

# Rückwirkungen der KWK-Erzeugung auf den Kraftwerkspark - Arbeits- und Leistungsbetrachtung

Dipl. Wi.-Ing. Serafin von Roon, Dipl.-Ing. Michael Beer  
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München

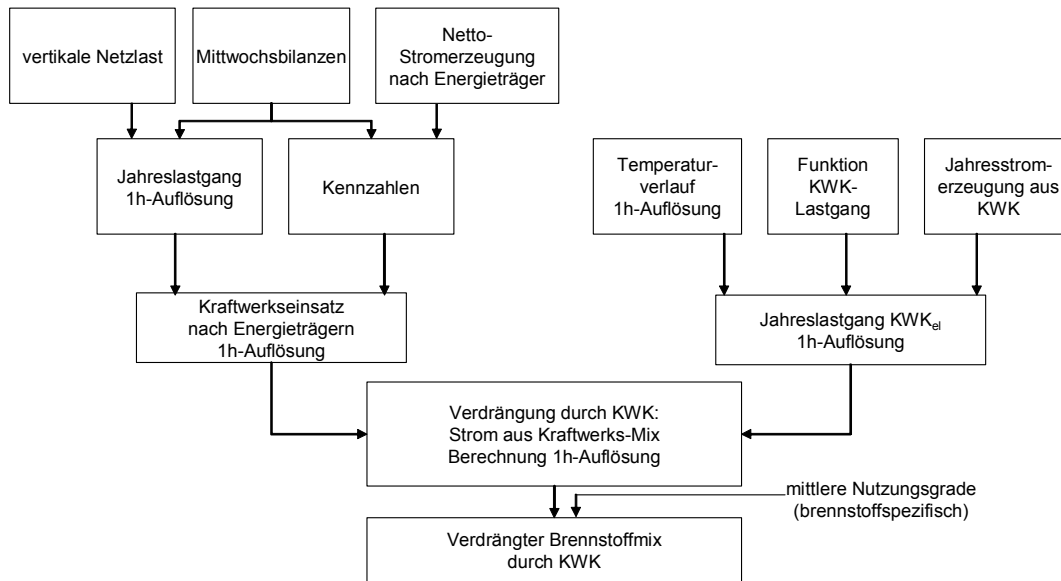
- Dieser Beitrag ist in der EuroHeat&Power Heft 5, 2008 erschienen -

Die Bereitstellung von Strom und Wärme mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) weist im Vergleich zur getrennten Erzeugung einen hohen Nutzungsgrad auf. Ein Ersatz ungekoppelter Erzeugung durch KWK kann somit zur Ressourcenschonung und zu verminderten CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen.

Neben den Effizienzvorteilen stellt sich die Frage, welche Rückwirkungen die KWK-Erzeugung auf den Kraftwerkspark hat. Eine aussagekräftige Analyse ist nur auf Basis von Lastgängen mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung möglich. Ziel der Untersuchung war es somit, den elektrischen Gesamtlastgang und den KWK-Lastgang zu modellieren. Die Untersuchung wurde auf der Datenbasis für das Jahr 2005 vorgenommen. Die Ausführungen sind zweigeteilt. Im ersten Teil in der Euro Heat & Power Heft 4, 2008 wurde auf die statistische Datenbasis sowie der Methodik zur Modellierung des Gesamtlastgangs und des KWK-Erzeugungsganges eingegangen. Im vorliegenden zweiten Teil wird sowohl eine Arbeits- auch Leistungsbetrachtung durchgeführt. Hierdurch sind energiewirtschaftliche Aussagen über die Verdrängung konventioneller Erzeugung durch KWK-Erzeugung möglich.

