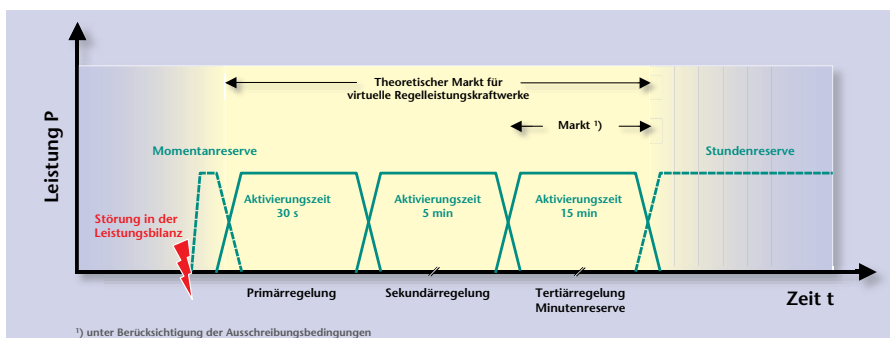


Bild 2
Einsatzreihenfolge für unterschiedliche Arten von Regelleistung.

Pro	Contra
<input type="checkbox"/> Das Konzept des virtuellen Kraftwerks erschließt weitere Wertschöpfungspotenziale für KWK-Anwendungen	<input type="checkbox"/> Virtuelle Kraftwerke befinden sich noch in der Erprobungsphase
<input type="checkbox"/> Virtuelle Kraftwerke aus KWK-Anlagen ermöglichen einen kostenproportionalen und zeitnahen Ausbau der Erzeugungskapazität	<input type="checkbox"/> Es besteht noch Forschungsbedarf mit Blick auf Anlageneinbindung, Kommunikation und Sicherheitsaspekte
<input type="checkbox"/> Bei deutlicher Erhöhung des KWK-Anteils an der Stromerzeugung kann Einfluss auf die Erzeugungscharakteristik genommen werden	<input type="checkbox"/> Es entstehen zusätzliche Kosten beim Betreiber für Information und Kommunikation sowie gegebenenfalls Wärmespeicher
	<input type="checkbox"/> Die disponible Leistung unterliegt je nach Einsatzfall tageszeitlichen bzw. saisonalen Schwankungen

Tabelle 2

Treiber und Hemmnisse eines virtuellen Kraftwerks.

Frage, ob die Stromgestehungskosten der KWK-Anlage zu seinen üblichen Strombezugskosten konkurrenzfähig sind. Dabei muss allerdings die vermiedene Netznutzung des KWK-Stroms berücksichtigt werden. Damit sind bei der KWK-Stromerzeugung zur Hausenergieversorgung die Erlöspotenziale durch die Strombezugskosten begrenzt. Im Konzept des virtuellen Kraftwerks können weitere Vermarktungspotenziale erschlossen werden.

Virtuelle Regelleistungskraftwerke

Im Rahmen eines FfE-Projekts wurden organisatorische Hemmnisse und wirtschaftliche Potenziale der Bereitstellung von Regelleistung unter heutigen Marktbedingungen untersucht. Der Anbieter von Regelleistung muss entscheiden, ob Primär-, Sekundär- oder Tertiär-Regelleistung (Minutenreserve) angeboten werden soll. Diese unterscheiden sich durch die im Transmission Code 2003 [4] definierten technischen Anforderungen. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Aktivierungszeit, die die Einsatzreihenfolge bestimmt (**Bild 2**). Darüber hinaus werden bei der Sekundär- und Tertiärregelung positive und negative Regelleistung getrennt ausgeschrieben. Aus der Sicht eines Kraftwerksbetreibers bedeutet der Abruf positiver Regelleistung eine Leistungserhöhung und der Abruf negativer Regelleistung entsprechend eine Leistungsverringerung. Der Regelleistungsanbieter ist verpflichtet, für einen Einsatz vorgesehene Anlagen zunächst zu präqualifizieren und mit dem Übertragungsnetzbetreiber einen Rahmenvertrag zu schließen. Die Mindestgebotmenge für Sekundär- und Tertiärregelung beträgt 30 MW. Dies ist eine Hürde, denn sollte diese Leistung beispielsweise vollständig durch Mikro-KWK-Anlagen zur Hausenergieversorgung gedeckt werden, müssten bei einer

angenommenen mittleren elektrischen Leistung von 5 kW mindestens 6 000 Anlagen zusammengeschlossen werden und alle Anlagen zur gleichen Zeit ihre Nennleistung erbringen können. Eine weitere Hürde ist die hohe Zeitverfügbarkeit der angebotenen Leistung, die bei der Sekundärregelung 95 % beträgt und bei der Primär- bzw. Tertiärregelung 100 %, das heißt, die Leistung muss konstant über den gesamten Angebotszeitraum verfügbar sein. Hieraus ergeben sich aufgrund der saisonalen Schwankungen im KWK-Betrieb vor allem Schwierigkeiten bei der Bereitstellung von Primär- und Sekundärregelleistung, die immer für sechs Monate vorzuhalten ist. Bei der Tertiärregelung können saisonale und tageszeitliche Schwankungen besser berücksichtigt werden, da die vorzuhaltende Leistung immer für den folgenden Tag ausgeschrieben wird.

