



***Technologische und energiepolitische Bewertung
der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung
in Deutschland****

Prof. Dr. Georg Erdmann
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Lars Dittmar

Fachgebiet Energiesysteme – TU Berlin
Einsteinufer 25 (TA8) – 10587 Berlin – Tel. 030-314-22890
georg.erdmann@tu-berlin.de

Berlin, im März 2010

* Eine erste Version des Projektberichts wurde auf einem RWE-Fachgespräch am 26. März 2010 in Berlin mit Experten diskutiert. Die Autoren bedanken sich bei den Teilnehmern für die vielen wertvollen Anregungen.

1 Executive Summary

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird in der öffentlichen Diskussion bislang als ein zentraler Baustein für das Erreichen der nationalen CO₂-Reduktions- und Energieeffizienzziele angesehen. Im Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP) wurde deshalb das Ziel formuliert, den KWK-Strom-Anteil von derzeit ca. 12,5 % bis zum Jahre 2020 auf 25% zu verdoppeln. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde als wichtigste politische Maßnahme das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) mit Wirkung zum 1. Januar 2009 novelliert. Den aktuellen Entwicklungen zufolge hat es allerdings den Anschein, dass es nicht möglich sein wird, das KWK-Ausbauziel zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund behandelt die vorliegende Studie die Rolle von KWK im Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit. Unsere Analysen zeigen, dass die pauschale Bewertung von KWK als wirksames und kosteneffizientes Instrument zum Klimaschutz unzutreffend ist. Die Anwendungsbereiche der KWK sind sehr vielschichtig. Entsprechend variieren die Einsparungen an der Primärenergie sowie die damit verbundenen CO₂-Minderungsbeiträge. Paradoxerweise erhalten heute aber gerade diejenigen KWK-Technologien und KWK-Anwendungen die höchste Förderung, die unseren Berechnungen zufolge die geringsten Einspareffekte sowie die höchsten CO₂-Vermeidungskosten aufweisen. Eine undifferenzierte KWK-Förderung steht damit im Widerspruch zu einer volkswirtschaftlich effizienten Klimaschutzpolitik.

Darüber hinaus droht beim absehbaren Ausbau Erneuerbarer Energien im Bereich der Elektrizitätserzeugung und der Wärmebereitstellung sowie angesichts des Trends zur Energieeffizienz im Gebäudebestand ein zunehmender Zielkonflikt. Ohne zusätzliche Investitionen in die Flexibilität der Elektrizitätsversorgung führt der KWK-Ausbau aus Energiesystemensicht zu einer suboptimalen Energieversorgung.

Auch in Ländern mit einem hohen KWK-Anteil wie Dänemark und den Niederlanden zeichnet sich ein solcher Zielkonflikt ab. Im Fall von Dänemark ist der Systemkonflikt zwischen dezentraler KWK und Windstromerzeugung bereits erkennbar. Der hohe Windstromanteil kann nicht mehr vollständig in das dänische System integriert werden, sondern muss exportiert werden. In den Niederlanden kam eine jüngere Studie der TU Delft zu dem Ergebnis, dass es die kosteneffizienteste Lösung sei, zur Integration eines hohen Windstromanteils in das niederländische System einen Teil der KWK-Wärmeerzeugung durch Heizkessel zu ersetzen.

2 Hintergrund

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird in der öffentlichen Diskussion als ein zentraler Baustein für das Erreichen der nationalen CO₂-Reduktions- und Energieeffizienzziele angesehen. Ein häufig zu findender Vergleich von KWK und getrennter Erzeugung von Wärme und Strom ist in Abbildung 1 dargestellt. Hier wird ein erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerke (BHKW) mit der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in einem Kohlekraftwerk bzw. Heizölkessel verglichen. Diesem

Vergleich zufolge soll das BHKW zu einer bedeutenden Primärenergieeinsparung und CO₂-Verminderung gegenüber dem angenommenen Referenzsystem führen.

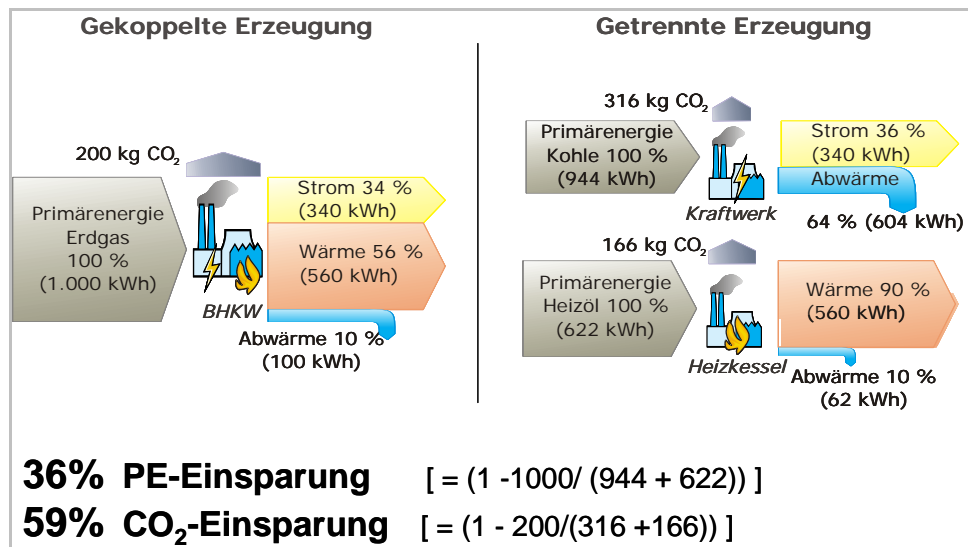


Abbildung 1: Nicht sachgerechte, aber häufig verwendete Darstellung der Primärenergie- und CO₂-Einsparungen eines BHKW

Dieser Vergleich ist jedoch irreführend, da hier drei unterschiedliche Effekte miteinander kombiniert werden (Abbildung 2):

- (1) Brennstoffeffekt: Wenn für die getrennte Erzeugung der gleiche Primärenergieträger unterstellt wird, in diesem Fall Erdgas, so reduziert sich der Einspareffekt um 22 Prozentpunkte.
- (2) Technologie-Effekt: Während die Brennstoffnutzungsgrade des BHKW dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, werden für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme veraltete Technologien unterstellt. Geht man jedoch auch bei der getrennten Erzeugung vom aktuellen Stand der Technik aus und unterstellt für die Referenztechnologien 55 Prozent (modernes GuD-Kraftwerk) bzw. 96 Prozent (Erdgas-Brennwertkessel), so reduziert dieser Technologie-Effekt den Einspareffekt noch einmal um 19 Prozentpunkte.
- (3) KWK-Effekt: Nur die verbleibenden 17 Prozentpunkte beziffern die Primärenergieeinsparung der gekoppelten gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung, nicht die in Abbildung 1 ausgewiesenen 59 Prozent.

Damit wird der so genannte KWK-Effekt unter Umständen immer noch überschätzt, denn in den allermeisten Fällen werden KWK-Anlagen nicht die gesamte Wärmelast eines Versorgungsobjektes oder Versorgungsgebietes übernehmen, sondern nur einen Teil des Wärmebedarfs decken. Für den Rest sorgen ein Heizwerk oder ein Spitzenkessel, die im Bedarfsfall auch als Backup-System fungieren.

