

Perspektiven der Kraft-Wärme- Kopplung im Rahmen der Energie- wende

Sabine Gores

Ralph O. Harthan

Hauke Hermann

Charlotte Loreck

Dr. Felix Chr. Matthes

Berlin, 10. April 2013

Öko-Institut e.V.

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
D-10179 Berlin
Tel.: +49-30-40 50 85-380
Fax: +49-30-40 50 85-388

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Tel.: +49-61 51-81 91-0
Fax: +49-61 51-81 91-33

Geschäftsstelle Freiburg

Merzhauser Str. 173
D-79100 Freiburg
Tel.: +49-761-452 95-0
Fax: +49-761-452 95 - 88

www.oeko.de

Förderhinweis

Diese Analyse wurde finanziell vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert.

Die Förderer übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen der Förderer übereinstimmen.

Zusammenfassung

In diesem Bericht wird ein Überblick über die zukünftige Entwicklung der KWK-Anlagen gegeben mit dem Fokus auf deren Funktion in einem Strommarkt, der zunehmend von erneuerbaren Energien geprägt ist. Dabei wird nach der Betrachtung der bisherigen Entwicklung ein Bogen gespannt von den Einschätzungen zu den Potenzialen der KWK über die derzeitigen wirtschaftlichen Aspekte zu ersten Überlegungen über verschiedene Einsatzmöglichkeiten der KWK. Mit einem anschließenden Blick auf deren Energie- und CO₂-Einspareffekte endet der Bericht dann mit einem abschließenden Fazit zu der zukünftigen Perspektive dieser Anlagen.

Bei der Entwicklung der KWK seit 2003 ist ein Anstieg der KWK-Stromerzeugung zu verzeichnen, der den KWK-Anteil an der Netto-Stromerzeugung von 13 auf 16 % steigen ließ. Die größten Zubauraten sind dabei im Bereich der biogenen Stromerzeugung zu verzeichnen, vor allem durch die Förderung durch das EEG.

Die Einschätzungen zu der Entwicklung der netzgebundenen Wärmeversorgung und den Potenzialen der KWK-Stromerzeugung unterscheiden sich stark zwischen verschiedenen Studien. In der Zusammenschau der Studien mit Hilfe des Medians lässt sich erkennen, dass die netzgebundene Wärmenutzung ab 2020 im Sinken begriffen ist, wohingegen sich bei der KWK-Stromerzeugung ein Anstieg bis 2020 abzeichnet und dort erst ab 2030 von einer Abnahme ausgegangen werden kann.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit Hilfe des COGIX wird gezeigt, dass die Bepreisung der CO₂-Emissionen einen deutlich positiven Effekt auf die Deckungsbeiträge aller Arten von KWK-Anlagen hat, solange sie am Markt mit der Stromerzeugung aus Brennstoffen mit höherer CO₂-Intensität konkurrieren. Während der Einfluss der Stromkennzahl sich als sehr gering zeigt, beruht die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen grundsätzlich entscheidend auf deren Auslastung. Das Fazit aus dieser Betrachtung ist, dass große Erdgas-betriebene KWK-Anlagen nur mit zusätzlichen Einkommensströmen wirtschaftlich dargestellt werden können.

Schließlich werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten von KWK-Anlagen in Hinblick auf deren Einsatz in einem von fluktuierenden Energieträgern dominierten Strommarkt betrachtet. Dabei stehen die Flexibilitätsoptionen eines zusätzlichen Wärmespeichers, eines Heizkessels aber auch die direkte Wärmeerzeugung über Strom im Mittelpunkt der Betrachtungen. Während diese Flexibilitätsoptionen zuerst unter der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit erfolgen, schließen sich daran Erkenntnisse aus einer modellgestützten Analyse an, die mit dem Modell PowerFlex durchgeführt wurden.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt überschlägig und berücksichtigt keine Fördermittel, sie bietet aber durch die Betrachtung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit von den Strompreisen ein geeignetes Hilfsmittel, um die Positionierung der KWK-Anlagen am Strommarkt abzuschätzen. Deutlich wird dabei, dass ein Wärmespeicher durch die erhöhte Nutzungsdauer der KWK-Anlage die Wirtschaftlichkeit deutlich erhöhen kann, insbesondere bei hohen Strompreisen. Heizkessel stellen nur in einem kleinen Strompreisbereich die attraktivste Wärmeerzeugungsoption dar, während der Ein-

satz von elektrischen Widerstandsheizungen bei niedrigen Strompreisen eine wirtschaftliche Wärmeerzeugungsoption darstellen kann. Entscheidend bei dieser überschlägigen Betrachtung ist die Anzahl der Stunden im hoch- und niederpreisigen Segment der Stromkosten.

Mit den modelltheoretischen Überlegungen kann dargestellt werden, wie der Einsatz von Wärmespeichern den KWK-Anteil erhöht und den Einsatz von Heizkesseln reduziert. Insbesondere kann aber auch gezeigt werden, dass die Menge an überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien gesenkt werden kann und die Nutzung der Wärmespeicher bis zum Szenarienhorizont (2030) deutlich ansteigen wird. Insgesamt unterstützen die Ergebnisse damit die Einschätzung, dass sich durch die verstärkte Einspeisung erneuerbarer Energien die Flexibilitätsanforderungen an stromerzeugende Anlagen erhöhen werden und dass KWK-Anlagen durch den Einsatz von Wärmespeichern einen interessanten Beitrag leisten können.

Bei der Betrachtung der CO₂-Einsparungen durch KWK-Anlagen wird deutlich, dass diese stark abhängig ist von den spezifischen CO₂-Emissionen der Referenzsysteme, die mit der gekoppelten Betriebsweise verglichen werden. Dieses macht im Umkehrschluss deutlich, dass mit sinkenden durchschnittlichen CO₂-Emissionen des Stromsystems (wie durch den steigenden Anteil der erneuerbaren Energien zu erwarten ist) der diesbezügliche Vorteil der fossilen KWK-Stromerzeugung in Zukunft deutlich sinken wird. Die Stärke dieser Anlagen wird damit zukünftig vor allem in der flexiblen Bereitstellung der Residuallast liegen. In der Einzelsystemanalyse werden anschließend verschiedene Flexibilitätsoptionen hinsichtlich der Auswirkungen auf die CO₂-Einsparungen analysiert: Der Einsatz von Wärmespeichern verstärkt die Einspar-effekte nahezu proportional zur Verlängerung der Betriebsstunden der Anlagen, wobei dieser Effekt besonders bei kleinen Anlagen zum Tragen kommt, da diese (im rein wärmegeführten Betrieb) oftmals mit geringen Benutzungsstunden betrieben werden. Bei einer zusätzlichen Wärmeabfuhr über das Dach sind die Einspar-effekte von den Strom-Wirkungsgraden der Anlagen im Verhältnis zu denen des Referenzsystems abhängig.

Der Einsatz von elektrischen Widerstandsheizungen sollte nur im Falle eines Überangebotes von erneuerbaren Energien am Markt erfolgen. Da dieses Situation noch nicht oft eintritt und im Zweifelsfall vor allem die Gefahr besteht, dass Strom aus Braunkohlekraftwerken zur Wärmeerzeugung verwendet wird, was einen verheerenden ökologischen Effekt bewirken würde, werden schließlich Überlegungen zur Höhe des CO₂-Preises angestellt, die diese Effekte angemessen bepreisen würden. Da diese erheblich über den derzeitigen Preisen für CO₂-Zertifikate liegen ist das Fazit, dass derzeit von einer solchen Option Abstand zu nehmen ist.

Diese Studie stellt an einigen Stellen nur anfängliche Betrachtungen an, die in verschiedener Weise in folgenden Arbeiten vertieft werden könnten. Vor allem steht dabei die Fragestellung nach einer möglicherweise strompreisstabilisierenden Wirkung von KWK-Anlagen im Vordergrund, wenn diese flexibel und lastangepasst betrieben werden und nicht wie derzeit – auch durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen gestützt – im Must-run-Betrieb.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
1 Einleitung	9
2 Derzeitiger Stand der KWK	11
3 Potenziale der KWK	14
4 Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen	18
5 Einsatzmöglichkeiten der KWK im Energiesystem	21
5.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verschiedener Flexibilitätsoptionen	23
5.2 Modellgestützte Analyse	27
5.3 Thesen zur Nutzung der KWK im künftigen Energiesystem	31
6 Energie- und CO₂-Einspareffekte durch KWK	33
6.1 CO ₂ -Einspareffekteallgemein	33
6.2 Bewertung von Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität	35
6.3 Weiterer Forschungsbedarf	38
7 Fazit	40
8 Referenzen	43
8.1 Literatur	43
8.2 Datenbasen	44
Anhang	45
Modellbeschreibung PowerFlex	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Beiträge zur Primärenergieeinsparung bis 2020	9
Abbildung 3-1	Potenziale für netzgebundene Wärme	15
Abbildung 3-2	Potenziale für die KWK-Stromerzeugung.....	16
Abbildung 4-1	KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX 2003-2011.....	19
Abbildung 5-1:	Deckungsbeiträge verschiedener Erzeugungstechnologien in Abhängigkeit des Strompreises.....	25
Abbildung 5-2:	Vergleich des KWK-Anteils zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)	28
Abbildung 5-3:	Vergleich des Anteils der Wärmeerzeugung in Kesseln am gesamten Wärmebedarf zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)	29
Abbildung 5-4:	Vergleich des Anteils der Wärmeeinspeisung aus Wärmespeichern am gesamten Wärmebedarf zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)	30
Abbildung 5-5:	Vergleich überschüssiger erneuerbarer Energien zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)	31
Abbildung 6-1	Notwendiger CO ₂ -Preis um zu verhindern, dass elektrische Widerstandsheizungen mit Braunkohlestrom betrieben werden.....	38

Tabellenverzeichnis

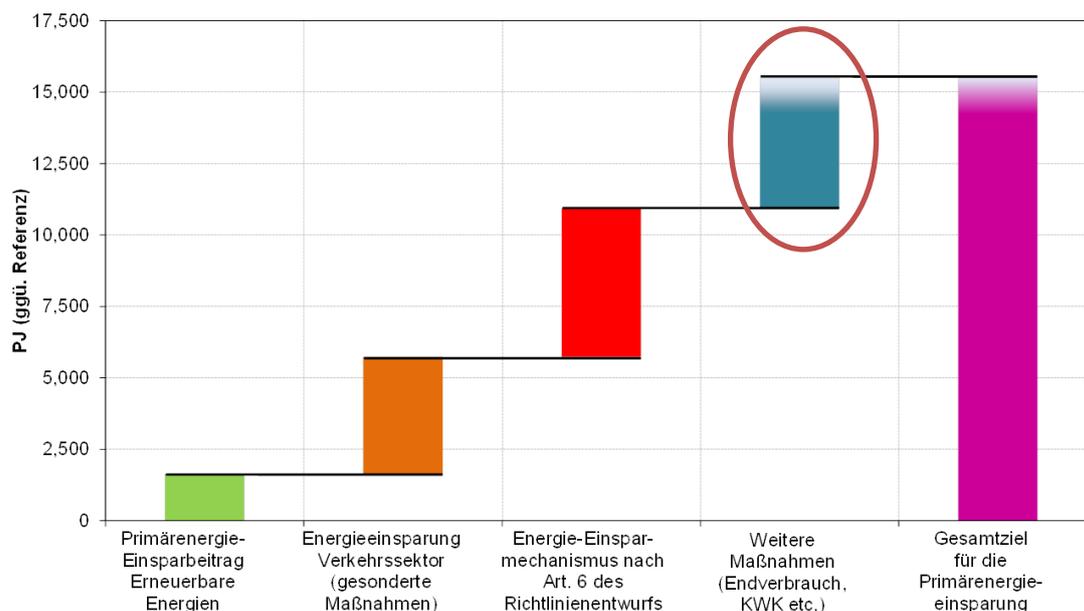
Tabelle 2-1	KWK-Stromerzeugung 2003-2010	11
Tabelle 2-2	CO ₂ -Einsparung durch KWK-Erzeugung.....	12
Tabelle 5-1	Rahmendaten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen einer flexiblen KWK-Anlage, 2020	23
Tabelle 6-1	Vergleich eines statischen und dynamischen Referenzsystems	33
Tabelle 6-2	Emissionseinsparung verschiedener Anlagentypen.....	34
Tabelle 6-3	CO ₂ -Einsparungen durch Verwendung eines Speichers und bei Wärmeabfuhr über das Dach	36

1 Einleitung

Für die Umsetzung des Energiekonzepts, wie es in der Mitte des Jahres 2011 beschlossen wurde, ist ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Energien als Alternative zur Kernkraft erforderlich, ebenso wie massive Anstrengungen bei der Strom- und Wärmeeinsparung. Diese beiden Pfeiler bewirken wesentliche Änderungen im Strom- und Wärmemarkt, mit denen sich Investoren derzeit konfrontiert sehen. So werden Anlagen, die heute neu gebaut werden, innerhalb ihrer geplanten Laufzeit am Strommarkt mit einem Anteil an erneuerbaren Energien aus überwiegend variablen Quellen von über 50 % konkurrieren müssen. Auf der anderen Seite werden die Einsparungen des Energiebedarfs auf dem Wärmemarkt und bei elektrischen Geräten beträchtlich sein, so dass sich die Lastprofile signifikant ändern werden.

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als Technologie zur effizienten Energienutzung kann – neben den Primärenergiespareffekten des Ausbaus erneuerbarer Energien, den verkehrs- und anderen endenergiebedingten Maßnahmen – einen wichtigen Beitrag leisten. In Abbildung 1-1 ist der Beitrag der KWK z.B. zur Erreichung des EU-Effizienzziels (20 % ggü. Referenzszenario (BAU) bis 2020) dargestellt.

Abbildung 1-1 Beiträge zur Primärenergieeinsparung bis 2020



Quelle: Matthes 2011

Auf der anderen Seite bietet der Einsatz der KWK auch verschiedene Flexibilitätsoptionen, die einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Strom- und Wärmeversorgung leisten können.

KWK-Anlagen sind deshalb eine der Optionen, mit denen in der nächsten Dekade die ausfallenden Kapazitäten der aus politischen Gründen auslaufenden Kernkraftwerke und der aus wirtschaftlichen Gründen abgehenden fossilen Kraftwerke ersetzt werden

können. Insgesamt ist in diesem Zeitraum mit einem Neubau von ca. 5-10 GW_{el} zu rechnen.

Andererseits stehen derzeit Investoren von KWK-Anlagen durch deren Einsatz auf zwei verschiedenen Marktsystemen (Strom und Wärme) vor der doppelten Herausforderung, die Entwicklungen auf beiden Märkten einschätzen zu müssen. So wird der massive Ausbau von erneuerbaren Energien und der steigenden Stromeffizienz zu einer deutlich sinkenden Auslastung führen, bei einem zunehmenden Auseinanderlaufen von Wärmebedarfs- und Residuallast-Profilen.

Diese Unsicherheiten, zusammen mit sich zum Teil verschärfenden Rahmenbedingungen, wie dem Abschmelzen der kostenlosen Zuteilung für KWK-Wärmeproduktion im Rahmen des EU ETS oder die Diskussion um die Abschaffung der vermiedenen Netznutzungsentgelte (vNNE), wirken hemmend auf die Investitionsentscheidung, zumal die wirtschaftliche Darstellbarkeit, auch auf Grund steigender Investitionskosten, nicht immer eindeutig gesichert ist. Die Förderung durch das KWKG stellt in diesem Zusammenspiel (vor allem nach der Novelle 2012) eine entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen dar.

In dem hier vorliegenden Bericht soll deshalb in einer Rundschau mögliche Perspektiven für die KWK aufgezeichnet werden: Ausgehend vom derzeitigen Stand der KWK-Nutzung werden die Potenziale dargestellt, die für die KWK in verschiedenen wissenschaftlichen Betrachtungen quantifiziert wurden. Anschließend erfolgt ein Blick auf die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen, wobei vor allem größere KWK-Anlagen auf Erdgasbasis betrachtet werden. In Kapitel 5 werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten der KWK im Energiesystem aus zwei verschiedenen Blickwinkeln untersucht, die in Thesen zur Nutzung der KWK münden. In Kapitel 6 erfolgt eine Betrachtung der Energie- und CO₂-Einspareffekte der KWK für das Gesamtsystem aber auch in Bezug auf die zuvor betrachteten Flexibilitätsoptionen. Daran anschließend werden Ideen für weitergehende Untersuchungen aufgeführt. Abschließend folgt ein Fazit, das von der zukünftigen Rolle der KWK über verschiedene Einzelaspekte einen Bogen schlägt zu den daraus folgenden Konsequenzen für rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen.

