

Rückwirkungen der KWK-Erzeugung auf den Kraftwerkspark - Lastgangssynthese

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

- Dieser Beitrag ist in der EuroHeat&Power Heft 4, 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 CO₂-Emissionen beitragen. Aus diesem Grund hat die Bundesregierung im Integrierten Energie- und Klimapaket das Ziel zur Verdopplung der Stromerzeugung aus KWK bis 2020 auf 25 % der gesamten Stromerzeugung vorgegeben.

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 vorliegenden ersten Teil wird auf die statistische Datenbasis sowie der Methodik zur Modellierung des Gesamtlastgangs und des KWK-Erzeugungsganges eingegangen. Im zweiten Teil wird sowohl eine Arbeits- auch Leistungsbetrachtung durchgeführt. Hierdurch sind energiewirtschaftliche Aussagen über die Verdrängung konventioneller Erzeugung durch KWK-Erzeugung möglich.

Statistische Basis

Für die Synthese des elektrischen Verbraucherlastganges und des KWK-Erzeugungsganges stehen neben den Internetseiten der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) weitere öffentliche Quellen zur Verfügung (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: *Statistische Basis für die Lastgangssynthese*

Quelle	Inhalt	Jahressumme
Vertikale Netzlast der vier ÜNB (/ÜNB 07/):	„(...) die vorzeichenrichtige Summe aller Übergaben aus dem Übertragungsnetz über direkt angeschlossene Transformatoren und Leitungen zu Verteilungsnetzen und Endverbrauchern.“	366 TWh
Leistungsbilanz der allgemeinen Stromversorgung (/VDN 06/, /UCTE 05/):	Netzbelastung gemäß der Vereinbarung der UCTE für jeden dritten Mittwoch im Monat als Viertelstundenwert von 11:00 Uhr bis 11:15 Uhr	-
Leistung und Belastung der Kraftwerke (/STB 08/):	Netzeinspeisung der Kraftwerke der allgemeinen Versorgung für jeden dritten Mittwoch im Monat in Stundenwerten nach Energieträgern	-
Nettoerzeugung inkl. KWK (/STB 08/):	Monatliche Erzeugung der allgemeinen Versorgung nach einzelnen Energieträgern	498 TWh
Windenergieeinspeisung (/ÜNB 07/):	Stromerzeugung aus Windkraft; ab 2006 aufgeteilt nach den vier Regelzonen	27,2 TWh (2005) 30,5 TWh (2006)
Berichte der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme beim VDEW (/AGFW 06/):	Monatliche Erzeugungsmengen der AGFW-Mitgliedsunternehmen	-
Außentemperatur (/Lfl 07/):	Witterungsdaten für Wetterstationen in Bayern	-

Abbildung 1 zeigt schematisch die verschiedenen Netz- und Verbrauchsebenen und farblich hervorgehoben die verschiedenen veröffentlichten Lasten bzw. Leistungsflüsse zur leichteren Abgrenzung der Begrifflichkeiten.