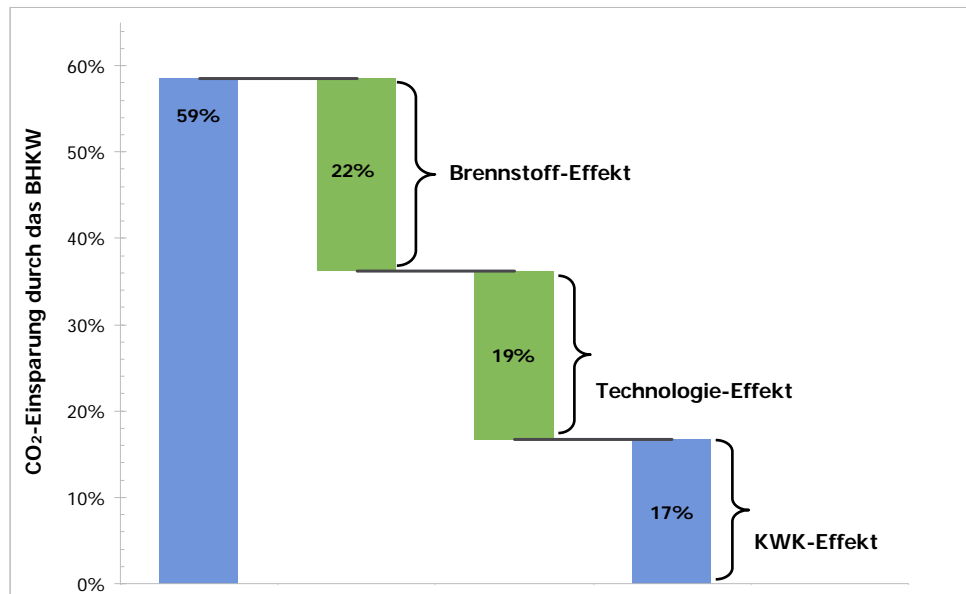


Abbildung 2: Dekomposition der CO₂-Einspareffekte eines BHKW

Abbildung 2 weist aber auch darauf hin, dass unter den heute zur Verfügung stehenden Technologien die kombinierte Wärme- und Stromerzeugung einen Beitrag zur Primärenergie- und CO₂-Einsparung leisten kann. Demzufolge wird im Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP) der Bundesregierung das Ziel formuliert, den KWK-Stromanteil von derzeit ca. 12,5% bis zum Jahre 2020 auf 25% zu verdoppeln. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde unter anderem das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) mit Wirkung zum 1. Januar 2009 novelliert. Die Novelle verlangt von den Netzbetreibern die vorrangige Abnahme und Vergütung von Strom aus KWK-Anlagen und stellt damit die Gleichrangigkeit zwischen KWK-Strom und Strom aus Erneuerbaren Energien her. Die Förderung der KWK-Stromerzeugung sowie der Wärmenetze erreicht bis zu 750 Mio. Euro pro Jahr.

Diese KWK-Förderung scheint jedoch nicht auszureichen, um einen KWK-Stromanteil von 25% zu erreichen. Entsprechend mehren sich heute die Stimmen, die eine Aufstockung der KWK-Förderung fordern. Vor diesem Hintergrund hat die RWE AG eine wissenschaftliche Expertise in Auftrag gegeben, mit der die aktuellen und zukünftigen Vorteile der KWK im Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit aus wissenschaftlicher Sicht analysiert werden sollen. Grundlage einer solchen Analyse ist der Vergleich von verschiedenen KWK-Konzepten mit der getrennten Erzeugung von Elektrizität und Wärme. Als Beurteilungskriterien sollen neben der Kosteneffizienz auch die Energie- und Klimateffizienz betrachtet werden.

3 Methodik

Um diese Aufgabe zu lösen, werden sieben unterschiedliche erdgasbasierte KWK-Versorgungskonzepte herangezogen, die von den Marktakteuren bei heutigen KWK-Investitionsentscheidungen im Vordergrund stehen und das gesamte Spektrum von KWK-Anwendungsfällen abdecken:

- I. Einfamilienhausversorgung (Mikro-KWK Anlage)
- II. Objektversorgung eines Verwaltungsgebäudes mit einem Blockheizkraftwerk
- III. Objektversorgung eines Hallenbads mit einem Blockheizkraftwerk
- IV. Nahwärmeversorgung eines Altbauviertels mit einem Blockheizkraftwerk
- V. Nahwärmeversorgung eines Neubauviertels mit einem Blockheizkraftwerk
- VI. Wärmeversorgung eines Industriebetriebes durch ein Gas und Dampf-Kraftwerk (GuD) mit Wärmeauskopplung
- VII. Fernwärmeversorgung durch eine GuD-Anlage mit Wärmeauskopplung

Die für die Studie verwendeten Annahmen bzgl. der KWK-Technologien sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Unsere Analyse bezieht sich jeweils auf die gesamte Versorgungsaufgabe. Dazu werden die betrachteten Versorgungsfälle jeweils entsprechend der aktuell gängigen Praxis anhand von spezifischen Jahresdauerlinien der Wärmelast ausgelegt.

Fall Nr.	I	II	III	IV	V	VI	VII
Beschreibung	Einfamilienhaus	Verwaltungsbau	Schwimmbad	Nahwärme Neubau	Nahwärme Altbau	Industriebetrieb	Fernwärme
Wärmebedarf [MWh _{th}]	24	444	2.235	4.503	5.416	181.961	1.366.412
Bedarfsdichte [MWh/ha]	-	-	-	350	500	-	650
Verteilkosten [€/MWh _{th}]	-	-	-	21	17	-	14
KWK-Technologie	Stirling	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	GuD	GuD
Module	-	1	3	3	4	-	-
Elektr. Leistung [kW _{el}]	1	30	150	300	400	20.000	200.000
Elektr. Wirkungsgrad	14,0%	30,0%	32,0%	34,0%	34,0%	42,5%	46,6%
Therm. Wirkungsgrad	83,0%	60,0%	58,0%	56,0%	56,0%	43,5%	40,3%
Investition [€/kW _{el}]	12.500	1.627	1.375	1.094	1.094	1.066	638
Variable Betriebskosten [€/MWh _{el}]	28	21	21	18	18	7	7
KWK-Volllaststunden/a	2.217	5.460	6.401	6.051	6.017	6.689	6.224
Leistungsanteil Spitzenlastkessel (mit Reserve)	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Leistung Spitzenkessel [kW _{th}]	10	192	518	1.581	1.550	36.392	345.923
Arbeitsanteil Spitzenkessel	43%	26%	22%	34%	27%	25%	21%
Wirkungsgrad Spitzenkessel	96%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Investition [€/kW _{th}]	-	103	96	81	82	52	41
Variable Betriebskosten [Euro/MWh _{th}]	-	0,2	0,2	0,13	0,13	0,13	0,13
Fixe Betriebskosten [% Investitionskosten/a]	-	2	2	2	2	1	1
Betrachtungszeit [a]	20	20	20	20	20	20	20
Kalkulationszinssatz	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%

Daraus ergeben sich die Jahreserzeugungsmengen der zusätzlich erforderlichen Spitzenlastkessel bzw. Reserveheizwerke. Für den Bereich der Fernwärme- und Nahwärme-KWK werden auch die Verluste der Wärmenetze sowie die Wärmeverteilungskosten betrachtet, die unter anderem von der Wärmebezugsdichte in den zu versorgenden Siedlungsstrukturen abhängen.