2 Derzeitiger Stand der KWK

Im Jahr 2010 betrug die KWK-Stromerzeugung 93 TWh, rund 16 % der gesamten Netto-Stromerzeugung von Deutschland. Seit dem Jahr 2003 ist sie kontinuierlich angestiegen, insgesamt um 23 %. Dabei nahm die KWK-Stromerzeugung in den beiden größten Bereichen, nämlich der allgemeinen Versorgung und der industriellen Kraftwirtschaft, in diesem Zeitraum jedoch nur um 13 % zu. Deutlich stärkere Zuwächse sind in den Bereichen der vorwiegend kleineren Anlagen zu verzeichnen, nämlich den kleinen fossil betriebenen KWK-Anlagen unter 1 MW installierter Leistung und den biogenen KWK-Anlagen unter, aber auch über 1 MW (in den folgenden Tabellen geführt unter der Rubrik „Außerhalb der Tab 066 und 067“).

Tabelle 2-1 KWK-Stromerzeugung 2003-2010

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	TWh							
KWK-Stromerzeugung	75,6	77,2	80,0	82,5	82,6	86,2	85,4	93,1
Nach Bereichen								
Nach StBA, Tab 066 und 067	73,8	75,3	77,9	79,8	77,6	79,5	77,0	83,2
Allgemeine Versorgung	50,3	52,4	52,3	54,0	51,9	53,8	50,5	53,4
Industrielle Kraftwirtschaft	23,5	22,9	25,6	25,8	25,8	25,7	26,6	29,8
Außerhalb der Tab 066 und 067	1,8	2,0	2,1	2,8	5,0	6,7	8,4	9,9
Kleine fossile KWK	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,7	2,9	3,3
Biogene KWK	0,0	0,0	0,0	0,5	2,5	4,0	5,5	6,6
Fossil / biogen								
fossil	74,4	75,4	76,7	78,0	76,4	78,4	75,3	81,0
biogen	1,9	2,4	3,2	4,3	6,3	8,2	10,4	12,1
Netto-Stromerzeugung gesamt	566	574	579	594	594	594	552	586
KWK-Anteil	13%	13%	14%	14%	14%	14%	15%	16%

Quelle: Öko-Institut 2012a.

Die Daten der allgemeinen Versorgung und der industriellen Kraftwirtschaft können seit dem Jahr 2003 den Tabellen 066 und 067 des Statistischen Bundesamtes entnommen werden. Demnach ist die KWK-Stromerzeugung der industriellen Kraftwirtschaft im betrachteten Zeitraum sogar um 27 % angestiegen, die der allgemeinen Versorgung nur um 6 %. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es zwischen den beiden Gruppen immer wieder durch z.B. Betreiberwechsel zu Umbuchungen von einzelnen Kraftwerken kommt, die das Ergebnis entscheidend beeinflussen können. Es ist deshalb im Verlauf der Zeitreihe angezeigt, die Summe der beiden zu betrachten. Deutlich zu erkennen ist, dass die KWK-Stromerzeugung dieser beiden Sektoren von der wirtschaftlichen Entwicklung abhängig ist: so ist z.B. im Jahr 2009 ein erheblicher Einbruch der KWK-Erzeugung offensichtlich. Eine Abhängigkeit von der Gradtagszahl konnte ausgeschlossen werden (Öko-Institut 2012a).

Die KWK-Stromerzeugung außerhalb der statistischen Erfassung zeigt einen kontinuierlichen, starken Anstieg von 1,8 auf 9,9 TWh von 2003 bis 2010. Dieser beruht zum einen auf dem verstärkten Einsatz fossiler BHKW unter 1 MW. Da aus methodischen

Gründen Anlagen unter 1 MW in den statistischen Daten nicht enthalten sind, wird für die Quantifizierung dieser Entwicklung die BHKW-Umfrage des Öko-Instituts verwendet, mit der seit dem Jahr 2002 detailliert der Absatz von BHKW verfolgt wird. Besonders stark ist jedoch die biogene KWK-Stromerzeugung außerhalb der Erfassung der Tabellen 066 und 067 angestiegen. Bei dieser muss davon ausgegangen werden, dass nicht nur Anlagen unter, sondern auch über 1 MW zusätzlich zu den statistischen Werten zu berücksichtigen sind, da die Erfassung durch die statistischen Landesämter in den letzten Jahren dem rasanten Ausbau in diesem Bereich nicht nach kommt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des KWK-Monitorings eine Methode zur Ermittlung der zusätzlichen biogenen KWK-Stromerzeugung entwickelt, die einen Anstieg auf 6,6 TWh im Jahr 2010 in den letzten fünf Jahren aufzeigt. Insgesamt stieg damit die biogene KWK-Stromerzeugung auf 12,1 TWh, etwa 13 % der gesamten KWK-Stromerzeugung.

Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme spart gegenüber ungekoppelten Prozessen durch den höheren Gesamtwirkungsgrad Brennstoff und damit CO₂ ein. Entscheidend für die Quantifizierung der CO₂-Einsparung ist dabei das betrachtete Referenzsystem für die ungekoppelte Strom- und Wärme-Erzeugung, für das verschiedene methodische Ansätze verwendet werden können. Einen entscheidenden Einfluss hat außerdem der eingesetzte Brennstoff, da z.B. eine Kohle-KWK-Anlage stets höhere CO₂-Emissionen aufweist als eine ungekoppelte biogene Erzeugung.

Für eine übergreifende Betrachtung müssen die Referenzsysteme den gesamten ungekoppelten Erzeugungs-Mix abbilden. Im Rahmen des KWK-Monitorings wurde dazu ein statisches Referenzsystem gewählt, das auf einer Betrachtung der Verdrängung anderer Arten der Stromerzeugung beruht. Durch die spezifische Ausgestaltung der Vereinbarung zum KWK-Monitoring mussten die Vergleichssysteme für die ungekoppelte Erzeugung auf das Jahr 1998 referenziert werden: Für das Strom-Referenzsystem wurden Emissionsfaktoren in der Bandbreite von 770 bis 860 g CO₂/kWh und für das Wärme-Referenzsystem ein Emissionsfaktor von 295 gCO₂/kWh festgelegt. Damit ergibt sich eine CO₂-Einsparung von 47,5 Mio. t CO₂ für die gesamte KWK-Strom- und Wärmeerzeugung im Jahr 2010. Die Ergebnisse über die gesamte Zeitreihe für das niedrigere Strom-Referenzsystem ist getrennt nach den vier Bereichen in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2 CO₂-Einsparung durch KWK-Erzeugung

Eingesparte CO ₂ -Emissionen durch KWK-Erzeugung	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Mio. t CO ₂							
Gesamt	27,4	29,1	33,7	37,4	40,2	42,4	42,5	47,5
davon nach StBA, Tab 066 und 067	26,3	28,0	32,4	35,4	35,7	35,9	34,3	37,8
Allgemeine Versorgung	14,6	16,4	18,9	22,1	21,8	21,8	19,5	20,5
Industrielle Kraftwirtschaft	11,7	11,6	13,5	13,3	13,9	14,1	14,8	17,2
Außerhalb der Tab 066 und 067	1,1	1,1	1,2	2,0	4,6	6,5	8,3	9,8
Kleine fossile KWK	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	2,0
Biogene KWK	0,0	0,0	0,0	0,7	3,1	4,9	6,5	7,8

Quelle: Öko-Institut 2012a.

Die im Jahr 2010 installierte KWK-Leistung betrug knapp 29 GW, wobei etwa 15 GW auf Dampfturbinen und 10 GW auf Gasturbinen entfallen. Die restlichen knapp 4 GW wurden durch Motoren und sonstige Anlagen bereitgestellt. Im Verlauf der Jahre 1998 bis 2010 blieb die Dampfturbinenleistung etwa konstant, wohingegen erhebliche Zuwächse im Bereich der Gasturbinen (knapp 30 %) und der Motoren (80 %) zu verzeichnen sind (Öko-Institut 2012a).

3 Potenziale der KWK

Für die Einschätzung des Potenzials der KWK in Deutschland sind zahlreiche Faktoren entscheidend, da sich KWK-Anlagen im Spannungsfeld mehrerer Systeme befinden, deren Entwicklung wiederum von verschiedenen Annahmen abhängt und die entscheiden das Potenzial der KWK beeinflussen.

Zum einen bestimmt die **Entwicklung des Wärmebedarfs** in den verschiedenen Sektoren das KWK-Potenzial: Es ist davon auszugehen, dass im Zuge der Anstrengungen zum Klimaschutz der Gebäudewärmebedarf mehr oder weniger schnell und stark sinken wird. Von dieser Entwicklung sind vor allem Nah- und Fernwärmenetze betroffen, die besonders für den Einsatz von KWK-Anlagen geeignet sind¹, deren Planung jedoch den sinkenden Bedarf berücksichtigen muss. Ein weiterer wichtiger Sektor ist die Industrie, deren KWK-Potenzial vor allem auf dem Bedarf an Nieder- und Mitteltemperaturwärme (Warmwasser, Raumwärme und Prozesswärme bis 500 °C) beruht.

Des Weiteren ist das KWK-Potenzial von der **Entwicklung des Strommarktes** abhängig, die die Nachfrage- als auch die Angebotsseite betrifft. So führen stromseitige Effizienzsteigerungen einerseits zu einer sinkenden Stromnachfrage. Andererseits konkurrieren KWK-Anlagen als Stromerzeuger auf dem Strommarkt gegen Kondensationskraftwerke sowie die stark steigende Einspeisung aus erneuerbaren Energien.

Vor diesem Hintergrund ist die Ermittlung eines theoretischen KWK-Potenzials nicht zielführend, entscheidend für den mittel- und langfristigen Ausbau und Einsatz der KWK ist das wirtschaftliche Potenzial der KWK-Anlagen. Diese wird zum einen bestimmt durch die **Preisentwicklung** auf der Brennstoff- und der Ertragsseite (Wärmelerlöse). So sind die Entwicklung des Strompreises und des Erdgaspreises wichtige Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit der KWK (Kapitel 4). Darüber hinaus stellen verschiedene **Förderinstrumente** wie das KWKG oder das EEG wichtige Erlösquellen dar. Des Weiteren beeinflusst der Emissionshandel die KWK-Stromerzeugung durch besondere Zuteilungsregeln, aber auch durch Auswirkungen des CO₂-Zertifikatspreises auf den Strompreis.

Die Realisierung der technisch machbaren und wirtschaftlichen Potenziale kann des Weiteren durch diverse Hemmnisse administrativer, informeller und personeller Art behindert werden, eine Zusammenstellung dazu ist in UBA (2007) aufgeführt.

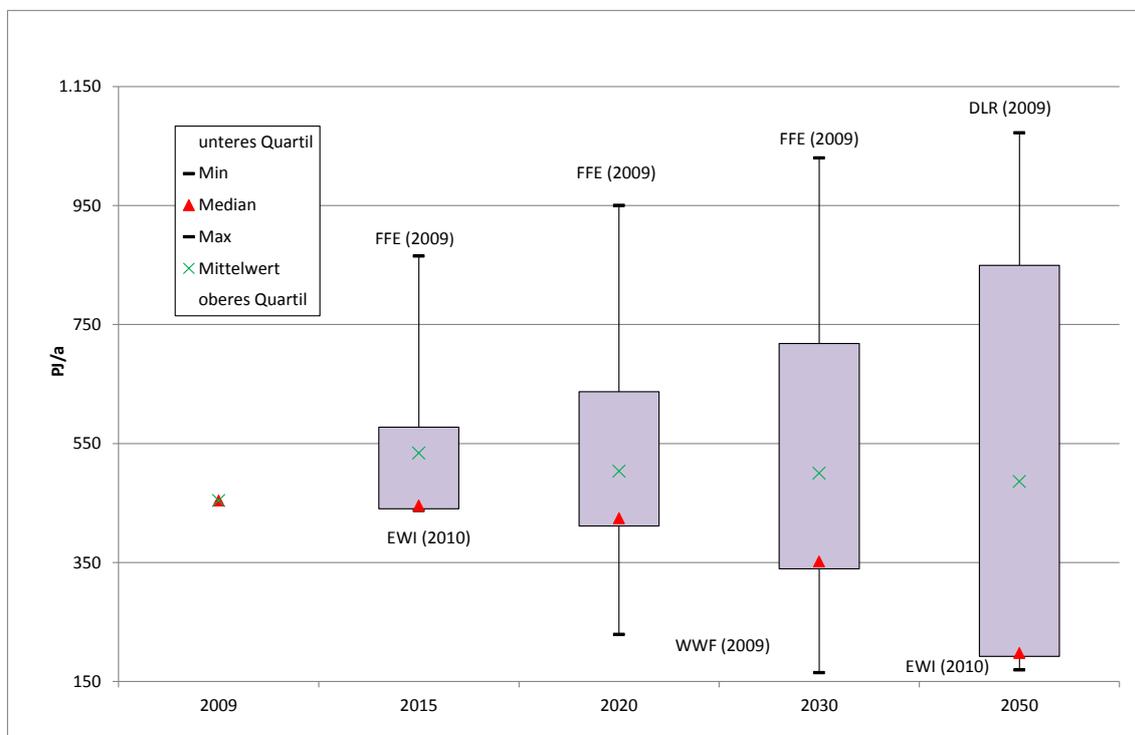
Damit entscheiden zahlreiche Faktoren über den Einsatz und die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen, deren zukünftige Entwicklungen für den jeweiligen Investor zum Teil nur schwer einschätzbar sind. Vor diesem Hintergrund gibt es zahlreiche, stark divergierende Einschätzungen zum zukünftigen Potenzial der KWK in Deutschland. Potenziale für den verstärkten Einsatz der KWK liegen im Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung sowie der Erschließung noch nicht erschlossener Potenziale in der Industrie.

¹ Derzeit wird gut 70 % der Fernwärmeerzeugung in öffentlichen Netzen durch KWK-Anlagen bereitgestellt (Öko-Institut 2012b).

Netzgebundene Wärme

Im Rahmen eines Projekts über den künftigen KWK-Ausbau (Öko-Institut 2012b) wurden zehn Studien zur Entwicklung der netzgebundenen Wärmeversorgung ausgewertet. Der prognostizierte Fernwärmeabsatz differiert stark je nach Ansatz der Studie. In Abbildung 3-1 sind die Bandbreiten der Ergebnisse überblicksartig dargestellt. Ausgehend von einer Fernwärmeversorgung von rund 450 PJ im Jahr 2009 (AGEB) zeigt sich eine zunehmende Spreizung, die bis zum Jahr 2050 von 165 (EWI 2010) bis 1.030 PJ (DLR 2009) reicht. Der arithmetische Durchschnittswert zeigt dabei nach einem kleinen Anstieg bis 2015 einen Rückgang auf den Wert von 2009 im Jahr 2050. Betrachtet man jedoch den Median, der Extremwerte dämpft und damit „Ausreißern“ eine schwächere Gewichtung gibt als der Durchschnittswert, zeigt sich eine abnehmende Tendenz, besonders deutlich ab 2020, auf nur noch etwa 200 PJ im Jahr 2050.

Abbildung 3-1 Potenziale für netzgebundene Wärme



Quelle: Öko-Institut 2012b.

Dieses Ergebnis entspricht der Einschätzung, dass mittelfristig (ab 2020) der abnehmende Gebäudewärmebedarf den Bedarf an netzgebundener Wärme senken wird.

