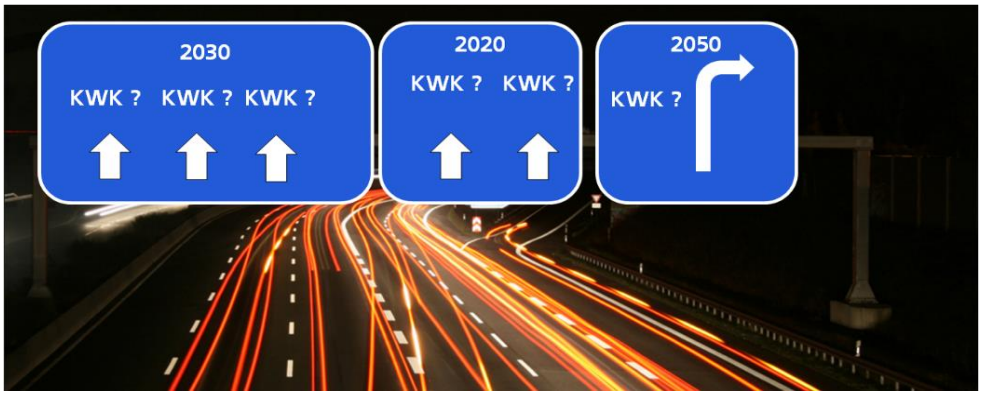
Fraunhofer ISI

Kurzpapier

Vorabanalyse Langfristige Rolle und Modernisierung der Kraft-Wärme-Kopplung



Dr. Frank Sensfuß

Gerda Deac

Christiane Bernath

Unter Mitarbeit von Katharina Grave

Karlsruhe, 03.02.2017

Abstract

Dieses Kurzpapier analysiert Perspektiven für die mittel- bis langfristige Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an der Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmesektor. Kernaussagen zur zukünftigen Entwicklung basieren auf einer Literaturanalyse. Abgeleitet werden Handlungsleitbilder für die Weiterentwicklung des deutschen Strom- und Wärmesystems. Die Handlungsleitbilder verdeutlichen den besonderen strategischen Wert der Wärmenetze und die Notwendigkeit ihres Erhalts und der Modernisierung. Sie zeigen, wie die fossile KWK als Brückentechnologie in einem System mit sinkenden Emissionen genutzt werden kann. Erneuerbare Energien werden langfristig zur leitenden Technologie im Strom- und Wärmesektor. Sie steigern den Bedarf für Flexibilität im Strom- und Wärmemarkt. Zentral für eine effiziente Dekarbonisierung ist ein konsistentes Preissignal in beiden Sektoren, das sowohl Brennstoffkosten als auch die Kosten von CO_2-Emissionen korrekt widerspiegelt.

Kurzfassung

Diese Analyse zeigt zentrale Trends für eine volkswirtschaftlich sinnvolle zukünftige Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Deutschland. Sie berücksichtigt bestehende Literatur und vertieft die Analyse der BMWi-Langfristszenarien. Auf dieser Basis werden Handlungsleitbilder für die KWK abgeleitet.

Die Bereitstellung von Strom- und Wärme (<500 C°) kann am kostengünstigsten dekarbonisiert werden. Die Klimaschutzziele erzeugen deshalb einen starken Dekarbonisierungsdruck auf diese beiden Sektoren.

Die KWK kann in beiden Sektoren eine relativ kostengünstige Dekarbonisierungsoption sein. Dafür muss sie jedoch nachweislich gleichzeitig im Strom- und Wärmesektor kostengünstig CO_2-Emisionen einsparen. KWK mit fossilen Brennstoffen kann dabei als Brückentechnologie angesehen werden. Die genaue Entwicklung hängt von vielen Faktoren ab. Durch die Dekarbonisierung werden Erneuerbare Energien langfristig die leitende Technologie in Strom- und Wärmesektor werden. Dies erfordert ein hohes Maß an Flexibilität in beiden Sektoren.

Wärmenetze schaffen strategische Flexibilität für die Energiewende. Denn Wärmenetze können leichter auf erneuerbare Energien oder andere, emissionsarme Wärmeträger umgestellt werden als eine Vielzahl einzelner Heizsysteme.

Um Flexibilität im Strom- und Wärmesektor bereitzustellen, wird langfristig in den Wärmenetzen die hybride Wärmebereitstellung aus Strom und thermischer Feuerung vorteilhaft. Sie ergänzt die Nutzung von Effizienztechnologien wie Wärmepumpen und KWK. Um die Flexibilität zielorientiert zu nutzen, müssen der Strom- und der Wärmemarkt effizient und störungsfrei koordiniert sein.

Aus den Aussagen ergeben sich **Handlungsleitbilder** für eine effiziente kurzfristige und langfristige Entwicklung des Strom-Wärmesystems:

- Strategische Flexibilität durch Wärmenetze ist gerade bei bestehender politischer und technologischer Unsicherheit wichtig. Wärmenetze sollten deshalb erhalten und modernisiert werden.
- Wird KWK weiterhin gefördert, sollten die Emissionseinsparung und der Wert der Leistungsbereitstellung laufend überprüft werden.
- An der Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmesektor müssen flexible Erzeugungsinfrastrukturen (Wärmespeicher, hybride Feuerung, flexible KWK) geschaffen werden.

- Im operativen Einsatz von Strom- und Wärmeerzeugungstechnologien müssen Preissignale möglichst konsistent sein. Preise müssen sowohl die Kosten der Brennstoffe als auch den Preis für CO_2-Emissionen effizient widerspiegeln.

Inhaltsverzeichnis

Abstract **2**

Kurzfassung **3**

Inhaltsverzeichnis **5**

1 Einleitung **7**

2 Die zukünftige Rolle der KWK in der Literatur **8**

2.1 Generelle Überlegungen zur KWK 8

2.2 Mengenentwicklung der KWK 9

2.2.1 Szenarienvergleich der KWK-Stromerzeugung 9

2.2.2 Szenarienvergleich fossile KWK-Stromerzeugung 13

3 Analyse der zukünftigen Rolle der KWK anhand der BMWi-Langfristszenarien **16**

3.1 Ausgangslage zu Klimaschutzzielen 16

3.2 Bereitstellung von Strom und Wärme 18

3.2.1 Fokus Stromsektor 18

3.2.2 Fokus Wärmebereitstellung 21

3.3 Szenarienvergleich und Wirkungsmechanismen 23

3.3.1 Erzeugungsperspektive 23

3.3.2 Die Rolle der Wärmenetze 25

3.4 Flexibilitätsanforderungen 26

3.5 Abgleich mit Kernaussagen in der Literatur 29

4 Handlungsleitbilder **32**

5 Literaturverzeichnis **34**

6 Anhang 37

6.1 Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015) 37

6.2 Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr (IWES et al. 2015) 38

6.3 Energiereferenzprognose (Prognos AG et al. 2014) 39

6.4 Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas (Blesl 2014) 40

6.5 KWK-Ausbau (Gores et al. 2014) 41

1 Einleitung

Dieses Kurzpapier fasst die Ergebnisse der Vorabanalyse „Langfristige Rolle und Modernisierung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)“ im Rahmen des Projektes „Leitstudie Strom – Analysen für eine sichere, kosteneffiziente und umweltverträgliche Stromversorgung“ zusammen. Ziel der Analyse ist zentrale Trends für eine volkswirtschaftlich sinnvolle zukünftige Entwicklung der KWK im Zeitraum 2030/2050 anhand einer Literaturanalyse zu identifizieren.

Dazu werden die Ergebnisse relevanter Studien zusammengetragen und gegenübergestellt (Kapitel 2). In Kapitel 3 wird die Literaturanalyse um eine Analyse der Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Fraunhofer ISI et al. 2017) ergänzt, da den Autoren zu dieser Studie detailliertere Daten vorliegen. In dieser Analyse stehen die Ergebnisse zur Entwicklung der KWK und die zugrunde liegenden Wirkzusammenhänge im Fokus. Einige Ergebnisse dieser Vorabanalyse wurden in den aktuellen Diskussionsprozess der AG1 der Plattform Strommarkt eingespeist. In Kapitel 4 werden zentrale Handlungsleitbilder für die Weiterentwicklung des Energiesystems an der Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmeversorgung abgeleitet. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden im weiteren Projektverlauf vertiefende Überlegungen zu den Zielsetzungen und Handlungsleitbildern für die zukünftige Entwicklung der KWK vorgenommen.

2 Die zukünftige Rolle der KWK in der Literatur

Dieser Abschnitt untersucht die zukünftige Rolle der KWK in der Literatur. Auf Basis einiger genereller Überlegungen zur KWK werden ausgewählte Szenarienstudien in Bezug auf die sich ergebende Mengenentwicklung der KWK im Allgemeinen und der fossilen KWK im Besonderen untersucht.

2.1 Generelle Überlegungen zur KWK

Die KWK verbindet die Sektoren Strom und Wärme (vgl. Abbildung 2-1). Die Entwicklungen in beiden Sektoren entscheiden daher über die Vorteilhaftigkeit der KWK. KWK ist genau dann eine vorteilhafte Technologie, wenn sie gleichzeitig im Strom- und Wärmesektor eine kostengünstige und CO_2-arme Erzeugungstechnologie darstellt. Daraus ergeben sich zwei zentrale Wirkfaktoren: das Emissionsbudget und der Wert Bereitstellung gesicherter Leistung, der sich aus der Menge alternativer Stromerzeugungstechnologien mit hoher Verfügbarkeit und den jeweiligen spezifischen Emissionen ergibt.

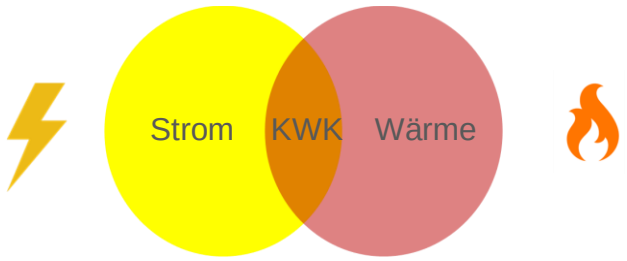


Abbildung 2-1: KWK als Verbindung zwischen Strom- und Wärmesektor

In Abbildung 2-2 ist für verschiedene Situationen im Strom- und Wärmemarkt das CO_2-Minderungspotenzial der KWK schematisch dargestellt. Die Häufigkeit der einzelnen Situationen operativen Einsatz (Stunden/Viertelstunden) entscheidet über die Vorteilhaftigkeit der KWK. In der Übergangsphase kann die KWK ihre Vorteile als CO_2-arme Technologie ausspielen und Emissionen gegenüber einer ungekoppelten Erzeugung mindern. Je höher jedoch die erneuerbaren Anteile im Strom- und Wärmemarkt werden und je weniger Emissionsbudget noch zur Verfügung steht, desto weniger kann die KWK zur Minderung von CO_2-Emissionen beitragen.