Zur Beurteilung der jeweils resultierenden CO₂-Emissionsminderungen sowie der volkswirtschaftlichen Erzeugungs- bzw. der CO₂-Vermeidungskosten werden die KWK-Versorgungskonzepte den folgenden Referenzsystemen der getrennten Erzeugung von Wärme und Strom gegenübergestellt:

- **Referenzsysteme Stromerzeugung:**
 - Gas und Dampf (GuD)-Kraftwerk
 - aktueller Strommix
- **Referenzsysteme Wärme:**
 - Erdgas-Brennwertkessel
 - elektrische Wärmepumpe
 - aktueller Wärmemix

Für die betrachteten Referenztechnologien verwendet unsere Studie nicht die Nenn-Wirkungsgrade und Energieverbrauchskennwerte, sondern die unter realitätsnahen Bedingungen gegebenen bzw. erreichbaren Werte. Bei diesem Ansatz gelangt man nahezu zwangsläufig auf Verteilungsfunktionen dieser Technologiemerkmale. Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine Verteilungsfunktion der Jahresnutzungsgrade von Brennwertkesseln (Quelle: Wolff, Teuber *et al.* 2004). Dieser Darstellung zufolge erreicht nur ein Teil der Brennwertkessel den von den Kesselherstellern angegebenen Norm-Nutzungsgrad von über 100 Prozent (H_u bezogen). Auch für die Jahresnutzungsgrade der GuD-Kraftwerke werden Verteilungsfunktionen verwendet, um damit die in jedem konkreten Anwendungsfall unterschiedlichen Einsatzparameter zu berücksichtigen. Unsere Studie verzichtet auf die detaillierte Berücksichtigung des technischen Fortschritts, in der Annahme, dass dieser in analoger Weise sowohl der getrennten als auch der gekoppelten Erzeugung von Elektrizität und Wärme zugutekommt.

Zur Integration der Verteilungsfunktionen in ein Rechenmodell empfiehlt sich der Rückgriff auf Monte-Carlo-Simulationen. Um die Modellergebnisse aus den Eingangsgrößen x_1, \dots, x_n zu ermitteln, wird eine große Anzahl (>10.000) von Simulationen durchgeführt, wobei die Eingangsgrößen x_1, \dots, x_n nach Maßgabe ihrer jeweiligen Häufigkeitsverteilungen zufällig ausgewählt werden. Entsprechend sind auch die Ergebnisvariablen Häufigkeitsverteilungen. Die Varianzen dieser Verteilungen spiegeln die Schwankungsbreite der Eingangsparameter wieder.

Da die Verteilungen der Eingangsvariablen auch extreme Annahmen am Rand der verfügbaren Datenbasis berücksichtigen, sind die Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen nicht mehr abhängig von einzelnen, eventuell nichtrepräsentativen Referenzwerten. Die Modellergebnisse zeigen das gesamte Spektrum der in der Praxis zu erwartenden Merkmale der getrennten bzw. der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme. Sie reflektieren den Grad an Vielfalt in den Anwendungsbereichen sowie die Unschärfen in den Ausgangsdaten.

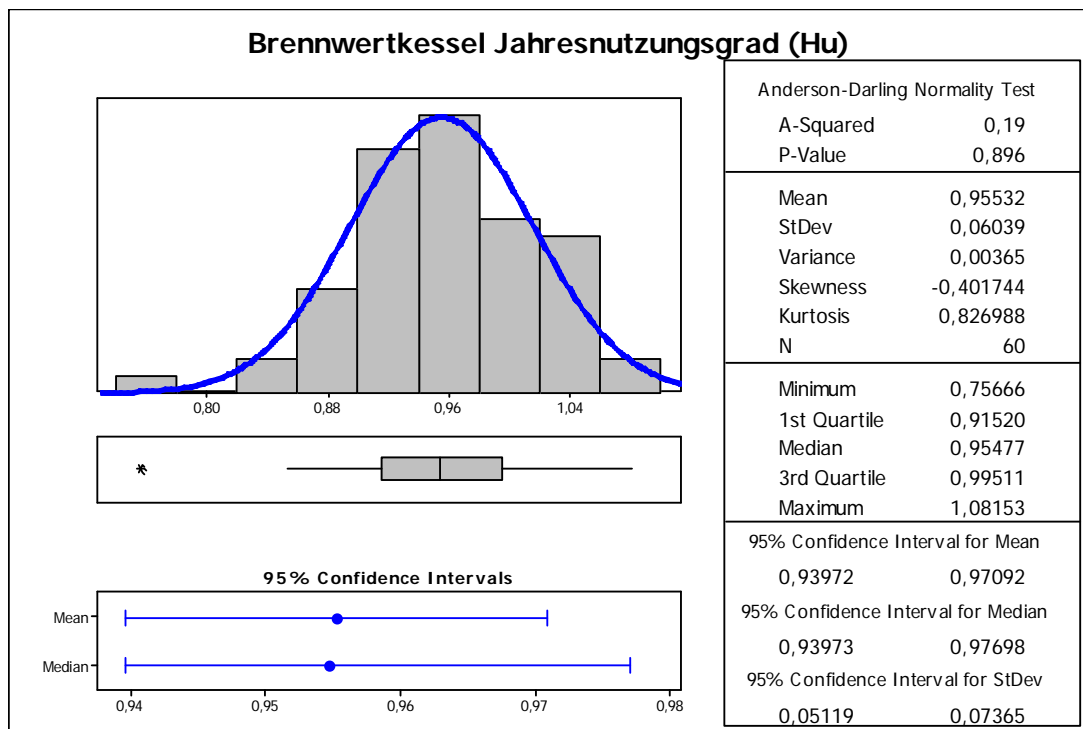


Abbildung 3: Verteilung der Nutzungsgrade von Brennwertkesseln (Wolff, Teuber et al. 2004)

Um die Auswirkungen eines gleichzeitigen Ausbaus der regenerativen und der KWK- Stromerzeugung zu modellieren, müssen stundenscharfe Berechnungen durchgeführt werden. Für die vorliegende Untersuchung wird das „*Baltic Model of Regional Electricity Liberalisation* (Balmorel)“ herangezogen. Balmorel ist ein technologieorientiertes, quasi-dynamisches lineares Optimierungsmodell für Märkte der leitungsgebundenen Energieträger Strom und Wärme. Ursprünglich wurde Balmorel in Dänemark zur Analyse der mittel- bis langfristigen KWK-Entwicklung in der Ostsee-Region entwickelt. Inzwischen wird Balmorel auch für eine Vielzahl anderer Fragestellungen eingesetzt: CO₂-Abscheidung und Speicherung, Wasserstoffwirtschaft, Analyse der CO₂-Intensität des Schweizer Stromabsatzes, Strom- und Fernwärmeaufbringung in Österreich uvm. Im Wesentlichen simuliert Balmorel die Umwandlung von Primärenergie in Strom und Wärme, die Übertragung von Elektrizität zwischen den Regionen und die Investitionsentscheidungen in neue Erzeugungs- und Übertragungsnetzkapazitäten.

Für die Simulationen des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2030 wird ein KWK-Ausbau entsprechend dem Leitszenario des BMU (Nitsch und Wenzel 2009) unterstellt. Dies bedeutet, dass die dezentrale KWK einen überproportionalen Beitrag leisten muss, weil die wärmeseitigen Potenziale der industriellen KWK-Nutzung und der Fernwärmeversorgung bereits weitestgehend ausgeschöpft sind (Nitsch und Wenzel 2009). Dementsprechend würden bis zum Jahr 2020 rund 13 GW_{el} dezentrale BHKW-Leistung installiert, bis zum Jahr 2030 sogar 17,5 GW_{el}. Trotz dieses KWK-Zubaus kommt es, der Leitstudie zu Folge, im Jahr 2020 nur zu einem KWK-Stromanteil von 22 Prozent. Erst 2030 würde das 25-Prozent-Ziel erreicht.

4 Ergebnisse

In der vorgelegten Studie werden drei Kernfragen beantwortet:

- Klimaeffizienz der KWK: Welchen Beitrag leistet die KWK in unterschiedlichen, praxisrelevanten Anwendungsfällen zur CO₂-Minderung und welche CO₂-Vermeidungskosten gehen damit einher?
- Zielkonformität des forcierten Ausbaus der KWK und der Erneuerbaren Energien: Wie wirkt sich ein verstärkter Ausbau der KWK und der Erneuerbaren Energien auf die gesamte, zukünftige Elektrizitätsversorgung aus?
- Warum konnte in Dänemark und den Niederlanden ein erheblich höherer KWK-Anteil an der Versorgung realisiert werden?