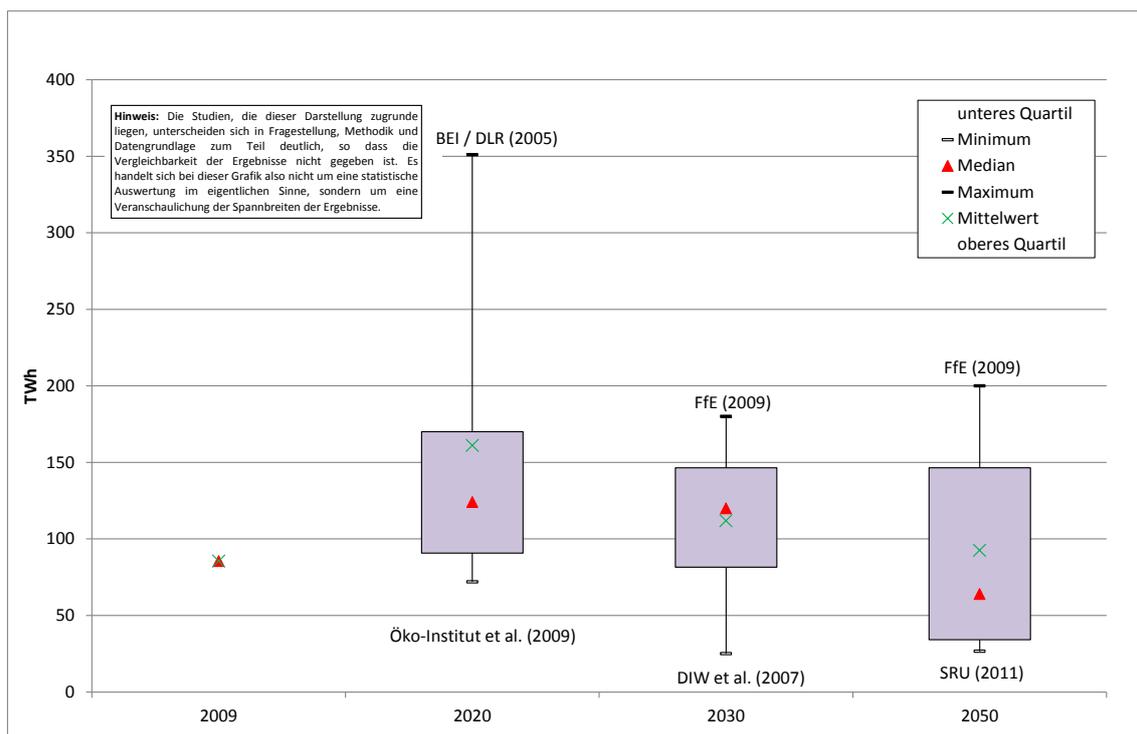
Industrie

Nach Ziesing (2008) existiert in Deutschland ein wirtschaftlich erschließbares Potenzial zwischen 87 und 122 TWh_e/a. Nach der Leitstudie 2011 wird ein Maximalwert von 55 TWh im Jahr 2025 prognostiziert, fast eine Verdopplung des Niveaus im Jahr 2010. Der größte Zuwachs wird dabei bei den Energieträgern Erdgas und Biomethan erwartet. Bis 2050 sinkt die KWK-Stromerzeugung nach der Leitstudie auf 38 TWh.

KWK-Stromerzeugung

Ebenfalls im Rahmen des Projektes über den künftigen KWK-Ausbau (Öko-Institut 2012b) wurde eine Analyse des Potenzials der KWK-Stromerzeugung durchgeführt (Abbildung 3-2). Ausgehend von 85 TWh (Öko-Institut 2012) im Jahr 2009 zeigt sich eine erhebliche Spreizung der Einschätzungen für das Jahr 2020 sowie ein schmalerer Korridor für die Jahre 2030 und 2050. Der Median lässt einen Anstieg bis zum Jahr 2020 auf rund 125 TWh erwarten, einem Wert, der knapp der Zielvorgabe eines Anteils der KWK-Stromerzeugung von 25 % an der gesamten Stromerzeugung im Jahr 2020 entspricht. In der langfristigen Entwicklung zeichnet sich eine abnehmende KWK-Stromerzeugung ab, die 2050 unter der KWK-Stromerzeugung des Jahres 2009 liegt.

Abbildung 3-2 Potenziale für die KWK-Stromerzeugung



Quelle: Öko-Institut 2012b.

Diese Entwicklung des Medians der KWK-Stromerzeugung ist analog zum abnehmenden Wärmebedarf für netzgebundene Wärme, lässt sich aber auch als Reaktion auf die Verringerung des Strombedarfs durch stromseitige Effizienzsteigerung erklären.

Biogene KWK

Wie in Kapitel 2 erwähnt, zeigte die KWK-Stromerzeugung besonders im Bereich der biogenen Stromerzeugung erhebliche Zuwächse in den letzten Jahren. Der Zubau in diesem Segment wird mittel- bis langfristig vor allem durch die Verfügbarkeit von Biomasse bestimmt werden. Nach der Leitstudie 2011 (Nitsch et al. 2012, S. 83) stehen in Deutschland Biomassen mit einem (Primär-)Energiegehalt von maximal 1.550 PJ/a zur nachhaltigen Nutzung zur Verfügung. Davon können nach dieser Studie rund 1.100 PJ/a für die Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden, der Rest wird für die Verwendung von Biokraftstoffen eingesetzt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der KWK-Anteil bei Biomasseanlagen von derzeit 50 % auf rund 80 % steigen wird. Damit steigt die biogene KWK-Stromerzeugung nach der Leitstudie 2011 auf etwa 48 TWh_{el} im Jahr 2050², bei knapp 12 TWh im Jahr 2010.

Abgesehen davon, dass in anderen Studien wie z.B. WWF (2009) geringere nachhaltige Gesamtpotenziale für Bioenergie in Deutschland ermittelt werden (2050: 1.200 PJ/a, S. 27), besteht zusätzlich eine Nutzungskonkurrenz mit der stofflichen Nutzung von Biomasse, beispielsweise als Ersatz für Rohölprodukte in der Industrie, die in dieser Betrachtung vernachlässigt wurde. Auch dadurch, dass Biomasse-Anlagen vor allem im ländlichen Raum zu finden sind, bei dem die geringe Siedlungsdichte selten einen hohen Wärmenutzungsgrad zulässt, erscheint die angesetzte Steigerung des KWK-Anteils auf 80 % recht hoch. Vielmehr könnten in Zukunft verstärkt Anlagen zur Aufbereitung von Biogas gebaut werden, die durch Einspeisung in das Erdgasnetz eine Nutzung der Biomasse am Ort der Wärmesenke ermöglichen.

Weitere Faktoren

Weitere Möglichkeiten für den verstärkten Einsatz von KWK-Anlagen bestehen zum einen durch den Einsatz von **Wärmespeichern**, die eine Flexibilisierung der Stromerzeugung und damit eine Erhöhung der KWK-Anteile ermöglicht (Kapitel 5). Die damit einhergehende mögliche stromgeführte Betriebsweise kann einen Beitrag zum Lastmanagement im Stromsektor darstellen. Zum anderen können zusätzliche Potenziale in der **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung** für einen erweiterten und effizienten Einsatz von KWK-Anlagen sorgen. Diese Anlagen haben sich jedoch wirtschaftlich noch nicht durchsetzen können, so dass deren zukünftiges Potenzial noch nicht abschätzbar ist.

² 80% der biogenen Stromerzeugung von 60 TWh_{el}. Des Weiteren wird ein Wert von 57,3 TWh für biogene KWK angegeben.

4 Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen

Die wirtschaftliche Attraktivität von KWK-Anlagen ergibt sich aus der Entwicklung auf dem Strom- und Brennstoffmarkt für Kraftwerke, dem Wärmemarkt im Bereich der zu beliefernden Kunden und dem Markt für CO₂-Emissionsberechtigungen. Zudem ist für Neuinvestitionen der Anlagenmarkt relevant.

Um die komplexen Zusammenhänge für die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen zu verdichten, wurde für den Verband kommunaler Unternehmen (VKU) der KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX (COGenerationIndex) entwickelt (Matthes 2012). Dieser Indikator wird auf der Basis aktueller Energie- und CO₂-Marktdaten entwickelt und repräsentiert größere KWK-Anlagen auf Erdgasbasis, die im Großhandelsmarkt für Strom aktiv sind oder aktiv sein können. Der KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX ist eine Maßzahl für die durch KWK-Anlagen erwirtschaftbaren Deckungsbeiträge bei standardisierten Rahmenbedingungen. Die Entwicklung des COGIX erlaubt damit einerseits Aussagen über die wirtschaftliche Situation des Betriebes bestehender KWK-Anlagen, die vor allem ihre laufenden Kosten erwirtschaften müssen und andererseits eine Einordnung der Wirtschaftlichkeit von Neuinvestitionen in hocheffiziente KWK-Anlagen. Der COGIX wird auf monatlicher Basis aktualisiert und kann mit jeweils aktuellen Energie- und CO₂-Preisprojektionen auch für die Zukunft fortgeschrieben werden.

Die erzielbaren Deckungsbeiträge bilden im Strommarkt die wichtigste Entscheidungsgröße. Sie werden als Differenz zwischen den Erträgen und den kurzfristigen Grenzkosten des Anlagenbetriebs definiert. Damit wird eine bestehende Anlage nur betrieben, wenn positive Deckungsbeiträge erwirtschaftet werden können, Investitionen in eine neue Anlage hingegen erfolgen nur, wenn mit den Deckungsbeiträgen auch fixe Betriebskosten sowie Investitionskosten erwirtschaftet werden können.

Positive Deckungsbeiträge für KWK-Anlagen werden nur dann erzielt, wenn die spezifischen Erträge für die Strom- und Wärmeenergieerzeugung auf dem jeweils relevanten Markt größer sind als die Grenzkosten der Produktion, wobei die Brennstoffkosten und CO₂-Emissionsberechtigungen die wesentlichen Determinanten darstellen. Damit stellt das Konzept des COGIX die Erweiterung des „Green sparkspread“ um die Einkommensströme aus dem Absatz der in KWK erzeugten Wärme dar. Der COGIX bezieht sich auf mit Erdgas betriebene KWK-Anlagen, deren Betriebsweise sich an den Großhandelsmärkten orientiert. Für Anlagenkonzepte hingegen die auf Endverbrauchsmärkte zugeschnitten sind, erlaubt er wegen der vielfältigen Einsatzparameter und der erheblichen Unsicherheiten keine ausreichend repräsentativen Aussagen.

Aus den Ergebnissen der COGIX-Berechnung über die erwirtschafteten Deckungsbeiträge kann der „anlegbare Barwert“ ermittelt werden. Für einen wirtschaftlichen KWK-Betrieb oder eine Neuinvestition in eine KWK-Anlage muss dieser Barwert mindestens die fixen Betriebskosten bzw. die Kapitalkosten decken. Dabei wird ein jeweils über 15 Jahre ermittelter Barwert bei Diskontraten von 8 und 12 % berechnet.

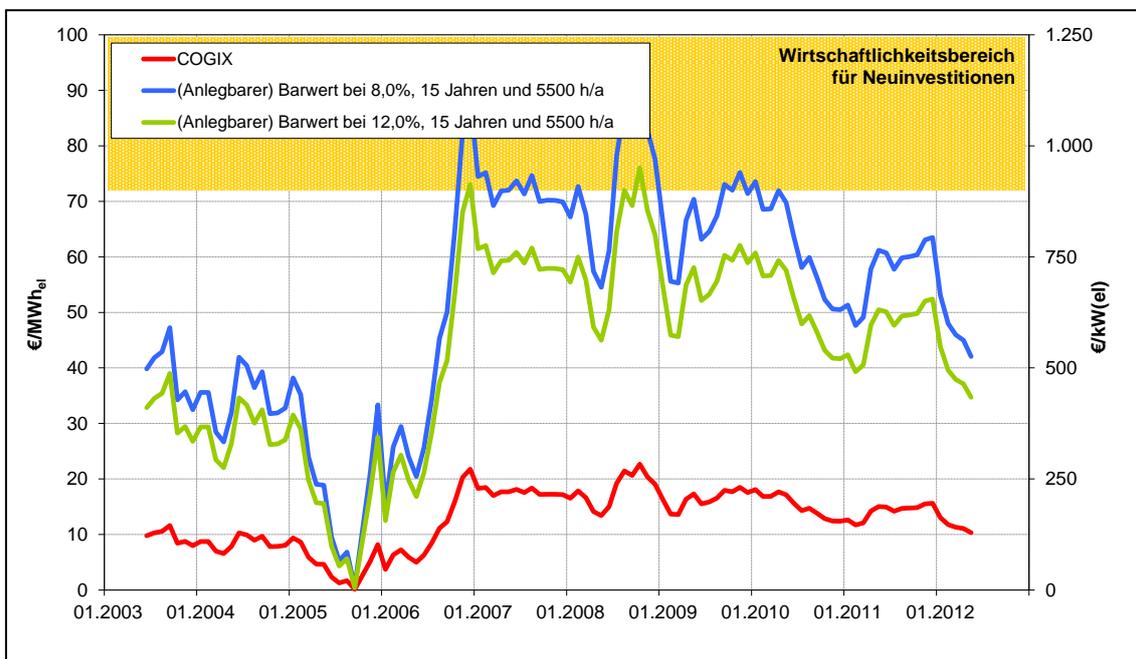
Für eine als repräsentativ definierte KWK-Anlage wird ein Gesamtnutzungsgrad von 0,85 angesetzt mit einer Stromkennzahl von 1,0, wodurch sich ein elektrischer Wir-

kungsgrad von 42,5 % ergibt (Matthes/Ziesing 2011). Der Großhandelspreis für Base-Lieferungen im Terminmarkt für das jeweils nächste Kalenderjahr wird als Referenzrahmen für den zu erzielenden Strompreis der KWK-Anlagen angesetzt. Analog dazu werden für die Kosten der CO₂-Zertifikate die monatlichen Mittelwerte der Terminkontrakte für das jeweils folgende Kalenderjahr verwendet. Desgleichen werden für den Gasbezug die entsprechenden Gas-Lieferkontrakte für die COGIX-Berechnung genutzt, wobei hier zusätzlich die Kosten für Netznutzung berücksichtigt werden, die im Wesentlichen mit einem Aufschlag von 4 €/MWh berücksichtigt wird. Die Wärmeerlöse werden auf der Basis der Erdgaspreise (frei Kraftwerk) abgeschätzt, die mit einem Faktor von 30 % beaufschlagt werden (Matthes/Ziesing 2011).

Die Berechnungen zeigen, dass die Bepreisung der CO₂-Emissionen einen deutlich positiven Effekt auf die Deckungsbeiträge der KWK-Anlagen hat. Der Einfluss der Stromkennzahl zeigt sich als sehr gering, da geringere elektrische Wirkungsgrade durch höhere Erlöse auf der Wärmeseite weitgehend kompensiert werden können.

Auf Grundlage der verfügbaren Energiemarktdaten wird der COGIX seit 2003 berechnet. Die **wirtschaftliche Situation der KWK** ist in Bezug auf den Strom-, Erdgas- und CO₂-Markt in der Gesamtschau durch eine **erhebliche Dynamik** gekennzeichnet, wobei sich im Verlauf der Jahre 2009, 2010 und 2011 die Rahmenbedingungen im Vergleich zu den Vorjahren etwas stabilisiert haben (Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1 KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX 2003-2011



Quelle: Matthes 2012

Im gesamten betrachteten Zeitraum schwankt der durch moderne KWK-Anlagen erwirtschaftbare Deckungsbeitrag (COGIX) zwischen etwa null und 22 €/MWh. Er lag damit durchgehend im positiven Bereich, was bedeutet, dass der wirtschaftliche Betrieb von KWK-Bestandsanlagen im Analysezeitraum durchgehend gesichert war.

Die Berechnung der anlegbaren Barwerte zeigt, dass allein marktgetriebene Investitionen kaum darstellbar sind, denn Investitionskosten in neue KWK-Anlagen liegen derzeit zwischen 900 und 1.250 €/kW. Seit Anfang 2009 zeichnen sich jedoch selbst für eine niedrigere Verzinsung keine ausreichenden Deckungsbeiträge ab. KWK-Anlagen können damit nur mit zusätzlichen Einkommensströmen wirtschaftlich dargestellt werden. Diese wichtigste zusätzliche Erlösquelle ist vor allem die Förderung im Rahmen des KWKG, aber auch die kostenlose Zuteilung von Emissionsberechtigungen im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems sowie die Erträge aus der Honorierung vermiedener Netzkosten.

Während der COGIX Aussagen über die Wirtschaftlichkeit großer Erdgas-betriebener KWK-Anlagen erlaubt, können durch Sensitivitätsberechnungen generelle Erkenntnisse über den Einfluss der einzelnen Parameter auf die finanzielle Darstellbarkeit von Anlagen getroffen werden (siehe dazu Ziesing 2012).

So beruht die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen grundsätzlich entscheidend auf der Auslastung, also der Anzahl der Vollbenutzungsstunden der Anlagen. Jedoch wirken sich auch steigende CO₂-Preise positiv auf KWK-Anlagen auf Erdgas- oder Biomasse-Basis aus, da sie am Markt mit der Stromerzeugung aus Brennstoffen mit höherer CO₂-Intensität konkurrieren. Dieses gilt auch für kleine Anlagen, die nicht innerhalb des Emissionshandelssystems Zertifikate erwerben müssen.

Kürzere Planungszeiträume und sinkende Strom- und Wärmeerlöse gefährden die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen, ebenso wie ein möglicher Wegfall der vermiedenen Netznutzungsentgelte, aber auch geringere Zuteilungen von Emissionsberechtigungen im Rahmen des Emissionshandels. Zusätzlich hemmend wirken die massiven Preissteigerungen im Anlagenmarkt, die Steigerungen der Investitionskosten von ca. 30 % für große Anlagen beobachten lassen, wodurch ein großer Teil des KWKG-Fördereffektes erodiert wird (Matthes 2012).

5 Einsatzmöglichkeiten der KWK im Energiesystem

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in einer mittel- bis langfristigen Perspektive der Bedarf an zusätzlicher konventioneller Stromerzeugung beschränkt sein wird, da insbesondere der verstärkte Zubau erneuerbarer Energien einen Großteil der Stromerzeugung der außer Betrieb gehenden Kraftwerke kompensiert. So zeigen Ergebnisse eines laufenden Forschungsprojektes (Öko-Institut 2012c), dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Referenzszenario (Aktuelle-Politiken-Szenario, APS) von 98 TWh im Jahr 2008 auf 310 TWh im Jahr 2030 zunehmen wird. Auf der anderen Seite führen Effizienzmaßnahmen dazu, dass die gesamte Stromerzeugung im Szenarienerverlauf sinkt (von 597 TWh im Jahr 2008 auf 531 TWh). In einem zweiten Szenario, das von weitergehenden energiepolitischen Maßnahmen ausgeht (Energiewende-Szenario, EWS), erreicht die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 316 TWh im Jahr 2030. Die Gesamtstromerzeugung geht sogar auf 461 TWh zurück.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Wärmenachfrage, insbesondere im Raumwärmebereich, aufgrund von Energieeffizienzmaßnahmen (Gebäudedämmung usw.) weiter zurückgehen wird. So nimmt der Endenergiebedarf für die Bereiche Raumwärme und Warmwasser im APS um 8 % zwischen 2008 und 2030 ab, im EWS sogar um 30 %.

Der grundsätzlich zu erwartende Rückgang der konventionellen Stromerzeugung und der Wärmenachfrage deckt sich mit den langfristigen Erwartungen bezüglich der KWK-Strom- und Wärmeerzeugung (Kapitel 3).

Historisch wurden KWK-Anlagen oft als „Must-run“-Anlagen betrachtet, deren Stromproduktion als Koppelprodukt für die Deckung der Wärmenachfrage anfiel. Bedingt durch die Liberalisierung werden KWK-Anlagen verstärkt nach den Erfordernissen des Marktes eingesetzt. Vor dem Hintergrund sinkender Strom- und Wärmenachfragen kommt damit der Flexibilitätsbereitstellung von KWK-Anlagen im künftigen Energiesystem eine besondere Bedeutung zu.

So können KWK-Anlagen eine Leistungsreserve für das Stromsystem bereitstellen. Diese umfasst zum einen positive oder negative Regelleistung für den kurzfristigen Ausgleich ungeplanter Abweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch. Dieses System ist bereits heute im größeren Leistungsbereich etabliert. In der längeren Frist könnten KWK-Anlagen auch zur Bereitstellung von Backup-Leistung in einem von einer starken Durchdringung mit erneuerbaren Energien geprägten System bereitstellen. Dies bedeutet, dass KWK-Anlagen insbesondere zu den Zeiten Strom erzeugen, in denen keine Erzeugung aus erneuerbaren Energien bereitsteht (beispielsweise bei einer mehrtägigen Windflaute). Beiden Möglichkeiten ist gemein, dass die KWK-Anlagen aus technischer Sicht grundsätzlich die Fähigkeit besitzen müssen, strommarktorientiert zu produzieren.

Ein strommarktorientierter Betrieb von KWK-Anlagen ist dann möglich, wenn die KWK-Anlage Flexibilität in Bezug auf die Strom- und Wärmeerzeugung aufweist. So können Entnahme-Kondensations-Kraftwerke flexibel zwischen KWK- und Kondensationser-

zeugung variieren. In Zeiten hoher Wärmenachfrage wird ein Teil des Dampfes von verschiedenen Turbinenstufen angezapft und über den Wärmetauscher zur Produktion von Nutzwärme geleitet. In Zeiten geringer Wärmenachfrage (oder hoher Stromnachfrage) kann entsprechend mehr Dampf über die Turbinen zur Stromerzeugung geleitet werden. Gegendruckanlagen wiederum haben eine feste Kopplung von Strom- und Wärmeerzeugung und weisen in diesem Sinne keine Flexibilität auf. Eine Veränderung der Stromerzeugung geht damit immer mit einer entsprechenden Veränderung der Wärmeerzeugung einher, die gegebenenfalls ausgeglichen werden muss.

Des Weiteren können KWK-Anlagen (sowohl Entnahme-Kondensations-Anlagen als auch Gegendruck-Anlagen) strommarktorientiert betrieben werden, sofern sie über alternative Wärmeerzeuger verfügen. So können KWK-Anlagen, die über einen zusätzlichen Heizkessel verfügen, in Zeiten, in denen sich eine Vermarktung am Strommarkt nicht lohnt (geringe Strompreise, hohe Einspeisung erneuerbarer Energien) oder negative Regelleistung bereitgestellt werden muss, Wärme über den Kessel erzeugen. Grundsätzlich können auch andere Arten von Wärmequellen diese Funktion erfüllen. So kann im genannten Fall hoher Einspeisung erneuerbarer Energien über die direkte Wärmeerzeugung durch Strom (elektrische Widerstandsheizungen) oder Wärmepumpen Wärme bereitgestellt werden, sodass die KWK-Anlage nicht betrieben werden muss. Der Einsatz von Spitzenlastkesseln ist im Objektbereich bereits jetzt üblich. Bei kleinen BHKW wird derzeit hingegen teilweise statt eines Spitzenkessels eine direkte Heizfunktion mit Hilfe einer Heizpatrone (elektrische Widerstandsheizung) in der Anlage vorgesehen, mit der auf einen kurzzeitigen hohen Wärmebedarf reagiert werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Flexibilisierung des Betriebs von KWK-Anlagen ist die Errichtung von Wärmespeichern. Schon heute kann das Fernwärmenetz Wärmeeinspeisung und -entnahme über einen bestimmten Zeitraum abpuffern. Sofern KWK-Anlagen mit Wärmespeichern ausgestattet werden, so können diese verstärkt strommarktorientiert betrieben werden, da die Wärmenachfrage nicht stets zeitgleich durch die KWK-Anlage gedeckt werden muss. Mit dieser Konfiguration kann die KWK-Anlage in Zeiten hoher Strom- aber geringer Wärmenachfrage vollständig im KWK-Modus betrieben werden, wobei die Wärme jedoch teilweise in den Wärmespeicher geleitet wird. In Zeiten hoher Wärmenachfrage kann dem Speicher vermehrt Wärme entnommen werden, ohne dass die KWK-Anlage notwendigerweise produzieren muss. Die Konfiguration mit Wärmespeichern kann ebenfalls mit weiteren Wärmequellen (Heizkessel, elektrische Widerstandsheizungen, Wärmepumpen, andere Wärmequellen (z.B. solarthermisch)) kombiniert werden und so die Flexibilität weiter erhöhen.

Im Folgenden sollen zunächst verschiedene Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen angestellt werden, um zu bewerten, wie die verschiedenen Flexibilisierungsoptionen von KWK-Anlagen aus Kostengründen priorisiert werden könnten (Abschnitt 5.1). In einer modellgestützten Analyse wird untersucht, welcher Flexibilitätsnutzen durch Kessel und Wärmespeicher bereitgestellt werden kann (Abschnitt 5.2). In Abschnitt 5.3 werden die Ergebnisse dieser beiden Analysen in Form von Thesen zusammengefasst.

5.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verschiedener Flexibilitätsoptionen

Bereits heute gibt es KWK-Anlagen, die ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen. So veröffentlichten die Stadtwerke Düsseldorf am 02.07.2012 per Pressemitteilung zentrale Eckdaten ihres erdgasgefeuerten GuD-Neubauprojekts³. Das Projekt zeichnet sich durch hohe elektrische Wirkungsgrade, eine hohe elektrische Leistung und eine große Stromkennzahl aus. Die vorgesehene Gasturbine ist sehr flexibel und kann im Rahmen eines Schnellstarts nach 10 Minuten eine Leistung von 350 MW erbringen. Insofern handelt es sich um eine „vorbildliche“, da effiziente und flexible Anlage.

Im Folgenden soll nun auf Basis dieser Angaben untersucht werden, welche Grenzkosten die KWK-Anlage aufweist und wie sie entsprechend am Strommarkt eingesetzt wird. Anschließend soll bewertet werden, wie diese Anlagen in Bezug auf die erzielbaren Deckungsbeiträge im Vergleich zum Einsatz anderer Optionen zur Wärmebereitstellung zu bewerten sind. Hierbei soll der mögliche Einsatz eines Wärmespeichers, einer elektrischen Widerstandsheizung oder eines Heizkessels im Jahr 2020 betrachtet werden. Die Rahmendaten für die Berechnung sind in Tabelle 5-1 angegeben.

Tabelle 5-1 Rahmendaten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen einer flexiblen KWK-Anlage, 2020

Installierte Leistung (stromgeführt)	MW _{el}	595
Wirkungsgrad elektrisch (stromgeführt)	%	61%
Thermische Leistung	MW _{th}	975
Gesamtnutzungsgrad	%	85%
Wärmeauskopplung	MW _{th}	300
Installierte Leistung (wärmegeführt)	MW _{el}	529
Wirkungsgrad elektrisch (wärmegeführt)	%	54%
Wärmeauskopplung	MW _{th}	300
Erdgaspreis (plant gate 2020)	Euro / MWh _{th}	40
Anlegbarer Wärmepreis	Euro / MWh _{th}	52
Kosten Erdgas	Euro / MWh _{el}	74
Wärmegutschrift	Euro / MWh _{el}	30
Grenzkosten Stromproduktion (mit Wärmegutschrift)	Euro / MWh _{el}	44
Grenzkosten Wärmeproduktion Kessel	Euro / MWh _{th}	40
Grenzkosten Wärmeproduktion Tauchsieder	Euro / MWh _{th}	Strompreis

Quelle: Stadtwerke Düsseldorf, eigene Berechnungen Öko-Institut.

KWK-Anlage

Für den Erdgaspreis wurde für das Jahr 2020 ein Preis von 40 €/MWh_{th} frei Kraftwerk basierend auf Öko-Institut (2012d) angenommen. Der anlegbare Wärmepreis beträgt

³ <http://www.swd-ag.de/unternehmen/erzeugungsanlagen/lausward.php>.

52 €/MWh oder das 1,3-fache des Erdgaspreises frei Kraftwerk (Matthes/Ziesing 2011). In Tabelle 5-1 wurden die kurzfristigen Grenzkosten der KWK-Anlage berechnet:

- Für die Stromerzeugung hat die KWK-Anlage im wärmegeführten Betrieb Erdgaskosten in Höhe von 74 €/MWh_{el}⁴.
- Gleichzeitig erwirtschaftet die KWK-Anlage eine Wärmegutschrift in Höhe von 30 €/MWh_{el}. Dabei wird berücksichtigt, dass pro MWh Strom etwa 0,57 MWh Wärme produziert werden (Nutzwärmeleistung durch elektrische Leistung im wärmegeführten Betrieb).
- Durch Subtraktion ergeben sich kurzfristige Grenzkosten von 44 €/MWh_{el}.

Dies bedeutet, dass die Anlage immer dann am Strommarkt eingesetzt werden kann, d.h. positive Deckungsbeiträge erwirtschaftet, wenn der Spotpreis höher als 44 €/MWh_{el} ist⁵. Wenn der Strompreis niedriger als 44 €/MWh_{el} ist, kann die Anlage am Strommarkt nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Heizkessel

Für einen typischen Heizkessel werden eine Ausführung in Brennwertechnik und ein Wirkungsgrad von 100 % unterstellt. Basierend auf dem genannten Erdgaspreis von 40 €/MWh_{th} und der Erdgassteuer in Höhe von 5,5 €/MWh ergeben sich kurzfristige Grenzkosten der Wärmebereitstellung des Heizkessels in Höhe von 45,5 €/MWh_{th}. Damit erzielt ein Kessel stets einen Deckungsbeitrag von 6,5 €/MWh (anlegbarer Wärmepreis abzüglich Kosten für Erdgas).

Elektrische Widerstandsheizung

Für die elektrische Widerstandsheizung wird vereinfacht angenommen, dass der Wirkungsgrad ebenfalls 100 % beträgt. In diesem Fall entsprechen die kurzfristigen Grenzkosten der Wärmebereitstellung der elektrischen Widerstandsheizung dem Strompreis. Damit erlöst eine elektrische Widerstandsheizung immer dann positive Deckungsbeiträge, wenn der Strompreis niedriger als 52 €/MWh liegt. Je niedriger der Strompreis, desto höher der Deckungsbeitrag.

Abbildung 5-1 fasst die Deckungsbeiträge von KWK-Anlagen, Heizkessel und elektrische Widerstandsheizungen in Abhängigkeit vom Strompreis zusammen. So kann eine KWK-Anlage insbesondere dann wirtschaftlich betrieben werden, wenn der Strompreis höher als 44 €/MWh ist. Ab einem Strompreis von ca. 50 €/MWh stellt die KWK-Anlage die Wärmeerzeugungsoption mit dem höchsten Deckungsbeitrag dar. Damit profitiert eine KWK-Anlage grundsätzlich von hohen Strompreisen. Die elektrische Widerstandsheizung wiederum erzielt positive Deckungsbeiträge bis zu einem Strompreis von ca. 52 €/MWh. Bis zu einem Strompreis von ca. 45 €/MWh stellt er die Wärmeer-

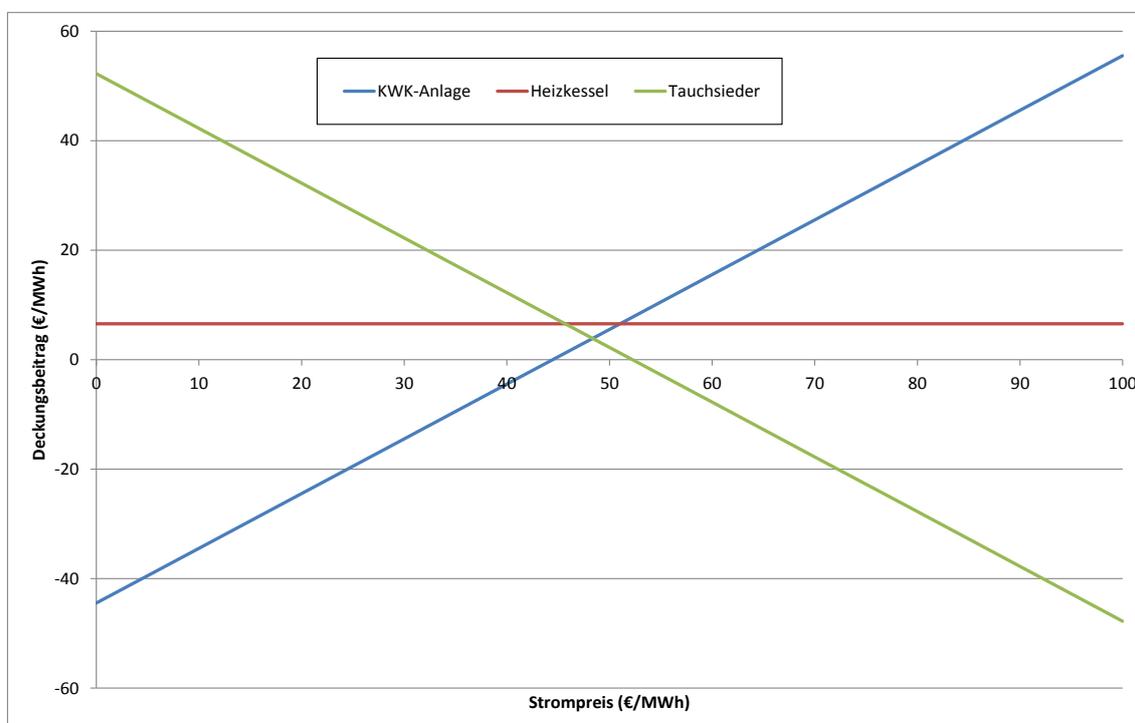
⁴ Berechnet aus dem Erdgaspreis und dem Wirkungsgrad im wärmegeführten Betrieb.

⁵ Der mögliche Einfluss der KWK-Förderung, vermiedener Netznutzungsentgelte und des CO₂-Preises wurde hier nicht berücksichtigt.

zeugungsoption mit dem höchsten Deckungsbeitrag dar. Damit profitiert die elektrische Widerstandsheizung grundsätzlich von niedrigen Strompreisen und ist damit komplementär zur KWK-Anlage. Der Deckungsbeitrag des Heizkessels hängt nur vom Wärmeerlös und dem Erdgaspreis (zzgl. Steuern) ab und ist damit vom Strompreis unabhängig. Er kann durchgängig mit einem positiven Deckungsbeitrag betrieben werden. Allerdings stellt er nur in dem Bereich eines Strompreis von 45 €/MWh bis 50 €/MWh die Erzeugungsoption mit dem höchsten Deckungsbeitrag dar.

Im Folgenden soll nun die Wirtschaftlichkeit eines Wärmespeichers diskutiert werden. Diese erfolgt jedoch separat von KWK-Anlage, Heizkessel und elektrischer Widerstandsheizung, da es sich hierbei um keine Erzeugungsoption, sondern lediglich um eine Option zur zeitlichen Verlagerung der Wärmeeinspeisung handelt.

Abbildung 5-1: Deckungsbeiträge verschiedener Erzeugungstechnologien in Abhängigkeit des Strompreises



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Wärmespeicher

Für einen Wärmespeicher wird angenommen, dass dieser in Verbindung mit einer KWK-Anlage gebaut und als Tagesspeicher ausgelegt wird, der über die Differenz zwischen dem Preis für Be- und Entladen (abzüglich eventueller Speicherverluste) mit jedem Ladezyklus Deckungsbeiträge erwirtschaften kann. Wenn der Strompreis höher als die kurzfristigen Grenzkosten der KWK-Anlage sind und kein Wärmebedarf vorliegt, sollte der Wärmespeicher „beladen“ werden; wenn der Strompreis zu niedrig ist, um die KWK-Anlage zu betreiben und Wärmebedarf besteht, sollte der Speicher

„entladen“ werden. Der Deckungsbeitrag, der dem Speicher zugerechnet werden kann, ergibt sich aus der Differenz des Strompreises und der kurzfristigen Grenzkosten der KWK-Anlage (unter Vernachlässigung der Speicherverluste) zum Zeitpunkt der Beladung für den Fall, dass die KWK-Anlage die Wärme nicht direkt in das Wärmenetz abgeben kann⁶. Damit kann ein Wärmespeicher die Betriebsdauer von KWK-Anlagen erhöhen. Die daraus resultierenden zusätzlichen Deckungsbeiträge der KWK-Anlage sowie des vermiedenen Kessel Einsatzes werden folglich dem Wärmespeicher zugerechnet.

Zwischenfazit

Aus dieser Analyse können folgende Schlussfolgerungen für das Jahr 2020 abgeleitet werden:

- KWK-Anlagen stellen eine kostengünstige Option für die Wärmebereitstellung oberhalb eines Strompreisniveaus von ca. 45 bis 50 €/MWh dar.
- Sofern es viele Stunden mit hohen Strompreisen gibt, zu denen jedoch keine Wärmenachfrage besteht, so kann ein Wärmespeicher die Betriebsdauer von KWK-Anlagen erhöhen und damit generell die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen einschließlich Wärmespeicher erhöhen.
- Elektrische Widerstandsheizungen stellen eine wirtschaftliche Wärmeerzeugungsoptionen bei niedrigen Strompreis unterhalb von 45 bis 50 €/MWh dar.
- Heizkessel erzielen grundsätzlich positive Deckungsbeitrag stellen jedoch nur in einem kleinen Strompreisbereich (45 bis 50 €/MWh) die attraktivste Wärmeerzeugungsoption dar.

Welche Kombination dieser Wärmeerzeugungstechnologien und Wärmespeicher die insgesamt wirtschaftlich attraktivste ist, hängt von der Gewichtung der Anzahl der Stunden ab, die sich im hoch- bzw. niedrigpreisigen Segment bewegen. Sofern von insgesamt steigenden Strompreisen (z.B. durch steigenden Brennstoff- und CO₂-Zertifikatspreise sowie durch Knappheitspreise) ausgegangen werden kann, so stellt eine KWK-Anlage in Kombination mit einem Wärmespeicher eine günstige Option dar. Sofern von grundsätzlich fallenden Strompreisen (aber steigenden Brennstoffpreisen) ausgegangen werden kann (z.B. durch einen verstärkten Zubau erneuerbarer Energien, ggf. in Kombination mit einer sinkenden Stromnachfrage), so stellen elektrische Widerstandsheizungen, ggf. in Kombination mit Wärmespeichern eine wirtschaftlich attraktive Option dar. Heizkessel können grundsätzlich Komplementärelemente darstellen, die die entsprechende Wärmeproduktion ausgleichen können. Eine detaillierte

⁶ Wenn mit dem Wärmespeicher eine Wärmeproduktion aus dem Erdgaskessels substituiert wird, ergibt sich ein ähnlicher Deckungsbeitrag. Es ist immer günstig bei hohen Strompreisen den Wärmespeicher zu befüllen. Da der Erdgaskessel keine hohen Deckungsbeiträge erwirtschaftet, entsprechen die Deckungsbeiträge für die Substitution des Kesselbetriebs durch Wärme aus dem Speicher näherungsweise ebenfalls der Differenz des Strompreises zum Zeitpunkt der Beladung und der kurzfristigen Grenzkosten der KWK-Anlage.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss hierbei die Entwicklung der Strompreise, die daraus resultierenden Deckungsbeiträge sowie die benötigten Investitionskosten berücksichtigen. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Insbesondere wäre es sehr interessant zu analysieren, in wieweit KWK-Anlagen strompreisstabilisierend (sowohl nach oben und nach unten) sein können und inwieweit die Einführung der hier betrachteten Flexibilitätsoptionen das häufigere Auftreten von sehr niedrigen Strompreisen verhindern können, weil die KWK-Anlagen nicht mehr als must-run betrieben werden müssen.

Die Bewertung der Kombination der verschiedenen Wärmeerzeugungsoptionen aus ökologischer Sicht wird in Kapitel 6 vorgenommen.

5.2 Modellgestützte Analyse

Im Rahmen einer modellgestützten Analyse soll untersucht werden, welche Rolle dem Einsatz von Heizkessel bzw. von Wärmespeichern bei einem wirtschaftlichen Einsatz von KWK-Anlagen zukommt. Dabei wird auf die detaillierten Einlastungsergebnisse von fossilen und biogenen Kraftwerken (Kondensationskraftwerke und KWK-Anlagen) unter Vorgabe einer Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung im Modell PowerFlex im Rahmen eines laufenden Projektes (Öko-Institut 2012c) zurückgegriffen⁷. Der Fokus dieser Studie liegt auf der Entwicklung der KWK-Nutzung über die Zeit sowie auf einem Vergleich von Szenarien (s.u.). Eine ausführliche Diskussion der Rahmendaten und Ergebnisse der Modellierung kann dem Endbericht des genannten Projekts entnommen werden.

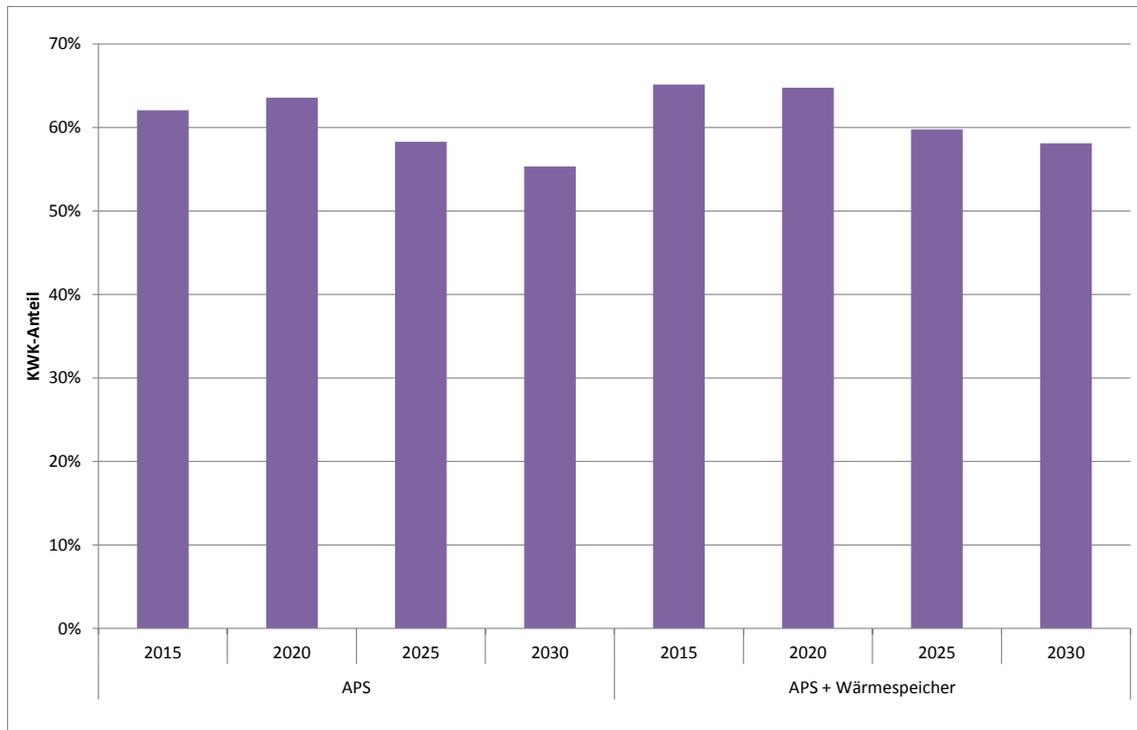
Im Referenzszenario (Aktuelle-Politiken-Szenario, APS) verfügen große KWK-Anlagen über zusätzliche Heizkessel, die dann zur Wärmebereitstellung herangezogen werden, wenn dies wirtschaftlich attraktiver ist, als die KWK-Anlage zu betreiben⁸. Dies ist vor allem in Zeiten geringer Residuallast und damit geringer Strompreise der Fall. Darüber hinaus wird in einer zusätzlichen Analyse angenommen, dass die KWK-Anlagen über Wärmespeicher verfügen (Szenario „APS + Wärmespeicher“). Dies erlaubt den KWK-Anlagen in Zeiten hoher Strompreise zu produzieren, die Wärme jedoch ggf. erst zu einem späteren Zeitpunkt an das Netz abzugeben. Damit kann der KWK-Anteil, insbesondere von Entnahme-Kondensations-Kraftwerke erhöht werden.

Abbildung 5-2 zeigt den KWK-Anteil (d.h. der Anteil der jährlichen Stromerzeugung, der im KWK-Modus erfolgt) von KWK-Anlagen im Szenarienhorizont im Fall mit und ohne Nutzung von Wärmespeichern.

⁷ Eine Modellbeschreibung von PowerFlex kann dem Anhang entnommen werden.

⁸ Für den Betrieb der Heizkessel wird der Erdgaspreis zzgl. der relevanten Erdgassteuer angesetzt.

Abbildung 5-2: Vergleich des KWK-Anteils zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)



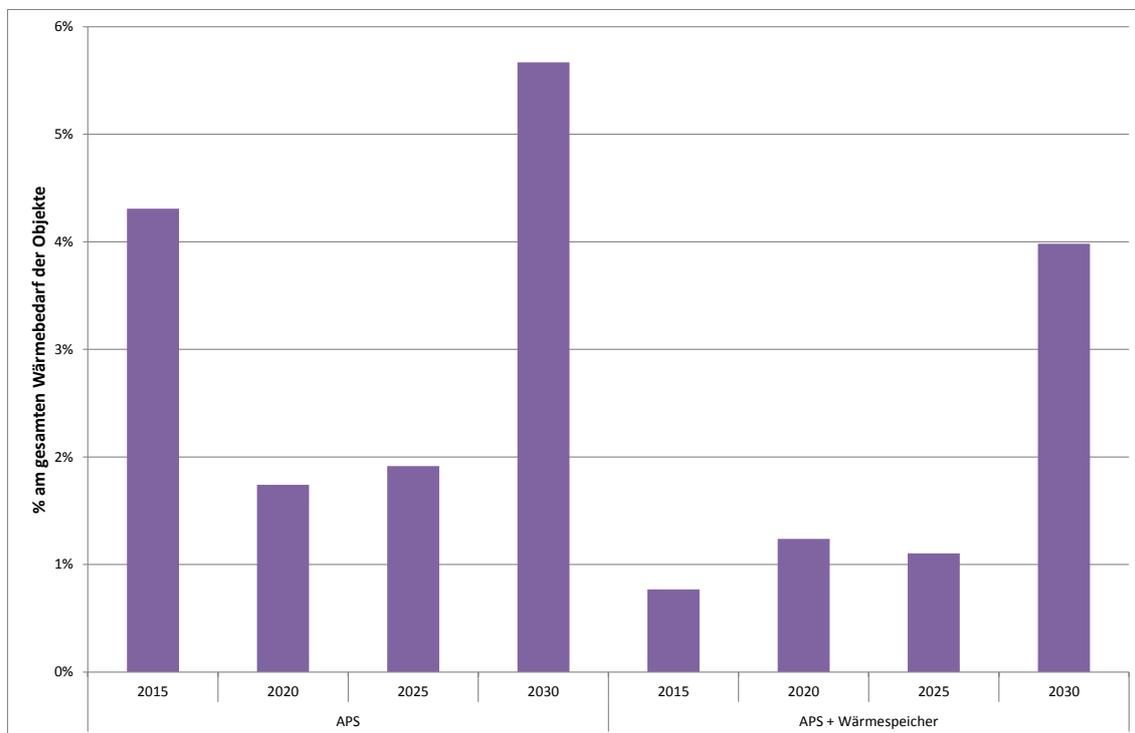
Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Die Abbildung verdeutlicht zum einen, dass der KWK-Anteil im Zeitverlauf sinkt⁹, von rund 62 % (65 % mit Wärmespeicher) im Jahr 2015 auf 55 % (58 % mit Wärmespeicher) im Jahr 2030. Dies bedeutet, dass KWK-Anlagen im Zeitverlauf vermehrt zur reinen Stromproduktion eingesetzt werden (Kondensationsbetrieb). Dies ist konsistent mit den Anforderungen an stromgeführte KWK-Anlagen: der verstärkte Zubau erneuerbarer Energien lässt aufgrund geringer bzw. negativer Residuallasten in bestimmten Stunden einen Betrieb von KWK-Anlagen nicht zu; außerdem steigt die Notwendigkeit von Stromerzeugungskapazitäten zur Systemstabilisierung, wenn keine Stromeinspeisung von erneuerbaren Energien zur Verfügung steht. Die Abbildung verdeutlicht jedoch auch, dass durch Wärmespeicher der KWK-Anteil, und damit der Umweltnutzen, erhöht werden kann, von 62 % auf 65 % im Jahr 2015 und von 55 % auf 58 % im Jahr 2030. Durch Wärmespeicher kann damit Wärme auch in solchen Stunden genutzt werden, in denen die KWK-Anlage strommarktgetrieben eingesetzt werden und kein ausreichender Wärmebedarf besteht. Der Einsatz von Wärmespeichern führt demnach zu einem effizienteren Betrieb von KWK-Anlagen (höherer KWK-Anteil).

Abbildung 5-3 stellt den Anteil der Wärme dar, der in beiden Szenarien durch Heizkessel zur Verfügung gestellt wird.

⁹ Mit Ausnahme einer geringfügigen Zunahme im APS im Jahr 2020.

Abbildung 5-3: Vergleich des Anteils der Wärmeerzeugung in Kesseln am gesamten Wärmebedarf zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)

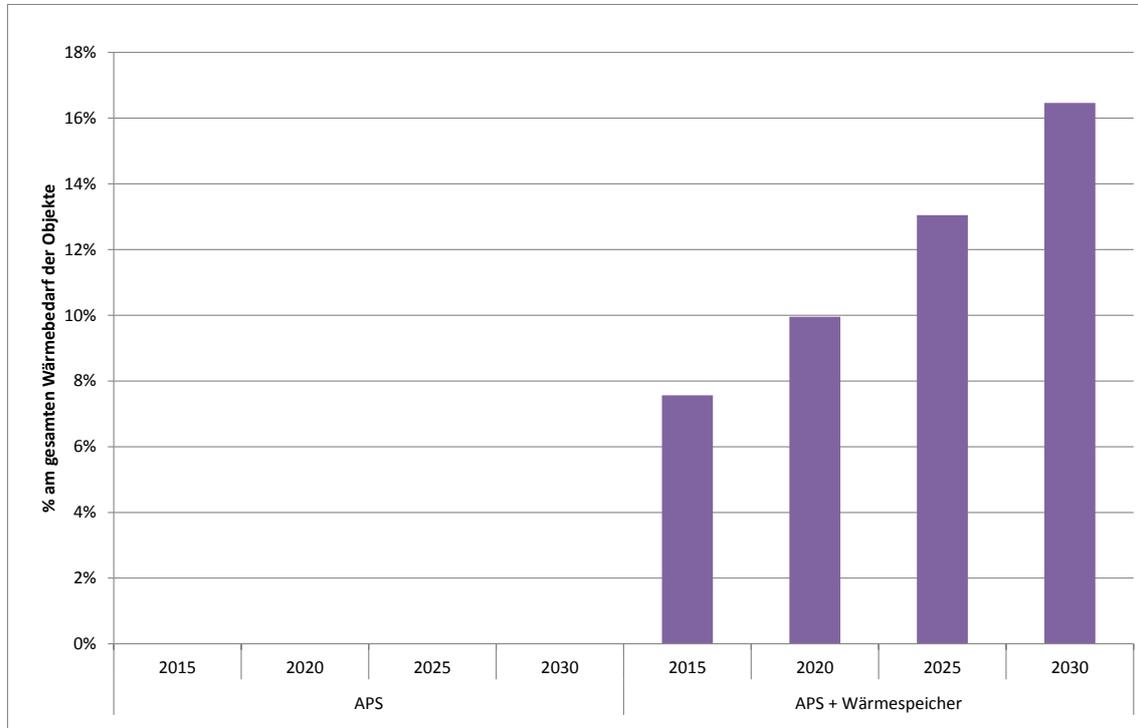


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Grundsätzlich nimmt die Kesselnutzung einen geringen Anteil an der Wärmeversorgung von maximal 6 % ein. Die Szenarienrechnung zeigt, dass der Anteil der Kesselnutzung bis zum Jahr 2020 sinkt (APS) bzw. leicht ansteigt (APS + Wärmespeicher) und in beiden Szenarien bis 2025 auf niedrigem Niveau verbleibt. Im Jahr 2030 nimmt die Kesselnutzung in beiden Szenarien stark zu. Die Zunahme der Wärmeerzeugung in Kesseln ist konsistent mit dem grundsätzlich sinkenden KWK-Anteil (Abbildung 5-2) aufgrund einer verstärkten Einspeisung erneuerbarer Energien. Durch Wärmespeicher kann die Nutzung von Kesseln deutlich reduziert werden, von 4 % auf 1 % im Jahr 2015 und von 6 % auf 4 % im Jahr 2030, da Wärmespeicher einen strommarktgetriebenen Betrieb von KWK-Anlagen erlauben, bei späterer Nutzung der ausgekoppelten Wärme.

Abbildung 5-4 zeigt den Anteil der Wärme, der über Wärmespeicher (d.h. nicht direkt aus der KWK-Anlage oder aus Kesseln) an das Wärmenetz abgegeben wird.

Abbildung 5-4: Vergleich des Anteils der Wärmeeinspeisung aus Wärmespeichern am gesamten Wärmebedarf zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespeichern (APS + Wärmespeicher)



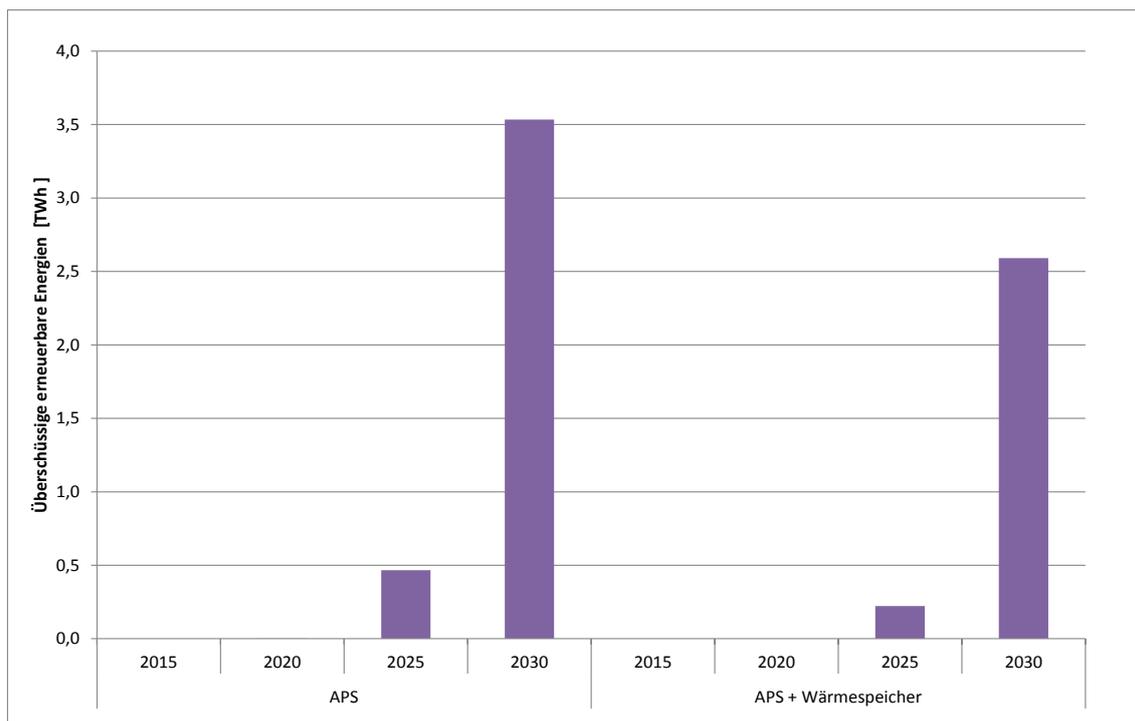
Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Im Referenzszenario sind keine Wärmespeicher vorhanden, entsprechend gibt es keine Nutzung. Der Anteil der Wärme, der über Wärmespeicher an das Wärmenetz abgegeben wird, nimmt im Szenario „APS + Wärmespeicher“ von rund 8 % auf 16 % zwischen 2015 und 2030 zu. Dies unterstreicht den steigenden Bedarf an Flexibilität in KWK-Anlagen im Zeitverlauf, da der Anteil des Wärmebedarfs, der direkt mit den KWK-Anlagen gedeckt wird von 91 % [1-0,075 (Wärmespeicher)-0,015 (Spitzenkessel)] im Jahr 2015 auf 80 % [1-0,16-0,04] im Jahr 2030 sinkt. Abbildung 5-5 vergleicht die Strommenge aus erneuerbaren Energien, die im Szenarienvverlauf (z.B. aufgrund negativer Residuallasten) nicht genutzt werden kann. Die Abbildung zeigt, dass es bis 2020 nur einen geringen EE-Überschuss gibt¹⁰. Bis zum Jahr 2030 nimmt er jedoch eine merkbare Größenordnung an durch die zunehmende Anzahl von Stunden, in denen mehr erneuerbare Stromerzeugung zur Verfügung steht als Nachfrage besteht. Da KWK-Anlagen im Referenzfall stets die Wärmenachfrage decken müssen, kann es dazu kommen, dass erneuerbare Energien verstärkt nicht genutzt werden können. Sofern die KWK-Anlage jedoch aufgrund eines vorhandenen Wärmespeichers nicht betrieben werden muss, so kann auch die überschüssige Stromerzeugung erneuerbarer

¹⁰ In der Abbildung aufgrund der geringen Größe nicht sichtbar.

Energien reduziert werden. So bleiben unter Nutzung von Wärmespeichern im 2030 Jahr lediglich 2,6 TWh erneuerbarer Stromerzeugung ungenutzt, während es im Fall ohne Wärmespeicher 3,5 TWh sind. Damit stellen Wärmespeicher eine Flexibilitätsop-tion zur Integration der erneuerbaren Energien in das Stromsystem dar. Der Effekt bis 2030 ist jedoch begrenzt.

Abbildung 5-5: Vergleich überschüssiger erneuerbarer Energien zwischen dem Referenzszenario (APS) und einem Szenario mit Nutzung von Wärmespei-chern (APS + Wärmespeicher)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut.

5.3 Thesen zur Nutzung der KWK im künftigen Energiesystem

Aus den in den Abschnitten 5.1 und 5.2 vorgestellten Analysen können folgende The- sen für die Nutzung der KWK in einem künftigen Energiesystem abgeleitet werden:

- These 1: Aufgrund einer verstärkten Einspeisung erneuerbarer Energien erhöhen sich die Flexibilitätsanforderungen an stromerzeugende Anlagen bis 2030.
- These 2: Im Bereich der Wärmeerzeugung kann Flexibilität durch KWK-Anlagen, Heizkessel, elektrische Widerstandsheizungen oder Wärmespeicher be- reitgestellt werden.
- These 3: KWK-Anlagen können Flexibilität auf dem Strom- und Wärmemarkt be- reitstellen, sofern sie

- Zeitweise im Kondensationsmodus betrieben werden können. Damit sind Entnahme-Kondensations-Anlagen grundsätzlich flexibler als Gegendruck-Anlagen.
- Mit Wärmespeichern betrieben werden: Diese erhöhen die Flexibilität von KWK-Anlagen bei gleichzeitiger Reduktion der Kesselnutzung und einer Erhöhung des KWK-Anteils.

These 4: Verbleibende ungenutzte Strommengen aus erneuerbaren Energien können für die Wärmeerzeugung in elektrischen Widerstandsheizungen genutzt werden und so die Kesselnutzung reduzieren. Nutzungskonkurrenzen (z.B. Wasserstoffherzeugung) müssen berücksichtigt werden.

These 5: KWK-Anlagen stellen eine kostengünstige Option für die Wärmebereitstellung bei hohen Strompreisen dar. Wärmespeicher können die Betriebsdauer von KWK-Anlagen und damit die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen erhöhen. Elektrische Widerstandsheizungen stellen eine wirtschaftliche Wärmeerzeugungsoption bei niedrigen Strompreisen dar. Heizkessel sind nur in einem kleinen Strompreisbereich die attraktivste Wärmeerzeugungsoption, können jedoch ein wichtiges Komplementärelement für die Spitzenlast und zur Reservebereitstellung darstellen.

These 6: Die wirtschaftlich sinnvolle Kombination von Wärmeerzeugungstechnologien und Wärmespeichern hängt von der Gewichtung der Anzahl der Stunden im hoch- bzw. niedrigpreisigen Segment der Strompreise ab. Bei steigenden Strompreisen stellen KWK-Anlagen in Kombination mit Wärmespeichern eine günstige Option dar. Bei fallenden Strompreisen stellen elektrische Widerstandsheizungen, ggf. in Kombination mit Wärmespeichern, eine wirtschaftlich attraktive Option dar. Heizkessel können grundsätzlich Komplementärelemente darstellen.

6 Energie- und CO₂-Einspareffekte durch KWK

6.1 CO₂-Einspareffekte allgemein

In Kapitel 2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Ermittlung der Einspareffekte durch die KWK-Stromerzeugung stark abhängig ist von dem ungekoppelten Referenzsystem, mit dem die gekoppelte Erzeugung verglichen wird.

Im Rahmen des KWK-Monitorings (Öko-Institut 2012b) wurde deshalb ein Vergleich angestellt zwischen den CO₂-Einsparungen, die sich mit dem statischen System ergeben, das auf einem System der ungekoppelten Erzeugung im Jahr 1998 basiert (770 g CO₂/kWh für die Strom- und 295 g CO₂/kWh für die Wärmeerzeugung), und einem dynamischen Referenzsystem, das der Tatsache Rechnung trägt, dass im Verlauf der Zeitreihe Effizienzverbesserungen im Referenzsystem stattfinden. Dafür wurde ein linearer Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen der Referenzsysteme von den Werten für das Jahr 1998 bis zu denen für das Jahr 2010 aus BMU (2011) angesetzt¹¹: 679 g CO₂/kWh für die Strom- und 273 g CO₂/kWh für die Wärmeerzeugung (s. Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1 Vergleich eines statischen und dynamischen Referenzsystems

		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
KWK-Erzeugung									
Strom	TWh _{el}	76	77	80	83	83	86	85	93
Wärme	TWh _{th}	179	181	185	186	184	188	187	202
CO ₂ -Emissionen	Mio. t CO ₂	84	84	82	81	78	80	78	84
Statistisches Referenzsystem									
Strom	g CO ₂ /kWh				770				
Wärme	g CO ₂ /kWh				295				
CO ₂ -Emissionen	Mio. t CO ₂	111	113	116	118	118	122	121	131
Eingesparte CO ₂ -Emissionen	Mio. t CO ₂	27	29	34	37	40	42	43	48
Dynamisches Referenzsystem									
Strom	g CO ₂ /kWh	732	725	717	709	702	694	687	679
Wärme	g CO ₂ /kWh	286	284	282	280	279	277	275	273
CO ₂ -Emissionen	Mio. t CO ₂	106	107	109	111	109	112	110	118
Eingesparte CO ₂ -Emissionen	Mio. t CO ₂	23	24	27	30	32	32	32	35
Differenz Statisches/dynamisches Referenzsystem	Mio. t CO ₂	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-13

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut.

Es zeigt sich, dass mit der Annahme eines dynamischen Referenzsystems mit einer Absenkung der Referenzwerte um 12 bzw. 7 % (Strom/Wärme), die CO₂-Einsparung durch KWK-Erzeugung im Jahr 2010 um knapp 30 % niedriger liegt: bei 35 statt 48 Mio. t CO₂.

¹¹ Diese beziehen sich auf die Verdrängungswirkung von Biomasse-Anlagen, werden hier dennoch beispielhaft herangezogen, um einen sinkenden Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen des Strom-Referenzsystems zu veranschaulichen.

Im Folgenden wird nun nicht mehr die gesamte KWK-Erzeugung betrachtet, die einen Mix von verschiedenen Brennstoffen, Größenklassen und Einsatzgebieten beinhaltet, sondern es erfolgt eine Betrachtung auf Anlagenebene. Dabei werden nur Gas-Systeme betrachtet, da Kohle-KWK Anlagen gegenüber anspruchsvollen Referenzsystemen keine CO₂-Einsparungen erzielen können. Verglichen werden dabei das dynamische Referenzsystem (1) und ein BvT (Beste verfügbare Technik) -System von 365 g CO₂¹²/ kWh Strom und 202 g CO₂ / kWh Wärme¹³(2). Bei dieser Betrachtung können auch für die Wärmeerzeugung niedrigere spezifische CO₂-Emissionsfaktoren angesetzt werden, da Prozesswärme bei dieser Einzelanlagenbetrachtung nicht berücksichtigt wird:

Tabelle 6-2 Emissionseinsparung verschiedener Anlagentypen

	Installierte Leistung	Strom-kennzahl	Brennstoff-ausnutzung	CO ₂ -Emissionen	Referenz-Emissionen 1	Einsparung ggü. Referenzsystem 1	Referenz-Emissionen 2	Einsparung ggü. Referenzsystem 2
	MW	kWh _{el} /kWh _{th}	%/100	t CO ₂	t CO ₂		t CO ₂	
Mikro-KWK, Erdgas	0,005	0,41	89%	16	27	42%	17	9%
2 MW, Erdgas	2	0,76	85%	4394	8306	47%	5042	13%
600 MW, Erdgas	529	1,76	85%	786570	1764631	55%	1014404	22%

Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut.

Alle betrachteten Erdgas-Anlagen führen auch mit dem anspruchsvollen Referenzsystem 2 zu einer Emissionseinsparung. Die spezifische Emissionseinsparung von großen Anlagen ist größer als die von kleinen¹⁴.

Tabelle 6-1 zeigt, dass die Einsparungen der KWK in der Vergangenheit hoch waren, weil historisch auch ein großer Anteil von Kohlekraftwerken verdrängt wurde. Der Vergleich mit dem dynamischen Referenzsystem sowie den Berechnungen in Tabelle 6-2 zeigen, dass die Emissionseinsparungen der KWK-Anlagen in Zukunft mit dem Emissionsfaktor für Strom sinken werden: Sinkende Emissionsfaktoren sind mit Sicherheit in Zukunft zu erwarten, da zum einen die Effizienzen steigen, vor allem aber der Anteil erneuerbarer Energien erheblich anwachsen wird, wodurch öfter Gaskraftwerke das Referenzsystem am Strommarkt bilden werden.

Damit verliert vor allem auf längere Sicht die Argumentation über die CO₂-Einsparung als Vorteil für die KWK an Bedeutung. Erhalten bleibt aber als entscheidender Vorteil für die KWK die bessere Primärenergieausnutzung (bei ausreichend hohen Stromkennzahlen und Gesamtnutzungsgraden), beim Einsatz fossiler – aber eben auch biologischer Energieträger.

¹² Neues GuD-Kraftwerk.

¹³ 100% Ausnutzung des Erdgases durch Warmwasser-Erzeugung mit Brennwertthermen.

¹⁴ Die Benutzungsstunden wurden hier einheitlich auf 4000 h gesetzt.

6.2 Bewertung von Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität

In den vorhergehenden Kapiteln wurde bereits betont, dass die Möglichkeit des flexiblen Betriebs von KWK-Anlagen für ihre Passfähigkeit in das zukünftige Energiesystem entscheidend sein wird. Im Folgenden sollen mögliche Maßnahmen zur Flexibilitätssteigerung von KWK-Anlagen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Emissionseinsparungen betrachtet werden.

Speicher

Die Verwendung von Wärmespeichern als Ergänzung von KWK-Anlagen führt zu einer Entkopplung der Stromerzeugung vom Wärmebedarf: Dadurch kann die KWK-Anlage länger am Stück, damit kontinuierlicher und effizienter – aber grundsätzlich auch orientiert am Strommarkt betrieben werden. Dieses bewirkt vor allem eine Erhöhung der jährlichen Benutzungsstunden und eine erhöhte KWK-Stromerzeugung. In Tabelle 6-3 ist eine Beispielrechnung für zwei Anlagen im Vergleich zum ersten Referenzsystem durchgeführt worden: Während für die kleine Anlage mit üblicherweise geringen Vollbenutzungsstunden im Standardfall von 2.000 h eine Verdopplung der Betriebsstunden angesetzt werden kann, lässt sich für die 2-MW-Anlage hingegen durch die höhere Auslastung schon im Standardfall mit 6000 Stunden nur eine geringere Erhöhung der Benutzungsstunden annehmen. Es resultiert daraus eine CO₂-Minderung, die nahezu proportional¹⁵ zur Erhöhung der Benutzungsstunden ist. Durch diese Proportionalität führt der Einsatz eines Speichers besonders in Anlagenkonstellationen, in denen mit geringen Benutzungsstunden zu rechnen ist, zu erheblichen zusätzlichen CO₂-Einsparungen.

Abfuhr überschüssiger Wärme über das Dach

Wird angenommen, dass die KWK-Anlage eine erhöhte Flexibilität gewährleisten soll, als bereits der Einsatz eines Wärmespeichers ermöglicht, wird vermehrt die Möglichkeit der Wärmeabfuhr über das Dach diskutiert.

Bei einem Ansatz, dass sich damit die Anlage 500 Vollbenutzungsstunden länger betreiben lässt als in dem Fall mit Speicher, ergibt sich für die Mikro-KWK-Anlage eine etwas reduzierte CO₂-Minderung, da die Anlage bei alleiniger Stromproduktion einen schlechteren Wirkungsgrad hat und damit höhere spezifische CO₂-Emissionen (CO₂/kWh_{el}) als das Referenzsystem aufweist. Für die 2-MW-Anlage ergibt sich hingegen eine (geringe) zusätzliche CO₂-Einsparung, denn auf Grund der deutlich höheren Stromkennzahl, liegt der elektrische Wirkungsgrad höher, damit liegen die spezifischen CO₂-Emissionen unter denen des Referenzsystems 1.

Die CO₂-seitige Bewertung dieser Flexibilitätsmaßnahme ist somit einerseits abhängig vom elektrischen Wirkungsgrad (und damit der Stromkennzahl) der Anlage und andererseits davon, wie sich dieser zu dem des Referenzsystems verhält.

¹⁵ Durch die Verwendung eines Verlustfaktors als Speicherverlust (hier 0,9) ist die Minderung nicht direkt proportional.

Tabelle 6-3 CO₂-Einsparungen durch Verwendung eines Speichers und bei Wärmeabfuhr über das Dach

	Vbh	Netto-Strom-erzeugung	Netto-Nutz-wärme-erzeugung	CO ₂ -Emis-sionen	Eingespar-te CO ₂ -Emis-sionen 1	Einsparung
	h/a	GWh _{el}	GWh _{th}	t CO ₂	t CO ₂	% ggü.
Mikro-KWK, Erdgas	2000	0,01	0,02	8	5,7	
mit Speicher	4000	0,02	0,04	14	11,1	96% ggü. ohne Speicher
zus. mit Wärmeabfuhr über das Dach	4500	0,02	0,04	16	11,0	-1% ggü. mit Speicher
2 MW, Erdgas	6000	12	15,8	6.591	5.868	
mit Speicher	7000	14	16,58	7.253	6.779	16% ggü. ohne Speicher
zus. mit Wärmeabfuhr über das Dach	7500	15	16,58	7.771	6.940	2% ggü. mit Speicher

Quelle: Eigene Berechnungen.

Elektrische Widerstandsheizungen

Während in den vorhergehenden Betrachtungen die Bilanzgrenze um die Anlage gelegt wurde, ist diese bei der Bewertung der Umwandlung von elektrischer in thermischer Energie nicht sinnvoll möglich, da für diese Diskussion die Herkunft und „Wertigkeit“ des Stroms zu beachten ist, der für diesen Zweck verwendet wird. Im Kern geht es deshalb hier vor allem um die Frage, wie es zu bewerten ist, dass das energetisch hochwertige Produkt Strom mit elektrischen Widerstandsheizungen in das energetisch minderwertige Produkt Wärme umgewandelt wird.

Wenn der CO₂-Preis für Emissionsberechtigungen die „ökologische Wahrheit“ sagen würde, wäre auch die betriebswirtschaftlich optimale Lösung die volkswirtschaftlich optimale Lösung. Insbesondere so lange noch umfangreiche Kapazitäten an Braunkohlekraftwerken in Deutschland betrieben werden, besteht die reale Gefahr, dass in den elektrischen Widerstandsheizungen Braunkohlestrom eingesetzt wird, was eine sehr negative CO₂-Emissionsbilanz nach sich ziehen würde. Zum Vergleich wird daher ein neueres Braunkohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 40 % betrachtet. Dies entspricht dem unteren Rand der Wirkungsgrade, der nach der Wende errichteten Braunkohlekraftwerke. Diese Kraftwerke (z.B. Schwarze Pumpe, Boxberg, Lippendorf, BOA 1-3) werden auch noch bis 2040 betrieben. Die Brennstoffpreise für Braunkohle basieren auf Öko-Institut (2012c).

Zu prüfen ist also, ob noch Braunkohlekraftwerke am Netz sind, wenn elektrische Widerstandsheizungen eingesetzt werden. Vereinfacht gesagt kann der CO₂-Preis berechnet werden, der nötig ist, um die variablen Kosten der Braunkohlekraftwerke über das Niveau des Erdgaspreises zu heben, da derzeit Braunkohlekraftwerke ganz links in der Merit-Order sind, also mit niedrigen variablen Kosten betrieben werden können. Nur wenn diese variablen Kosten derart durch die CO₂-Zertifikate erhöht werden, kann man sicher sein, dass keine Braunkohlekraftwerke mehr am Netz sind, wenn elektrische Widerstandsheizungen betrieben werden (vergleiche dazu Kapitel 5.1). Um dies exakt zu berechnen wird der CO₂-Preis bestimmt, der nötig ist, um die kurzfristigen

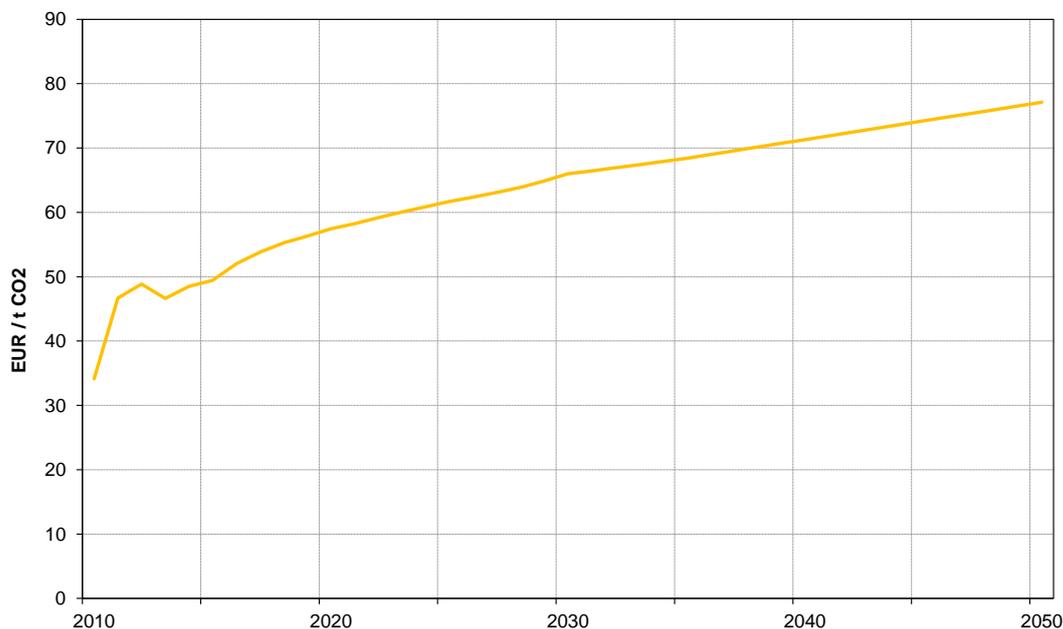
Grenzkosten der Braunkohlekraftwerke auf das Niveau der kurzfristigen Grenzkosten der hier betrachteten KWK-Anlage zu heben:

Bedingt durch die sehr niedrigen Brennstoffkosten der Braunkohle (3,1 €/MWh_{th}) ergibt sich für die kurzfristigen Brennstoffkosten in 2020 nur ein Betrag von 8 €/MWh (ohne CO₂-Einpreisung). Im Vergleich dazu betragen die Grenzkosten der KWK-Anlage (Tabelle 5-1) 44 €/MWh. Die Kostendifferenz der beiden Erzeugungstechnologien beträgt also 36 €/MWh. Berücksichtigt man die Differenz der spezifischen CO₂-Emissionen der beiden Erzeugungstechnologien, so ergeben sich bereits in 2020 CO₂-Preise von 60 €/EUA, um die kurzfristigen Grenzkosten eines Braunkohlekraftwerks auf das Niveau der kurzfristigen Grenzkosten der hier betrachteten KWK-Anlage zu heben (s. Abbildung 6-1).

In Kapitel 5.1 wurde abgeleitet, dass es wirtschaftlich interessant ist elektrische Widerstandsheizungen zu betreiben, wenn die Strompreise niedriger sind als die Grenzkosten der KWK-Anlage. Dies bedeutet, dass in 2020 mindestens CO₂-Preise von 60 €/EUA notwendig sind, um zu verhindern, dass elektrische Widerstandsheizungen mit Braunkohlestrom betrieben werden. Außerdem sind Nutzungskonkurrenzen für den „überschüssigen“ Strom zu berücksichtigen. Die Nutzung des Stroms in energetisch „höherwertigen“ Anwendungen (Lastmanagement, Pumpspeicher, Export nach Skandinavien, Elektrofahrzeuge) ist oftmals sinnvoller. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass „Windüberschüsse“ vor allem in Norddeutschland anfallen und hier abgesehen von der Städten Hamburg und Berlin nur eine überschaubare Fernwärmenachfrage zur Verfügung steht.

Die Installation von elektrischen Widerstandsheizungen sollte also eher nicht wirtschaftlich gefördert werden. Am geeignetsten sind hohe CO₂-Preise, um den Ausbau der Flexibilitätsoptionen kostenoptimal voranzutreiben.

Abbildung 6-1 Notwendiger CO₂-Preis um zu verhindern, dass elektrische Widerstandsheizungen mit Braunkohlestrom betrieben werden



Quelle: Eigene Berechnungen Öko-Institut.

6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, die Wirkungen des derzeitigen EEG- und KWKG-Fördersystems auf den Betrieb von KWK-Anlagen zu Zeiten hoher Einspeisungen erneuerbarer Energien zu überprüfen. Kernfrage ist, wie durch einen regulatorischen Rahmen sichergestellt werden kann, dass KWK-Anlagen dann nicht produzieren, wenn erneuerbare Energien das Grenzkraftwerk bilden.

Derzeit gibt die Förderung durch das EEG und das KWKG in zweierlei Hinsicht keine Anreize, auf die Verhältnisse am Strommarkt zu reagieren:

- Zum einen wird jegliche KWK-Stromerzeugung durch das EEG (und eine begrenzte Menge durch das KWKG) durch einen Zuschuss pro erzeugter kWh gefördert.
- Zum anderen ist der eigenerzeugte Strom für die meisten Anlagen-Betreiber kostengünstiger als der aus dem Netz bezogene Strom, denn
 - a) die niedrigen Erzeugungskosten der EE-Grenzkraftwerke werden nicht durch den Verbraucher-Strompreis abgebildet
 - und b) müssen für den eigenerzeugten Strom durch die Eigenverbrauchsprivilegierung keine EEG- und KWKG-Umlage, keine weiteren Umlagen, Konzessionsabgaben, geringere Netzentgelte und in etlichen Fällen auch keine Stromsteuer gezahlt werden.

Durch beide Effekte folgt, dass die nach dem EEG, aber auch nach dem KWKG geförderten Anlagen möglichst durchgehend betrieben werden. Im Fall von Industrieanlagen erfolgt der Betrieb vor allem angepasst an den Eigenbedarf, im Fall von kleinen Anlagen (unter 2 MW_e) in Abhängigkeit von der Wärmeabnahme, da der eingespeiste Strom stets nach dem KWK-Index vergütet wird. Eine Anpassung an die Erfordernisse des Strommarktes erfolgt in diesen Systemen nicht. Im Detail ist zu überprüfen, ob eine Abkehr von der strommarkt-unabhängigen Förderung jeder erzeugten Kilowattstunde notwendig ist, um mit der Weiterleitung der Strommarktpreise an die Betreiber die erforderlichen Signale zur angepassten KWK-Stromerzeugung zu setzen.

Andererseits bedeutet die Befreiung der Eigenstromerzeugung von Umlagen, Abgaben, Systemkosten und ggf. Stromsteuer eine erhebliche Einsparung, die im Augenblick besonders im industriellen Bereich starke Anreizwirkung zeigt und Investitionen in neue KWK-Anlagen fördert. Vor dem Hintergrund, dass damit eine weitere Reduzierung des Kreises der EEG-Umlagenzahler als auch der Träger der Systemkosten induziert wird und es langfristig nicht gewünscht ist, dass sich weitere Bereiche zunehmend der Finanzierung der erneuerbaren Energien und der Kosten des Stromversorgungssystems entziehen, ist diese Entwicklung in der nächsten Zeit schwerpunktmäßig zu beobachten. Es könnte dabei unter anderem angedacht werden, mit einer pauschalen, reduzierten EEG-Umlage pro eigenerzeugter Kilowattstunde, den Kreis der EEG-Einzahler wieder zu vergrößern. Eine Unterscheidung in KWK- und Nicht-KWK-Eigenstromerzeugung erscheint aus administrativen Gründen nicht als angebracht. Auch würde die alleinige Berücksichtigung von Neuanlagen die Wirkung dieser Maßnahme extrem reduzieren, da in den nächsten Jahren der Anteil der Stromerzeugung aus Neuanlagen nur wenige Prozentpunkte der gesamten Stromerzeugung umfassen wird.

Des Weiteren wäre eine tiefergehende Betrachtung interessant, um genauer zu quantifizieren, in wieweit KWK-Anlagen durch lastangepasste Fahrweise strompreisstabilisierend wirken können und in wieweit die Einführung der hier betrachteten Flexibilitätsoptionen das häufigere Auftreten von sehr niedrigen Strompreisen verhindern können, wenn die KWK-Anlagen nicht mehr als must-run betrieben werden würden.

7 Fazit

Der Ausbau der KWK-Stromerzeugung beruhte in den letzten Jahren vor allem auf der Entwicklung im Bereich der biogenen KWK-Stromerzeugung, die durch das EEG gefördert wird. Die Einschätzung zur Entwicklung der KWK-Stromerzeugung ist in der Betrachtung verschiedener Studien sehr heterogen. Es dominiert die Ansicht, dass bei der KWK-Stromerzeugung ein Anstieg bis 2020 zu erwarten ist und ab 2030 von einer Abnahme ausgegangen werden kann.

Dieser kurzfristige Anstieg könnte zur Bereitstellung der Kraftwerkskapazitäten beitragen, die im Zuge der Energiewende als Ersatzkapazität in der nächsten Dekade erforderlich werden. Da größere, Erdgas-betriebene KWK-Anlagen nur mit zusätzlichen Einkommensströmen wirtschaftlich dargestellt werden können, ist die Novelle des KWKG sicherlich als förderlich einzuschätzen.

Zukünftige Rolle der KWK

Die fossile Kraft-Wärme-Kopplung führt nur solange zu Emissionseinsparungen, wie andere fossile Kraftwerke verdrängt werden. Als Konsequenz sollten in Stunden, in denen erneuerbare Energien das Grenzkraftwerk bilden, fossile KWK-Anlagen möglichst nicht zum Einsatz kommen. Grundsätzlich sind niedrige Preise am Strommarkt ein erster Indikator, dass KWK-Anlagen nicht produzieren sollten. Dieses Gedanken-spiel macht deutlich, dass fossile KWK-Anlagen mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien den Vorteil der CO₂-Einsparungen gegenüber anderen Optionen verlieren und in einem zukünftigen Stromsystem mit einem sehr hohen EE-Anteil nur noch sehr punktgenau zur Deckung der Residuallast betrieben werden sollten. Es ist eindeutig, dass Energieträger für KWK-Anlagen mit geringem CO₂-Gehalt, wie Erdgas, länger in der oben dargestellten optimierten Fahrweise zum Einsatz kommen können, da sie über einen längeren Zeitraum niedrigere CO₂-Emissionen aufweisen als das Grenzkraftwerk. Biogen betriebene KWK-Anlagen haben prinzipiell das gleiche Flexibilitätspotenzial wie fossile KWK-Anlagen, der Einsatz von Biomasse zur Strom- und Wärme-herstellung ist jedoch im Hinblick auf die aufkommende Nutzungskonkurrenz begrenzt.

Bereitstellung von Flexibilität für das Stromsystem

Neben der grundsätzlichen Bereitstellung zusätzlicher Stromerzeugungskapazitäten kann der Einsatz von KWK-Anlagen zusätzliche Vorteile für das Stromsystem bieten: Wenn die KWK-Anlagen nicht wärme- sondern stromgeführt betrieben werden, können sie eine Option zur Deckung der Residuallast bzw. zur Bereitstellung von Regelleistung darstellen: Die zeitliche Entkopplung der Stromerzeugung und Wärmeversorgung geschieht durch den Einsatz von Spitzenkesseln oder solarthermischen Systemen und Wärmespeichern bzw. die Abfuhr ungenutzter Wärme über das Dach. Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Wärmeerzeugung durch Strom (elektrische Widerstandsheizungen), die im Fall eines Überangebotes von Strom aus erneuerbaren Energien eine Möglichkeit bietet, mit dem Überschuss umzugehen. Da diese Optionen im Gesamtkontext mit anderen Flexibilitätsoptionen (Netzausbau, Demand Side Management, Elektromobilität, Power-to-gas usw.) betrachtet werden müssen, werden die verschie-

denen Optionen nur qualitativ betrachtet. In Anbetracht des in Zukunft nur noch zeitlich begrenzt wirksamen Emissionsvorteils der KWK-Anlagen stellt die Einbindung in solche Systemverbünde ein zentrales Kriterium für die Vorteilhaftigkeit der fossilen KWK dar. Nur wenn KWK-Anlagen durch andere Systeme sinnvoll ergänzt oder zumindest in einem ausreichend weiten Bereich im Entnahmekondensationsbetrieb gefahren werden können, stellen sie weiterhin ein wichtiges Übergangselement vor dem Hintergrund der zukünftig sinkenden Wärmenachfrage dar.

Auch der Aufbau von Nah-Wärmenetzen ist für ein effizientes, zukünftiges Energiesystem zielführend. Nach Ablauf der Lebensdauer der Anlage kann eine Ersatzanlage eingesetzt werden, die an die ggf. gesunkene Nachfrage angepasst wird. Dann kann die Ersatzanlage mit dem jeweilig aktuellen Stand der Technik und ggf. auch mit dem geeignetsten Energieträger der jeweiligen Zeit betrieben werden. Hierfür sollten vor allem kleine und mittelgroße Anlagen zum Einsatz kommen. In zukünftigen Wärmenetzen erscheinen die Einsatzmöglichkeiten für neue Großanlagen aufgrund der geringen Anpassungsfähigkeit auf sinkende Wärmenachfrage und der langfristigen Kapitalbindung stark begrenzt. Kleinere Anlagen weisen geringere Abschreibungszeiten auf und können damit betriebswirtschaftlich flexibler eingesetzt werden.

Kleinstanlagen hingegen erscheinen für die Bereitstellung von Flexibilität für das Stromsystem eher weniger geeignet. Gründe dafür sind ihre geringere Flexibilität in Bezug auf die Wärmelieferung (durch geringere Anzahl von Wärme-Abnehmern), aber auch die technisch aufwändigere Einbindung in ein Gesamtsystem bei hohen spezifischen Investitionskosten und geringeren Wirkungsgraden. Auch besteht besonders in diesem Größenklassensegment eine zunehmende Konkurrenzsituation zwischen der KWK und der Wärmeerzeugung durch erneuerbare Energien (Solarthermie, Geothermie aber auch Wärmepumpen), die in Bezug auf die zukünftige Ausgestaltung der Förderung berücksichtigt werden sollte.

Power to Heat

Die Wärmeerzeugung aus Strom (Power to heat) zu Zeiten niedrigerer Strompreise muss differenziert betrachtet werden. Solange die CO₂-Preise nicht auf ein höheres Niveau steigen, können elektrische Widerstandsheizungen zwar zu Kosteneinsparungen für das Gesamtsystem führen, erhöhen aber die Emissionen zur Wärmeerzeugung erheblich, da sie in der Regel die Auslastung der Braunkohlekraftwerke erhöhen. Auch sind Nutzungskonkurrenzen für eine anderweitige Nutzung des Stroms zu berücksichtigen.

Konsequenzen für rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Um den Ausbau der KWK als Übergangstechnologie zu unterstützen, ist eine finanzielle Förderung (wie derzeit u.a. durch das KWKG) erforderlich, um die Wirtschaftlichkeit darstellbar zu gestalten, aber auch Hemmnisse durch die damit ausgedrückte politische Unterstützung dieser Technologie zu verringern. Kontraproduktive Veränderungen der Rahmenbedingungen für die KWK (wie die Diskussion um die mögliche Abschaffung der vermiedenen Netznutzungsentgelte) sollten deshalb möglichst vermieden werden, um keine widersprüchlichen Signale zu setzen. Dennoch sollte die Förderung

von dem tatsächlichen Umweltnutzen abhängig gemacht werden, also von der Effizienz der Anlagen im Vergleich zu anderen, modernen und CO₂-armen Techniken. Nicht jede KWK-Anlage ist effizient oder führt zu einer Reduktion von Treibhausgasen. Insbesondere kohlebetriebene KWK-Anlagen führen kaum zu Emissionseinsparungen und sollten nicht mehr gefördert werden.

Wärmespeicher haben neben der Erhöhung der flexiblen Fahrweise der KWK-Anlagen eindeutig eine verstärkende Wirkung auf den effizienten Betrieb von KWK-Anlagen und sind deshalb folgerichtig förderwürdig.

Strom aus EEG- und KWK-Anlagen, der vom Produzenten direkt verbraucht wird, ist von der Zahlung der EEG- und KWKG-Umlage sowie weiteren Umlagen, Abgaben, Entgelten und ggf. Stromsteuern befreit. Diese Eigenverbrauchsprivilegierung und die starre Förderung jeder erzeugten Kilowattstunde führen dazu, dass die nach EEG und KWKG geförderten Anlagen (vor allem Biomasse-Anlagen) von den Betreibern möglichst durchgehend betrieben werden. Damit kann der Betrieb der KWK-Anlagen keinen Flexibilitätsbeitrag für das Stromsystem leisten. Um den Betrieb dieser Anlagen stärker als bisher am Strommarkt auszurichten und um einer weiteren Verringerung des Kreises der EEG-Umlage zahlenden Verbraucher entgegen zu wirken, sollte eigenverbraucher Strom einer pauschalen, reduzierten EEG-Umlage pro eigenerzeugter Kilowattstunde unterworfen werden. Eine Unterscheidung in KWK- und Nicht-KWK-Eigenstromerzeugung oder zwischen Neu- und Bestandsanlagen erscheint aus administrativen Gründen nicht als angebracht.

8 Referenzen

8.1 Literatur

- BEI/DLR 2005: Bremer Energieinstitut, DLR Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK, einschließlich hocheffizienter Kleinst-KWK, unter Berücksichtigung der sich aus der EU-KWK-RL ergebenden Aspekte Potenzialabschätzung
- BKWK (Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.) 2011: Neue Chancen mit Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie: effizient produzieren - nachhaltig wirtschaften. http://www.bkwk.de/industrie/Broschuere_KWK_in_der_Industrie.pdf
- BMU 2011: Erneuerbare Energien in Zahlen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, Stand Dez. 2011.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) et al. 2007: Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO₂-Emissioneneinschließlich Bewertung der Kosten(Verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung). Climate Change 10/07. Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 202 41 182. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Öko-Institut, Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (VIK).
- EWI et al. 2010: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt 12/10. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS), Prognos AG, Köln, Osnabrück, Basel, August 2010.
- FfE 2009: Energiezukunft 2050. Endbericht der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) in Zusammenarbeit mit dem ifo Institut für Wirtschaftsforschung. München, Oktober 2009.
- Matthes/Ziesing 2011: Wirtschaftlichkeit von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Studie für den Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU). Band 1: Der KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX - Methodenband. Berlin, Januar 2011.
- Matthes 2012: Wirtschaftlichkeit von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Studie für den Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU). Der KWK-Wirtschaftlichkeitsindikator COGIX- Jahresbericht 2011. Berlin, Januar 2012.
- Nitsch 2009: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2011: Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin, Januar 2011.
- Öko-Institut et al. 2009: Politikszenerarien V – auf dem Weg zum Strukturwandel. Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 306 16 025 für das Umwelt-

bundesamt (UBA), Berlin. Öko-Institut, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Forschungszentrum Jülich, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (FhG-ISI), Dr. Ziesing.

Öko-Institut 2012a: Monitoring der KWK-Vereinbarung vom 19. Dezember 2003 für den Teilbereich Kraft-Wärme-Kopplung. Berichtszeitraum 2010 (KWK-Monitoring 2010); Gores, S.; Harthan, R.; im Unterauftrag des Rheinisch-Westfälisches Institutes für Wirtschaftsforschung (RWI) für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Öko-Institut 2012b: KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit der Anreize im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten. Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 3710 97 198 für das Umweltbundesamt (UBA). Matthes, F. Chr; Gores, S.; Harthan, R.; Loreck, Ch. (Öko-Institut, Berlin); Horst, J. (IZES.); Dr. Ziesing, H.-J. (in Bearbeitung).

Öko-Institut 2012c: Politikszenerarien VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 3709 41 109 für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Matthes, F. Chr; Busche, J.; Gores, S.; Harthan, R.; Hermann, H.; Loreck, Ch., Scheffler, M. (Öko-Institut, Berlin); Hansen, P. (IEK-STE); Diekmann, J., Horn, M. (DIW), Eichhammer, W., Elsland, R., Fleiter, T., Köhler, J., Schade, W., Schломann, B., Sensfuß, F. (Fhg-ISI), Ziesing, H.-J. (in Bearbeitung).

Öko-Institut 2012d: Harmonisierung Energiepreisprojektionen. Analysepapier zum Energiekonzept der Bundesregierung im Auftrag des BMU (in Bearbeitung).

UBA 2007: Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO₂- Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten. Berlin, 2007.

WWF 2009: Modell Deutschland; Matthes et al.

Ziesing 2008: KWK-Potenziale in Deutschland und ihre Erschließung. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 58. JG., Heft 3.

Ziesing 2012: KWK: Einige Sensitivitätsanalysen zu den wesentlichen wirtschaftlichen Einflussgrößen. Präsentation beim Workshop „Klimaschutz und KWK-Ausbau“ im Rahmen des UFOPLAN-Forschungsvorhabens „KWK-Ausbau“; Berlin 02. April 2012.

8.2 Datenbasen

Tabellen 066 und 067 des Statistischen Bundesamtes

AGEB – Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland

Anhang

Modellbeschreibung PowerFlex

Das am Öko-Institut entwickelte Strommarktmodell PowerFlex ist ein Fundamentalmodell, welches thermische Kraftwerke, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien, Pumpspeicherkraftwerke und flexible Stromverbraucher kostenminimal einsetzt, um die Stromnachfrage und den Bedarf an Regelleistung zu decken. Das Modell PowerFlex ist sowohl als lineares als auch als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem formuliert und wird gegenwärtig zur Ex-ante-Szenarienanalyse von Ausbaupfaden für erneuerbare Energien, Elektromobilität und Smart Grids und zur Ex-Post-Bewertung von Politikmaßnahmen, wie z. B. dem europäischen Emissionshandel, eingesetzt.

Die einzelnen Kraftwerke werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Kraftwerke mit einer installierten elektrischen Leistung größer 100 MW werden blockscharf und mit einem individuellen Wirkungsgrad erfasst. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen werden in technologie- und baujahrspezifischen Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Diese Anlagen können ihre Leistung ohne Berücksichtigung von Lastgradienten ändern.

Biomassekraftwerke, die Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, werden als Technologieaggregate im Modell abgebildet und sind somit Teil des thermischen Kraftwerksparks. Ihr Einsatz wird als flexibel angenommen¹⁶. Das zur Verfügung stehende Stromangebot aus Laufwasser, Wind offshore, Wind onshore und Photovoltaik wird mit Hilfe generischer Einspeiseprofile in stündlicher Auflösung vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge an Wasser-, Wind- und Photovoltaikstrom wird modellendogen bestimmt, so dass es bei negativer Residuallast und unzureichender Speicherkapazität zu inländisch nicht nutzbaren Überschüssen kommen kann.

Darüber hinaus werden im Modell Pumpspeicherkraftwerke mit Hilfe der installierten elektrischen Leistung und der Speicherkapazität vorgegeben. Ihr Einsatz (Stromnachfrage, Stromerzeugung) ist dabei Ergebnis der Modellierung.

Das Erzeugungsprofil für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich aus einem typischen Fernwärmeprofil und einer angenommenen Gleichverteilung für industrielle KWK-Anlagen zusammen. Für Must-run-Kraftwerke, wie z. B. Gichtgas- oder Müllverbrennungsanlagen, wird eine gleichverteilte Stromeinspeisung unterstellt. Die Wärme, die von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen zu decken ist, kann auch von Heizkesseln oder – je nach Szenario – aus Wärmespeichern bereitgestellt werden.

Die Stromnachfrage wird analog zur fluktuierenden Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien in stündlicher Auflösung vorgegeben.

¹⁶ Hierbei wird angenommen, dass Betrieb einer Biomasse-Anlage im Verlauf des Szenarienhorizonts eine wirtschaftliche attraktive Option darstellt.

Auf Basis einer vollständigen Voraussicht für alle 8760 Stunden des Jahres wird dann im Rahmen einer linearen Optimierung der kostenminimale Einsatz von thermischen Kraftwerken, Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien und Pumpspeicherkraftwerken unter Berücksichtigung technischer und energiewirtschaftlicher Nebenbedingungen bestimmt.

Das Optimierungsproblem ist in GAMS implementiert und wird mit Hilfe des Simplex-Algorithmus gelöst. Es besteht bei einem ganzjährigen Optimierungszeitraum (8760 Zeitschritte) aus ca. 2,5 Mio. Variablen.

Als Modellergebnis werden basierend auf dem stundenscharfen Kraftwerkseinsatz die Benutzungsstunden pro Kraftwerk, die Menge überschüssiger fluktuierender Stromerzeugung sowie die gespeicherte KWK-Wärmemenge und die Wärmeerzeugung in Kesseln ausgegeben.