	Situation	Minderung der CO_2-Emissionen
	Übergangsphase: KWK-Erzeugung ersetzt ungekoppelte fossile Strom- und Wärmeerzeugung	↗
	Übergangsphase: Häufig Leistungsbedarf, der nicht CO_2-arm gedeckt werden kann	↗
	In Zukunft: Selten Leistungsbedarf, da hohe EE-Einspeisung	↘
	In Zukunft: In Strom- und Wärmemarkt hohe EE-Anteile, nur Bedarf an sehr CO_2-armer Erzeugung	↘

Abbildung 2-2: Situationen am Strom- und Wärmemarkt und Vorteil der fossilen KWK

Zwischenfazit Generelle Überlegungen zur KWK

Aussage 1: KWK ist eine vorteilhafte Technologie, wenn Sie gleichzeitig im Strom- und im Wärmesektor eine kostengünstige und CO_2-arme Erzeugungstechnologie darstellt.

2.2 Mengenentwicklung der KWK

2.2.1 Szenarienvergleich der KWK-Stromerzeugung

Generell kann zwischen zwei Arten der Literatur unterschieden werden: Studien mit Szenarienrechnungen, die meistens auch quantitative Angaben zur langfristigen Entwicklung der KWK enthalten, und Studien mit allgemeinen Schlussfolgerungen zur Entwicklung der KWK, die keine expliziten Zahlen zum Ausbau angeben. Nachfolgend werden nur die Studien mit konkreten Angaben zum langfristigen Ausbau der KWK (Szenarienrechnungen) für den Vergleich verwendet. Im Rahmen dieser Analyse werden folgende Studien betrachtet:

- Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015)
- Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr (IWES et al. 2015)
- Energiereferenzprognose (Prognos AG et al. 2014)
- Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas (Blesl 2014)
- KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten (Gores et al. 2014)

Im Anhang dieses Dokumentes findet sich jeweils ein kurzer Steckbrief der untersuchten Studie mit Beschreibung der Szenarien, Annahmen und Ergebnissen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen grafisch die Entwicklung der KWK-Stromerzeugung aus den Studien. Beim Vergleich der Werte ist zu beachten, dass es sich bei den Daten zu KWK-Stromerzeugung nicht immer um eine exakt gleich definierte Größe handelt. Die exakte Definition kann sich erheblich auf die numerischen Werte auswirken (→ siehe Infobox).

Infobox: Indikatoren für die KWK

In der Literatur werden verschiedene Bezugsgrößen zur Angabe der KWK-Stromerzeugung angegeben. Unterschiede ergeben sich in Bezug auf den genutzten Brennstoff und auf die Bewertung der ungekoppelten Stromerzeugung in KWK-Kraftwerken. Generell muss bei Vergleichen immer beachtet werden, auf welche Bezugsgröße sich der angegebene KWK-Wert bezieht.

Abbildung 2-3 zeigt exemplarisch die Werte für die Stromerzeugung aus KWK aus dem Basisszenario der BMWi-Langfristszenarien (Fraunhofer ISI et al. 2017) bei verschiedenen Bezugsgrößen. Die deutliche Spreizung des Wertes von 90 TWh bis 130 TWh zeigt, wie wichtig eine klare Definition des verwendeten Indikators ist. Dies trifft sowohl auf den Vergleich verschiedener Studien als auch die Definition politischer Ziele zu.

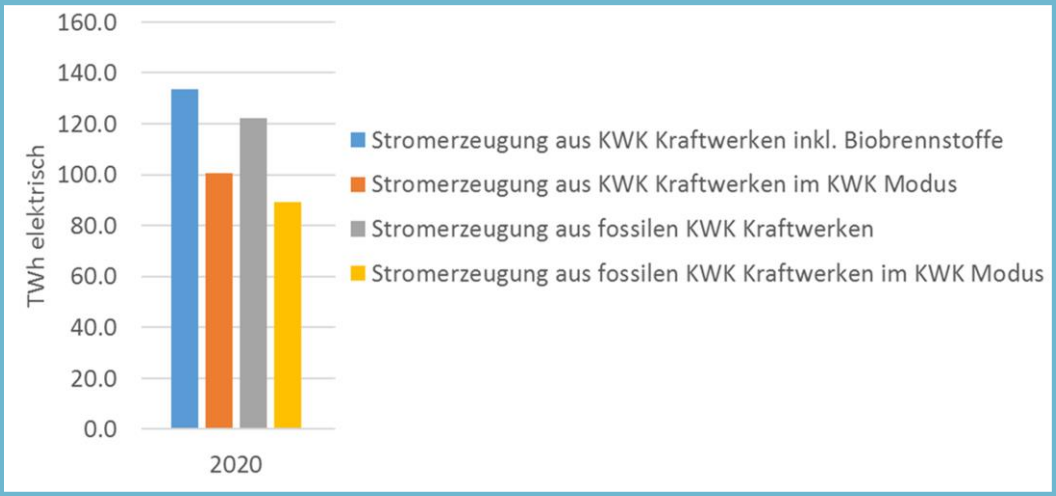


Abbildung 2-3: Vielfalt der Indikatoren bei KWK (Fraunhofer ISI et al. 2017)

In (Gores et al. 2014) werden die Potenziale der KWK-Stromerzeugung verschiedener Szenarien und Abschätzungen untersucht. Der Schwerpunkt dieser Studie liegt darauf, die Minimal- und Maximalwerte zum KWK-Ausbau und die daraus resultierende Spannbreite zu zeigen. Dieser Vergleich von meist etwas älteren Studien weist insbesondere für das Jahr 2050 eine erhebliche Spannbreite von 20 bis 200 TWh auf. Dies spiegelt eine große Unsicherheit sowie Unterschiede in den grundlegenden Annahmen der Analysen wider.

Im Folgenden werden jüngere Studien aus dem deutschen Sprachraum verglichen. Dazu werden die Szenarien aus (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015; Prognos AG et al. 2014; IWES et al. 2015; Blesl 2014) näher analysiert. Die Werte der erreichten THG-Emissionsreduktionen sind nach aufsteigender Zielerreichung in Tabelle 2-1 aufgeführt. Die Szenarien werden für die nachfolgenden Vergleiche in drei Kategorien eingeteilt und entsprechend farblich gekennzeichnet:

1. Szenarien ohne Zielerreichung (grau),
2. Szenarien mit Zielerreichung, mehr als 80 % THG-Emissionsreduktion (blau) und
3. Szenarien mit Zielerreichung, etwa 95 % THG-Emissionsreduktion (grün).

Tabelle 2-1: Vergleich der THG-Emissionsreduktionen der Szenarien (eigene Zusammenstellung)

Quelle	**Szenario**	**THG-Emissions-reduktion in 2050**
Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015	AMS *	60 %
Prognos AG et al. 2014	Referenzprognose & Trendszenario *	65 %
Blesl 2014	ETS75 *	76 %
Prognos AG et al. 2014	Zielszenario *	80 %[1]
Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015	KS 80 *	83 %
IWES et al. 2015	Szenario -83 %	83 %
Blesl 2014	C75 *	86 %
Blesl 2014	C75_BEEVPEC *	89 %

[1] Es werden nur die energiebedingten Emissionen und Prozessemissionen betrachtet.

Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015	KS 95 *	94 %
Blesl 2014	C90 *	94 %
IWES et al. 2015	Szenario -95 %	95 %

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Entwicklung der KWK-Stromerzeugung in den Szenarien. Die Ergebnisse aus Szenarien ohne Zielerreichung (grau) werden getrennt gezeigt, da diese die Ziele des Energiekonzepts verfehlen und deshalb nicht als handlungsleitend angesehen werden können (BMWi 2010; Bundesregierung 2013). In beiden Abbildungen sind die Szenarienergebnisse nach aufsteigender Zielerreichung der THG-Emissionsreduktion im Jahr 2050 sortiert. Eine gestrichelte Linie zeigt jeweils den Trend der Entwicklung über die Zeit.

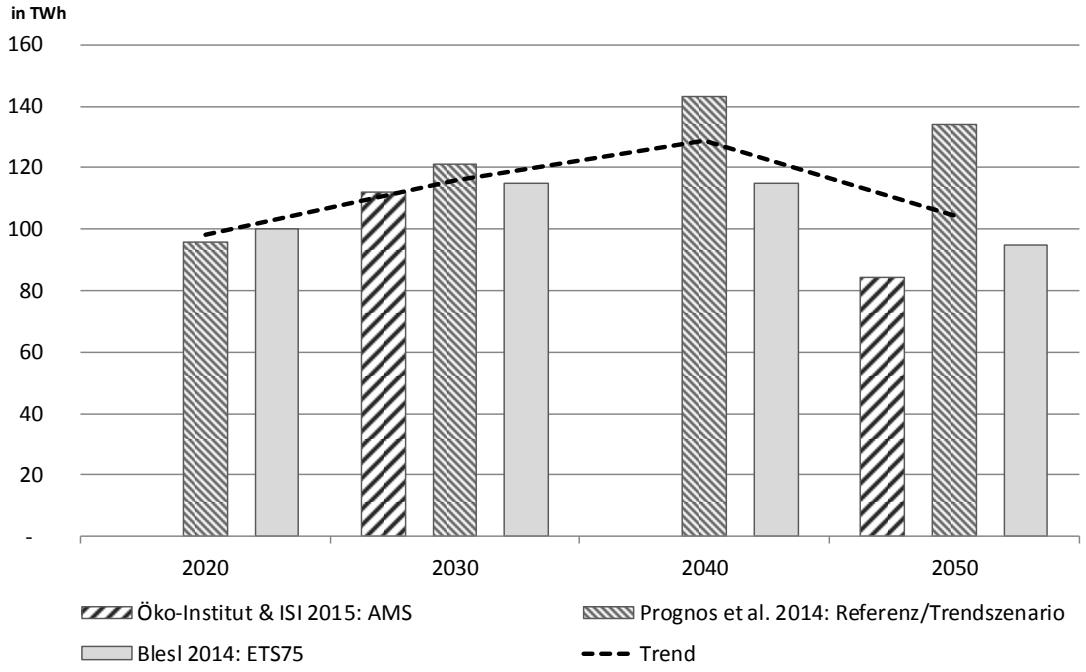


Abbildung 2-4: Vergleich zur Entwicklung der KWK-Stromerzeugung in Nichtzielszenarien und Trend (eigene Zusammenstellung)