4.1 Klimaeffizienz der KWK

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der CO₂-Einsparpotenziale für die sieben betrachteten Anwendungsfälle der KWK-Nutzung in Referenz zur getrennten Erzeugung von Strom in GuD-Kraftwerken und der getrennten Erzeugung von Wärme in Erdgas-Brennwertkesseln. Drei der sieben Referenzfälle weisen mittlere Einsparpotenziale von weniger als 10 Prozent auf. Diese Referenzfälle sind: Mikro-KWK (I), Nahwärme im Neubau (IV) und Nahwärme im Altbau (V). Dies liegt am geringen elektrischen Wirkungsgrad und an den Leitungsverlusten in Nahwärmenetzen.

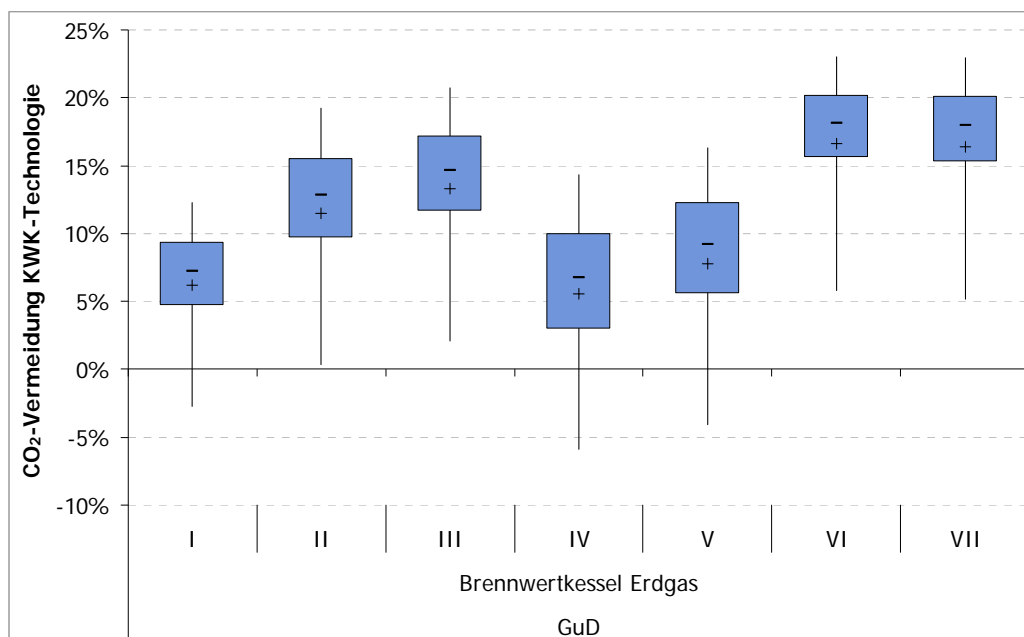


Abbildung 4: Aktuell erzielbare CO₂-Einsparungen der KWK-Referenzfälle verglichen mit einer GuD-Anlage und Erdgas-Brennwertkesseln

Nach Abbildung 4 bieten die übrigen Referenzfälle heute einen CO₂-Einspareffekt von mehr als 10 Prozent, wobei die GuD-basierte Fernwärmeversorgung (VII) mit 15 Prozent am besten abschneidet – trotz der berücksichtigten Leitungsverluste im Wärmenetz. Demnach ist der Fernwärmeausbau auf Basis von GuD-Kraftwerken attraktiv, sofern das zu versorgende Gebiet eine hohe Wärmebezugsdichte aufweist. Das ist allerdings bei der Neuversorgung von Gebieten mit Altbaubeständen im Normalfall nicht gegeben: Neue Fernwärmenetze konkurrieren mit bestehenden Heizungssystemen, weshalb bei der Neuerschließung effektiv zunächst nur geringe Anschlussdichten erreichbar sind, sofern kein ordnungspolitisch fragwürdiger Anschluss- und Benutzungszwang den Wettbewerb auf dem Wärmemarkt aufhebt.

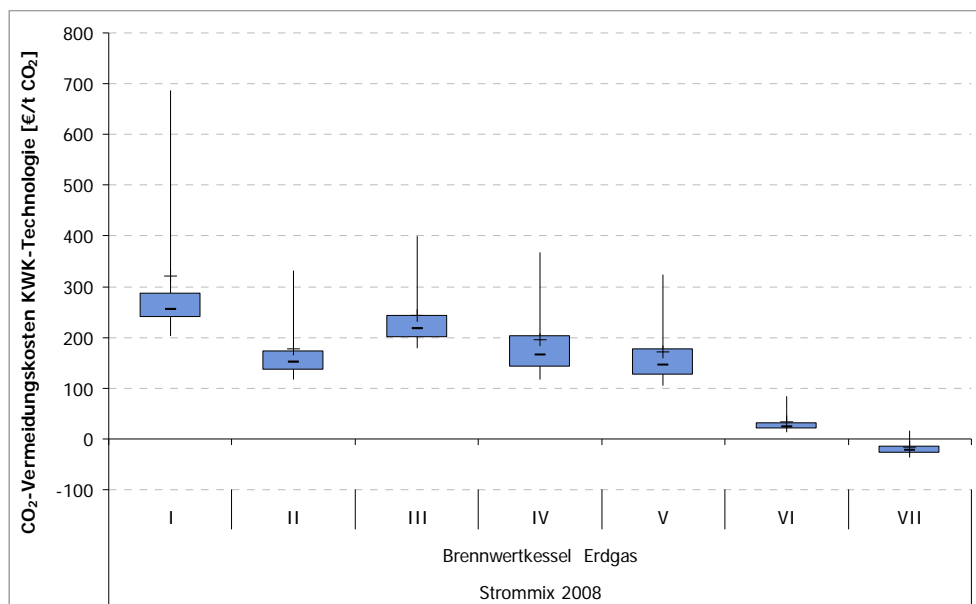


Abbildung 5: CO₂-Vermeidungskosten der KWK-Systeme im Vergleich zum deutschen Strommix 2008 und der Wärmebereitstellung in Erdgas-Brennwertkesseln

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die CO₂-Vermeidungskosten der sieben betrachteten KWK-Versorgungskonzepte gegenüber der getrennten Erzeugung von Elektrizität und Wärme mittels moderner Erdgas-Technologien. Während Abbildung 5 den deutschen Strommix des Jahres 2008 als Referenzsystem zugrunde legt, ist es in Abbildung 6 die Stromerzeugung mittels moderner Gas- und Dampfkraftwerke (GuD). Nur bei den betrachteten KWK-Systemen VI (Wärmeversorgung von Industriebetrieben) und VII (Fernwärmeversorgung) ergeben sich CO₂-Vermeidungskosten von weniger als 100 Euro/t CO₂. Bei der Fernwärmeversorgung sind die CO₂-Vermeidungskosten derzeit sogar negativ. Die Fernwärmeauskopplung aus neuen GuD-Kraftwerken ist klimapolitisch also sehr vorteilhaft und ohne zusätzliche Fördermittel wettbewerbsfähig, sofern man die mit einem massiven Ausbau der Fernwärmeversorgung unvermeidlich verbundenen Anlaufverluste ausblendet. Bei den anderen betrachteten KWK-Versorgungskonzepten liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei mehr als 150 Euro/t CO₂. Die höchsten Vermeidungskosten ergeben sich für das KWK-Versorgungskonzept I (Mikro-KWK). Zwar werden kleine KWK-Anlagen entsprechend der EU-Richtlinie 2004/8/EG als hocheffizient bezeichnet, und zwar selbst dann, wenn sie überhaupt keine Primärenergie einsparen. Doch ist ihr möglicher Beitrag zum Klimaschutz und zur Primärenergieeinsparung gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme vergleichsweise teuer. Kleine motorische Blockheizkraftwerke gelten

jedoch in der Öffentlichkeit als klimapolitisch besonders attraktiv und erhalten entsprechend dem KWK-Gesetz die höchste Förderung. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist dies zweifellos eine suboptimale Klimaschutzpolitik.