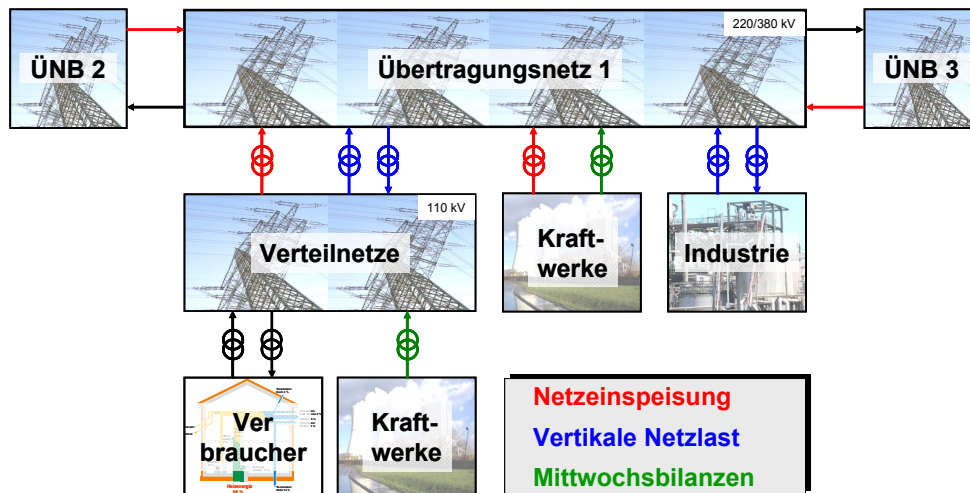


Abbildung 1: *Abgrenzung der Begrifflichkeiten*

Die von den vier ÜNB veröffentlichte Netzeinspeisung beinhaltet alle Zuflüsse in das jeweilige Höchstspannungsnetz. Da auch Durchleitungen durch die Netze möglich sind, kann die Summe der vier Netzeinspeisungen mehr als die Gesamterzeugung abbilden.

Die vertikale Netzlast ergibt sich aus der stundenscharfen Summe der Zu- und Abflüsse aus bzw. in niedrigere Netzebenen und direkt angeschlossene große Industriebetriebe. Die vertikale Netzlast kann negativ werden, wenn mehr aus den unteren Netzebenen ins Übertragungsnetz zurückgespeist wird, als die direkt angeschlossenen Verbraucher benötigen. Der Überschuss wird in einem der anderen Übertragungsnetze verbraucht oder ins Ausland exportiert. Die stundenexakte Summierung der vier vertikalen Netzlasten bildet ein Maß für die Lastcharakteristik der Verbraucher. Ein Teil der Verbraucherlast wird jedoch direkt durch Erzeugung in den Verteilnetzen gedeckt. Daher bildet das zeitliche Integral unter der vertikalen Netzlast mit 366 TWh nicht die gesamte Stromerzeugung der allgemeinen Versorgung mit 498 TWh ab.

Die Mittwochsbalancen geben die Netzeinspeisung der Kraftwerke der allgemeinen Versorgung für jeden dritten Mittwoch im Monat in Stundenwerten nach Energieträgern an. Damit repräsentieren sie die tatsächliche Lastsituation besser, als die vertikale Netzlast, der die Kraftwerke der unteren Netzebenen fehlen. Kraftwerke, die nicht der allgemeinen Versorgung angehören, wie beispielsweise Windkraftanlagen, sind allerdings in den Mittwochsbalancen nicht enthalten.

Modellierung des Lastgangs der Stromerzeugung

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Erzeugung eines Jahreslastganges der Erzeugung der allgemeinen Versorgung und des elektrischen Verbrauchs für 2005 aus den verfügbaren statistischen Daten erläutert. Das Ziel ist, die vertikale Netzlast so zu korrigieren, dass sowohl der Erzeugungsmenge, als auch der Charakteristik inkl. der Jahreshöchstlast möglichst gut abgebildet werden. Ein weiteres Qualitätsmerkmal dieser berechneten Lastkurve ist die Abbildung der Stundenwerte der Mittwochsbalan-

zen. Für die Umrechnung der vertikalen Netzlast auf die durch den bestehenden Kraftwerkspark zu deckende Verbraucherlast sind folgende Ansätze denkbar:

Eine einfache Möglichkeit, die gewünschte Jahreserzeugungsmenge nachzubilden, ist die Korrektur der vertikalen Netzlast mit einem **festen Faktor**. Dieser ergibt sich aus der Jahreserzeugung der allgemeinen Versorgung (498 TWh) und der durch die vertikale Netzlast repräsentierten Erzeugung (366 TWh) zu 1,36. Für das betrachtete Jahr 2005 werden somit die einzelnen Lastpunkte der vertikalen Netzlast um jeweils 36 Prozent angehoben. Nach dieser Methode wird eine hohe vertikale Netzlast (Hochlast) stärker erhöht als eine niedrige vertikale Netzlast (Schwachlast). Der so synthetisierte Lastgangs stimmt zwar mit der Jahreserzeugung überein, ein Vergleich mit den zwölf Mittwochsbilanzen zeigt jedoch, dass die Lastcharakteristik systematisch verzerrt ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Korrektur ist, den Fehlbetrag als **Band konstanter Leistung zu addieren**. Im Jahr 2005 wurden so durchschnittlich pro Stunde 15 GWh mehr erzeugt, als die vertikale Netzlast vorgibt. Die Addition des konstanten Sockelbetrages bewirkt eine Parallelverschiebung der vertikalen Netzlast. Auch bei dieser Methode wird zwar die Erzeugungsmenge, nicht aber der Lastverlauf der Mittwochsbilanzen richtig abgebildet.

Aufgrund der unzureichenden Abbildung der Lastgangscharakteristik bei Multiplikation mit einem festen Faktor und Addition eines Bandes konstanter Leistung wird eine **Ausgleichsfunktion addiert**. Um die festen Lastpunkte der Mittwochsbilanzen zu erreichen, darf dieses Lastband nicht konstant sein. Die einzelnen Punkte der vertikalen Netzlast werden dazu um den jeweiligen Fehlbetrag verschoben. Gleichzeitig müssen auch die angrenzenden Punkte verschoben werden, um weiterhin einen stetigen Lastverlauf zu erhalten.

Ein Verfahren zur harmonischen, stetigen Verbindung von bekannten Stützpunkten ist die Anwendung von Splines. Das sind Polynome n-ten Grades, die so zwischen die Punkte gelegt werden, dass die Steigung der Funktionen links und rechts der Stützpunkte gleich ist.

Abbildung 2 zeigt in den blauen Punkten die absolute Abweichung der vertikalen Netzlast von den 24 Stundenwerten der Mittwochsbilanz als fehlende Leistung. Rot hervorgehoben ist der Spline, der die 11:00 Uhr Werte korrigiert. Am dritten Januar-mittwoch liegt die vertikale Netzlast beispielsweise um ca. 14 GW unter der gemeldeten Erzeugungsleistung, während im Juni die Abweichung lediglich knapp 7 GW beträgt.

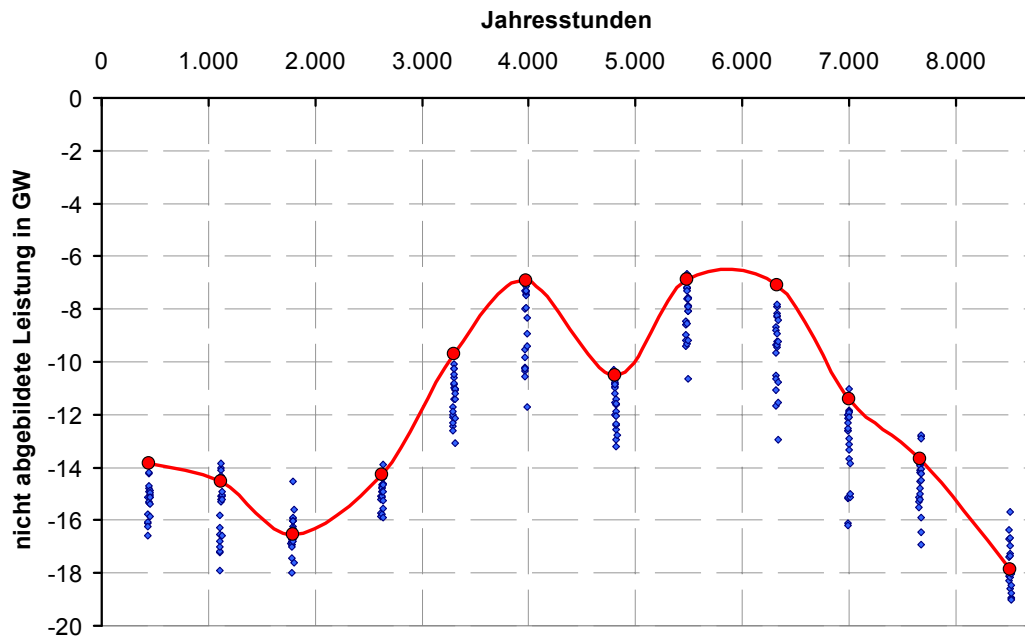


Abbildung 2: *Abweichung der vertikalen Netzlast von der tatsächlichen Erzeugung der allgemeinen Versorgung*

Die Streuung der Abweichung an den einzelnen Tagen ist mit bis zu 5 GW relativ groß. Aus diesem Grund reicht es nicht aus, eine einzelne Korrekturfunktion zu erstellen. Daher wurden 24 Korrekturfunktionen für jede Tagesstunde berechnet. Mit Hilfe dieser 24 Funktionen konnte somit zu jedem der 8.760 Werte der vertikalen Netzlast ein individueller Korrektur-Summand ausgewiesen werden. Die Abweichung in der Jahreserzeugung beträgt bei dieser Methode 3,7 %.

In den Mittwochsbilanzen ist nur die Erzeugung der allgemeinen Versorgung und nicht die Windstromeinspeisung abgebildet. Für den gesamten Erzeugungslastgang muss der Windlastgang daher zur korrigierten vertikalen Netzlast addiert werden.

Alle vier ÜNB veröffentlichen seit 2006 die Windstromeinspeisung. Für 2005 sind lediglich die Daten für das Netzgebiet von Vattenfall öffentlich verfügbar. Aufgrund der Erzeugungsanteile dominieren die Einspeisungscharakteristika der Windstromerzeugung im Vattenfall- (37,5 % in 2006) und im E.ON-Netzgebiet (42,5 % in 2006) den Leistungsgang der bundesweiten Stromerzeugung aus Wind. Für die Berechnung des Lastgangs für 2005 wird die Windstromeinspeisung ins Netzgebiet von Vattenfall als charakteristisch für die gesamte Erzeugung angesehen. Das Integral des von Vattenfall veröffentlichten Leistungsganges aus dem Jahr 2005 wurde daher zunächst normiert und mit 27,2 TWh skaliert. Das Ergebnis gibt den Leistungsgang der Windstromeinspeisung 2005 wieder.

Abbildung 3 zeigt den mit Hilfe von Splines ermittelten Erzeugerlastgang für das Jahr 2005 als Rasterdiagramm. Diese Form der Darstellung ermöglicht ein schnelles visuelles Erfassen von großen Datenmengen. Dabei sind die einzelnen Tage auf der Abszisse und die einzelnen Stunden des Tages auf der Ordinate aufgetragen. Der jeweilige Wert ist farblich codiert dargestellt, hohe Werte in rot und niedrige Werte in blau.

Es ist beispielsweise zu erkennen, dass im Winter zwei Verbrauchsspitzen, mittags und abends, auftreten, während im Sommer und der Übergangszeit nur eine Mittagsspitze erkennbar ist. Des Weiteren zeigt sich, dass der morgendliche Lastanstieg zu deutlich konstanteren Zeiten auftritt, als der Rückgang der Last am Abend. Die senkrechte Streifenbildung ist auf die einzelnen Wochenlastgänge und den niedrigeren Stromverbrauch am Wochenende zurückzuführen.