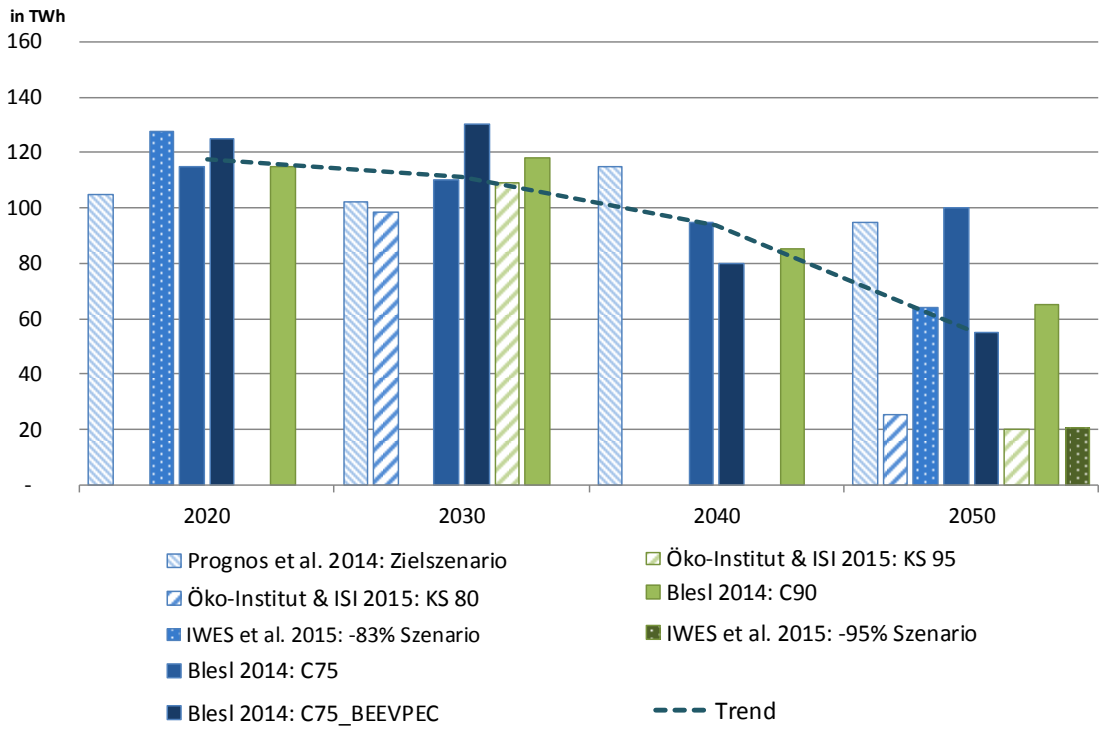


Abbildung 2-5: Vergleich zur Entwicklung der KWK-Stromerzeugung in Zielszenarien und Trend (eigene Zusammenstellung)

Auch hier gilt der Hinweis, dass die dargestellten KWK-Stromerzeugungsmengen unterschiedlich definiert sind. Deshalb können aus diesem quantitativen Vergleich nur generelle Trends abgeleitet werden. Auf den ersten Blick zeigt sich die große Spannbreite der Ergebnisse. Dies liegt neben den schon erwähnten Unterschieden in der Definition der Bezugsgröße auch an sehr unterschiedlichen Modellierungsansätzen und Rahmenannahmen. Bei einer genaueren Analyse zeigen sich jedoch einige Trends in diesem Szenariovergleich. In vielen Szenarien zeigt sich eine bogenförmige Entwicklung, die in den Jahren 2030/2040 ihren Höhepunkt erreicht und bis zum Jahr 2050 wieder abfällt. Beim Vergleich der Ergebnisse für das Jahr 2050 zeigt sich ebenfalls eine Tendenz, dass die KWK Stromerzeugung bei steigendem Ambitionsniveau der Dekarbonsierung niedriger ausfällt. Einzelne Szenarien wie das C75-Szenario (Blesl 2014) ragen hier jedoch heraus. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Szenario in erheblichem Umfang Stromerzeugung aus Geothermie und Biomasse unter KWK-Stromerzeugung erfasst wird. Der fossile Anteil der KWK fällt in diesen Szenarienergebnissen deutlich geringer aus und ist teilweise mit CCS ausgestattet.

2.2.2 Szenarienvergleich fossile KWK-Stromerzeugung

Der folgende Abschnitt vertieft die Analyse, indem die quantitativen Ergebnisse für Studien mit vergleichbarer Indikatorik verglichen werden. Dabei wird

nur die KWK-Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken in den verschiedenen Studien verglichen. Verwendet werden nur Szenarien, in denen die Angaben zur KWK-Stromerzeugung nach Brennstoffen aufgeschlüsselt sind. Die auf diese Weise analysierten Szenarien sind in der vorangegangenen Tabelle 2-1 mit einem Stern markiert.

Abbildung 2-6 zeigt die Entwicklung der KWK-Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken in diesen Szenarien. Die Farbgebung teilt erneut die Szenarien in drei Kategorien der Zielerreichung (vgl. Tabelle 2-1). Die Szenarien, die die Ziele verfehlen, sind durch Kreuze von den Zielszenarien abgesetzt. In diesem Vergleich zeigt sich der in den bisher dargestellten Vergleichen grob erkennbare Trend noch einmal deutlicher. Es ergibt sich ein Entwicklungskorridor für die KWK, dessen Verlauf den Charakter **der fossilen KWK als Übergangstechnologie** widerspiegelt. Ab dem Jahr 2020 oder auch 2030 zeigt der Korridor einen tendenziell abnehmenden Verlauf. Der Korridor enthält vorwiegend die Werte derjenigen Szenarien mit einer Zielerreichung der THG-Emissionsreduktion in 2050 von über 80 %. Im Jahr 2050 liegen lediglich die Werte der Nicht-Zielszenarien AMS, Referenzprognose/Trendszenario und ETS75 oberhalb des eingezeichneten Korridors. Diese Szenarien erreichen lediglich eine Reduktion der THG-Emissionen zwischen 60 und 76 %. Sie verfehlen somit das Ziel des Energiekonzepts und können deshalb nicht als handlungsleitend angesehen werden (BMWi 2010; Bundesregierung 2013). In den **Szenarien mit ambitionierteren Klimaschutzzielen ist die Absenkung der fossilen KWK-Stromerzeugung am stärksten**. Im Jahr 2050 ist nur noch ein geringer Anteil fossiler KWK an der Gesamtstromerzeugung vorhanden. Die fossile KWK kann bei einer bereits weitgehenden Dekarbonisierung des Stromsektors als kosteneffiziente CO_2-Vermeidungsoptionen kaum noch eine Rolle spielen. Dies betrifft beispielweise die Szenarien KS 95 oder C90. Daraus lässt sich der bisherige Trend der Literaturanalyse präzisieren: **Je stärker die Dekarbonisierung des Stromsektors, desto weniger Strom wird aus fossiler KWK im Jahr 2050 erzeugt[2].**

[2] Diese Aussage gilt auch weitgehend unter der Berücksichtigung von KWK CCS. Einige der Studien enthalten KWK CCS als Option. Aus grundsätzlichen Überlegungen lässt sich ableiten, dass CCS nur für einen kleinen Anteil von KWK-Anlagen eine Option sein kann, da diese Technologie nur an Standorten mit Wärmenetz und CCS Infrastruktur und unter sehr hohen Auslastungen rentabel sein kann.

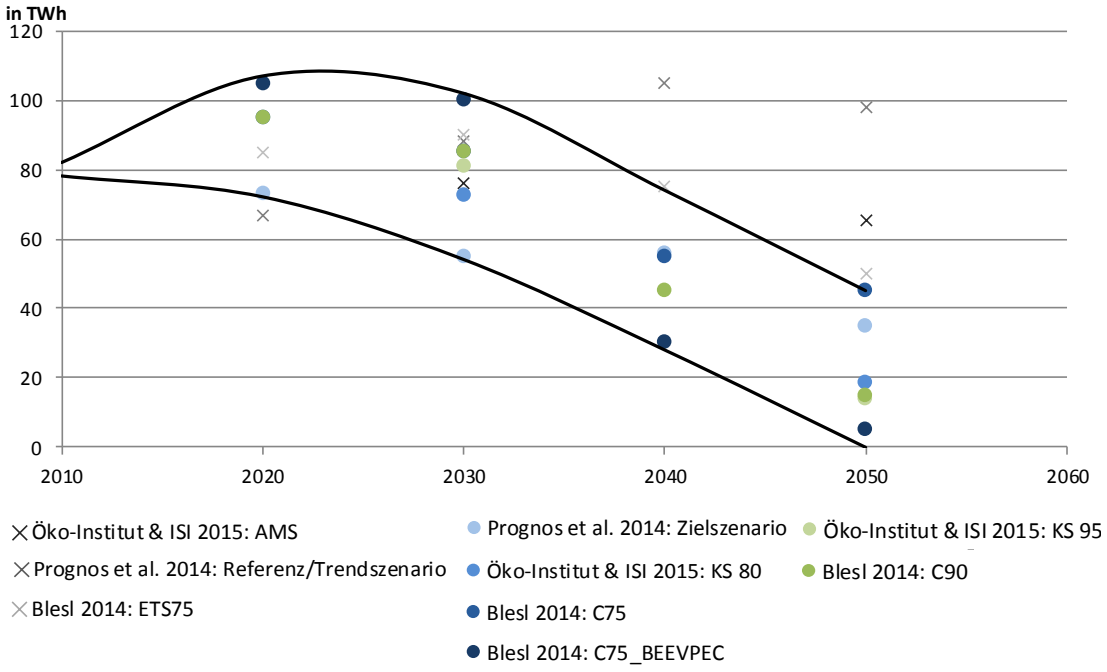


Abbildung 2-6: Szenarienvergleich der KWK-Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken (eigene Zusammenstellung)

Zwischenfazit Mengenentwicklung der KWK

Aussage 2: Fossile KWK ist eine Brückentechnologie.

Die Literaturanalyse ergibt trotz erheblicher Unschärfen bei der Definition der verglichenen Erzeugungsmengen Hinweise auf einen Trend für die Entwicklung der KWK-Erzeugungsmengen. Die KWK-Erzeugung ist eine Brückentechnologie, die ggf. mittelfristig ansteigt, aber mit zunehmender Dekarbonisierung tendenziell an Bedeutung verliert.

Dieser Trend für die allgemeine KWK-Stromerzeugung zeigt sich noch eindeutiger für die fossile KWK Stromerzeugung.

3 Analyse der zukünftigen Rolle der KWK anhand der BMWi-Langfristszenarien

Dieser Abschnitt ergänzt die Literaturanalyse um eine vertiefende Analyse der Entwicklung der KWK in den BMWi-Langfristszenarien. Den Autoren liegen Daten für eine tiefere Analyse vor. Aufbauend auf einer kurzen Analyse der Entwicklung der Emissionsbudgets werden zentrale Trends für die Entwicklung des Strom- und Wärmesektors dargestellt. In einem Szenariovergleich werden Wirkungsmechanismen für die Mengenentwicklung der KWK aufgezeigt. Anhand eines ausgewählten Szenarios werden die Flexibilitätsanforderungen in Strom- und Wärmenetzen dargestellt. Anschließend werden ausgewählte Kernaussagen noch einmal mit den Aussagen in der vorliegenden Literatur abgeglichen.