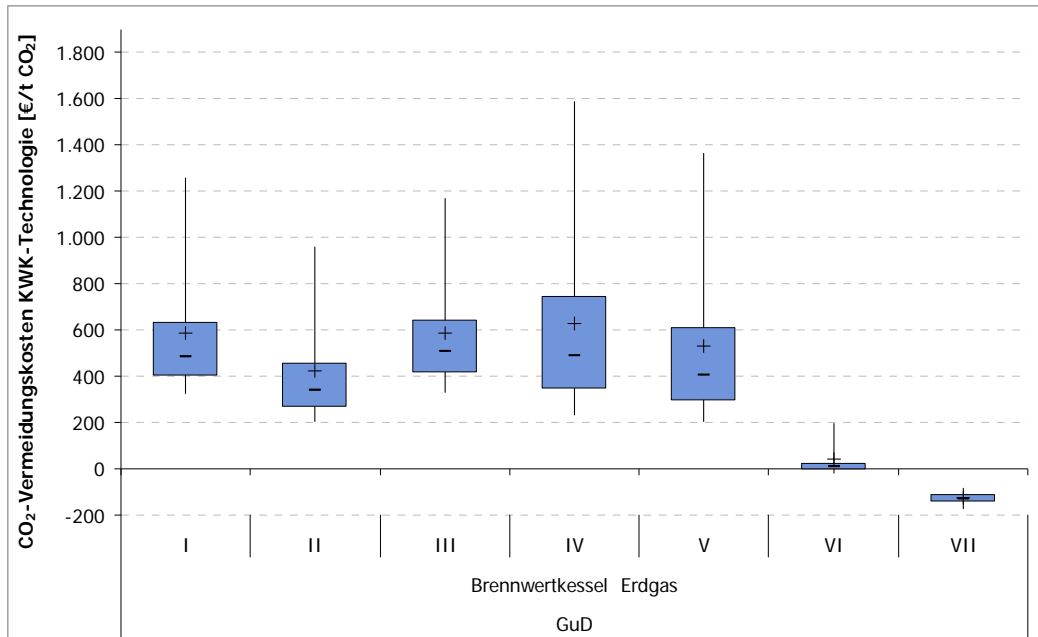


Abbildung 6: CO₂-Vermeidungskosten der KWK-Systeme im Vergleich zur GuD-Stromerzeugung und der Wärmebereitstellung in Erdgas-Brennwertkesseln

Zukünftig ist mit deutlich steigenden regenerativen Anteilen bei der getrennten Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung zu rechnen. Bei der Elektrizitätserzeugung bietet insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) einen maßgeblichen Anreiz für den Zubau von Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen. Entsprechend der Ziele der Bundesregierung wird die CO₂-Intensität des deutschen Strommixes im kommenden Jahrzehnt gegenüber dem aktuellen Wert von rund 600 g CO₂/kWh kräftig sinken (Abbildung 7).

Auch beim deutschen Wärmemix wird die CO₂-Intensität künftig unter den aktuellen Wert von rund 270 g CO₂/kWh fallen. Dank des Erneuerbare-Energie-Wärmegesetzes (EEWärmeG) werden insbesondere die Geothermie sowie die Solarthermie künftig eine erkennbar wichtigere Rolle im Wärmemarkt spielen und den Marktanteil der konventionellen Erdgas- und Heizölsysteme reduzieren. Energieeffiziente Neubauten und Gebäudesanierungen entsprechend der Energieeinsparverordnung (EnEV) werden die Wärmebezugsdichte künftig weiter absenken, womit die Nah- und Fernwärmeversorgung nicht nur wirtschaftlich vor zusätzliche Herausforderungen gestellt wird, sondern auch höhere Verluste bei der Wärmeübertragung hinzunehmen hat.

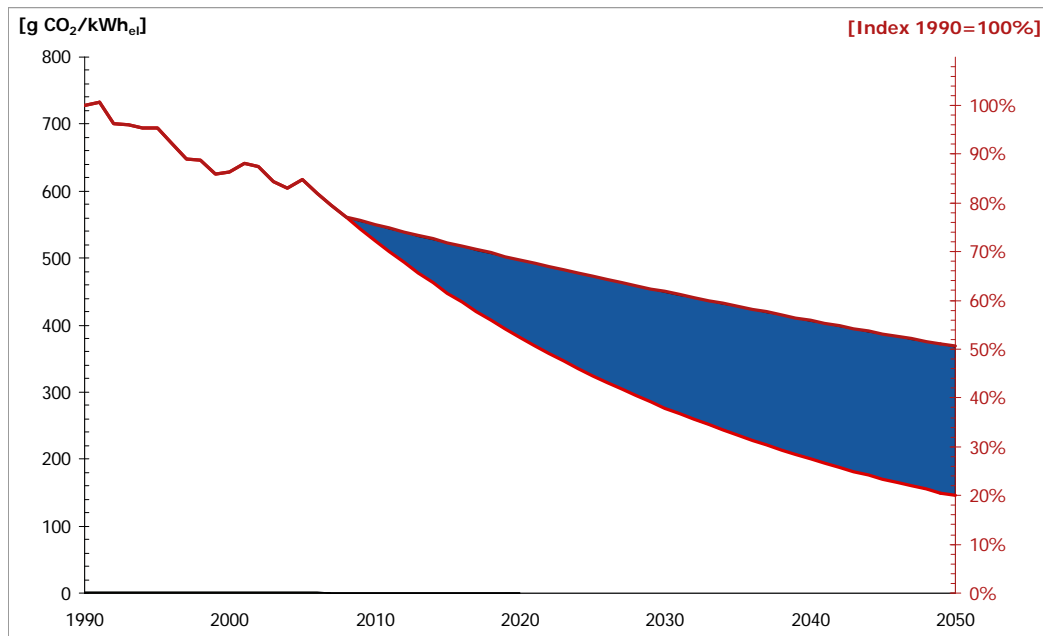


Abbildung 7: Spezifische CO₂-Emissionskoeffizienten des deutschen Strommix bis 2050

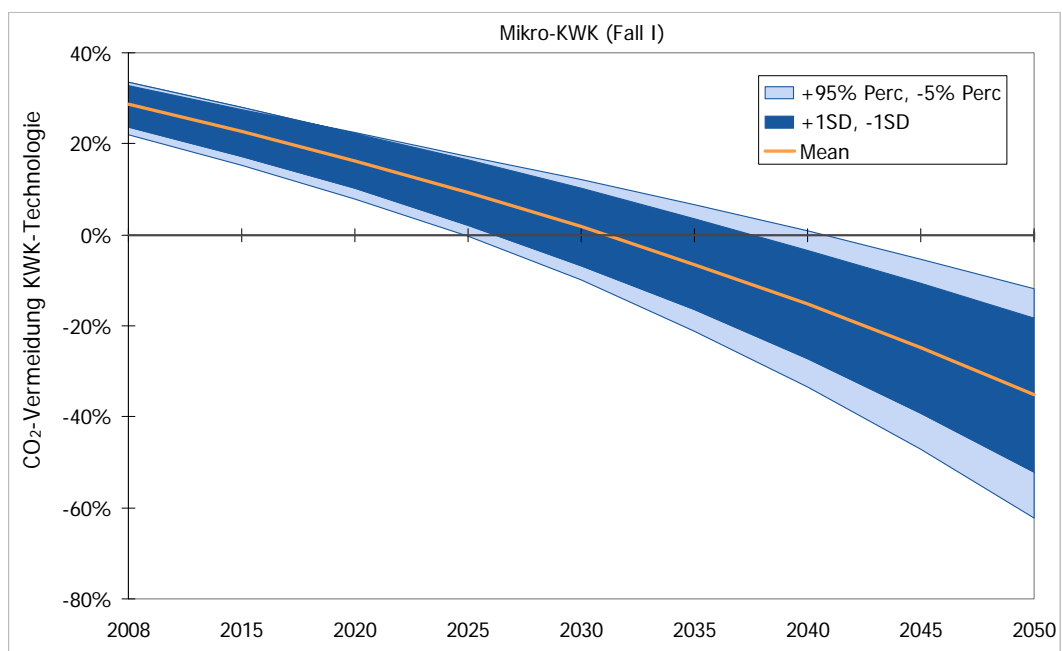


Abbildung 8: Dynamische Entwicklung des Einsparpotenzials des Referenzfalls Mikro-KWK