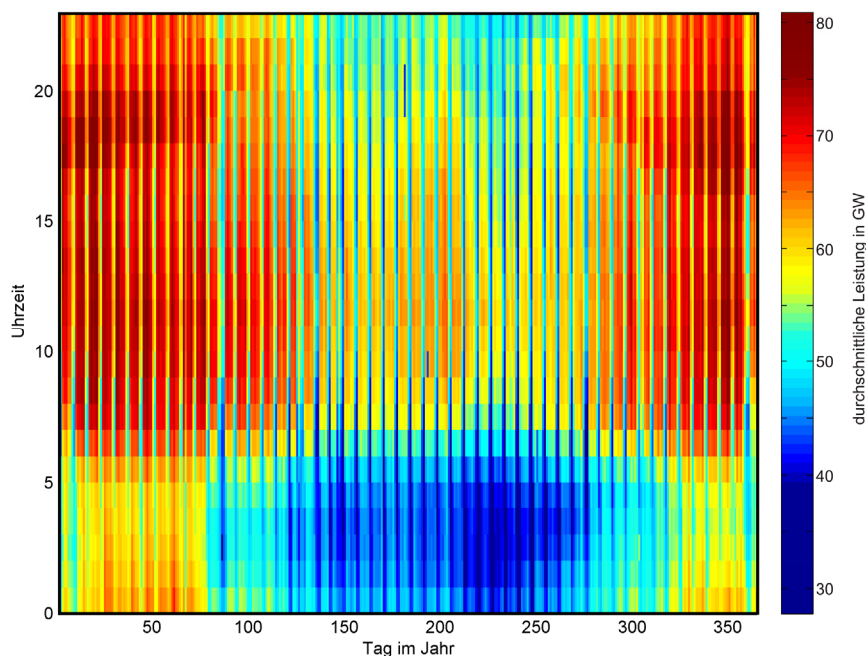


Abbildung 3: *Erzeugerlastgang für das Jahr 2005 als Rasterdiagramm*

KWK-Lastgang

Die gesamte ins Stromnetz einspeisende KWK-Stromerzeugung betrug 2005 58,8 TWh /VDN 07/. Die KWK-Stromerzeugung der allgemeinen Versorgung betrug hingegen 52,3 TWh /STB 08/. Die Monats-Charakteristik der allgemeinen KWK-Erzeugung ist in **Abbildung 4** dargestellt. Wie erwartet, ist sowohl der Anteil der KWK-Wärme-, als auch der Stromerzeugung im Sommer geringer, als im Winter. Die Stromkennzahl nimmt 2003 in den Sommermonaten zu. Daher nimmt auch der Gesamtnutzungsgrad der Anlagen von maximal 80 % im Dezember auf knapp 67 % im Juni ab. Verglichen mit anderen Jahren ist dieses Verhalten im Jahr 2003 aufgrund des „Jahrhundert“-Sommers besonders ausgeprägt.

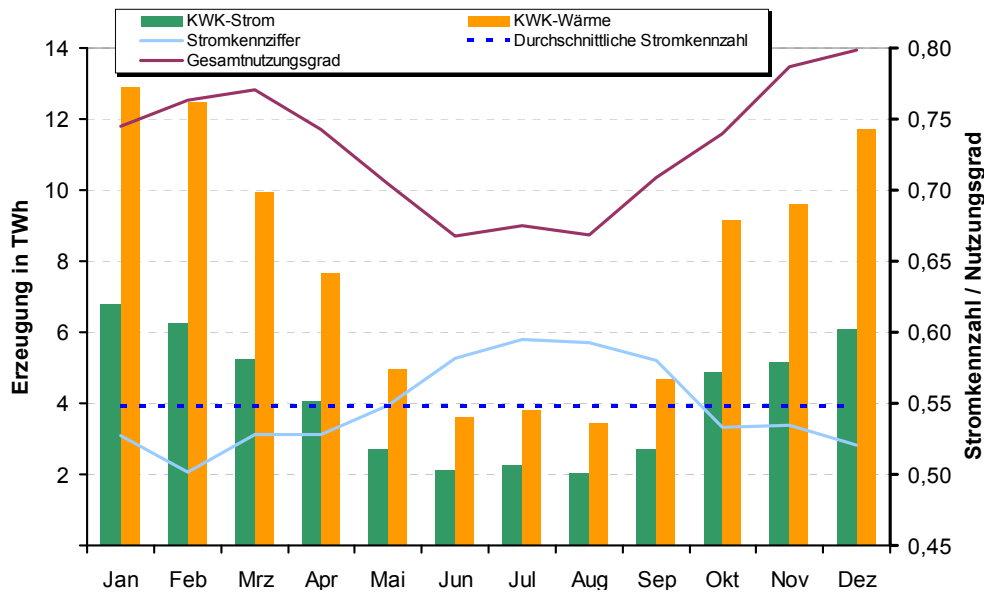


Abbildung 4: Monatsgang der KWK-Strom- und -Wärmeerzeugung 2003 /STB 08/

Auf der Basis von Fernwärmelastgängen von vier großen Stadtwerken konnte eine Funktion ermittelt werden, mit der sich ein auf die mittlere Leistung normierter stundenscharfer Fernwärmelastgang für Deutschland mit folgenden Eingangsdaten berechnen lässt:

- Angabe des Wochentages bzw. bundesweiten Feiertages
- stundenscharfe Zeitreihe mit der mittleren Temperatur im Gebiet von Würzburg.

Die Datumsangabe wird benötigt, da gezeigt werden konnte, dass der Fernwärmebedarf bei gleicher Außentemperatur stark von der Uhrzeit und dem Wochentag bestimmt wird. Eine Unterscheidung in die zwei Gruppen Montag bis Freitag einerseits, sowie Samstag, Sonntag und Feiertag andererseits erwies sich als ausreichend.

Die mittlere Temperatur wird als gleitendes gewichtetes 72-Stundenmittel gebildet. Hierbei gingen die Temperaturen der 24 unmittelbar davor liegenden Stunden mit 50 %, die nächsten zurückliegenden Stunden mit 30 % und die 24 am längsten zurückliegenden Stunden mit 20 % in die Berechnung des Mittelwertes ein. Die Temperaturdaten wurden von der Internetseite der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft bezogen /LfL 07/. Es wurden die Messwerte von drei Wetterstationen bei Würzburg verwendet.

Der Fernwärmelastgang wurde im nächsten Schritt durch Multiplikation mit der Stromkennzahl in einen normierten KWK-Stromlastgang umgerechnet. Da die Stromkennzahl nicht konstant ist (vgl. auch Abbildung 4), wurden auf Basis der Monatsbilanzen des Statistischen Bundesamtes die mittleren Stromkennzahlen für jeden Monat im Jahr 2005 ermittelt (vgl. /STB 08/).

Der normierte KWK-Lastgang wurde im folgenden Schritt mit der von der AGFW veröffentlichten mittleren KWK-Stromerzeugung für 2005 skaliert. Die KWK-Stromerzeugung wird im Arbeitsbericht der AGFW mit 35.604 GWh angegeben /AGFW 06/. Dies entspricht einer mittleren Leistung von 4,06 GW. Mit dem so erzeugten KWK-Lastgang konnten Monatsbilanzen aufgestellt werden und mit den Monatsbilanzen des Statis-

tischen Bundesamtes in /STB 08/ verglichen werden. Hierbei zeigte sich, dass die Fehlleistung zur gesamten KWK-Leistung in jedem Monat etwa gleich hoch ist. Da somit nur eine geringfügige Temperaturabhängigkeit des Fehlbetrags besteht, wurde die Differenz zwischen der von der AGFW ausgewiesenen KWK-Stromerzeugung von 35.604 GWh und der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten KWK-Stromerzeugung der allgemeinen Versorgung von 52.310 GWh durch Addition einer konstanten Leistung zum KWK-Lastgang ausgeglichen. Der modellierte stundenscharfe KWK-Lastgang für 2005 ist in **Abbildung 5** dargestellt.

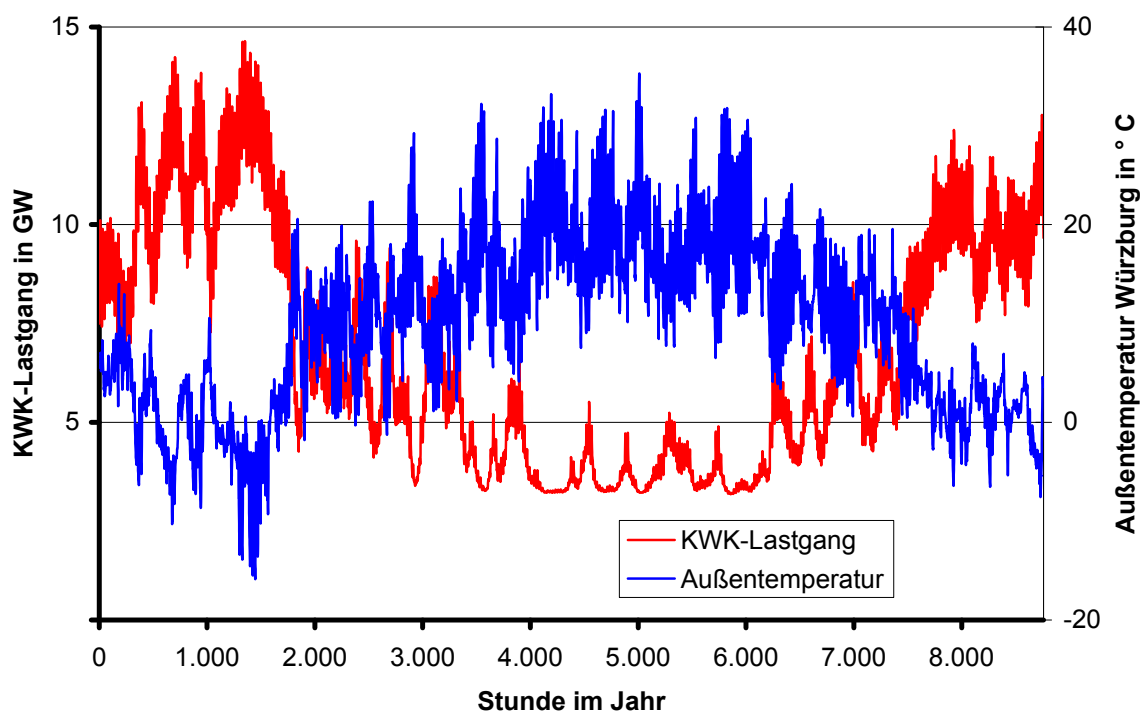


Abbildung 5: *Modellierter KWK-Lastgang für 2005*

Wie in **Abbildung 5** zu erkennen ist, besteht eine hohe Temperaturabhängigkeit bei der KWK-Stromerzeugung. Dennoch ist auch im Sommer ein wesentlicher Grundlastanteil bei der KWK-Erzeugung zu erkennen.

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

Quellen

- /AGFW 06/ Branchenreport 2006 der AGFW, Bezug über www.agfw.de, Zugriff am 17.05.2007
- /BEE 07/ Beer, Michael et al.: *Energie-Daten und Analyse R&D (EduaR&D), Teilprojekt: Ganzheitliche und dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 2007
- /LfL 07/ Internetseite der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft; www.lfl-bayern.de, Zugriff am 17.05.2007

- /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*
- /ÜNB 07/ *Netzkennzahlen der vier Übertragungsnetzbetreiber*, <http://www.vdn-berlin.de/netzkennzahlen.asp>, laufende Aktualisierung, 2007
- /VDN 06/ Verband der Netzbetreiber beim VDEW: Leistungsbilanz der allgemeinen Stromversorgung in Deutschland Rückschau, Berlin, verschiedene Jahre
- /VDN 07/ Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW, www.vdn-berlin.de, Stand: Mai 2007