3.1 Ausgangslage zu Klimaschutzzielen

Die Bundesregierung hat im Energiekonzept aus dem Jahr 2010 Klimaschutzziele für die zukünftige Reduktion der Treibhausgasemissionen vorgegeben. Die Treibhausgasemissionen sollen bis zum Jahr 2020 um 40 % im Vergleich zum Jahr 1990 verringert werden. Im Jahr 2050 soll eine Reduktion zwischen 80 % und 95 % erzielt werden (BMWi 2010; Bundesregierung 2013). Die Ziele für Treibhausgasemissionen in Deutschland sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

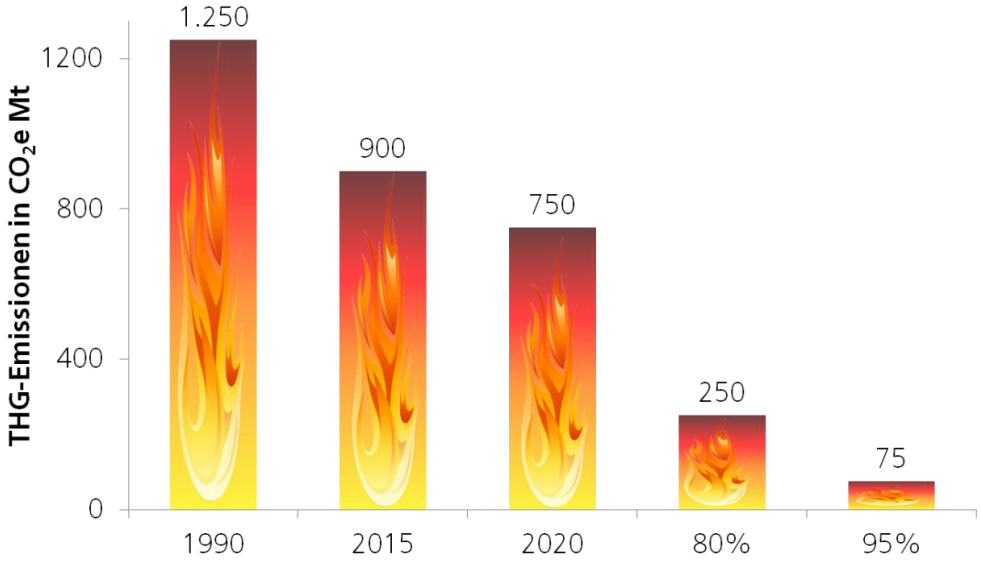


Abbildung 3-1: Korridor für Treibhausgasemissionen in Deutschland

Die genannten Ziele beziehen sich auf die gesamte Bundesrepublik. Um sie zu erreichen, müssen sie entweder direkt über Zielvorgaben oder indirekt über Preismechanismen auf die Sektoren heruntergebrochen werden. Eine

aktuelle Studie, die eine solche Aufteilung in verschiedenen Szenarien vornimmt, sind die BMWi-Langfristszenarien (Fraunhofer ISI et al. 2017). Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Basisszenario aufgegliedert nach Sektoren ist in Abbildung 3-2 zu sehen. Die Darstellung verdeutlicht, dass grundsätzlich in allen Sektoren die Emissionen deutlich reduziert werden müssen. Die Sektoren Verkehr und Industrie müssen einen herausfordernden Transformationsprozess durchlaufen. Im Bereich Energiewirtschaft, Haushalte und GHD-Sektor entfallen die Emissionen hauptsächlich auf die Bereitstellung von Strom und Wärme. Dieser Bereich verursacht derzeit mehr als die Hälfte der gesamten Emissionen, deshalb ist hier eine besonders starke Dekarbonisierung erforderlich. Neben dieser numerischen Notwendigkeit bestehen hier durch die Erneuerbaren Energien auch kostengünstige Erzeugungsoptionen, die anderen Sektoren nicht direkt bzw. nur durch teurere strombasierte Brennstoffe zur Verfügung stehen. Durch eine Zielverfehlung in anderen Sektoren oder durch ambitioniertere Ziele kann sich das knappe Emissionsbudget für die Bereitstellung von Strom und Wärme zusätzlich reduzieren.

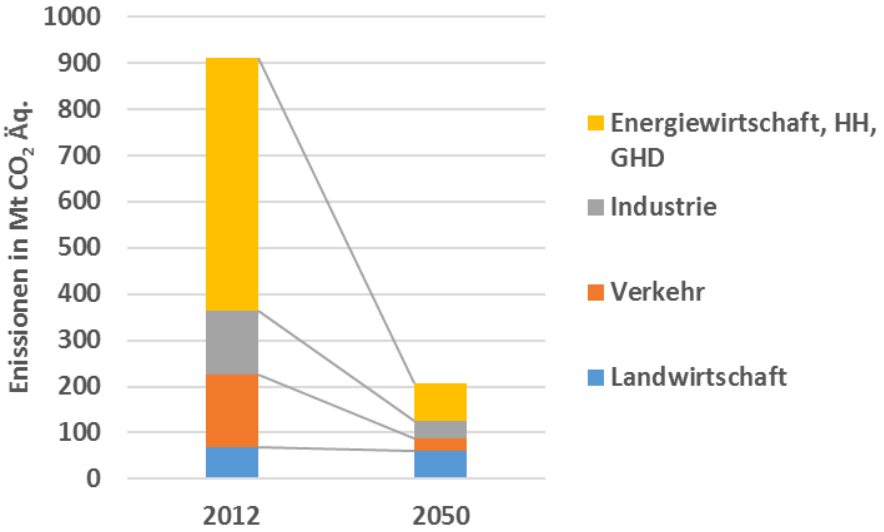


Abbildung 3-2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Sektoren im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

Zwischenfazit Ausgangslage

Aussage 3: Der Strom- und Wärmesektor unterliegen einem besonderen Dekarbonisierungsdruck.

Die Klimaschutzziele erfordern eine starke Dekarboniserung aller Sektoren. Die Bereitstellung von Strom und Wärme unterliegt dabei unter Gesichtspunkten der Kosteneffizienz einem besonderen Dekarbonisierungsdruck.

3.2 Bereitstellung von Strom und Wärme

In den nächsten beiden Abschnitten werden zentrale Entwicklungen der Dekarbonisierung von Strom- und Wärmesektor anhand des Basisszenarios der BMWi-Langfristszenarien identifiziert (Fraunhofer ISI et al. 2017).

3.2.1 Fokus Stromsektor

Der Erkenntnisgewinn der BMWi-Langfristszenarien resultiert aus dem Vergleich verschiedener Szenarien. Das Basisszenario bildet die Grundlage für den Szenarienvergleich in Kapitel 3.3. Im Basisszenario sind sowohl der Strommarkt in Europa als auch in Deutschland von einer intensiven Dekarbonisierung und einer stark steigenden Stromproduktion aus Windenergie geprägt.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen die Stromerzeugung im Basisszenario. In Europa geht die Stromproduktion aus fossilen Energieträgern fast vollständig zurück, lediglich die Kernenergie spielt in einigen Ländern noch eine bedeutende Rolle. Der Großteil der Stromerzeugung basiert auf Erneuerbaren Energien. In Deutschland werden ab 2020 Erneuerbare Energien – insbesondere Windenergie – stark ausgebaut. Die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen nimmt stetig ab. Im Jahr 2050 spielen fossile Brennstoffe nur noch eine geringe Rolle, sie werden ausschließlich in KWK-Anlagen eingesetzt. Unabhängig von den Details dieses einzelnen Szenarios kann davon ausgegangen werden, dass **der Stromsektor in einer von Klimaschutz geprägten Entwicklung durch einen hohen Anteil von Stromerzeugung aus Windenergie und Solartechnologien geprägt ist.** Diese Entwicklung erhöht den Flexibilitätsbedarf im System.

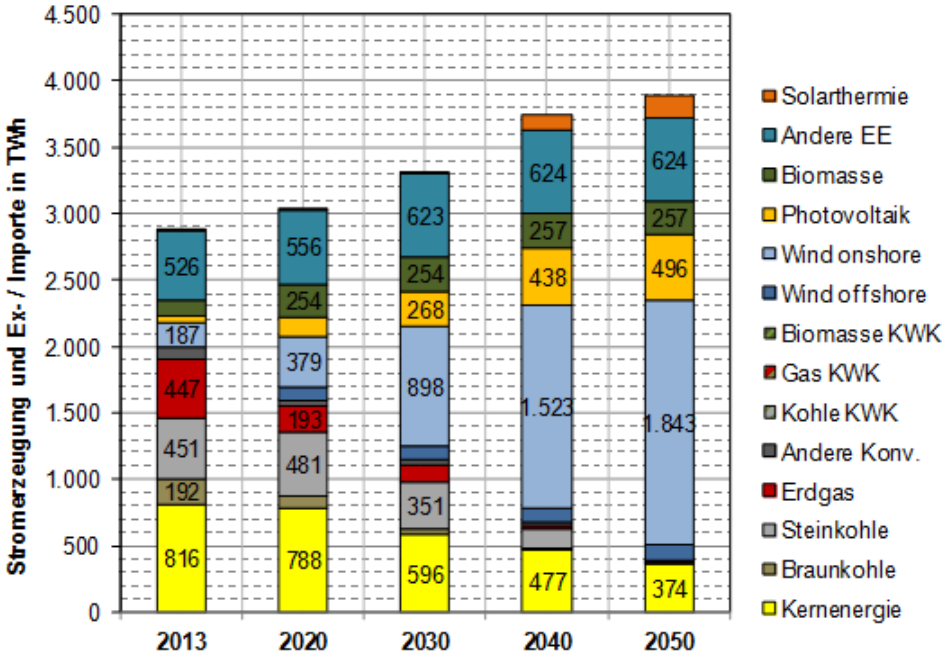


Abbildung 3-3: Stromerzeugung in Europa ohne Deutschland im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

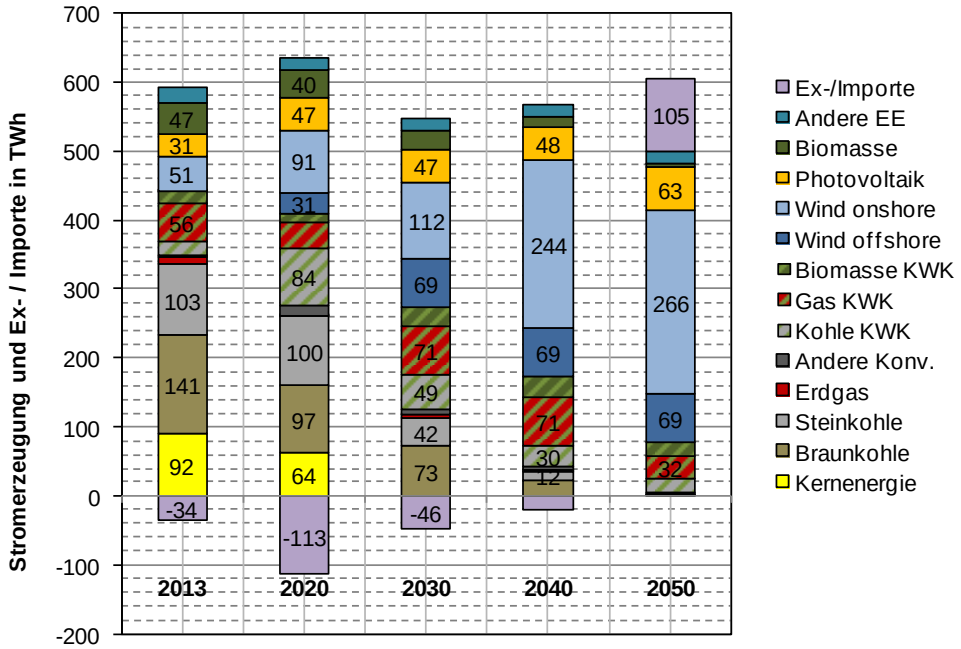


Abbildung 3-4: Stromerzeugung in Deutschland im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

3.2.2 Fokus Wärmebereitstellung

Für die Entwicklung der KWK ist neben dem Stromsektor auch die Entwicklung des Wärmebedarfs entscheidend. In einer auf die Einhaltung der Klimaschutzziele orientierten Welt gibt es auch hier einige generelle Trends. Diese sollen am Beispiel des Basisszenarios erläutert werden. Dabei wird zur Vereinfachung des Sachverhalts der Fokus auf die Wärmebereitstellung im Bereich der Gebäude bzw. der Fernwärme und Nahwärme gelegt.

Der Endenergiebedarf von Gebäuden zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser geht zurück. Diese Entwicklung ergibt sich durch den Neubau energieeffizienter Gebäude und die Sanierung des Bestandes.

Der Einsatz fossiler Energieträger wird deutlich reduziert. Die Entwicklung der Wärmebereitstellung für Gebäude im Basisszenario ist in Abbildung 3-5 zu sehen. In diesem Szenario wir die fossile Feuerung gegenüber 2010 auf 1/6 reduziert.

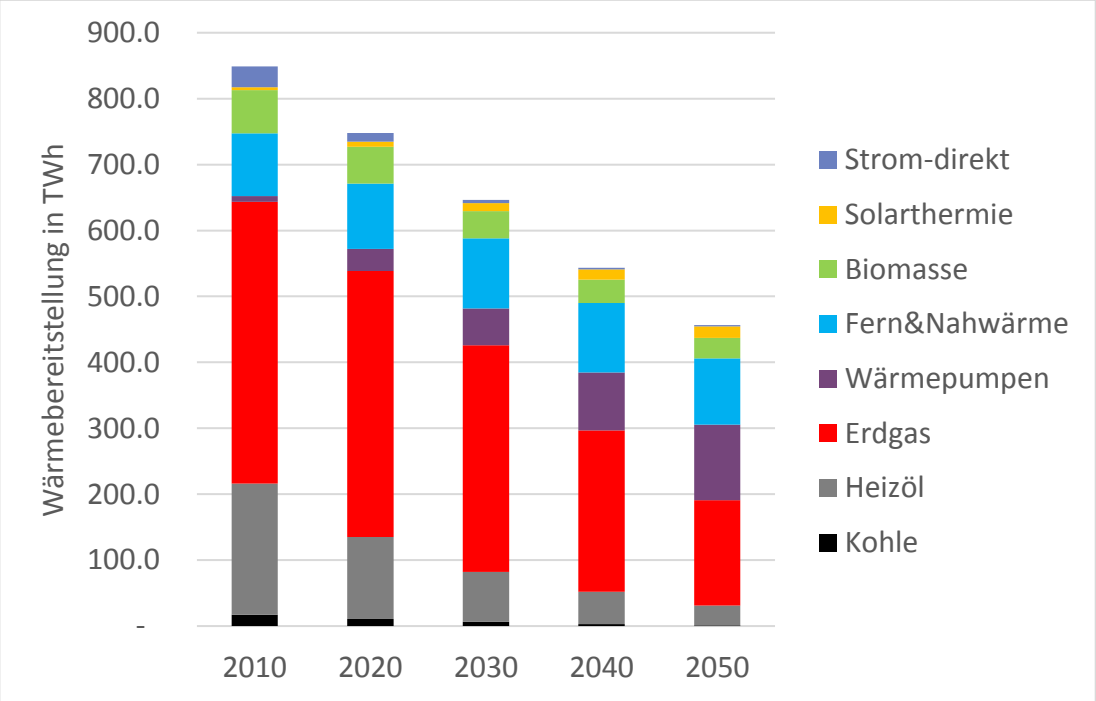


Abbildung 3-5: Entwicklung der Wärmebereitstellung für Gebäude im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

Verschiedene Technologien decken den verbleibenden Endenergiebedarf. **Erneuerbare Energien gewinnen an Bedeutung**. Die Nutzung erfolgt dabei direkt durch Solarthermie, Biomasse und Umweltwärme zur Wärmebereitstellung oder durch Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel indirekt über den Stromsektor. Diese Entwicklung lässt sich anhand des Basisszenarios verdeutlichen. Die Entwicklung der Wärmebereitstellung in Gebäuden für aus-

gewählte erneuerbare und strombasierte Technologien ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Im Basisszenario geht die direkte Nutzung von Strom, zum Beispiel in Nachtspeicherheizungen. Gleichzeitig steigt die Nutzung von zunehmend CO_2-armem Strom in Wärmepumpen an. Die Nutzung von Biomasse wird in diesem Szenario langfristig teilweise durch Solarthermie ersetzt.

Die steigende Effizienz der Gebäude führt zu einer sinkenden Wärmenachfrage in den Wärmenetzen. Durch den Ausbau von Wärmenetzen werden mehr Gebäude mit Nah- und Fernwärme versorgt. Der Ausbau der Wärmenetze umfasst den Bau von neuen Wärmenetzen, die Erweiterung von bestehenden Wärmenetzen und die Erhöhung der Anschlussraten in bestehenden Wärmenetzen (Nachverdichtung). Der Rückgang der Wärmenachfrage in bestehenden Wärmenetzen wird so annähernd kompensiert und die durch Wärmenetze bereit gestellte Wärmemenge bleibt mittelfristig auf einem vergleichbaren Niveau. Der Anteil der durch Wärmenetze gedeckten Raumwärme- und Warmwassernachfrage steigt.

In Wärmenetzen werden verschiedene Technologien zur Wärmebereitstellung genutzt. Die Wärmebereitstellung in Wärmenetzen wird über den Einsatz Erneuerbarer Energien, effiziente KWK und langfristig auch zunehmend CO_2-armen Strom dekarbonisiert.

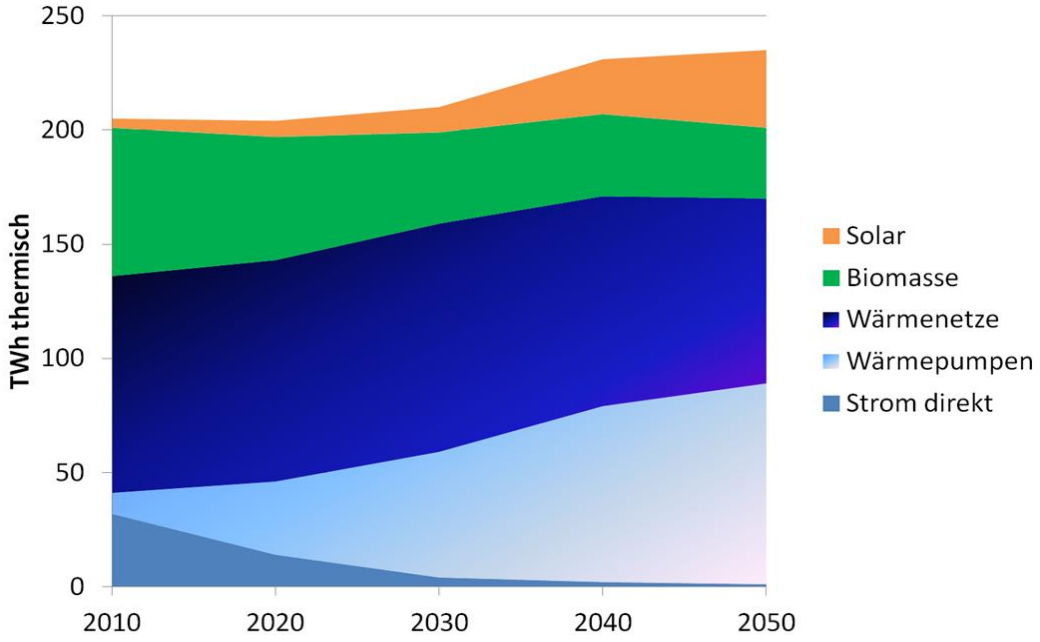


Abbildung 3-6: Entwicklung der Wärmebereitstellung Gebäude im Basisszenario (ausgewählte Technologien)

Zwischenfazit Bereitstellung von Strom und Wärme

Aussage 4: Erneuerbare Energien werden langfristig die leitende Technologie in Strom- und Wärmesektor im Rahmen einer Dekarbonisierung der Energieversorgung.

Dies geschieht sowohl direkt über die Nutzung von EE-Wärme als auch indirekt über die Nutzung von Strom.

3.3 Szenarienvergleich und Wirkungsmechanismen

Vor dem Hintergrund dieser grundliegenden Trends stellt sich die Frage nach der zukünftigen Rolle der KWK. Ein Vergleich von drei Szenarien aus den BMWi-Langfristszenarien zeigt die grundsätzlichen Mechanismen in einem System mit mindestens 80 %-iger CO_2-Reduktion.

3.3.1 Erzeugungsperspektive

Die folgende Darstellung in Abbildung 3-7 zeigt die Entwicklung der Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken im KWK-Modus[3]. Die ungekoppelte Stromerzeugung in KWK-Kraftwerken sowie die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien sind in dieser Darstellung explizit nicht berücksichtigt. Die mögliche Entwicklung verläuft in einem breiten Korridor. In Richtung 2050 fällt dieser Korridor deutlich ab[4].

3 Dabei wird nur gekoppelte Erzeugung aus fossilen Brennstoffen entsprechend üblicher Stromkennzahlen erfasst. Bei Großkraftwerken mit kleiner Wärmeauskopplung wird nur die Stromerzeugung, die der Wärmeerzeugung mit entsprechender Stromkennzahl zugeordnet werden kann, erfasst.

4 Es kann erwartet werden, dass im Rahmen einer ambitionierten Dekarbonisierung von 95 % die Werte im Endjahr noch deutlich niedriger ausfallen.

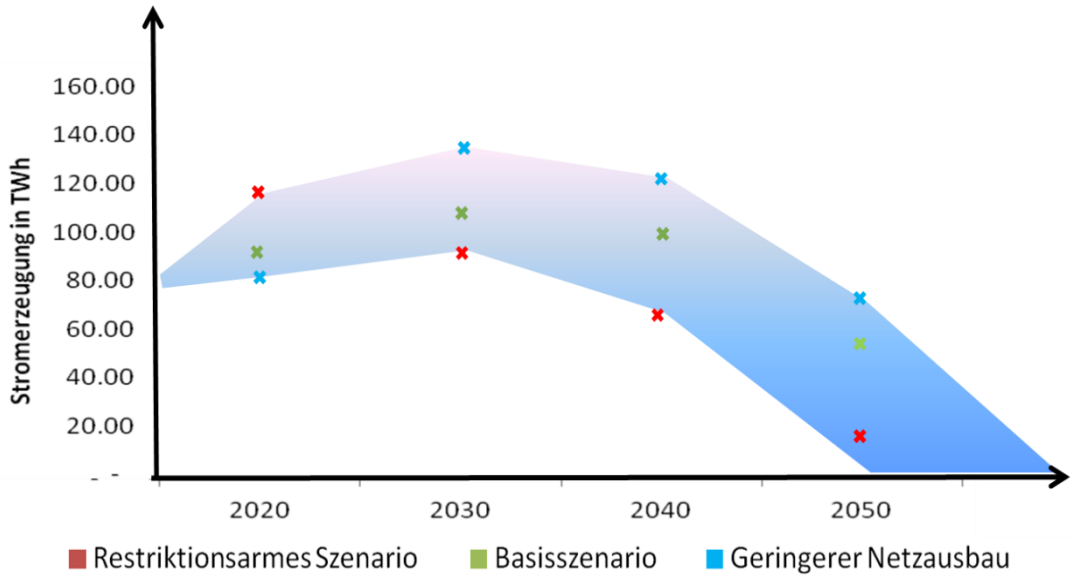


Abbildung 3-7: Szenarienvergleich der Stromerzeugung aus fossilen Kraftwerken im KWK Modus (Szenarien mit mindestens 80 % THG-Emissionsreduktion)

Im „Restriktionsarmen Szenario“ (rot markiert) wird eine hohe nationale Erzeugung Erneuerbarer Energien in Deutschland erreicht. Insgesamt erreicht die Erzeugung mehr als 440 TWh. Außerdem wird in diesem Szenario ab 2030 CCS stark eingesetzt, auch wenn dies vor dem Hintergrund des aktuellen politischen Umfelds in Deutschland als wenig wahrscheinlich erscheint. KWK ist in diesem Szenario nicht konkurrenzfähig, da die Verfügbarkeit von CCS und starker Netzausbau den Wert der gesicherten Leistung senkt und gleichzeitig Erneuerbare Energien und CCS das System günstiger und weitergehend dekarbonisieren. Der Wert der KWK für die CO_2-arme Leistungsbereitstellung sinkt in diesem Szenario kontinuierlich. Die Stromerzeugung reduziert sich somit auf eine Größenordnung von ca. 20 TWh im Jahr 2050.

Im Basisszenario (grün markiert) ist CCS im Kraftwerkssektor nicht verfügbar. Weiterhin sind die Vorgaben zu Erneuerbaren Energien in Deutschland[5] leicht geändert. In der Leistungsbereitstellung konkurriert KWK deshalb nicht mit CCS und hat einen höheren Wert. Auch der Wert der KWK für die CO_2-arme Leistungsbereitstellung steigt, insbesondere in der Übergangszeit 2030 bis 2040. Aus diesem Grund erfolgt bis 2030 ein höherer Ausbau der KWK

5 Hierzu gehört im Vergleich zum restriktionsarmen Szenario ein höherer Ausbau von Windenergie auf See und ein höherer Ausbau der PV auf Dächern.

als im Restriktionsarmen Szenario. Die steigenden CO_2-Preise in der Dekade bis 2050 führen in dem Szenario dazu, dass der Wert der gesicherten Leistungsbereitstellung der KWK durch die höheren Kosten der CO_2-Emissionen überkompensiert wird. Aus diesem Grund sinkt die Stromerzeugung aus KWK im Wettbewerb mit nationaler und internationaler Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien wieder deutlich auf ca. 70 TWh in 2050 ab.

Im Szenario „Geringerer Netzausbau“ (blau markiert) gibt es Beschränkungen für den Ausbau der Stromnetze. So werden z.B. keine neuen Trassen über EnLAG und BBPlG hinaus erschlossen. Somit sind die überregionalen Ausgleichsoptionen beschränkt. Der Wert der KWK für die CO_2-arme Leistungsbereitstellung steigt stark, insbesondere in der Übergangszeit 2030 bis 2040. Der Ausbau erreicht im Szenarienvergleich seinen höchsten Wert. In der Dekade bis 2050 liegt in diesem Szenario ein deutlich höherer CO_2-Preis von ca. 200 €/t statt 100 €/t an, um auch in diesem Szenario die THG-Minderungsziele zu erreichen. Dieser höhere CO_2-Preis kompensiert somit auch den höheren Wert der Leistungsbereitstellung. In der Folge sinkt in diesem Szenario die KWK-Erzeugung wieder auf das Niveau von 2020 ab.

In allen Szenarien ist die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen relativ hoch. Dafür gibt es verschiedene Gründe: Erstens bilden alle drei Szenarien Großwärmepumpen, Geothermie, Solarthermie und industrielle Abwärme im Wärmesektor aufgrund des Szenariodesigns für die im Strommarktmodell optimierten Wärmenetze nicht ab. Diese drei Technologien dürften den Bedarf für KWK im Wärmemarkt generell absenken. Zweitens zeigen die Szenarioanalysen, dass auch mehr erneuerbare Energien im Stromsektor den Bedarf für KWK senken. Wenn mehr erneuerbare Energien Strom produzieren, wird weniger Strom aus KWK benötigt. In diesem Fall passt sich auch die Bereitstellung der Wärme in den Wärmenetzen im Rahmen der Optimierung an die Entwicklungen des Stromsektors an. Power-to-Heat und ggf. konventionelle Feuerung können dann die geringeren KWK-Anteile im Wärmemarkt kompensieren. Drittens reduzieren alle Szenarien „nur“ ca. 80 % der THG-Emissionen. Szenarien, die über 95 % der THG-Emissionen reduzieren, dürften eine deutlich geringere fossile KWK-Stromerzeugung ausweisen.

3.3.2 Die Rolle der Wärmenetze

Durch den Ausbau der EE im Strom- und Wärmemarkt steigt der Bedarf an flexiblen Kapazitäten, die jeweils schnell auf Strompreise oder den lokalen Wärmebedarf reagieren können. Allerdings kann derzeit nur grob abgeschätzt werden, welche Technologien wann genau im Strom- und Wärmesektor benötigt werden. Dies wird durch die große Bandbreite der Szenarioergebnisse bestätigt. Ein großer Vorteil von Wärmenetzen ist, dass sie dem

Betreiber ermöglichen, auf unerwartete Entwicklungen schnell und einfach zu reagieren. Sollte etwa der Flexiblitätsbedarf im Stromsektor überraschend ansteigen, kann der Betreiber zum Beispiel eine Power-to-Heat-Anlage an sein Wärmenetz anschließen und überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien in Wärme umwandeln. Wärmenetze können so helfen, sich heute gegen Unsicherheiten abzusichern. Damit bieten sie strategische Flexibilität, da Wärmebereitstellungstechnologien leichter an zentraler Stelle umgestellt werden können als in tausenden Einzelfeuerungen. Dies setzt jedoch auch voraus, dass die Wärmenetze sich so wandeln, dass eine effiziente Integration erneuerbarer Energien möglich ist. In vielen Fällen erfordert dies z.B. eine Absenkung des Temperaturniveaus um den effizienten Arbeitspunkten der erneuerbaren Technologien gerecht zu werden.

Zwischenfazit Wirkungsmechanismen für die Mengenentwicklung der KWK

Die Analyse zeigt, dass fossile KWK eine Brückentechnologie ist und stützt somit Aussage 2.

Aussage 5: Die optimale Entwicklung der KWK hängt von vielen Faktoren ab.

Die Höhe (maximaler Ausbau der KWK im Zeitverlauf) und Länge (Ende der Nutzung der KWK in nennenswertem Umfang) der Brücke „fossile KWK“ sind unsicher und hängen von den Faktoren Dekarbonisierungsdruck und Wert der Leistungsbereitstellung ab. Der Wert der Leistungsbereitstellung sinkt bei zusätzlicher Flexibilität im Stromsystem oder zusätzlichen CO_2-armen Kapazitäten, wie z.B. der Verfügbarkeit von Netzausbau und CCS.

Aussage 6: Wärmenetze schaffen strategische Flexibilität für die Energiewende.

Vor dem Hintergrund der oben genannten Unsicherheiten schaffen Wärmenetze wichtige strategische Flexibilität, weil es wesentlich einfacher ist, an zentraler Stelle Feuerungstechnologien und Speicher in ein Netz zu integrieren, als die entsprechenden technologischen Anpassungen in tausenden von Haushalten vorzunehmen.

3.4 Flexibilitätsanforderungen

Nachfolgend werden die Flexibilitätsanforderungen in Strom- und Wärmesektor analysiert. Dazu werden die Erzeugung einer Winterwoche und einer

Sommerwoche im Jahr 2050 aus dem Basisszenario der Langfristszenarien zur Analyse herangezogen.

Winterwoche 2050 (KW 2)

Abbildung 3-8 zeigt die stündliche Stromerzeugung in einer modellierten Winterwoche in 2050 in Deutschland. Gegen Ende der Woche kommt es zu einer sehr starken Windeinspeisung. In dieser Zeit wird die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen heruntergefahren oder ganz abgeschaltet.