Unter Berücksichtigung dieser absehbaren Entwicklungen werden die klimapolitischen Vorteile der KWK innerhalb von einem oder zwei Jahrzehnten weitgehend erodieren. Der klimapolitische Vorteil der entsprechenden Versorgungskonzepte wird wohl in den 2020er Jahren (Mikro-KWK, Abbildung 9) beziehungsweise 2030er Jahren (Fernwärme, Abbildung 9) auslaufen. Angesichts der be-

triebswirtschaftlich notwendigen Betriebs- bzw. Nutzungsjahre von 2 Jahrzehnten sind aus heutiger Sicht nur noch Investitionen in große KWK-Anlagen (KWK-Systeme VI und VII) klimapolitisch sinnvoll.

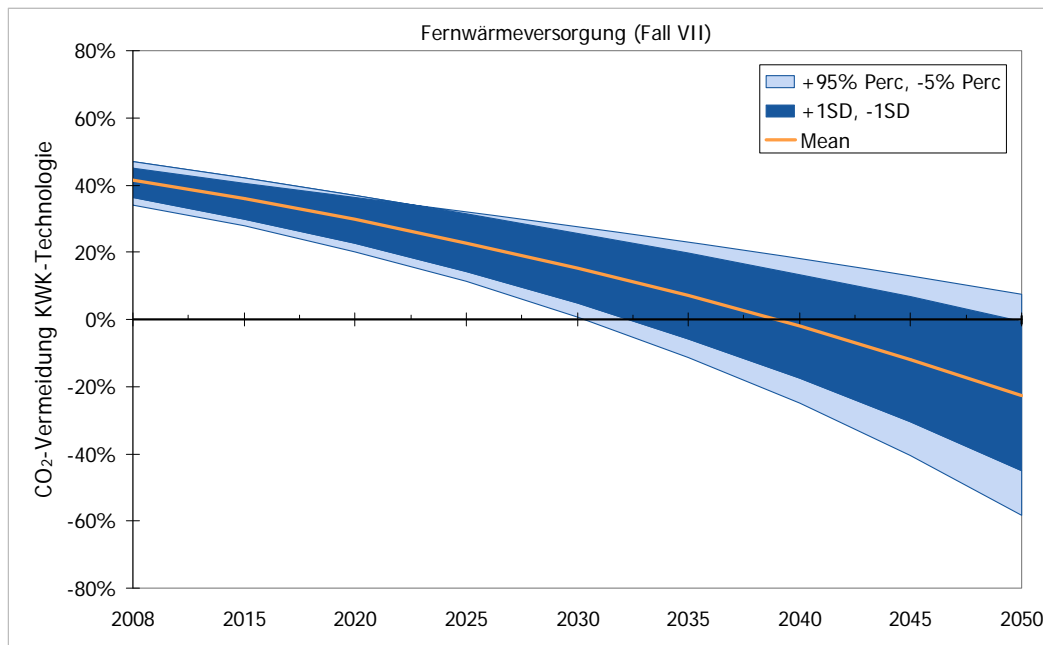


Abbildung 9: Dynamische Entwicklung des Einsparpotenzials des Referenzfalls Fernwärmeversorgung

Bei dieser Betrachtung wird unterstellt, dass neue KWK-Anlagen den durchschnittlichen Strom- und Wärmemix verdrängen. Im konkreten Einzelfall könnten andere Gegebenheiten vorliegen. Doch ist aus heutiger Sicht eine belastbare Beschreibung derartiger Situationen nicht wirklich möglich. Zur Beurteilung der längerfristigen politischen Weichenstellungen zugunsten bestimmter Energiesysteme lassen sich daher Approximationen nicht vermeiden. Hierbei sind der durchschnittliche Strom- und Wärmemix ohne Frage eine vernünftige Orientierungsgröße für langfristige Betrachtungen, insbesondere auch unter Berücksichtigung des KWK-Dispatchings entsprechend der Merit Order der deutschen Elektrizitätserzeugung.

4.2 Forcierter Ausbau von KWK und Erneuerbaren Energien

Neben den direkten Kosten des Klimaschutzes mittels KWK stellt sich die Frage, welche Folgen sich bei einem forcierten Ausbau der KWK bei einem gleichzeitigen Ausbau der Erneuerbaren Energien auf Ebene des gesamten Elektrizitätssystems ergeben. Während der Ausbau der Erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie, einen erhöhten Anspruch an die Flexibilität der Elektrizitätsversorgung stellt, wird durch den Ausbau der KWK die Flexibilität der Versorgung gemindert. Zwischen der monatlichen Erzeugung von Windstrom und KWK-Strom besteht eine hohe saisonale Korrelation. Abbildung 10 zeigt die relativen monatlichen Erzeugungsprofile von KWK- und Windstrom für Deutschland für die Jahre 2003 bis 2008. Die monatliche Erzeugung ist hier dergestalt normiert, dass die Jahressummen jeweils 100% ergeben.

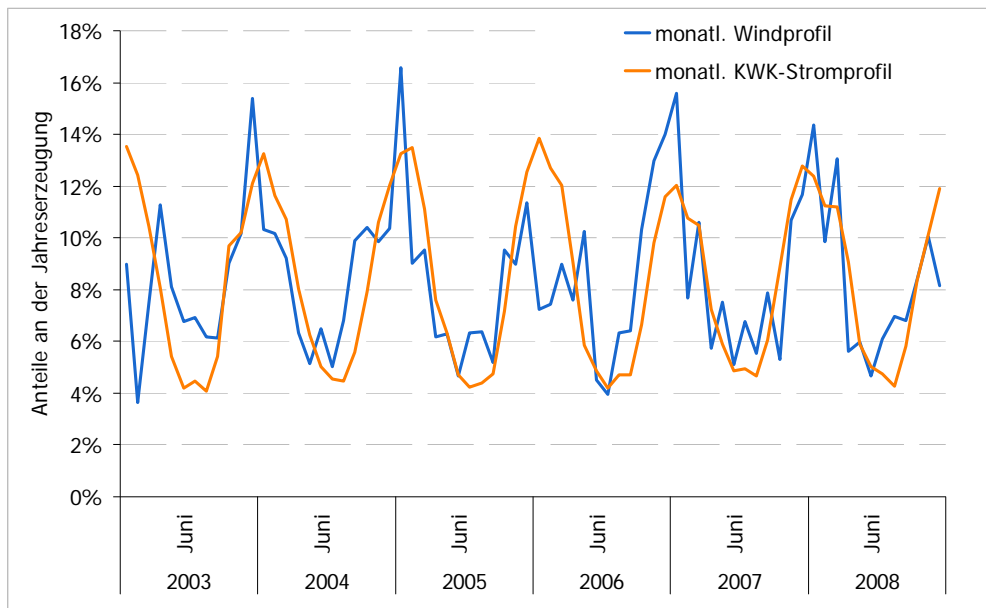


Abbildung 10: Monatliche Erzeugungprofile von Wind- und KWK-Strom in Deutschland zwischen 2003 und 2008 (Datenquelle: Statistisches Bundesamt 2009)

