

# Modellierung von Einsatzrestriktionen von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung für Strommarktsimulationen

Mihail Ketov<sup>1</sup>, Philipp Baumanns<sup>1</sup>, Albert Moser

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IAEW) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH), Schinkelstraße 6, 52062 Aachen, +49-241/80-97892, mihail.ketov@iaew.rwth-aachen.de, www.iaew.rwth-aachen.de

## **Kurzfassung:**

Einsätze thermischer Kraftwerke sind durch die Verdrängung von Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien (EE) zunehmend durch neue Einflussgrößen determiniert. Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) verbleiben aufgrund vertraglicher Verpflichtungen zur Wärmelieferung und entsprechender Erlöse durch den Verkauf von Wärme im Strommarkt. Das Ziel dieser Arbeit liegt daher in der Herleitung von wärmebedarfsgetriebenen Einsatzrestriktionen von KWK-Anlagen, um diese als Eingangsdaten für anschließende Strommarktsimulationen zu verwenden.

KWK-Anlagen sind in Wärmeversorgungssystemen vorzufinden, welche zudem Verbraucher, Wärmeversorgungsnetze und weitere Erzeugungsanlagen beinhalten. Freiheitsgrade beim KWK-Einsatz ergeben sich dabei durch technologische Freiheitsgrade oder durch alternative Anlagen zur Bedarfsdeckung wie Wärmespeicher, Heizwerke und Power-to-Heat-Anlagen.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermittelt kraftwerksscharfe und stündliche elektrische Arbeitspunktbereiche für KWK-Anlagen, welche die Lastdeckung in den Wärmeversorgungssystemen sicherstellen. Zusätzlich werden Freiheitsgrade wie alternative Anlagen zur Wärmebereitstellung und deren Erzeugungskosten feinbezogen.

Exemplarische Untersuchungen zeigen die Plausibilität der erzielbaren Ergebnisse auf und demonstrieren den Einfluss von KWK-Einsatzrestriktionen auf den europäischen Kraftwerkseinsatz. Es ergeben sich Abtauscheffekte innerhalb und zwischen Marktgebieten, die dazu führen, dass der Einsatz aus Marktsimulationen näher an der Realität liegt.

**Keywords:** Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmeversorgungssysteme, Wärmeversorgungsnetze, Wetterabhängigkeit, Kraftwerkseinsatz, Sektorkopplung, Must-Run, Mindesterzeugung, Netznutzungsfall, Netzausbauplanung, strategische Netzplanung, Strommarktsimulation, Systemanalysen, Marktanalysen

## **1 Hintergrund und Fragestellung**

Im Zuge der Energiewende strebt die deutsche Bundesregierung eine umfangreiche Integration von EE in das Stromversorgungssystem an. Um die Sicherheit und

---

<sup>1</sup> Jungautoren

Zuverlässigkeit der Versorgung mit elektrischer Energie zu gewährleisten, sind detaillierte Simulationen des Übertragungsnetzbetriebs und des blockscharfen Kraftwerkseinsatzes erforderlich.

Die abzubildende elektrische Transportaufgabe ergibt sich dabei aus den Handelsentscheidungen an den europäischen Strommärkten und den daraus resultierenden Kraftwerkseinsätzen. Die Herleitung von Kraftwerkseinsätzen ist hierbei von Bedeutung für Markt- und Systemanalysen, etwa zur Bewertung von Versorgungssicherheit und System Adequacy, zur fundamentalen Prognose künftiger Strompreise oder zur Ableitung des notwendigen Redispatch- oder Reservekraftwerksbedarfs.

Einsätze thermischer Kraftwerke sind dabei, insbesondere aufgrund der Verdrängung durch dargebotsabhängige Einspeisungen von EE-Anlagen an den Spotmärkten, zunehmend von neuen Einflussgrößen und Restriktionen geprägt. KWK-Anlagen verbleiben aufgrund von vertraglichen Verpflichtungen und zusätzlichen Erlösen durch den Verkauf der Wärme im Strommarkt.