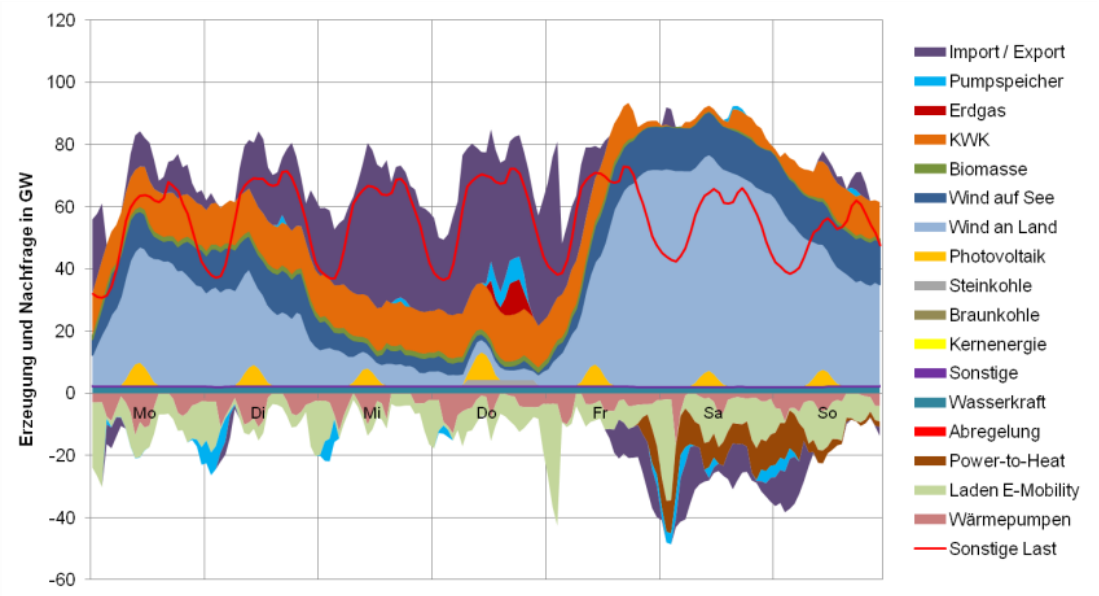


Abbildung 3-8: Stündliche Stromerzeugung Winterwoche in 2050 im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

Abbildung 3-9 zeigt die stündliche Wärmeerzeugung für die gleiche Woche in einem Wärmenetz einer Region innerhalb Deutschlands. Die KWK läuft zunächst durchgängig und der fossile Heizkessel deckt die Spitzen der Wärmenachfrage. Gegen Ende der Woche fährt die KWK herunter. Bei starker Windeinspeisung schaltet die KWK ab, Elektroheizkessel decken den Wärmebedarf und Speicher werden geladen.

Auffällig ist, dass trotz hoher Windenergieeinspeisung auf dem Strommarkt fossile Heizkessel einen bedeutenden Teil der Wärmenachfrage decken. Dies ist vor allem der Fall, wenn der Wert des Stroms im Stromsystem höher ausfällt als die Betriebskosten für fossile Heizkessel. In diesen Zeiten stellt die Nutzung von Elektrodenheizkesseln noch keine rentable Option dar. Die relativ große Rolle der fossilen Heizkessel erklärt sich unter anderem dadurch, dass das Modell Solarthermie, Geothermie und Großwärmepumen nicht berücktsichtigt. Im Falle einer Integration von Wärmepumpen oder EE-Wärme, z.B. aus Geothermie, würde der fossile Heizkessel, und ggf. auch die KWK voraussichtlich weniger Stunden eingesetzt.

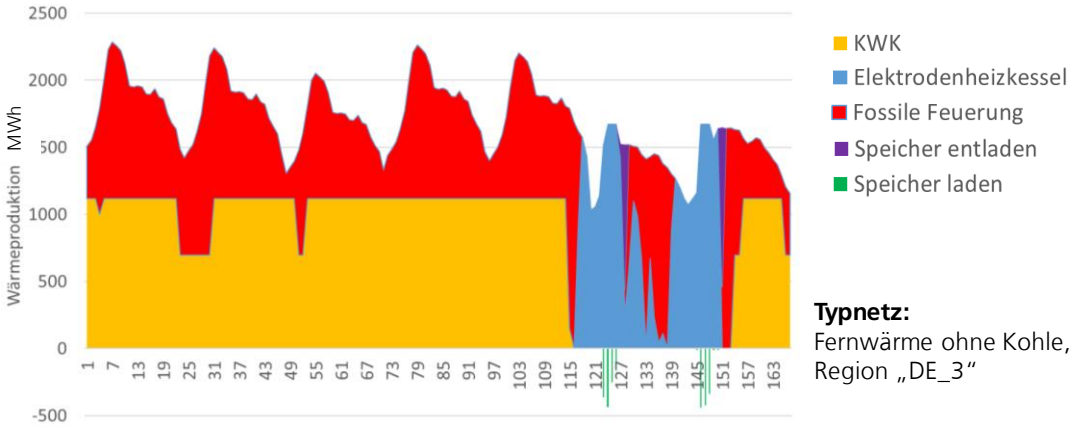


Abbildung 3-9: Stündliche Wärmeerzeugung Winterwoche in 2050 im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

Sommerwoche 2050 (KW 24)

Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 zeigen die Erzeugungsstrukturen auf dem Strommarkt und in einem Wärmenetz einer Region innerhalb Deutschlands für eine Sommerwoche in 2050. Während des Tages wird viel Solarenergie ins Netz eingespeist. Am Anfang und Ende der Woche ist die Stromerzeugung aus Windenergie ebenfalls hoch. Die Strom- und Wärmeerzeugung aus KWK wird in diesen Zeiten stark reduziert oder abgeschaltet.

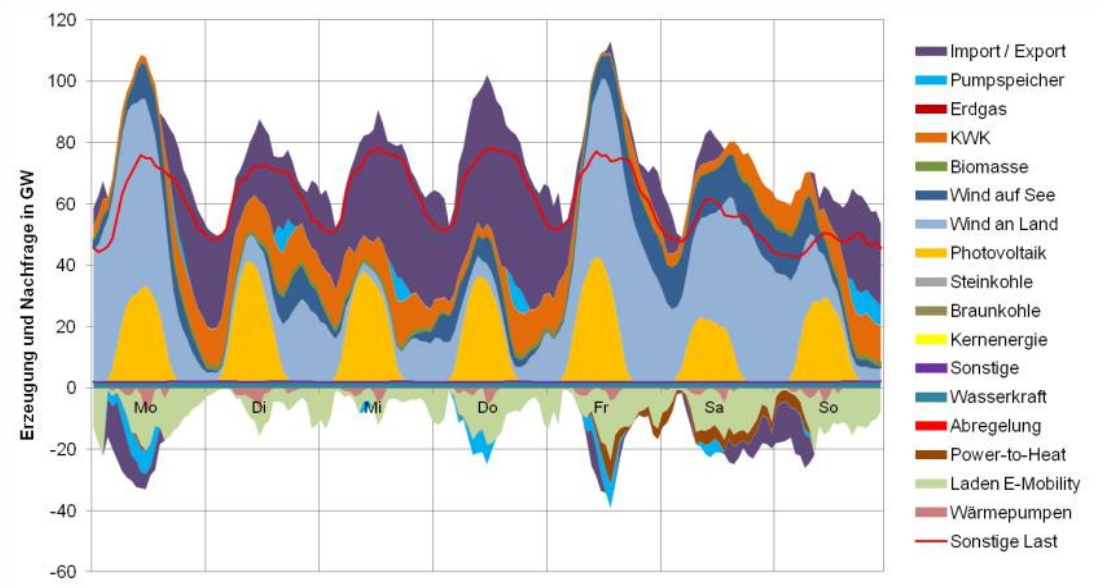


Abbildung 3-10: Stündliche Stromerzeugung Sommerwoche in 2050 im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

Im Wärmesektor werden die Wärmespeicher stark genutzt, um Extrema der Residuallast im Stromsektor auszugleichen. Tagsüber wird die KWK

teilweise vollständig herunter gefahren. Im Vergleich zur Winterwoche ist zu beachten, dass das gesamte Erzeugungsniveau deutlich unterhalb des Niveaus der Winterwoche liegt.

Abbildung 3-11: Stündliche Wärmeerzeugung Sommerwoche in 2050 im Basisszenario (Fraunhofer ISI et al. 2017)

Zwischenfazit Flexibilitätsanforderungen

Aussage 7: Die Integration der Erneuerbaren Energien erfordert ein hohes Maß an Flexibilität im Stromsektor und im Wärmesektor.

Dies ergibt sich auch aufgrund der hohen Volatilität der Bereitstellungstechnologien auf Basis von Solarenergie bzw. Windenergie.

Aussage 8: Hybride Wärmebereitstellung (Strom, thermische Feuerung) ggf. Speicherung schafft langfristig wertvolle Flexibilität.

Auf diese Weise kann auf die Wetterbedingungen und die CO_2 Intensität des Stroms flexibel reagiert werden.

Aussage 9: Eine effiziente Kopplung von Strom- und Wärmesektor erfordert eine effiziente und störungsfreie Koordination im operativen Einsatz.

Ansonsten ist die hier dargestellte ökonomisch effiziente Koordinierung der CO_2 Reduktion im operativen Einsatz des Computermodells, kaum in der Realität zu erreichen.

3.5 Abgleich mit Kernaussagen in der Literatur

Die vorangegangenen Kapitel haben die quantitativen Ergebnisse repräsentativer Studien analysiert und Kernergebnisse abgeleitet. Dieses Kapitel untersucht, inwieweit sich diese Kernergebnisse auch mit den qualitativen Aussagen dieser Studien decken oder ob die Studien die quantitativen Ergebnis-

se anders interpretieren. Dabei können nur die Aussagen abgeglichen werden, die in der ausgewählten Literatur behandelt werden.

KWK ist eine Brückentechnologie (Aussage 2)

Die erste auffällige Übereinstimmung in der Literatur ist, dass die KWK sehr häufig als eine *Brückentechnologie* bezeichnet wird. In (Gores et al. 2014) wird die KWK als ein „*sich den verändernden Nachfragen anpassendes Übergangselement*“ bezeichnet. Ein zeitlicher Rahmen für diese Entwicklung wird in (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015) angegeben: die Bedeutung der KWK wird nach 2030 deutlich abnehmen. Auch in (Biere 2015) wird argumentiert, dass der KWK-Strom zwar aktuell einen sehr positiven Beitrag zur Senkung der spezifischen CO_2-Emissionen leistet, mittelfristig bei „*Beibehaltung der Dekarbonisierungsstrategie der deutschen Stromproduktion*“ jedoch nicht mehr dazu beitragen kann. Dieser Zeitaspekt wird auch in (IWES et al. 2015) bestätigt, die mittelfristig den Ausbau von Kraftwerken primär mit KWK empfehlen. In (Gores et al. 2014) werden die Ergebnisse verschiedener Studien und Potenziale zur Stromerzeugung aus KWK verglichen. Die Mediane dieser Ergebnisse verlaufen in einem ähnlichen Trend: zunächst steigend bis 2020 und im Anschluss daran folgt ein Absinken. In einem Stromsystem mit steigendem Anteil Erneuerbarer Energien wird der Vorteil des höheren Brennstoffnutzungsgrades von KWK-Technologien im Vergleich zu ungekoppelten Kraftwerkstechniken zunehmend abgeschwächt (Prognos AG et al. 2014). Mit Blick auf das Jahr 2050 ist für fossile KWK-Anlagen nahezu kein Emissionsbudget vorhanden (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015). Auch (Agora Energiewende 2015) bestätigen, dass fossile KWK auf lange Sicht mit dem Emissionsbudget in Konflikt geraten kann.