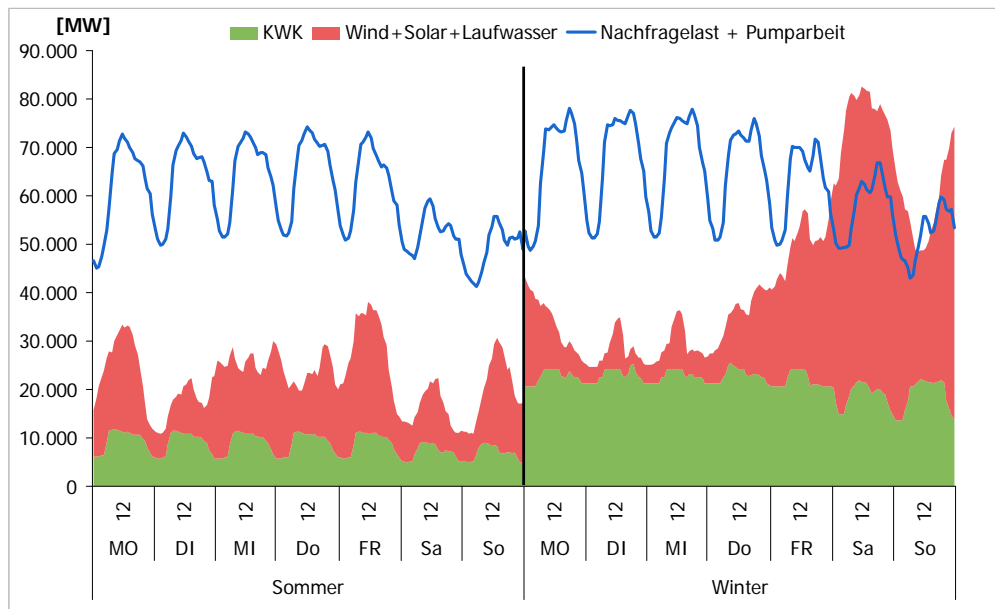


Abbildung 11: Stromerzeugung einer exemplarischen Winter- und Sommerwoche in 2030

Zur Analyse dieser Effekte werden stundengenaue Szenariorechnungen der Elektrizitätsversorgung für den Zeithorizont bis 2030 durchgeführt, wobei in den Rechnungen unterstellt wird, dass der Ausbau der KWK und der Erneuerbaren Energien gemäß den Zielen des Integrierten Energie- und

Klimaschutzprogramms erfolgen. Damit wird der zunehmende Zielkonflikt sichtbar, der sich bei einem gleichzeitigen Ausbau der KWK und der Windenergie gemäß IEKP-Zielen einstellen wird.

Mit steigender Durchdringung von Windenergie und KWK sind demzufolge gehäuft Situationen zu erwarten, in denen der jeweilige Strombedarf soweit durch Erneuerbare Energien gedeckt werden kann, dass der Betrieb von KWK-Anlagen – oder der Windkraftanlagen – eingeschränkt werden muss. Abbildung 11 zeigt exemplarisch eine solche Situation für das modellierte Jahr 2030. Der Abbildung ist die KWK-Stromerzeugung sowie die Nachfragelast einer Winter- und Sommerwoche des Modelljahres 2030 zu entnehmen. Für das Ende der Winterwoche ergibt sich eine Situation, in welcher die Summe von KWK-Strom und Strom aus Erneuerbaren Energien die Nachfragelast übersteigt. Es handelt sich um ein Wochenende, an welchem die Einspeisung von KWK-Strom und Strom aus Erneuerbaren Energien hoch, die Stromnachfrage jedoch niedrig ist. In dieser Situation ist das System nicht mehr in der Lage, den erzeugten Strom zu integrieren. Der maximale Erzeugungsüberschuss an diesem Tag beträgt ca. 30 GW, d.h. das 1,7-fache der derzeit bestehenden Stromexportkapazitäten von ca. 18 GW.

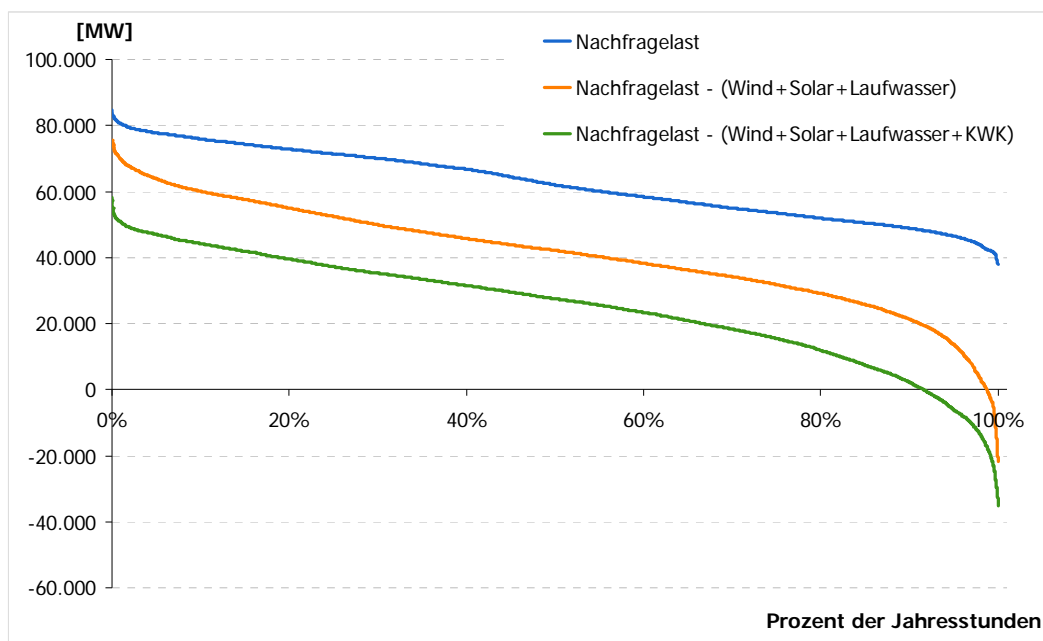


Abbildung 12: Nachfragelast sowie Residuallasten des Modelljahres 2030

Betrachtet man das gesamte Jahr 2030, so übersteigt die alleinige Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in 58 Stunden des Jahres die Stromnachfrage, sofern keine zusätzlichen Must-run-Stromerzeugungskapazitäten zur Netzstabilisierung erforderlich sind. Inclusive der Erzeugung aus KWK-Anlagen sind es hingegen 525 Stunden, also ca. das 10-fache (Abbildung 12). In solchen Stunden muss entweder die KWK-Erzeugung oder die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien herunter geregelt werden oder es muss zusätzlich in die Flexibilität der Stromerzeugung bzw. vor allem der KWK investiert werden. Das Priorisieren flexibler KWK (z.B. Entnahme-Kondensations-Anlagen), Anreize zur flexiblen Betriebsführung von KWK-Anlagen, die Errichtung thermischer bzw. elektrischer Speicherkapazitäten, zusätzlicher Stromexport oder die Bereitstellung von Backup-Boilern sind notwendige Strategien, den Angebotsüberschuss in das System zu integrieren. Doch diese Maßnahmen ver-

teuern letzten Endes die Strategien zum KWK-Ausbau und zehren dementsprechend den klimapolitischen Vorteil eines verstärkten KWK-Ausbaus auf.