## Arbeitsbetrachtung

Der Vergleich mit der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung ist geeignet, um den Prozess der KWK zu bewerten. Die Schwierigkeit dieser Methodik besteht jedoch darin, dass einer KWK-Erzeugung, deren Anlagenart, Nutzungsgrade und Brennstoffart bekannt sind, ein hypothetisches System ungekoppelter Erzeugung gegenübergestellt wird. Für dieses System besteht jedoch bei der Auswahl der Erzeugungsanlagen eine Vielzahl von Alternativen. Die Spannweite der Literaturwerte zur CO<sub>2</sub>-Einsparungen ist daher groß, wie anhand verschiedener angewendeter Referenzsysteme in dem Artikel /ROO 05/ diskutiert wurde. In diesem Artikel wurde als ein mögliches Referenzsystem ein so genannter Verdrängungsmix vorgestellt. Die Idee ist hierbei, dass auf Basis einer stundenscharfen Kraftwerkseinsatzplanung ermittelt wird, welche Kraftwerke durch die zusätzliche KWK-Erzeugung verdrängt werden. Der Jahreslastgang der allgemeinen Versorgung und der KWK-Erzeugungsgang sind hierbei wesentliche Eingangsgrößen. Im ersten Teil dieser Veröffentlichung wurde eine verbesserte und aktualisierte Methode zur Modellierung dieser beiden Größen vorgestellt. Hierdurch bestand die Möglichkeit den KWK-Verdrängungsmix für das Jahr 2005 mit einer verbesserten Methodik zu berechnen. Die Methodik zur Ermittlung des Verdrängungsmixes von KWK-Strom ist in **Abbildung 1** dargestellt.



**Abbildung 1:** *Methodik zur Ermittlung des verdrängten Brennstoffmixes durch KWK*

Im ersten Schritt wird der Kraftwerkseinsatz energieträgerscharf für jede Stunde eines Jahres modelliert. Im zweiten Schritt wird die zusätzliche KWK-Erzeugung für das gleiche Jahr in 1h-Auflösung abgebildet. Abschließend kann ermittelt werden, wie sich der Einsatz der Kondensationskraftwerke wegen der erhöhten KWK-Erzeugung verändert. Die so ermittelte Differenz im Energieträgermix wird als Verdrängungsmix ausgewiesen.

Der Jahreslastgang der allgemeinen Versorgung wird nach der in EuroHeat&Power Heft 4, 2008 beschriebenen Methodik für das Jahr 2005 modelliert. Eine wesentliche Nebenbedingung in dem Verdrängungsmix-Tool ist die Übereinstimmung der jährlichen Nettostromerzeugung der jeweiligen Energieträger mit der Erzeugung aus den amtlichen Statistiken in diesem Jahr. Der modellierte Lastgang weicht von der statistisch erfassten jährlichen Stromerzeugung um 3,7 % ab. Zur Anwendung des Tools wurde daher der modellierte Jahreslastgang um eine konstante Leistung ergänzt, um die fehlende Erzeugung auszugleichen.

Der Kraftwerkseinsatz wurde energieträgerspezifisch modelliert, d. h. es wurden alle Kraftwerke mit dem gleichen Energieträger zusammengefasst. Für die Charakteristik des Kraftwerkseinsatzes wurden die zwölf Mittwochsbilanzen ausgewertet. In **Abbildung 2** und **Abbildung 3** sind die Erzeugungsbilanzen der allgemeinen Versorgung am 3. Mittwoch im Januar und Juni 2005 dargestellt.

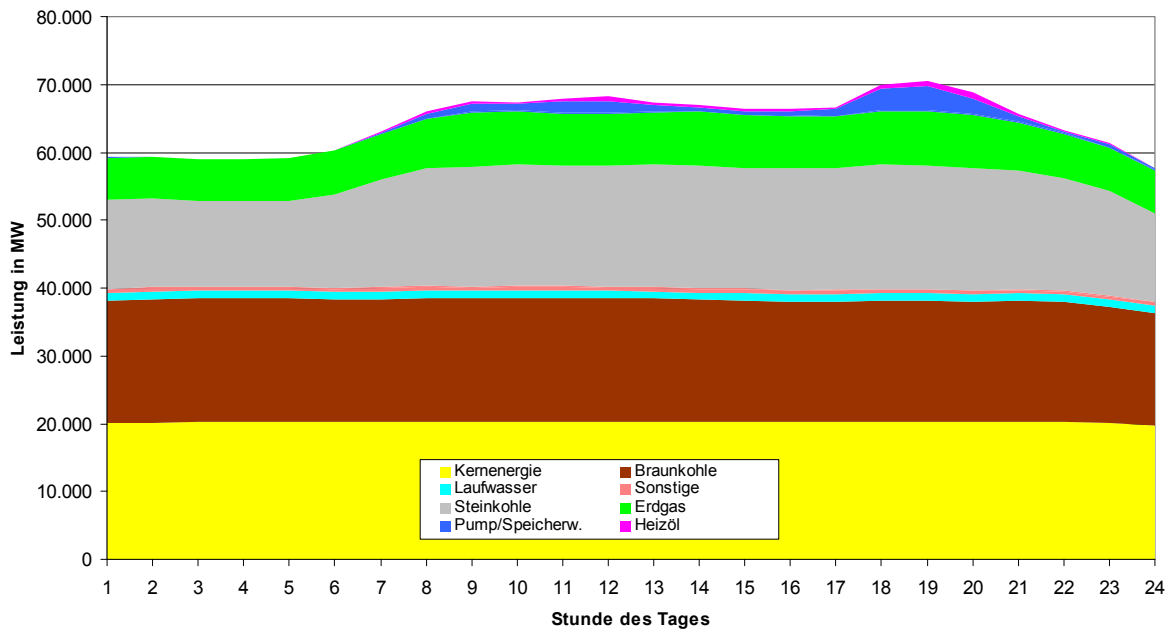


Abbildung 2: *Mittwochsbilanz der allgemeinen Versorgung im Januar 2005 nach /STB 08/*

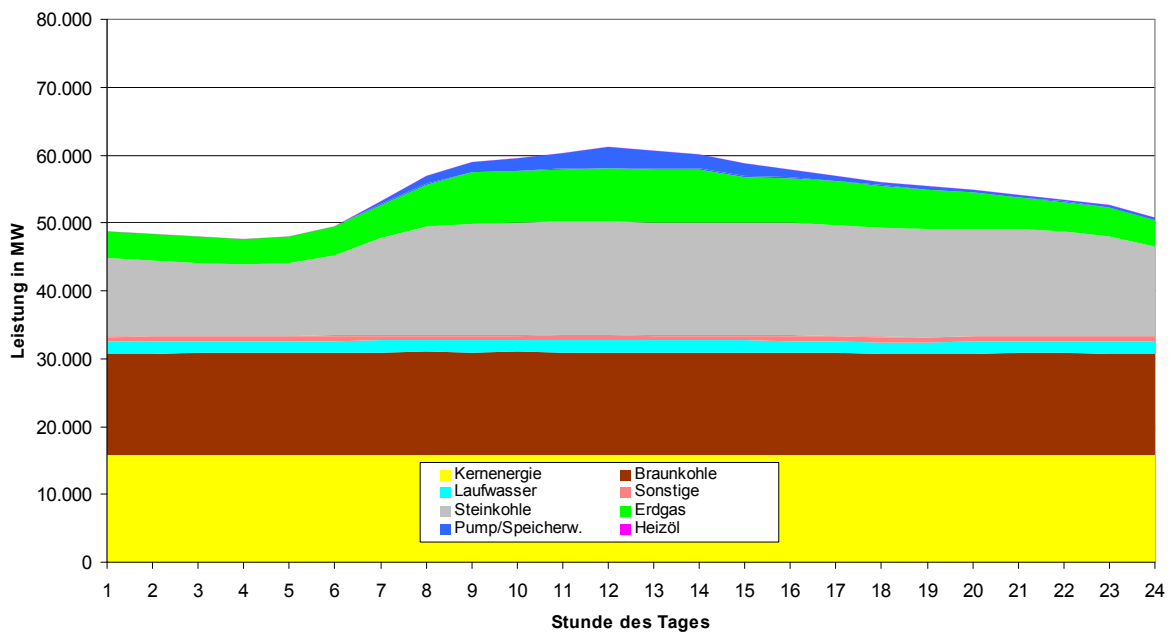


Abbildung 3: *Mittwochsbilanz der allgemeinen Versorgung im Juni 2005 nach /STB 08/*

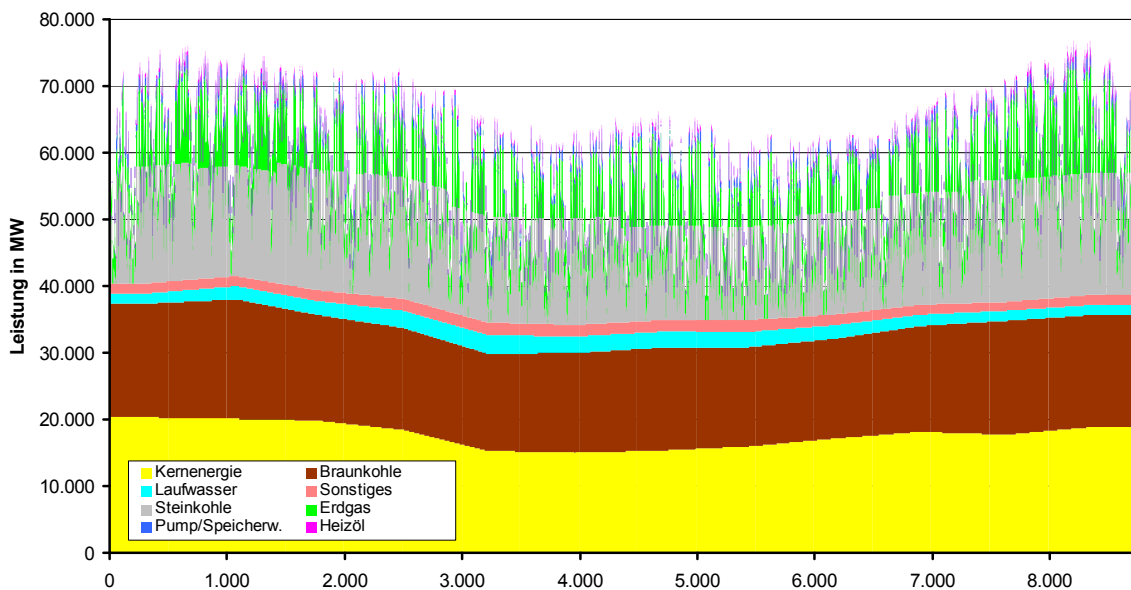
Die Auswertung der Mittwochsbilanzen zeigt die Charakteristik des Einsatzes der verschiedenen Kraftwerkstypen. Die Braunkohle- und Kernenergiekraftwerke als typische Grundlastkraftwerke fahren untermits mit nahezu konstanter Leistung. Sie variieren jedoch saisonal deutlich. Im Januar betrug beispielsweise die Leistung von Braunkohle- und Kernenergiekraftwerke in etwa 40 GW und im Juni lediglich ca. 30 GW. Andere Kraftwerkstypen fahren hingegen stark den Tageslastgang nach, wie beispielsweise

Steinkohlekraftwerke. Der Kraftwerkseinsatz erfolgt im liberalisierten Markt nach der Merit Order, d. h. dass die Kraftwerke in der Reihenfolge der geringsten Grenzkosten eingesetzt werden. Die Auswertung der Mittwochsbilanzen zeigt auch in Zeiten geringer Last den Betrieb von Erdgas-Kraftwerken, obwohl eine ausreichende Kapazität an Steinkohlekraftwerken zur Verfügung steht. Dies erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich, da Steinkohle günstiger ist als Erdgas. Gründe für diesen scheinbaren Widerspruch sind beispielsweise:

- mit Erdgas betriebene KWK-Anlagen, die zur Deckung der thermischen Last laufen müssen;
- Erdgas betriebene Kraftwerke weisen i. d. R. eine bessere Lastwechseldynamik auf und werden daher zum Ausgleich von Lastschwankungen betrieben;
- in Rubrik Erdgas-Kraftwerke sind auch moderne GuD-Kraftwerke enthalten, die aufgrund ihres hohen Nutzungsgrades (bis fast 60 %) geringere Grenzkosten als manche Steinkohlekraftwerke aufweisen.

Daher wurde auf Basis der Mittwochsbilanz eine Mindest-Erdgasleistung definiert. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke wurden zusammengefasst und ein typischer Wochenlastgang hinterlegt. Dieser Lastgang wurde auf Basis einer wirtschaftlichen Optimierung der Fahrweise anhand der EEX-Preise ermittelt.

Der Jahreslastgang der allgemeinen Versorgung wurde mit den Kraftwerken mit den geringsten Grenzkosten beginnend unter Einhaltung der oben ermittelten Kennzahlen und der energieträgerspezifischen Jahreserzeugung aufgefüllt. Der synthetisierte Kraftwerkseinsatz für das Jahr 2005 ist in **Abbildung 4** dargestellt.



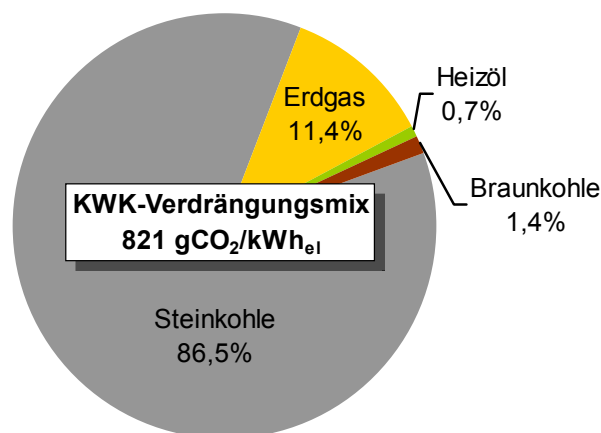
**Abbildung 4:** *Modellierter Kraftwerkseinsatz für 2005*

Auf Basis des stundenscharfen Kraftwerkseinsatzes im Jahr 2005 kann nun berechnet werden, welche Kraftwerkstypen durch Erzeugung aus neu zugebauten Quellen substituiert werden. Es wird die Annahme getroffen, dass zusätzliche KWK-Erzeugung zunächst in jeder Stunde Mittellast- und Spitzenlastkraftwerke verdrängt. Des Weiteren

wird angenommen, dass die Erzeugung dieser Kraftwerke anteilig - entsprechend der Leistung zu diesem Zeitpunkt - verdrängt wird.

Bei den Erdgaskraftwerken wurde, wie oben erläutert, auf Basis der Auswertung der Mittwochsbilanzen eine monatliche Mindestleistung festgelegt, die immer am Netz ist. Regenerative und sonstige Energieträger sind i. d. R. Must-Run-Anlagen bzw. weisen Grundlastcharakteristik auf. Die Fahrweise der Pump- und Speicherkraftwerke wird i. d. R. allein durch die Preischarakteristik, d. h. dem Verhältnis zwischen Hoch- und Niedrigpreisen bestimmt. Da die grundsätzliche Preischarakteristik an der EEX nicht wesentlich durch die zusätzliche KWK-Erzeugung verändert werden würde, wird angenommen, dass diese Kraftwerke ebenfalls nicht verdrängt werden. Nur wenn in einer Stunde die KWK-Leistung die Leistung der verdrängbaren Kraftwerke übersteigt, wird auch Erzeugung aus Grundlastkraftwerken ersetzt. Es kann von einer alleinigen Verdrängung von Braunkohlekraftwerken ausgegangen werden, da der CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel Braunkohlekraftwerke in der Merit Order deutlich schlechter stellt. Die Veröffentlichung von Kraftwerkseinsatzdaten bei der EEX bestätigt diese Annahme /EEX 07/.

Für die Bestimmung des Verdrängungsmixes muss neben dem Kraftwerkseinsatz (linker Ast in Abbildung 1) der Lastgang neu installierter KWK-Anlagen ermittelt werden (rechter Ast in Abbildung 1). Für die Verdrängung im Stromerzeugungsmix 2005 durch zusätzliche KWK-Stromerzeugung wird angenommen, dass diese KWK-Stromerzeugung die gleiche Charakteristik aufweist, wie die im ersten Teil ermittelte KWK-Erzeugung der allgemeinen Versorgung. Neben der Charakteristik des KWK-Lastgangs, muss noch die Höhe der jährlichen zusätzlichen KWK-Stromerzeugung festgelegt werden. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass der Verdrängungsmix bei Ausbauszenarien von bis zu 30 TWh zusätzlicher KWK-Stromerzeugung relativ stabil ist. Grundsätzlich ergibt sich bei höherer KWK-Stromerzeugung ein größerer Anteil an verdrängten Grundlastkraftwerken. Die Braunkohlegrundlastkraftwerke weisen die höchsten spezifischen Emissionen auf, so dass der gewichtete spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor mit zunehmender KWK-Stromerzeugung ansteigt. **Abbildung 5** zeigt den Verdrängungsmix für eine zusätzliche KWK-Stromerzeugung von 10 TWh für das Jahr 2005.



**Abbildung 5:** *KWK-Verdrängungsmix 2005*

Zur Bestimmung des spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors bedarf es noch der mittleren Nutzungsgrade der Kraftwerke und der brennstoffspezifischen Emissionen. Hierdurch ergibt sich eine untere Abschätzung des spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors, da im Sinne der Merit Order zunächst immer die Kraftwerke mit den schlechtesten Nutzungsgraden verdrängt werden. Des Weiteren wird bei den mit Erdgas betriebenen Kraftwerken in den amtlichen Statistiken nicht zwischen GuD-Kraftwerken und reinen Gasturbinenkraftwerken unterschieden. Auf Basis der verdrängten Brennstoffmenge lässt sich ein gewichteter spezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionfaktor von 821 g/kWh<sub>el</sub> berechnen. Der Verdrängungsmix wird mit 86,5 % von Steinkohle dominiert. Erdgas macht 11,4 % des Verdrängungsmixes aus. Heizöl mit 0,7 % und Braunkohle mit 1,4 % sind von eher untergeordneter Rolle.

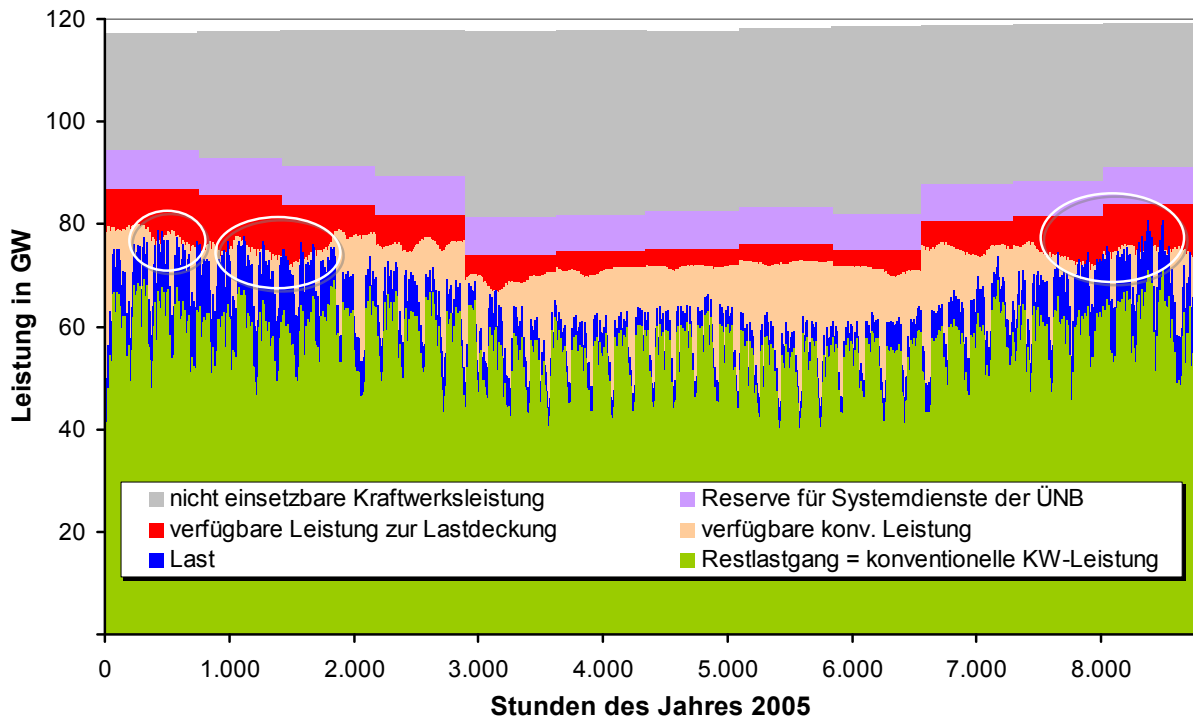
### Leistungsbetrachtung

Neben der energetischen Betrachtung sind für die energiewirtschaftlichen Auswirkungen insbesondere Überlegungen zur Leistung bzw. Leistungssicherung durch KWK interessant. Dass bei einem Ausbau der KWK an anderer Stelle Überkapazitäten entstehen, ist unbestritten. Bisher steht allerdings eine Quantifizierung dieser Effekte aus.

Selbst am Höchstlasttag eines Jahres ist immer noch zusätzliche Reservekapazität als Sicherheit verfügbar. Der Verband der Netzbetreiber beim BDEW (ehemals VDN), wie auch dessen europäisches Pendant, die Union for the Co-ordination of transmission of electricity (UCTE), veröffentlicht jährliche Zusammenstellungen der Leistungsbilanz für die Viertelstunde von 11:00 Uhr bis 11:15 Uhr an jedem dritten Mittwoch im Monat (VDN 06/, /UCTE 05/). Sie enthält Angaben zu verfügbarer Leistung und notwendiger bzw. verfügbarer Reserve.

**Abbildung 6** zeigt die auf Basis der statistischen Daten vom VDN bzw. UCTE erstellte Analyse der Rolle der KWK in der Leistungsbilanz der Stromversorgung für 2005. Unter „nicht einsetzbare Kraftwerksleistung“ fallen in dieser Darstellung neben der nicht planbar einsetzbaren Leistung auch die Kraftwerksausfälle und Revisionen. Für die verfügbare Leistung  $P_{\text{verfügbar}}(t)$  wurde angenommen, dass der ausgewiesene Wert für den gesamten Kalendermonat gilt. Diese wurde um die KWK-Leistung der einzelnen Stunden nach dem KWK-Lastgang  $P_{\text{KWK}}(t)$  bereinigt. Der daraus entstehende Leistungsgang  $P_{\text{konv, verfügbar}}(t)$  spiegelt die verfügbare Leistung in konventionellen Kraftwerken<sup>1</sup> wieder. Ebenfalls eingetragen ist der zu deckende Verbraucherlastgang  $P_{\text{Last}}(t)$  und der nach Abzug der KWK-Einspeisung zu deckende Restlastgang  $P_{\text{Rest}}(t)$ .

<sup>1</sup> Unter dem Begriff „konventioneller Kraftwerkspark“ sind in diesem Artikel die ungekoppelten thermischen Kraftwerke zusammengefasst.



**Abbildung 6:** *Leistungsbilanz der Stromversorgung im Jahr 2005 inkl. KWK*

Die verfügbare Leistung in konventionellen Kraftwerken müsste ohne Einspeisung von KWK in der Lage sein, die Last zu jeder Stunde des Jahres zu decken, wenn die KWK keine konventionelle Leistung ersetzt.

$$P_{konv,verfügbar}(t) - P_{Last}(t) > 0$$

Ist dies nicht der Fall, würde unter der Annahme einer gleich bleibenden Revisionsplanung der Wegfall der KWK dazu führen, dass die Last nicht mehr gedeckt werden könnte (markierte Stellen im Diagramm). Das so für das Jahr 2005 maximal auftretende Leistungsdefizit beträgt 6,9 GW.

Die KWK trägt vornehmlich im Winter zur Leistungssicherung bei, wenn sowohl die Last, als auch die KWK-Einspeisung sehr hoch sind. Das ist nicht unbedingt selbstverständlich, wenn man bedenkt, dass im Sommer die verfügbare Leistung zur Lastdeckung am geringsten ist. Dann sind viele Kraftwerke (bis zu 15 GW) auf Grund der geringeren Last in Revision. Die geringste zusätzliche Reserveleistung im konventionellen Kraftwerkspark ergibt sich nach folgender Formel:

$$P_{Reserve} = \text{MIN} \left[ P_{konv,verfügbar}(t) - P_{Rest}(t) \right]$$

Damit lässt sich die konventionelle Kraftwerksleistung ermitteln, die bei derzeitiger Fahrweise und Revisionsplanung der Kraftwerke nicht angefragt wird. Demnach errechnen sich für 2005 im Dezember etwa 3 GW an zusätzlicher Reserveleistung im konventionellen Kraftwerkspark. Diese Überdeckung ist u. a. die für die hohe Versorgungssicherheit in Deutschland mit verantwortlich. Im Juli des heißen Sommers 2003 lag dieser Wert in gleicher Höhe.

Zur Bewertung des Grenznutzens der KWK muss die gekoppelte KWK-Leistung nach /FW 308/ angesetzt werden, die zur Erzeugung der 58,5 TWh an KWK-Strom notwendig war. In /BLE 07/ wurde der gesamte KWK-Bestand für 2005 analysiert, also inklusive der Anlagen, die nicht ins Netz der allgemeinen Versorgung einspeisten. Diese stellten 2005 mit 32,8 GW KWK-Leistung 68,3 TWh an KWK-Strom bereit. Daraus errechnet sich eine Ausnutzungsdauer von etwa 2.080 h. Mit der Annahme gleicher Ausnutzungsdauer ergibt sich für die KWK-Anlagen der allgemeinen Versorgung eine Leistung von etwa 28,2 GW. Diese Leistung liegt jedoch nicht gleichzeitig am Netz an. Die maximal aufgetretene KWK-Leistung im Jahr 2005 war mit ca. 14,6 GW um etwa 48 % niedriger.

Wenn von der Annahme ausgegangen wird, dass eine neue KWK-Anlage ebenfalls der charakteristischen Fahrweise des Bestandes folgt, wird auch eine neu zu bauende KWK-Anlage Leistung im konventionellen Kraftwerkspark verdrängen.

Zum Zeitpunkt der minimalen Reserveleistung  $P_{Reserve}$  betrug die KWK-Leistung ca. zwei Drittel ihrer maximalen am Netz anliegenden Leistung. Durch Parametervariation kann nun gezeigt werden, dass ein zusätzlich installiertes GW an KWK-Anlagenleistung mit ca. einem Drittel zur Leistungssicherung beiträgt.

Die Ergebnisse, die dieser Untersuchung zugrunde liegen, wurden im Verbundprojekt „EduaR&D – Ganzheitliche dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie“ /BEE 07/ erarbeitet, dass vom BMWi unter dem FKZ 0328000A gefördert wurde. Die Studie kann unter [www.ffe.de](http://www.ffe.de) herunter geladen werden.

## Quellen

- /FW 308/ *Arbeitsblatt FW 308 - Zertifizierung von KWK-Anlagen*, Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. (AGFW), Frankfurt, November 2002
- /BEE 07/ Beer, Michael et al.: *Energie-Daten und Analyse R&D (EduaR&D), Teilprojekt: Ganzheitliche und dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie*, gefördert durch das BMWA, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 2007
- /BLE 07/ Blesl, M.: *KWK-Anlagenbestand: Potenziale für weitere Modernisierungen*, in EuroHeat&Power, Heft 4, 2007
- /EEX 07/ European Energy Exchange, deutsche Energiebörse in Leipzig, [www.eex.de](http://www.eex.de), letzter Stand: Mai 2007
- /ROO 05/ von Roon, S.: *Bewertung des Klimaschutzeffektes durch Kraft-Wärme-Kopplung*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen Jg. 55 Heft 11, 2005
- /STB 08/ Statistisches Bundesamt: *Monatsberichte über die Elektrizitätsversorgung*, laufende Aktualisierung, verschiedene Monate, 2008
- /UCTE 05/ Union for the Co-ordination of transmission of electricity: *System Adequacy Retrospect 2005*
- /VDN 06/ Verband der Netzbetreiber beim VDEW: *Leistungsbilanz der allgemeinen Stromversorgung in Deutschland Rückschau*, Berlin, verschiedene Jahre