Daher steht die Abbildung von Einsatzrestriktionen von installierten KWK-Anlagen im Fokus. Deren Einsatzentscheidungen hängen nicht alleine vom Spotmarkt ab, sondern vor allem vom nachfragespezifischen und lokalen Wärmebedarf. KWK-Anlagen sind dabei zwar an den jeweiligen Wärmebedarf gebunden, besitzen jedoch wegen der technischen Ausgestaltung oder anderweitigen Wärmebereitstellungsanlagen Freiheitsgrade im Einsatz. Zur Abbildung der Einsatzentscheidungen an Spotmärkten sind in der Vergangenheit fundamentale Ansätze entwickelt worden [1], [2] oder [3]. Jedoch fehlt diesen Ansätzen eine Methode zur Berechnung von realitätsnahen Einsatzrestriktionen je Kraftwerk. Der Fokus der Arbeit liegt somit in der Herleitung von wärmebedarfsgetriebenen Einsatzrestriktionen von KWK-Anlagen, um diese als Eingangsdaten für Strommarktsimulationen zu verwenden.

## 2 Analyse der Fragestellung

Aus systemtechnischer Sicht betrachtet setzen sich Wärmeversorgungssysteme aus Verbrauchern, Wärmeversorgungsnetzen und Erzeugungsanlagen zusammen [4].

Thermische Verbraucher bilden Haushalte, Gewerbe- und Industriebetriebe, welche Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme benötigen. Der Bedarf ist regelmäßig unabhängig von den Heizkosten, so dass sie als unelastische Last abgebildet werden kann. Raumwärme wird im Zeitverlauf unterschiedlich nachgefragt, weil der Heizbedarf von der lokalen Außentemperatur abhängt. Je niedriger die Außentemperatur ist, desto mehr Raumwärme ist notwendig. Der Bedarf an Warmwasser hängt insbesondere vom Nutzerverhalten ab und Prozesswärme vom zu versorgenden Herstellungs- bzw. Veredelungsprozess. Daher ist der Bedarf an Wärme zur Warmwasserbereitung und Prozesswärme nahezu unabhängig von der Außentemperatur [4].

Wärmeversorgungssysteme sind das Bindeglied zwischen Erzeugung und Verbrauch. Es wird dabei zwischen dezentralen Systemen, Nahwärme-, Fernwärme- und Industrienetzen unterschieden. Die Verteilung der thermischen Energie geht mit hohen spezifischen Verlusten einher, so dass die räumliche Ausdehnung von Wärmeversorgungsnetzen üblicherweise auf wenige 10 km begrenzt ist. Somit stehen nur die an das

Wärmeversorgungsnetz angeschlossenen Anlagen zur Versorgung mit Wärme zur Verfügung und es existiert eine Vielzahl an Versorgungsnetzen in einem Marktgebiet [4].

In dezentralen Systemen und Nahwärmenetzen sind zumeist KWK-Anlagen mit einer installierten Leistung von unter 1 MW<sub>el</sub> vorzufinden. Letztere Anlagen bewirken daher nur geringe Wechselwirkungen mit den Strommärkten. Fernwärme- und Industrienetze haben demgegenüber hohe thermische Lasten zu versorgen und können Leistungen von mehreren 100 MW<sub>el</sub> aufweisen. Hier ist eine signifikante Rückwirkung auf den Strommarkt bzw. die Einsatzweise der betroffenen Kraftwerke an diesem zu erwarten, so dass diese den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bilden. Der Großteil des thermischen Bedarfs in Fernwärmenetzen setzt sich aus Haushalten und Gewerbe zusammen, welche überwiegend Raumwärme nachfragen. Folglich bildet hier die Außentemperatur den Haupteinflussfaktor. Bei Industrienetzen setzt sich der Bedarf überwiegend aus Prozesswärme zusammen [4].

Zu den Erzeugungsanlagen in Wärmeversorgungssystemen gehören KWK-Anlagen, Heizwerke, Wärmespeicher und Power-to-Heat-Anlagen [4].

1. *KWK-Anlagen* stellen elektrische und thermische Energie zur Verfügung und werden strom- oder wärmegeführt betrieben. Der Einsatz stromgeführter Anlagen folgt dem Anreizen am Strommarkt und wärmegeführte Anlagen sichern lediglich die Deckung des Wärmebedarfs ab. Anlagen mit Gegendruckanlage haben ein festes Verhältnis zwischen thermischer und elektrischer Einspeisung und Entnahmekondensationsanlagen können dieses variieren und sind daher flexibler im Einsatz.
2. *Heizwerke* koppeln ausschließlich thermische Energie aus.
3. *Wärmespeicher* entkoppeln zeitlich die Wärmelast von der thermischen Auskopplung.
4. *Power-to-Heat-Anlagen* wandeln elektrische in thermische Energie um.

Alle Anlagen weisen einen definierten Bereich an zulässigen Kombinationen von elektrischen und thermischen Arbeitspunkten auf (Betriebsdiagramm) und koppeln thermische Energie aus, welche über das jeweilige Wärmeversorgungssystem an die Verbraucher geleitet wird. Von KWK-Anlagen sind die elektrischen Auskopplungen und deren Einschränkungen für europäische Strommarktsimulationen relevant. Wärmespeicher, Heizwerke und Power-to-Heat-Anlagen gehen dabei indirekt über die Freiheitsgrade im Einsatz der KWK-Anlagen ein.

KWK-Einsatzrestriktionen ergeben sich daher aufgrund des Erfordernisses neben der Stromnachfrage auch einen Wärmebedarf zu decken. Gleichzeitig können auch verbleibende Freiheitsgrade im Einsatz der Anlagen abgeleitet und genutzt werden beispielsweise durch alternative Heizmöglichkeiten (Heizwerke, Wärmespeicher oder Power-to-Heat), um eine strommarktorientierte Fahrweise zu ermöglichen.

### 3 Modell und Verfahren

Ziel des Verfahrens ist die Ermittlung von kraftwerksscharfen, stündlichen und elektrischen Arbeitspunktbereichen für KWK-Anlagen (KWK-Einsatzrestriktionen), welche die bilanzielle Lastdeckung in deren Wärmeversorgungssystem (Wärmeknoten) sicherstellen. Das Ergebnis ist daher eine Mindest- und Maximaleinspeisung je KWK-Anlage.

### 3.1 Verfahrensüberblick

Die Stufen des Verfahrens können Abbildung 1 entnommen werden. Sie werden für jedes elektrische Marktgebiet getrennt durchgeführt. Im ersten Verfahrensschritt werden auf Basis historischer Außentemperaturmesswerte die Temperaturzeitreihen an den einzelnen Wärmeknoten berechnet. Für das weitere Verfahren wird eine elektrische Einspeisesollgröße für die Fernwärme- und Industrie-KWK vorgegeben (Gesamtsolleinspeisung in  $\text{TWh}_{\text{el}}/\text{a}$ ). Mithilfe von KWK-Anlagenparametern und historischen Volllaststunden wird anschließend die elektrische Einspeisung von KWK-Anlagen in Industrienetzen (Industrie-KWK) hergeleitet. Danach wird für einen Startwert der Heizgrenze die Einsatzentscheidung bzw. Einspeisung von Fernwärme-KWK abgeleitet und die resultierende Gesamteinspeisung mit der vorgegebenen Gesamtsolleinspeisung abgeglichen. Die Heizgrenze wird danach iterativ angepasst, bis die gesamte KWK-Einspeisung im Marktgebiet sich der Vorgabe nähert. Im vierten Schritt werden die KWK-Einsatzrestriktionen bei Wärmeknoten mit mehreren KWK-Anlagen kostenminimal unter Einhaltung technischer Nebenbedingungen verrechnet. Abhängig von der jeweiligen technologischen Ausgestaltung einer KWK-Anlage liegt anschließend eine stündliche Zeitreihe der KWK-Einsatzrestriktionen je Anlage vor.



Abbildung 1: Verfahrensüberblick

### 3.2 Detaillierte Beschreibung einzelner Verfahrensschritte

Um den Raumwärmebedarf als Zeitreihe zu modellieren, ist vorab die Umgebungstemperatur beim Wärmeknoten abzuschätzen. Dazu werden im ersten Verfahrensschritt die räumlich nächstgelegenen Temperaturmessstationen ausgewählt (z. B. je Himmelsrichtung) und zum Wärmeknoten entfernungsgewichtet gemittelt. Als Ergebnis

bzw. Eingangsdatum für die nächsten Verfahrensstufen steht damit bei ausreichender Dichte der Messstationen eine stündliche Temperaturzeitreihe je Wärmeknoten zur Verfügung.

Auf Basis der Eingangsdaten für Industrie-KWK (Block, elektrische Leistung, Wärmebedarf) werden im zweiten Verfahrensschritt saisonal konstante KWK-Einsatzrestriktionen für diese Blöcke berechnet. Die Parametrierung richtet sich hier nach historischen Werten oder veröffentlichten Volllaststunden je Marktgebiet.

Den dritten Verfahrensschritt bildet die iterative Berechnung der Einsatzrestriktionen für Fernwärme-KWK. Für die Gesamtsolleinspeisung können beispielsweise historische Werte von eurostat verwendet werden [5]. Bei Einbezug von Verfügbarkeiten in einer anschließenden Strommarktssimulation sind hier die Werte entsprechend zu erhöhen.

Für den dritten Verfahrensschritt wird anschließend das Ablaufschema gemäß Abbildung 2 durchgeführt. Zunächst wird auf Basis der Temperaturzeitreihe, einer Startheizgrenze (beispielsweise 15°C) und dem Wärmeknoten der Heizbedarf anhand von Heizgradtagen berechnet. Heizgradtage sind dabei definiert durch die Summe der stündlichen positiven Temperaturdifferenzen zwischen Heizgrenze und Außentemperatur für einen Tag.

Danach wird die Einsatzentscheidung auf Basis der Heizgradtage getroffen und die resultierende Ist-Gesamterzeugung mit der Gesamtsolleinspeisung abgeglichen. Falls der aktuelle Einsatz eine Mehrerzeugung darstellt, wird die Heizgrenze verringert. Eine Mindererzeugung führt vice versa zu einer Erhöhung. Dabei wird mit einer Schrittweite beispielsweise von 5°C begonnen. Diese wird bei Richtungswechsel halbiert. Sobald die Gesamtsolleinspeisung getroffen wird, ist der Verfahrensschritt abgeschlossen. Die erreichte Heizgrenze dient anschließend als Plausibilisierungsgröße der Eingangsdaten. Außergewöhnlich hohe oder niedrige Werte deuten auf nicht plausible Eingangsdaten hin.

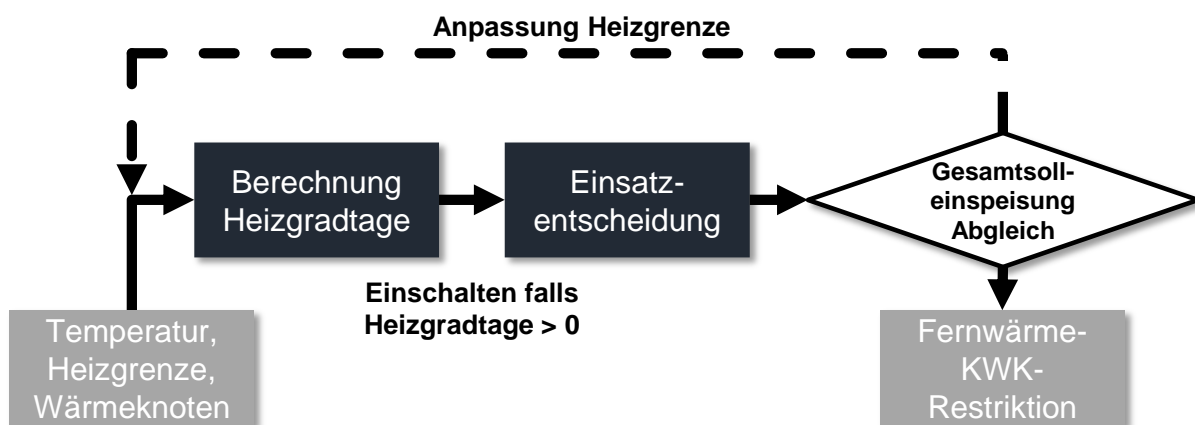


Abbildung 2: Ablaufschema für die Anpassung der Heizgrenze (dritter Verfahrensschritt)

Nach Herleitung der Einschaltentscheidungen werden bei mehreren KWK-Anlagen an einem Wärmeknoten die KWK-Einsatzrestriktionen innerhalb des Wärmeknotens verschoben. Dabei müssen die Gesamtsolleinspeisung sowie technische und betriebliche Nebenbedingungen wie beispielsweise die Leistungsgrenzen ( $P_{el,max}$  und  $P_{el,min}$ ) weiterhin eingehalten werden. Zudem müssen die verschobenen KWK-Einsatzrestriktionen insgesamt kostengünstiger ausfallen. Dazu wird je Wärmeknoten mit mehreren KWK-Anlagen geprüft,

ob die Einsatzrestriktion in einer KWK-Anlage wegfallen oder verringert werden kann und zum Ausgleich eine kostengünstigere KWK-Anlage eine höhere Einsatzrestriktion erhält.

Ergebnis des Verfahrens bilden KWK-Einsatzrestriktionen in Form der elektrischen Mindesterzeugung je KWK-Anlage. Auf Basis der technologischen Beschaffenheit (Entnahmekondensations- oder Gegendruckanlage) und der Einteilung in strom- und wärmegeführte Anlagen wird anschließend die Ausgestaltung der KWK-Einsatzrestriktion konkretisiert. Gegendruckanlagen und wärmegeführte Anlagen erhalten die gleiche Mindest- und Maximaleinspeisung als Vorgabe. Stromgeführte Entnahmekondensationsanlagen können mit ihrer elektrischen Leistung nach oben abweichen. Sofern sich durch die Wärmeauskopplung einer Entnahmekondensationsanlage die elektrische Leistung entsprechend den Leistungsgrenzen in einzelne Stunden verringern würde, können diese in den Restriktionen durch eine reduzierte elektrische Maximalleistung Berücksichtigung finden.

## 4 Exemplarische Untersuchungen

Um das neue Verfahren zur Herleitung von KWK-Einsatzrestriktionen zu plausibilisieren und die Realitätsnähe zu evaluieren, werden in Abschnitt 4.1 zunächst die KWK-Einsatzrestriktionen geprüft. Anschließend werden die Einsatzrestriktionen exemplarisch in einer europäischen Strommarktsimulation mit berücksichtigt und damit der Einfluss der KWK-Einsatzrestriktion auf den europäischen Kraftwerkseinsatz gezeigt.

### 4.1 Plausibilisierung von KWK-Einsatzrestriktionen

Auf Basis von öffentlich verfügbaren Temperaturmesswerten (Internetwetterportale, Veröffentlichungen von Flugplatzbetreibern und dem Deutschen Wetterdienst), einer vom IAEW recherchierten Kraftwerksdatenbank und der Gesamtsolleinspeisung von eurostat ist exemplarisch ein Szenario parametrisiert worden. Mit diesen Eingangsdaten ist das zuvor beschriebene Verfahren gemäß Abschnitt 3 durchgeführt und ausgewertet worden.

Die stündliche Außentemperatur als Eingangsdatum eines einzelnen Wärmeknotens mit einer angeschlossenen KWK-Entnahmekondensationsanlage sowie das Ergebnis in Form der minimalen und maximalen Einspeisung ist der folgenden Abbildung 3 (links) zu entnehmen. Aufgrund niedriger Außentemperaturen im Winter resultieren entsprechend hohe Raumwärmebedarfe und weiter auch ein KWK-Zwangseinsatz.

Die für das Verfahren vorgegebenen Gesamtsolleinspeisungen für die Marktgebiete Deutschland (DE), Frankreich (FR) und die Niederlande (NL) sind in Abbildung 3 (rechts) dargestellt. Die hergeleiteten Einsatzrestriktionen stimmen über alle KWK-Anlagen (Industrie und Fernwärme) und über alle Stunden des Jahres exakt mit der Vorgabe überein.

Folglich erstellt das entwickelte Verfahren im Zeitverlauf als auch aggregiert für ein Jahr plausible KWK-Einsatzrestriktionen für Anlagen in Industrie- als auch in Fernwärmenetzen. Die resultierenden stündlichen Einsatzrestriktionen für alle KWK-Anlagen können daher grundsätzlich in anschließende Strommarktsimulationen als Nebenbedingung eingehen.

Der aggregierte KWK-Zwangseinsatz im Winter kann in Situationen mit niedriger Residuallast als Must-Run-Erzeugung interpretiert werden. In der vorliegenden Rechnung ergibt sich für Deutschland im Januar (kältester Monat) eine KWK-Mindesteinspeisung

zwischen etwa 25 und 27 GW. Diese Schätzung liegt in der ähnlichen Größenordnung im Vergleich zu einer aktuellen Studie für die deutschen Übertragungsnetzbetreiber [8].

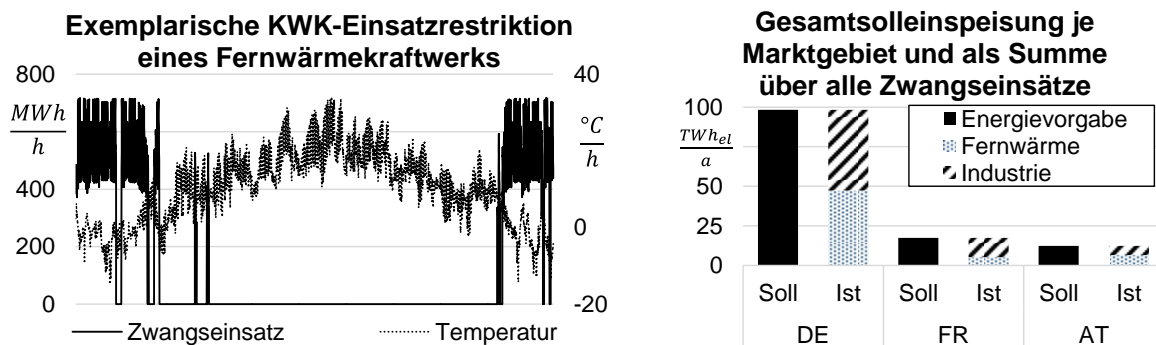


Abbildung 3: KWK-Einsatzrestriktion einer wärmegeführten Entnahmekondensationsanlage (links) und aggregierte KWK-Einsatzrestriktionen pro Jahr und Marktgebiet (rechts)

## 4.2 Marktsimulation mit KWK-Einsatzrestriktionen

Folgend werden mit den hergeleiteten KWK-Einsatzrestriktionen die Rückwirkungen auf den Kraftwerkseinsatz in Strommarktsimulationen evaluiert. Hierzu dienen zwei unabhängig voneinander durchgeführte Simulationsrechnungen: In der ersten Rechnung wird vollständig auf die Vorgabe von KWK-Einsatzrestriktionen verzichtet. Alle thermischen Kraftwerke inklusive der KWK-Anlagen werden rein strommarktbasierend eingesetzt (Basis). Für die zweite Rechnung wurden zunächst die KWK-Einsatzrestriktionen mit dem neuen Verfahren hergeleitet und damit die zweite Strommarktsimulation durchgeführt (Sensi). Damit bilden nur die KWK-Einsatzrestriktionen einen Unterschied zwischen beiden Rechnungen.

Für die Strommarktsimulation wird ein am IAEW entwickeltes und über mehrere Jahre stetig verbessertes Verfahren genutzt. Der Marktsimulationsansatz ist ursprünglich in [6] entwickelt worden. In [1] wurde er um eine detaillierte Regelleistungsabbildung erweitert (hier nicht betrachtet). Derzeit wird die Strommarktsimulation in [7] weiterentwickelt zur expliziten und modellendogenen Abbildung der thermischen Auskopplung von KWK-Anlagen (hier nicht betrachtet). Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine vereinfachte Marktsimulation als lineare Programmierung durchgeführt (entspricht dem ersten Verfahrensteil in [1], [6] und [7]).

Die Marktsimulation wurde für eine Vielzahl von Untersuchungen, die zum Beispiel im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber durchgeführt wurden, eingesetzt. Zielfunktion ist die Minimierung der Erzeugungskosten bei Vorgabe von Kraftwerkspark, EE-Einspeisung, Brennstoffpreisen und CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen zur Deckung einer Stromnachfrage unter Einhaltung technischer und betrieblicher Nebenbedingungen. Es werden alle konsequenten 8760 Stunden des Jahres geschlossen optimiert.

Eingangsdaten bilden hier ein blockscharfer vom IAEW recherchierter Datensatz zum europäischen Kraftwerkspark, Brennstoffpreise, CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise, Marktgebietszuschnitt, Übertragungsrestriktionen und Zeitreihen zur elektrischen Nachfrage für 2014. Auch die Zuordnung zu Wärmeknoten von KWK-Anlagen basiert auf öffentlich zugänglichen Daten. Alle KWK-Anlagen an jeweils einem Wärmeknoten decken gemeinsam dessen thermischen Bedarf (vgl. letzter Verfahrensschritt in Abschnitt 3.2). Als Wetterjahr für die Einspeisung aus

Windenergie- und Photovoltaikanlagen liegt das Jahr 2012 zugrunde. Der räumliche Betrachtungsbereich umfasst alle Marktgebiete im Bereich der ENTSO-E. Dementsprechend ist auch 2012 für das Temperatur- und Heizjahr ausgewählt.

KWK-Anlagen werden größtenteils mit Steinkohle und Erdgas befeuert. Zusätzlich sind Steinkohle- und Erdgaskraftwerke in Deutschland meistens preissetzend und stellen daher eine Herausforderung für fundamentale Strommarktsimulationen dar. Abbildung 4 zeigt die Stromerzeugung aus Erdgas- und Steinkohlekraftwerken (inklusive KWK-Erzeugung) in den beiden Simulationsrechnungen (Basis und Sensi) sowie die historischen Mengen gemäß ENTSO-E für Deutschland (DE) und die Anrainer Österreich (AT), Tschechien (CZ), Frankreich (FR), die Niederlande (NL) und Polen (PL).

Die KWK-Einsatzrestriktionen führen in der Marktsimulation zu einer deutlich höheren Erzeugung aus Erdgas von 16,3 TWh/a und zu erheblich weniger Erzeugung aus Steinkohle in Höhe von 27,1 TWh/a. Die historischen Erzeugungsmengen in AT, CZ, DE und PL werden durch diesen Abtausch deutlich besser getroffen.

Neben Abtauscheffekten innerhalb von Marktgebieten sind auch grenzüberschreitende Effekte auszumachen. Insbesondere in Marktgebieten mit hohen Anteilen an erdgasbefeuerten Kraftwerken ergeben sich deutliche Veränderungen im Einsatz und damit auch in den Handelsbilanzen: So resultierten die Einsatzrestriktionen in allen Marktgebieten in insgesamt 3,5 TWh/a niedrigeren Nettoexporten von Deutschland an die Anrainer.

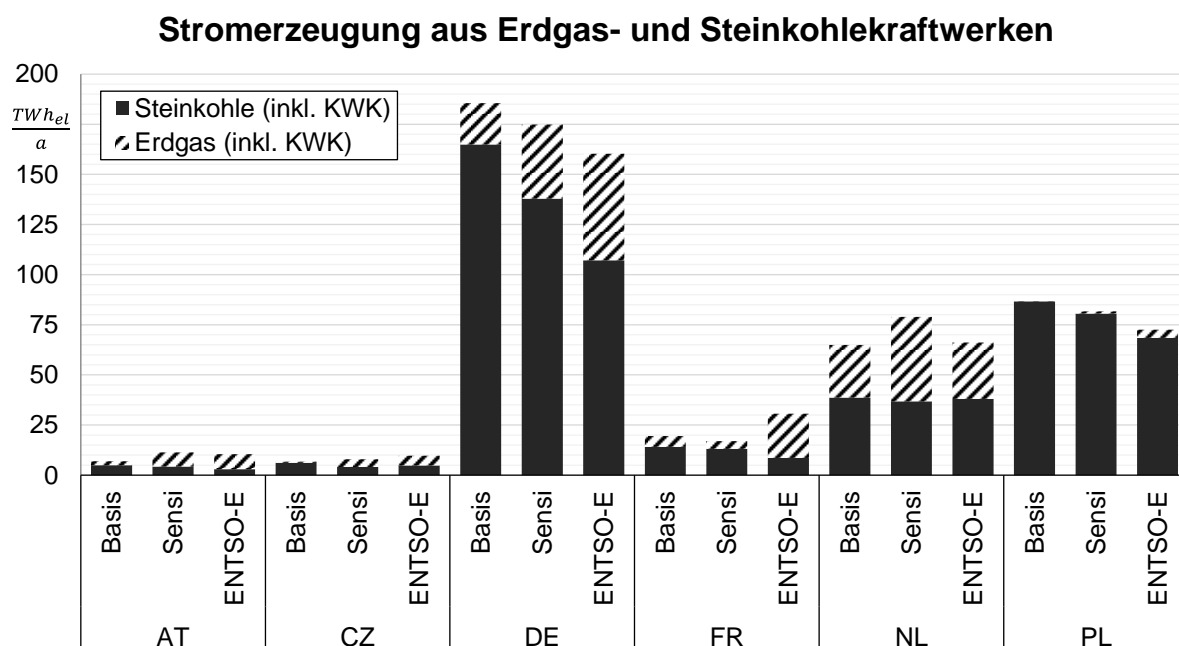


Abbildung 4: Vergleich elektrischer Jahreserzeugungsmengen aus Erdgas- und Steinkohlekraftwerken (inklusive KWK-Anlagen) für Deutschland und Anrainer (Auswahl) in der Strommarktsimulation mit und ohne KWK-Einsatzrestriktionen sowie historischen Mengen von der ENTSO-E in 2014

Neben dem realitätsnäheren Ergebnis konnten in den durchgeführten Simulationsläufen signifikante Unterschiede in der Rechenzeit festgestellt werden. Durch die Einschränkungen des zulässigen Lösungsraumes und die Vorwegnahme von Einschaltentscheidungen,



welche sich aus den KWK-Restriktionen ergeben, war eine Reduktion der Rechenzeit der Marktsimulation im zweistelligen Prozentbereich zu beobachten.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Einsätze thermischer Kraftwerke sind durch die Verdrängung von EE-Anlagen zunehmend durch weitere Randbedingungen, wie zum Beispiel die Temperatur, geprägt. KWK-Anlagen decken ihren temperaturabhängigen Wärmebedarf und sind damit im Strommarkt aktiv, auch wenn bei alleiniger Betrachtung des Strommarktes keine ausreichenden Anreize zum Betrieb vorhanden wären.

KWK-Anlagen in Wärmeversorgungssystemen können gleichwohl weitgehende Freiheitsgrade beim Einsatz haben. Diese ergeben sich durch alternative Anlagen zur Bedarfsdeckung wie Wärmespeicher, Heizwerke und Power-to-Heat-Anlagen.

Das neu entwickelte Verfahren ermittelt kraftwerksscharfe elektrische Arbeitspunktbereiche in stündlicher Auflösung für KWK-Anlagen, welche die bilanzielle Lastdeckung in deren Wärmeversorgungssystem sicherstellen. Zusätzlich werden Freiheitsgrade wie alternative Anlagen zur Wärmebereitstellung und deren Erzeugungskosten einbezogen.

Eine abschließende europäische Strommarktsimulation mit und ohne Einsatzrestriktionen zeigt auf, dass sich die Einsätze der Kraftwerke verschieben und die historischen Erzeugungsmengen je Marktgebiet besser getroffen werden. Durch die höhere Realitätsnähe kann ein deutlicher Mehrwert für Strommarktsimulationen erzielt werden. Beispielsweise können Fragestellungen bezüglich einer Must-Run-Erzeugung oder eines Netznutzungsfalls für weitere Untersuchungen wie Netzbetriebssimulationen fundierter beantwortet werden.

Für künftige Erweiterungen ist festzuhalten, dass eine explizite Abbildung des thermischen Bedarfs und der einzelnen Anlagen (Wärmespeicher, Heizwerke und Power-to-Heat) wünschenswert wäre, um die Sektorkopplung zwischen Strom- und Wärmeversorgung detailliert abzubilden und die Realitätsnähe weiter zu erhöhen.

## Literatur

- [1] Drees, T., *Simulation des europäischen Binnenmarktes für Strom und Regelleistung bei hohem Anteil erneuerbarer Energien*, ABEV Band 168, 2015
- [2] Richter, J., *DIMENSION – A Dispatch and Investment Model for European Electricity Markets*, EWI, Universität Köln, 2011
- [3] Meibom, P., Barth, R., Weber, C. et. al., *Wilmar Joint Market Model Documentation*, Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 2006
- [4] Schäfer, A., *Portfoliooptimierung in dezentralen Energieversorgungssystemen*, ABEV Band 152, 2013
- [5] eurostat, *Combined Heat and Power (CHP) data, Letztes Update am 24. November 2016* <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/4956229/CHP+data+2005-2013/62e87958-0b9a-4195-af70-356493e12233>, Abgerufen am 14. Januar 2017
- [6] Mirbach, T., *Marktsimulationsverfahren zur Untersuchung der Preisentwicklung im europäischen Strommarkt*, ABEV Band 128, 2009
- [7] Ketov, M., *Simulation der europäischen Strommärkte unter Berücksichtigung der Wärmeversorgung*, Jahresbericht des IAEW, ABEV Band 169, 2016
- [8] Consentec, *Konventionelle Mindesterzeugung – Einordnung, aktueller Stand und perspektivische Behandlung*, Untersuchung im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, 2016