4.3 KWK-Situation in Dänemark und den Niederlanden

In der Diskussion um den Ausbau der KWK in Deutschland werden immer wieder die Niederlande und Dänemark als Vorzeigenationen in Sachen KWK bemüht. Nach dem Vorbild dieser Länder sollte auch Deutschland in der Lage sein, in überschaubaren Zeiträumen den KWK-Anteil an der Stromproduktion auf 30% (Niederlande) oder gar 50% (Dänemark) zu steigern. Die Analysen des KWK Ausbaus in den Niederlanden und Dänemark zeigen, dass die Entwicklung des KWK-Ausbaus unterschiedliche Wege genommen hat: Während in Dänemark vor allem der Fernwärmemarkt die Entwicklung geprägt hat, ist in den Niederlanden die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung dominierend. Im „Erdgasland“ Niederlande spielt die Fernwärme aufgrund des Konkurrenzdrucks zur Erdgasversorgung mit einheimischen Gasvorkommen nur eine untergeordnete Rolle. In Dänemark wiederum hat die Fernwärme eine lange Tradition. Bereits in den 1970ern lag dort der Anteil der Fernwärme- bzw. Nahwärmeversorgung an der gesamten Wärmebereitstellung bei 30%.

Gemeinsam ist beiden Ländern, dass der Ausbau der KWK mit massiver politischer Unterstützung erfolgte und die KWK-Förderung bereits Ende der 1970 Jahre einsetzte. Beide Länder wählten jedoch unterschiedliche Wege zur Förderung des KWK-Ausbaus. Die dänische Energiepolitik stützte sich stark auf das Ordnungsrecht. Entsprechend wurde der Fernwärmeausbau in den Anfängen mit einem planwirtschaftlichen Ansatz vorangetrieben. Das dänische Wärmeversorgungsgesetz aus dem Jahr 1979 priorisierte den Ausbau der Fernwärme und ist in seiner Verbindlichkeit vergleichbar mit der Bauleitplanung in Deutschland. Die Niederlande wiederum setzten auf anreizkompatible Instrumente. Kern der Förderung sind energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen, denen zufolge Investitionen in die KWK für Industrie und Gewerbe, aber auch für Joint Ventures zwischen Verteilnetzbetreibern und Industrie wirtschaftlich attraktiv sind. Die hohen Einspeisevergütungen auf Basis der vermiedenen Bezugskosten, diverse zusätzliche Förderprogramme und nicht zuletzt die besondere Konstellation der niederländischen Elektrizitätswirtschaft der 1990er Jahre ermöglichten den starken Zubau der KWK in den Niederlanden.

In beiden Ländern zeichnet sich der oben beschriebene Systemkonflikt zwischen KWK-Ausbau und hohen regenerativen Stromerzeugungsraten ab. Im Fall von Dänemark äußert sich dieser Konflikt bereits heute, und zwar durch die Notwendigkeit von Stromexporten in benachbarte Länder im Fall hoher Windstromerzeugung. In den Niederlanden sind Experten der Ansicht, dass die kosteneffizienteste Lösung zur Integration eines hohen Windstromanteils in das niederländische System in der Flexibilisierung der KWK-Erzeugung besteht, wobei hierzu ein signifikanter Teil der KWK-Wärmeerzeugung durch Heizkessel ersetzt werden muss (Ummels et al. 2007).

5 Zusammenfassende Bewertung

Die Anwendungsbereiche der KWK sind sehr vielschichtig. Entsprechend variieren die Einsparungen an Primärenergie sowie die damit verbundenen CO₂-Vermeidungskosten. Paradoxerweise erhalten heute aber gerade diejenigen KWK-Technologien und KWK-Anwendungen besonderen politischen Zuspruch, die mit den höchsten CO₂-Vermeidungskosten verbunden sind. Unseren Analysen zufolge weist gerade die kleine KWK die höchsten Vermeidungskosten auf, ist also klimapolitisch wenig effizient. Darüber hinaus verflüchtigen sich die klimapolitischen Vorteile sogar bei den heute noch attraktiven Fernwärme-Versorgungskonzepten bis in die 2030er Jahre, weil bei der getrennten Strom- und Wärmeversorgung deutliche CO₂-Minderungen absehbar sind.

Wenn anstelle der isolierten KWK-Betrachtung eine integrierte Analyse der künftigen Elektrizitätsversorgung erfolgt, zeichnen sich zunehmende Systemkonflikte ab: Der massive Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung passt nicht zusammen mit dem gleichzeitigen Festhalten an den ehrgeizigen KWK-Ausbaenzielen. Ohne zusätzliche Investitionen in Elektrizitäts- und Wärmespeicher werden künftig KWK-Anlagen oder die erneuerbaren Energieanlagen zu bestimmten Zeiten teilweise leistungsreduziert produzieren müssen, während zu anderen Zeiten aus beiden Systemen keine ausreichenden Strommengen bereitgestellt werden können.

Gerade auch in Ländern mit einem hohen KWK-Anteil wie Dänemark und den Niederlanden zeichnet sich ein solcher Zielkonflikt bereits konkret ab und stellt ein Problem für den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien in beiden Ländern dar. Für Dänemark lässt sich der Systemkonflikt zwischen dezentraler KWK und Windstromerzeugung darin ablesen, dass schon heute ein Teil des Windstroms nicht in das dänische System integriert werden kann, sondern exportiert werden muss. Für die Niederlande zeigen Studien, dass zur Integration eines hohen Windstromanteils in das niederländische System ein signifikanter Teil der KWK-Wärmeerzeugung durch Heizkessel ersetzt werden muss, um so die notwendige Flexibilität für die Integration von Windstrom zu schaffen.

Wenn sich in den kommenden Jahren bestätigen sollte, dass das Ziel der Verdopplung des KWK-Anteils im Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm der Bundesregierung (IEKP) nicht erreicht wird, so wäre dies angesichts des absehbaren Ausbaus der Erneuerbaren Energien und der energetischen Modernisierung des Gebäudebestands kein klimapolitischer Nachteil. Deshalb besteht in diesem Fall auch kein Handlungsbedarf zugunsten einer noch einmal verstärkten KWK-Förderung.

Literatur

Eikmeier, B., J. Gabriel, *et al.* (2006): Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung., Energie & Management

Hekkert, P., R. Harmsen, *et al.* (2007): "Explaining the rapid diffusion of Dutch cogeneration by innovation system functioning." *Energy Policy* 35(9), S. 4677–4687

Horn, M., H.-J. Ziesing, *et al.* (2007): Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO₂-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten (Verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung). Dessau, Umweltbundesamt

Jeeninga, H., E. Honig, *et al.* (2002): Effect van energie en milieubeleid op broeikasgasemissies in de periode 1990-2000, Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM)

Mignard, D., G. P. Harrison, *et al.* (2007): "Contribution of wind power and CHP to exports from Western Denmark during 2000–2004." *Renewable Energy* 32(15): 2516–2528

Nitsch, J. und Wenzel, B. (2009): Leitszenario 2009 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Ummels, B.C., Pelgrum E., Kling W.L. (2007) Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply. IET Renewable Power Generation Special Issue - selected papers from EWEC 2007

Statistisches Bundesamt (2009) Monatsbericht über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung der Stromerzeugungsanlagen für die allgemeine Versorgung 2003 bis 2008. Statistik-Nr. 066K. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt

Verbong, G. and R. Raven (2007): "Multi-Regime Interactions in the Dutch Energy Sector: The Case of Combined Heat and Power Technologies in the Netherlands 1970–2000." *Technology Analysis & Strategic Management* 19(4): 491 - 507

Wolff, D., P. Teuber, *et al.* (2004): Abschlussbericht Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizkesseln mit Gas-Brennwertkesseln. Wolfenbüttel, Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel