

Systemdienstleistungen für den Strommarkt

## Flexibilität von KWK-Anlagen

Das deutsche Stromversorgungssystem zeichnet sich durch eine sehr hohe Versorgungssicherheit und -zuverlässigkeit aus. Damit auch in Zukunft die Integration erneuerbarer Energien voranschreiten kann, ohne das bewährte Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit zu verringern, bedarf es steuerbarer Flexibilität auf dem Strommarkt bei höchstmöglicher Effizienz. Die Kraft-Wärme-Kopplung wird oft als inflexibel und nicht zukunftsfähig dargestellt. Im Folgenden wird gezeigt, wie die Kraft-Wärme-Kopplung heute bereits zur Integration erneuerbarer Energien beiträgt, flexibel am Strommarkt teilnimmt und zusätzlich Systemdienstleistungen für den Strommarkt erbringt, während sie dabei eine sichere Wärmeversorgung von Ballungsgebieten durch Wärmenetze gewährleistet.

**K**raftwerksflexibilität gewinnt im heutigen und vor allem im zukünftigen Energiemarkt mehr und mehr an Bedeutung. Der stetig zunehmende Ausbau volatil einspeisender Erzeugungsanlagen

auf Basis erneuerbarer Energien (Photovoltaik- und Windenergieanlagen, im Folgenden kurz EE-Anlagen genannt) und der damit steigende Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommarkt stellen das bisherige Management von Stromerzeugungs- und Stromtransportkapazitäten vor große Herausforderungen.

Während im früheren Stromsystem Erzeugungskapazitäten rein nach dem Strombedarf geregelt wurden, werden im heutigen und verstärkt im zukünftigen Strommarkt steuerbare Erzeugungskapazitäten abhängig von der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien betrieben. Je höher die installierte Leistung aller EE-Anlagen in Deutschland ist, umso höher werden die Anforderungen an die Flexibilität (auch kurzfristig und ungeplant) von steuerbaren Erzeugungsanlagen im Hinblick auf An- und Abfahrtrampen, Mindestbetriebszeiten, Start-Stopp-Fähigkeit oder auch Lastbereiche und Teillastwirkungsgrade. Einen zusätzlichen Aspekt der Flexibilität stellt die Brennstoffvariabilität (sowohl fossile als auch erneuerbare Energieträger) des vorhandenen Erzeugungsparks dar. Dieser Faktor ist für die Versorgungssicherheit von besonderer Wichtigkeit, z. B. im Fall einer gestörten Erdgasversorgung. Die Brennstoffvariabilität hängt dabei stark von der eingesetzten Erzeugungstechnik ab, inwiefern auf

alternative Brennstoffe umgeschaltet werden kann.

Die beschriebene Betrachtungsweise stellt aber nur eine Seite der Energiewende-Medaille dar. Bisher wurde unter der Energiewende vor allem die Stromwende verstanden und die Anstrengungen auf eine nachhaltige und durch erneuerbare Energien geprägte Erzeugung von Strom fokussiert. Inzwischen gewinnt aber auch der Begriff Wärmewende immer mehr an Bedeutung und beschreibt eine Transformation der Wärmebereitstellung in Richtung nachhaltiger und durch erneuerbare Energien geprägter Erzeugung. In diesem Zuge wird immer öfter die Sektorkopplung als Heilsbringer für beide Teilmärkte (Strom- und Wärmewende) herangezogen.

Eine Technologie, die von Natur aus die Sektoren Strom und Wärme koppelt ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Dabei vereint sie hoch-effiziente und lastnahe Strom- und Wärmezeugung und sichert damit eine zukunftsfähige Bereitstellung von Strom und vor allem Wärme in Ballungszentren. Als Teil eines Fernwärmesystems ermöglicht eine KWK-Anlage die Wärmebereitstellung für eine Vielzahl von Kunden mit sehr geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen und eine zeitgleiche Stromerzeugung, die auf höhere Stromnetzebenen entlastend wirkt und damit die Integration erneuerbarer Energien fördert.

Neu errichtete Kraftwerke ohne KWK erreichen elektrische Nettowirkungsgrade bis 46 % (Steinkohle) bzw. 60 % (Gas und Dampf – GuD). Die bei der Energieumwandlung entstehende Wärme wird dabei ungenutzt an die Umwelt abgegeben. KWK-Anlagen dagegen wandeln bis zu 90 % der eingesetzten Primärenergie in Nutzenergie (Strom und Wärme) um und tragen deshalb erheblich zur Ressourcenschonung bei. Bei der Nutzung des gleichen Brennstoffs verbrauchen KWK-Anlagen bis zu 25 % weniger Primärenergie als Anlagen, die ungekoppelt Strom und Wärme erzeugen.

Im Zusammenhang mit der Stromwende werden KWK-Anlagen vermehrt als inflexibel angesehen (häufig werden sie als »Must-run-Anlagen« bezeichnet), die den weiteren Umbau des Stromsystems



Dr. **Claus Hartmann**, Abteilungsleiter Energiemanagement Netznutzungsmanagement (MN), Stadtwerke Flensburg GmbH, und Vorsitzender des AGFW-Expertenkreises »Heizkraftwerke > 20 MW«, **Artur Scheiermann**, Heizkraftwerkseinsatzvorplaner, Stadtwerke Flensburg GmbH, Dr. **Jens Kühne**, Referent Wärme-erzeugung/KWK, AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt am Main

behindern. Die Realität stellt sich jedoch anders dar: KWK-Anlagen in Wärmenetzen sind der Grundbaustein der effizienten und nachhaltigen Wärmeversorgung der Ballungsgebiete, der zusätzlich flexibel regelbare Stromerzeugungskapazität für das Stromsystem bietet.

Der Ausbau von flexiblen KWK-Anlagen ist vor allem auch ein kosteneffektiver Baustein der Energiewende. Beispielsweise werden durch neue gesetzliche Regelungen (»Nutzen statt Abregeln« gemäß § 13 Abs. 6a EnWG) Einspeisemanagementmaßnahmen von EE-Anlagen vermieden, indem KWK-Anlagen adaptiv heruntergeregelt werden und gleichzeitig der sonst abgeregelte EE-Strom sektorenkoppelnd zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Dieser flexible Einsatz der KWK-Anlage ermöglicht die Reduzierung von Entschädigungszahlungen im Rahmen von Einspeisemanagementmaßnahmen. Das heißt ebenfalls, dass die flexible KWK als Technolo-

gie für die Überbrückung des noch ausstehenden Netzausbaus zur Verfügung steht und so einen weiteren wichtigen volkswirtschaftlichen Vorteil für die Energiewende leistet.

Im Folgenden wird Aufschluss über die heute schon verfügbare Flexibilität von KWK-Anlagen gegeben und gezeigt, welche Systemdienstleistungen ebenfalls schon durch die KWK abgedeckt werden.

### KWK-Systeme: Flexibel auf Strom- und Wärmemarkt

KWK-Anlagen sind meist nur eine Komponente eines mit mehreren verschiedenen Erzeugern ausgestatteten Wärmeerzeugerparks eines Fernwärmesystems. Aus Gründen der wärmeseitigen Versorgungssicherheit ist die Summe der thermischen Leistung aller Erzeugungsanlagen größer als die thermische Netzhöchstlast. Dies bedeutet, dass die KWK-Anlage in der Regel keine Must-Run-Anlage ist, sondern

sehr flexibel auf dem Strommarkt eingesetzt werden kann, ohne die Versorgungssicherheit der Wärmeversorgung zu gefährden. Die unterschiedlichen Erzeugungsanlagen, z. B. gasbefeuerte KWK-GuD-Anlage oder gasbefeuerte Kesselanlage, haben unterschiedliche Betriebscharakteristika, die die Einsatzzeiten bestimmen. Zu den Einflussgrößen, die die Kraftwerkseinsatzplanung bestimmen, gehören u. a. der Stompreisverlauf, der Fernwärmebedarf, die Brennstoffkosten, der Primärenergiefaktor der Wärme, aber auch Förderzuschläge, z. B. KWK-Zuschlag. Diese verschiedenen Aspekte dienen als Input für komplexe Algorithmen, aus denen optimierte Kraftwerksfahrpläne berechnet werden.

Neben den klassischen Erzeugungsanlagen wie KWK-Anlage und gasbefeuertem Kessel werden vermehrt Flexibilitätsoptionen aufgebaut, um zusätzliche Variabilität in das KWK-Fernwärmesystem zu in-

Anzeige

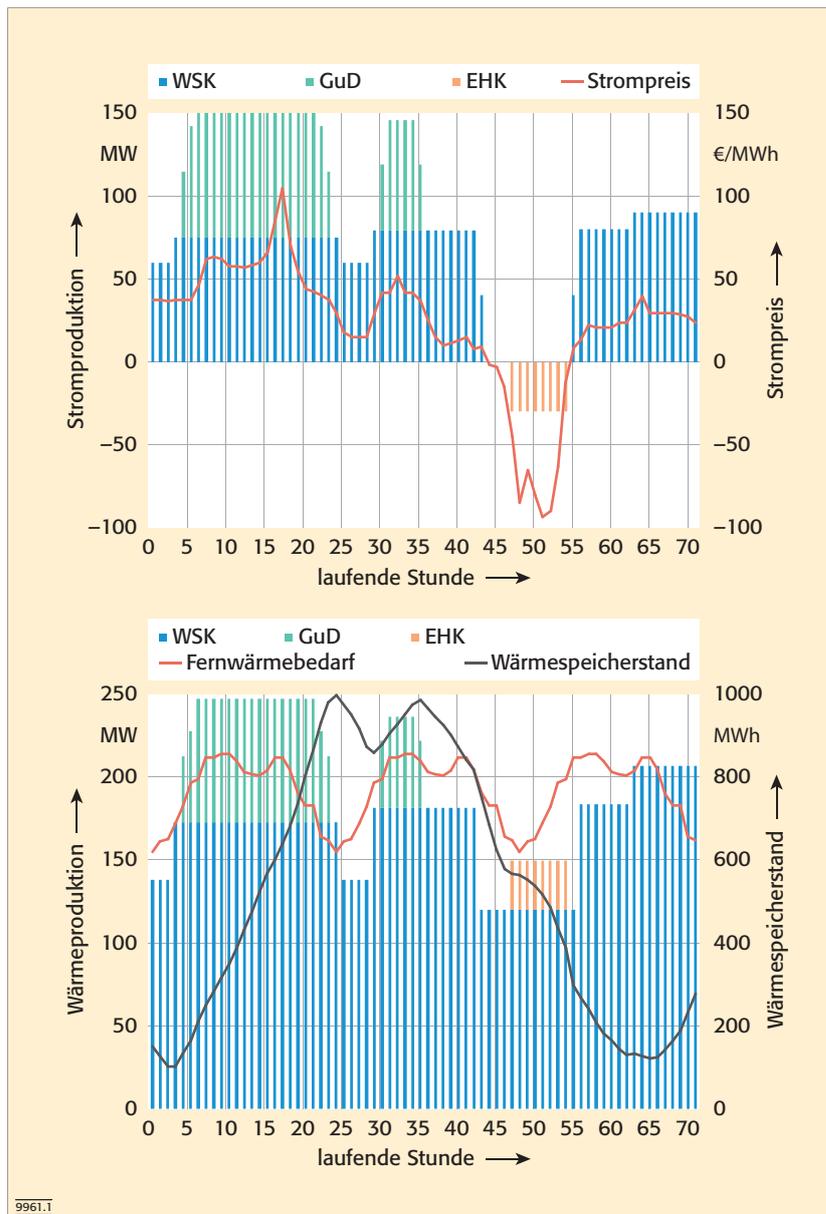
## EURO Heat & Power E-Magazin-Kiosk

- Vollzugriff für Abonnenten
- Archiv mit Recherchefunktion
- Am PC oder in der App



EuroHeat&Power App verfügbar für   

[www.ehp-magazin.de/e-magazin](http://www.ehp-magazin.de/e-magazin)



**Bild 1. Strom- und Wärmeproduktion eines multivalenten KWK-Systems abhängig vom Strompreis**  
 WSK Wirbelschichtkessel  
 GuD Gas- und Dampfanlage  
 EHK Elektrodenheizkessel

tegrieren. Zu diesen Optionen werden Wärmespeicher und elektrische Wärmeerzeuger, z. B. Elektrokessel oder Wärmepumpen, gezählt. Der Wärmespeicher dient grundsätzlich der zeitlichen Entkopplung von Wärmebedarf und -erzeugung, wodurch eine KWK-Anlage flexibler auf dem Strommarkt eingesetzt werden kann. Dies ermöglicht, den Betrieb von KWK-Anlagen gezielt am Strommarkt zu orientieren und unterstützt somit die Integration des Stroms aus erneuerbaren Energien. Ein elektrischer Wärmeerzeuger kann unter verschiedenen Ge-

sichtspunkten eingesetzt werden. Aus Sicht der Wärmeerzeugung kann ein elektrischer Wärmeerzeuger bei niedrigen oder negativen Strompreisen eingesetzt werden, wenn die Wärmegestehungskosten der KWK-Anlagen steigen. Die häufigste Einsatzweise der elektrischen Wärmeerzeuger stellt derzeit aber die Bereitstellung von negativer Regelernergie dar, da diese Anlagen sehr steile An- und Abfahrrampen realisieren können. Zukünftig werden elektrische Wärmeerzeuger im Verbund mit KWK-Anlagen weitere Systemdienstleistungen für die

Sicherheit und Zuverlässigkeit des Stromversorgungssystems übernehmen. So kann beispielsweise die stromseitige Einspeiseleistung der KWK-Anlage reduziert werden, während der elektrische Wärmeerzeuger die Wärmeversorgung gewährleistet. Aufgrund der Kombination beider Anlagen – KWK-Anlage und elektrischer Wärmeerzeuger – wird im Stromnetz ein höherer Effekt zur Stromnetzlastung realisiert (Doppelhub) als bei klassischen Redispatch- oder Einspeisemanagementmaßnahmen.

Ein diversifizierter Erzeugungspark aus unterschiedlichen Technologien (Müllverbrennungsanlage, Elektrodenkessel, Großwärmepumpe, Biomassekessel oder KWK-Anlage, Solarthermie, industrielle Abwärme) stellt ebenfalls die oben genannte Brennstoffflexibilität sicher. So ist es möglich, das Fernwärmesystem mit etwaiger Stromerzeugung in KWK auch bei Brennstoffengpässen weiterhin effizient und sicher zu betreiben. Dieser Aspekt muss vor allem im Zuge des Atomausstiegs und eines diskutierten Kohleausstiegs analysiert und bewertet werden.

Wie ein Zusammenspiel verschiedener Erzeugungsanlagen in Realität aussehen kann, ist in *Bild 1* dargestellt. *Bild 1* zeigt im oberen Teil die preisorientierte Stromproduktion für drei Tage in Abhängigkeit eines fiktiven Strompreisverlaufs. Die Darstellung spiegelt den Erzeugungspark der Stadtwerke Flensburg GmbH wider. Zu den Anlagen zählen drei Wirbelschichtkessel (WSK) auf Steinkohlebasis (zur Vereinfachung zusammengefasst), eine GuD-KWK-Anlage, ein elektrischer Wärmeerzeuger (EHK) und ein Wärmespeicher. Im unteren Teil von *Bild 1* wird die korrespondierende Wärmeerzeugung mit dem Wärmebedarf und Füllstand des Wärmespeichers gezeigt. Der Erdgaskessel (K5) stellt dabei die Reserveeinheit für die Fernwärmeversorgung dar.

Es ist sehr gut zu erkennen, wie die verschiedenen Erzeugungsanlagen eingesetzt werden, je nach aktuellem Strompreis. Das Steinkohle-Heizkraftwerk hat die niedrigsten Wärmegestehungskosten bei mäßigen Strompreisen und liefert somit die Grundlast der Wärme und die dazugehörige Strommenge an die

Börse. Übersteigt der Strompreis eine gewisse Grenze, so wird die GuD-Anlage gestartet, wodurch mehr Stromabsatz erzielt wird. Die Wärme, die nun insgesamt oberhalb des Wärmebedarfs des Fernwärmenetzes liegt, wird gespeichert und bei Unterdeckung des Wärmebedarfs aus dem Wärmespeicher entladen.

Fällt der Strompreis in negative Werte, so werden die KWK-Anlagen heruntergefahren und der elektrische Wärmeerzeuger wird hochgefahren. Da dieser nur eine geringe Leistung gegenüber den KWK-Anlagen hat, muss zusätzlich benötigte Wärme aus dem Wärmespeicher entladen werden. Erst sehr negative Strompreise lassen eine elektrische Wärmeerzeugung wirtschaftlich erscheinen, da die Wärmegestehungskosten eines elektrischen Wärmeerzeugers etwa den Strompreisen zuzüglich aller Umlagen, Steuern und Entgelten entsprechen.

Bild 1 verdeutlicht, dass eine KWK-Anlage sehr wohl strompreisorientiert eingesetzt wird, um energiewirtschaftlich optimierte Ergebnisse zu erhalten. Jedoch sind auch weitere Aspekte zu beachten, um der optimierten gleichzeitigen Vermarktung auf zwei Märkten (Strom und Wärme) gerecht zu werden. KWK-Anlagen haben auf beiden Märkten ihre Rechtfertigung und spielen ihre Vorteile gerade durch die Kopplung beider Märkte aus.

### Flexible Einsatzbereiche von KWK-Anlagen

KWK-Anlagen sind nicht nur im Verbund mit anderen Anlagen variabel einsetzbar, sondern zeichnen sich auch durch flexible Einsatzbereiche aus. So sind bei vielen Anlagen variable Verhältnisse von Wärme- zu Stromerzeugung möglich, wodurch solche Anlagen auch ohne den Verbund mit anderen Erzeugern auf den Strommarkt oder sonstige Einflüsse reagieren können.

Zur Veranschaulichung zeigt Bild 2 den Leistungsbereich der GuD-Anlage der Stadtwerke Flensburg. Dargestellt ist das Kennfeld der Anlage aufgespannt durch die thermische Leistung auf der X-Achse und der elektrischen Leistung auf der Y-Achse. Das grün gefärbte Innere der Fläche, die durch die sieben Punkte begrenzt ist, zeigt den tech-

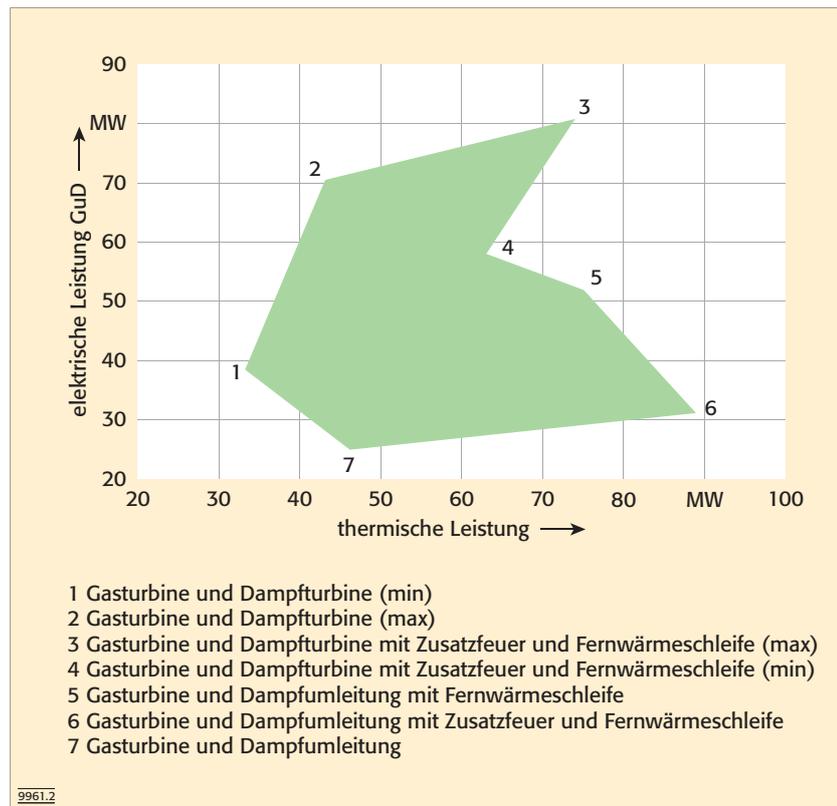


Bild 2. Leistungsbereich der Gegendruck-Gas- und Dampfturbinenanlage der Stadtwerke Flensburg

nisch möglichen Leistungsbereich der GuD-Anlage.

Die Anlage hat verschiedene Optionen, um ihre Leistung sowohl thermisch als auch elektrisch zu variieren. Die Möglichkeiten sind unterhalb von Bild 2 aufgeführt. Die Kennlinie zwischen Punkt 1 und Punkt 2 beschreibt dabei die gängige Fahrweise der GuD-Anlage zwischen Minimal- und Maximalleistung. In Zeiten, in denen erhöhte Fernwär-

meleistung benötigt wird, kann eine Zusatzfeuerung eingeschaltet werden und eine zusätzliche Fernwärmeschleife im Abhitzeessel der Gasturbine freigegeben werden (Punkt 3). Durch diese Maßnahmen wird im Maximalbetrieb die höchste elektrische Leistung erwirkt. Ist jedoch in Zeiten niedriger Strompreise und hohen Fernwärmebedarfs eine niedrige elektrische Leistung bei hoher thermischer Leistung gefordert,

Anzeige

## Anlagentechnik 2017

Rolf Rüdiger Cichowski (Hrsg.)  
 1. Auflage 2017, 11,2 x 16,5 cm, 324 Seiten,  
 vierfarbig, kartoniert, **35,80 €**  
**Kombi-Preis: Buch und E-Book 44,75 €**  
 ISBN 978-3-8022-1154-6,  
 Bestell-Nr. 310517\_310567

Weitere Informationen erhalten Sie unter  
[www.energie-fachmedien.de](http://www.energie-fachmedien.de)

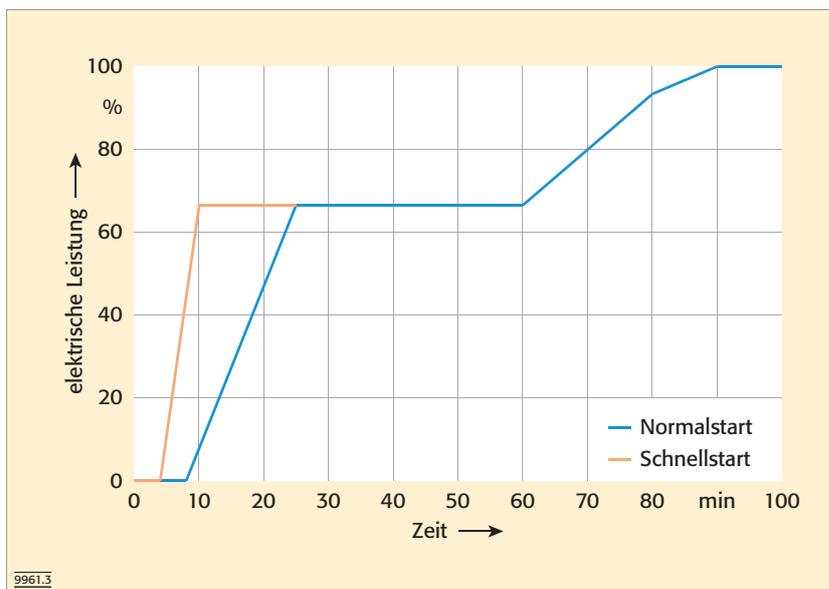


Bild 3. Startfähigkeit der Gas- und Dampfturbinenanlage der Stadtwerke Flensburg

so können die Punkte 6 und 7 angefahren werden. In dieser Einstellung wird die Gegendruck-Dampfturbine nicht mit Dampf durchströmt, so dass hier kein Strom, sondern mehr Wärme erzeugt wird.

Es wird ersichtlich, dass auch eine einzelne Anlage durch Einstellungen der Komponenten bereits flexibel auf fluktuierende Strompreise und variablen Wärmebedarf reagieren kann und weit entfernt von einem starren inflexiblen Betrieb ist.

Ein weiterer Aspekt, der in der Diskussion um Flexibilität häufiger auftritt, ist die Fähigkeit zum schnellen An- oder Abfahren von Anlagen. In Bild 3 ist dargestellt, wie schnell die GuD-Anlage der Stadtwerke Flensburg hochgefahren werden kann. Dabei kann zwischen Normal- und Schnellstart unterschieden werden. Es ist zu erkennen, dass bei einem Normalstart der Anlage 25 min benötigt werden, um rd. 70 % der elektrischen Leistung zu erreichen. Beim Schnellstart kann diese Zeit auf 10 min verkürzt werden. Dies sind insofern sehr attraktive Werte, um im Intradaymarkt tätig zu werden und ggf. kurzfristig auf den Strombedarf zu reagieren.

### Wert der Flexibilität und weiterer Systemdienstleistungen

Ein weiterer Beweis für die Flexibilität von KWK-Anlagen ist die Marktteilnahme für und Bereitstellung von

Regelenergie in allen drei Produkten Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve. Dabei werden je nach Produkt unterschiedliche technische Anforderungen an die Flexibilität der Anlagen gestellt, die in einer Präqualifikationsfahrt nachgewiesen werden müssen. Die erzielbaren Erlöse aus dem Regelenergiemarkt haben jedoch in den vergangenen Jahren abgenommen, da ein nahezu unverändertes Marktvolumen auf immer mehr Teilnehmer aufgeteilt wird. Dies führt zu einem Preiswettbewerb und somit einem Verfall der Erlöse.

Eine zweite Möglichkeit zur erfolgreichen Vermarktung von Kraftwerksflexibilität stellt der Intradaymarkt dar. Hier können kurzfristig Strommengen angeboten und verkauft werden bis kurz vor der physischen Lieferung. Dabei spielen vor allem untertägige Prognoseabweichungen der erneuerbaren Energien eine große Rolle in der Festlegung der Strompreise. Je nach Prognosegüte können die Strompreise auch deutlich oberhalb des für den Tag geltenden Day-ahead-Strommarkts liegen. Auch diese Erlösmöglichkeit wird von einigen KWK-Anlagenbetreibern verfolgt, die ihre Anlagen dort vermarkten – die nötige Flexibilität vorausgesetzt.

Eine zusätzliche Systemdienstleistung, die derzeit nicht ausreichend gewürdigt und vergütet wird, ist die Versorgungssicherheit auf Strom-

und Wärmeseite. Dabei steht vor allem die Schwarzstartfähigkeit der KWK-Anlagen im Vordergrund, die ebenfalls eine Art von Flexibilität darstellt. Es handelt sich dabei um die Fähigkeit, im Schwarzfall (Black-out) ein Kraftwerk selbstständig in Betrieb zu nehmen und im autonomen Inselbetrieb das Versorgungsgebiet mit Strom und Wärme zu bedienen. Die Schwarzstartfähigkeit erfordert neben der technischen Voraussetzung der Anlage ebenfalls ausführliche organisatorische Voraussetzungen zur richtigen Umsetzung im Schwarzfall. Die Vorhaltung der Schwarzstartfähigkeit und die Möglichkeit zur Inselversorgung werden derzeit nicht vergütet oder berücksichtigt. Eine monetäre Würdigung zur Unterhaltung der technischen und organisatorischen Voraussetzungen wird hiermit gefordert.

### Fazit

KWK-Anlagen werden heute schon im ausführlichen Rahmen flexibel betrieben und nehmen an den Märkten teil, in denen Flexibilität entlohnt wird. Die Erlösmöglichkeiten auf diesen Märkten sind aufgrund mittlerweile vieler Anbieter jedoch limitiert und bieten keinen ausreichenden Anreiz zur weiteren Flexibilisierung.

Das Praxisbeispiel zeigt, dass KWK-Anlagen bereits heute technisch flexibel – in allen Aspekten – betrieben werden und im Verbund mit anderen Wärmeerzeugungstechnologien weitere Anpassungsmöglichkeiten bieten, um sowohl das Stromversorgungssystem zu stabilisieren und zu sichern, als auch um eine kosteneffektive, sichere und nachhaltige Wärmeversorgung von Ballungsgebieten zu gewährleisten. ■

j.kuehne@agfw.de  
 claus.hartmann@stadtwerke-flensburg.de  
 www.agfw.de