Bei Vattenfall Europe kann getrennt auf jeweils Vier-Stunden-Blöcke geboten werden, während bei E.on nur zwischen einer Hoch- und Niedertarifphase unterschieden wird. Da die disponible Leistung bereits am Vortag zu quantifizieren ist, ergibt sich die Notwendigkeit einer besonders guten Prognose für die KWK-Fahrweise.

Die Auswertung der technischen und organisatorischen Anforderungen führt zu dem Ergebnis, dass für ein virtuelles Regelleistungskraftwerk vor allem der Minutenreservemarkt interessant ist.

Für den Fall eines erfolgreichen Regelleistungsgebots wird einerseits die Vorhaltung der Leistung (Leistungspreis) und andererseits, im Falle eines Regelleistungsabrufs, die geleistete Arbeit (Arbeitspreis) vergütet. Hierbei erhält jeder Regelleistungsanbieter die von ihm im Angebot festgelegten Preise.

Für eine wirtschaftliche Bewertung wurden mittlere Leistungspreise aller erfolgreichen Gebote im Zeitraum von Dezember 2004 bis November 2005 ausgewertet. Es ergibt sich ein mittlerer Leistungspreis für die positive Minutenreserve von 240 €/MW an Werktagen und von 37 €/MW an Wochenendtagen. Der mittlere Leistungspreis bezieht sich hierbei immer auf den gesamten Tag,

das heißt, im Mittel resultiert somit ein Wert von 1 Ct/kW für jede vorgehaltene Stunde an Werktagen. Dies ist im Vergleich zu den in Bild 1 dargestellten Stromgestehungskosten ein geringes zusätzliches Wertschöpfungspotenzial. Hierbei handelt es sich jedoch lediglich um die Vorhaltung von Leistung, durch die zunächst keine Kosten entstehen.

Weiterhin muss beachtet werden, dass teilweise deutlich höhere Preise von einzelnen Anbietern im Betrachtungszeitraum erzielt wurden, wie zum Beispiel mit Preisen von bis zu 23 ct/kW bei E.on oder sogar bis zu 150 Ct/kW pro vorgehaltener Stunde bei RWE. Kommt es zu einem Abruf elektrischer Arbeit, durch den dem Anlagenbetreiber Kosten entstehen, wird diese elektrische Arbeit mit dem Arbeitspreis vergütet. Dieser lag beispielsweise bei E.on in der Regel zwischen 12 und 280 Ct/kWh.

In Deutschland wird Minutenreserve jedoch nur sehr selten benötigt: Im Zeitraum von September bis Dezember 2005 wurde zum Beispiel im E.on-Netzgebiet in lediglich 109 von 11 716 Viertelstunden Minutenreserve abgerufen.

Der Arbeitspreis für negative Tertiärregelleistung beträgt normalerweise 0 Ct/kWh. Dies bedeutet, dass der im Falle eines Abrufs notwendige zusätzliche Strombezug aus dem Netz der allgemeinen Versorgung kostenlos erfolgt. Die mittleren Leistungspreise für die negative Minutenreserve lagen im obigen Auswertungszeitraum an Werktagen bei 47 €/MW und am Wochenendtagen bei 96 €/MW.

Im Falle eines virtuellen Regelleistungskraftwerks sind die vermarktbarsten Leistungen entscheidend. Wird zum Beispiel positive Regelleistung angeboten, was aus preislicher Sicht besonders attraktiv ist, dürfen die Anlagen in der Zeit, in der keine Regelleistung abgerufen wird, nur mit verminderter Leistung betrieben werden. Hierdurch verringern sich die Ausnutzungsdauer und Primärenergieeinsparungen gegenüber einer ungekoppelten Erzeugung, da der Wärmebedarf zu diesen Zeiten über den Spitzenlastkessel gedeckt werden muss. Die Quantifizierung der ökonomisch

und technisch sinnvollen disponiblen Regelleistung aus Mikro-KWK-Anlagen ist eine der wesentlichen Ziele des KW21-E2-Projekts [5].

KWK-Potenziale

Einschlägige Studien zur Energieversorgung der Zukunft gehen davon aus, dass der Anteil der dezentralen KWK-Stromerzeugung von den heute etwa 57 bis 62 TWh(el.)/a weiter ansteigen wird [6 bis 8]. Das für das Jahr 2050 ausgewiesene KWK-Potenzial reicht von etwa 116 bis 276 TWh(el.)/a [9]. Schon heute kann der KWK-Einsatz primärenergetisch betrachtet mit dem heutigen Stand der konventionellen Energieerzeugungstechnik konkurrieren, obwohl zumeist kleinere Leistungseinheiten zum Einsatz kommen [1]. Welches prognostizierte KWK-Potenzial tatsächlich erschlossen wird, hängt von den politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. In virtuellen Kraftwerken wird jedoch nur eine Teilmenge der dezentralen Erzeugungsstrukturen zusammengeschlossen sein. Aus wirtschaftlicher Sicht bieten Betriebskonzepte wie das Peak-Shaving, die Lastflussoptimierung oder die Bereitstellung von Regelleistung und -energie interessante Optionen. Die Möglichkeit einer zentralen Optimierung und Steuerbarkeit kann aus sicherheitsrelevanten Aspekten und der Aufrechterhaltung einer hohen Versorgungsqualität eine

technische Lösung sein. Insbesondere bei einer deutlichen Zunahme dezentraler Stromerzeugung könnte dies sogar technisch notwendig werden.

Es stellt sich die Frage, ob eine Vielzahl dezentraler Erzeugungsanlagen, betrieben nur nach internen Regelstrategien, ohne Einfluss der Bilanzkreisverantwortlichen in das Stromnetz einspeisen sollte. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommt auch die aktuelle VDE-Studie „Versorgungsqualität im deutschen Stromversorgungssystem“ [10], in der durch die zunehmende dezentrale Erzeugung bis 2020 die Notwendigkeit von virtuellen Kraftwerken vorhergesagt wird.

Fazit

Der Begriff des virtuellen Kraftwerks wird derzeit als Oberbegriff für Forschungsprojekte genutzt, die sich dem Betrieb von dezentralen Energieerzeugungsanlagen widmen. In Hinblick auf die Anlageneinbindung, die Anlagenkommunikation sowie Aspekte der Versorgungssicherheit und -qualität besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Wenn einfache, kostengünstige und effiziente Kommunikations- und Energiemanagementsysteme zur Verfügung stehen, können dezentrale Erzeugungsanlagen genutzt werden, um weitere, über die verbrauchsnahe Versorgung hinausgehende, energiewirtschaftliche Aufgaben zu übernehmen.

Literatur

- [1] Arndt, U.; Köhler, D.; Kramer, Th.; Mühlbacher, H.: *Das virtuelle Brennstoffzellen-Kraftwerk, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft – Teil 3*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, März 2004.
- [2] Arndt, U.; Duschl, A.; Köhler, D.; Schwaegerl, P.: *Energiewirtschaftliche Bewertung dezentraler KWK-Systeme für die Hausenergieversorgung, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft – Teil 5*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, Juli 2004.
- [3] Wagner, U.; Roth, H.; Richter, S.; von Roon, S.: *Perspektiven in der Kraftwerkstechnik*. Projekt KW 21. BWK Bd. 57 (2005) Nr. 10, S. 48-51.
- [4] Verband der Netzbetreiber (VDN): *TransmissionCode 2003. Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber*. Berlin, 2003.
- [5] Arndt, U.; von Roon, S.: *Innovative KWK-Systeme. Ersatz für Heizungen und Kraftwerke? Vortrag anlässlich des 37. Kraftwerkstechnischen Kolloquiums*, 18. bis 19. Oktober 2005, Dresden.
- [6] www.bkww.de
- [7] *Wärme- und Heizkraftwirtschaft in Deutschland: Arbeitsbericht 2004 der AGFW*. www.agfw.de/577.0.html
- [8] Blesl, M.; Fahl, U.; Voß, A.: *Wirksamkeit des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes*. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Bd. 56 (2006), Nr. 4, S. 18-24.
- [9] *Enquête-Kommission des Bundestags: Nachhaltige Energieversorgung, Bundestags-Drucksache 14/9400*, Ziffer 870, 2002. <http://dip.bundestag.de/btd/14/094/1409400.pdf>
- [10] *ETG-Task-Force Versorgungsqualität: Versorgungsqualität im deutschen Stromversorgungssystem*. *Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.)*, 2006.