Flexibilität im Strom-Wärmesystem wird immer wichtiger (Aussage 8)

Die in Zukunft weiter zunehmende Bedeutung der Flexibilität wird ebenfalls sehr häufig in der Literatur betont. Die KWK kann dabei eine wichtige Rolle übernehmen. Durch die Verwendung von hybriden Systemen (Kombination der KWK mit anderen Technologien) wird dem Stromsektor eine hohe Flexibilität zur Verfügung gestellt, um die fluktuierende Einspeisung aus Erneuerbaren Energien auszugleichen (Gerhardt et al. 2015; Henning et al. 2014). In der Literatur wird vor allem die Verbindung der KWK mit einem Wärmespeicher betont (Gerhardt et al. 2015; IWES et al. 2015; Henning et al. 2014; Blesl 2014). Weiterhin wird auch die Kombination mit einem Elektrodenkessel oder Elektroheizer hervorgehoben (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015; Gerhardt et al. 2015; IWES et al. 2015; Henning et al. 2014; Gerhardt et al. 2014). Die Kombination mit Wärmepumpen wird ebenfalls häufig angesprochen (Gerhardt et al. 2015; IWES et al. 2015; Henning et al. 2014; Blesl

2014). Außerdem kann die KWK gut mit Solarthermie kombiniert werden (Gerhardt et al. 2015; Henning et al. 2014).

Hybride Wärmesysteme können Erneuerbare Energien besser integrieren (Aussage 7)

In (Gerhardt et al. 2014) wird ausgeführt, dass Power-to-Heat das Potenzial bietet, erneuerbare Stromüberschüsse bei geringen Kapitalkosten zu integrieren. In der Studie wird die Nutzung der kurzfristig und zu geringen Kosten verfügbaren Technologien fokussiert. Darunter fallen großtechnische, zentrale Elektro- oder Elektrodenheizkessel. Voraussetzung für diese Nutzung ist allerdings eine hybride Auslegung, also das Vorhandensein alternativer Feuerungsoptionen wie z.B. auch der KWK.

4 Handlungsleitbilder

In diesem Abschnitt werden auf Basis der vorangegangenen Analyse Handlungsleitbilder abgeleitet. Diese orientieren sich in ihrer Struktur und Reihenfolge an der Vorgehensweise der Literaturanalyse.

Handlungsleitbild: Wärmenetze

Es bleibt festzuhalten, dass einige zukünftige technologische Entwicklungen im Strom- und Wärmesektor unsicher sind und z.T. von politischen Entscheidungen abhängen. Dies betrifft sowohl die Höhe der Dekarbonisierung als auch die Rahmenbedingungen für bestimmte Technologien. Vor diesem Hintergrund bieten Wärmenetze wichtige strategische Flexibilität, da es einfacher ist an zentraler Stelle Feuerungen umzustellen bzw. Speicher zu integrieren. **Daraus lässt sich das Handlungsleitbild ableiten, dass Wärmenetze erhalten und modernisiert werden müssen**. Vor dem Hintergrund sinkender Wärmenachfrage schließt dies weiteren Ausbau und Nachverdichtung ebenso mit ein wie eine schrittweise und an die Bedürfnisse der lokalen Wärmenachfrage angepassten Absenkung der Temperaturen in den Wärmenetzen.

Handlungsleitbild: Rolle der KWK

Die Analyse hat gezeigt, dass fossile KWK eine Brückentechnologie ist, deren Rolle im Strom- und Wärmesystem vom Emissionsbudget und dem Wert der Leistungsbereitstellung abhängt. In vielen Studien kommt es noch zu einem leichten Anstieg der KWK Erzeugung innerhalb der kommenden Dekade. Dies führt zu der Herausforderung, einerseits diesen Ausbau/Erhalt der KWK-Stromerzeugung zu begleiten, andrerseits jedoch auch sicherzustellen, dass keine ungewollten Lock-In-Effekte auftreten. Aus dieser Herausforderung lässt sich ein **weiteres Handlungsleitbild ableiten: Die Rolle der KWK bzgl. der Emissionseinsparung und der Leistungsbereitstellung muss im Falle einer weiteren Förderung laufend geprüft** und im Zusammenhang mit der Gesamtsystementwicklung gedacht werden.

Handlungsleitbild: Flexibilität

Langfristig werden Erneuerbare Energien in einer dekarbonisierten Welt die leitende Technologie im Strom- und Wärmemarkt. Dies führt zu erheblichen Anforderungen an die Flexibilität in beiden Energiesystemen. Daraus ergeben sich weitere Handlungsleitbilder für die Weiterentwicklung der KWK.

An der Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmesektor müssen flexible Erzeugungsinfrastrukturen geschaffen werden. Dies kann Wärmespeicher, flexible KWK und hybride Wärmebereitstellung mit strombasierten Systemen umfassen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der verbundene eu-

ropäische Stromsektor derzeit noch hohe spezifische CO_2-Emissionen aufweist, die oberhalb einfacher fossiler Feuerungstechnologien liegen. Aus diesem Grund ist das folgende Handlungsleitbild von zentraler Bedeutung.

Im operativen Einsatz von Strom- und Wärmeerzeugungstechnologien sollte ein möglichst konsistentes Preissignal für den Einsatz der Energieträger herrschen, das sowohl die Kosten der Brennstoffe als auch den Preis für CO_2-Emissionen effizient widerspiegelt. Dies ist eine zentrale Voraussetzung dafür, dass die genannten Flexibilitätsoptionen auch zu einer kosteneffizienten Reduktion der CO_2-Emissionen beitragen können. In der Konsequenz erdordert dies eine Neuordnung der staatlich veranlassten Preisbestandteile für die Energieträger.

5 Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (Hg.) (2015): Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in der Energiewende. Status quo, Perspektiven und Weichenstellungen für den sich wandelnden Stromund Wärmemarkt. Berlin. Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/perspektiven-der-kwk/Agora_069_KWK___REV_0915_WEB.pdf.

Biere, David (2015): Modellgestützte Szenario-Analyse der langfristigen Erdgasnachfrageentwicklung der deutschen Industrie. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Blesl, Markus (2014): Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas. Eine Energiesystem- und Technikanalyse. Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, Stuttgart. Online verfügbar unter http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2014/9626.

BMWi (Hg.) (2010): Energiekonzept für eine umwelt schonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf.

Bundesregierung (Hg.) (2013): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 18. Legislaturperiode. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2013/2013-12-17-koalitionsvertrag.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

dena (2008): Kurzanalyse der Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020 (mit Ausblick auf 2030). Annahmen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Berlin. Online verfügbar unter http://www.e-energie.pt-dlr.de/documents/Kurzanalyse_KuN-Planung_D_2020_2030_lang_0408.pdf.pdf.

DIW; Öko-Institut e.V.; Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (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). Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3291.pdf.

FfE (2009): Energiezukunft 2050. Teil II - Szenarien. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/download/berichte/Endbericht_Energiezukunft_2050_Teil_II.pdf.

Fraunhofer ISI; Consentec; M-Five; TU Wien; TEP Energy GmbH (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. unveröffentlicht.

Gerhardt, N.; Richts, C.; Hochloff, P. (2014): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien: Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten.

Gerhardt, Norman; Sandau, Fabian; Kessler, Alois; Kleimaier, Martin (2015): Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungsystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. In: *Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik -VDE-: Von Smart Grids zu Smart Markets 2015. CD-ROM: Zur zukünftigen Wechselwirkung von elektrischem Netz und Energiemarktaktivitäten, Beiträge der ETG-Fachtagung, 25. - 26. März 2015 in Kassel. Berlin: VDE-Verlag, 2015. (ETG-Fachbericht 145), 6 pp.*

Gores, Sabine; Jörß, Wolfram; Harthan, Ralph; Ziesing, H. J.; Horst, Juri (2014): KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kwk-ausbau-entwicklung-prognose-wirksamkeit-im-kwk.

Greenpeace e.V. (2008): Sicherheit der Stromversorgung in Deutschland. Stellungnahme zur Dena-Kurzstudie „Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020“. Kurzstudie. Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/Deckungsluecke_0.pdf.

Henning, Hans-Martin; Schmidt, Dietrich; Hoffmann, Clemens (2014): Transformationsprozess des Energiesystems: Technische Perspektive - Konsistente Gesamtsysteme. In: *Szczepanski, Petra (Red.): Forschung für ein nachhaltiges Strom-Wärme-System: Beiträge zur Jahrestagung 2013 des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien, 24. und 25. Oktober 2013, Konzerthaus Freiburg. Berlin: FVEE, 2014. (FVEE-Themen 2013), pp. 29-34*.

IWES; IBP; IFEU; Stiftung Umweltenergierecht (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. Ableitung von optimalen strukturellen Entwicklungspfaden für den Verkehrs- und Wärmesektor. Unter Mitarbeit von Norman Gerhardt, Fabian Sandau, Angela Scholz, Henning Hahn, Patrick Schumacher, Christina Sager et al. Kassel. Online verfügbar unter http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-

neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015/Interaktion_EEStrom_Waerme_Verkehr_Endbericht.pdf.

Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI (Hg.) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Online verfügbar unter http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf.

Prognos AG; EWI; GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte. Energiereferenzprognose. Endbericht Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-kurzfassung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2016.

SRU (2011): Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten. Berlin. Online verfügbar unter http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf?__blob=publicationFile.

WWF Deutschland (2009): Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Endbericht. Basel; Berlin. Online verfügbar unter http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf.

6 Anhang

6.1 Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015)

Szenarien

1. *Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (AMS)*
   Hierbei werden alle Maßnahmen berücksichtigt, die bis Oktober 2012 ergriffen worden sind. Diese werden bis 2050 fortgeschrieben.
2. *Klimaschutzszenario 80 (KS 80)*
   In diesem Szenario sollten die Klimaschutzziele des Energiekonzepts der Bundesregierung für Treibhausgasemissionen, Erneuerbare Energien und Energieeffizienz erreicht werden. Das Reduktionsziel für Treibhausgasemissionen bis 2050 beträgt hier 80 %.
3. *Klimaschutzszenario 95 (KS 95)*
   Im Vergleich zum vorigen Szenario wird das gewünschte Reduktionsziel auf 95 % erhöht.

Rahmenannahmen

In beiden Szenarien geht der Endenergiebedarf von Wohn- und Gewerbegebäuden zurück. Im KS 80 um etwa 60 % und im KS 95 etwas stärker mit rund 70 %. Im AMS werden neue KWK-Anlagen gefördert, die bis 2020 gebaut werden. BHKWs erhalten Investitionszuschüsse. Es gibt zudem eine Bestandsanlagenförderung für Erdgas-KWK. In den KS wird die Förderung von BHKWs bis 2030 fortgesetzt. Zusätzlich zur Bestandsanlagenförderung gibt es eine Neuanlagenförderung für Erdgas-KWK (dadurch wird Kohle-KWK verdrängt).

Ergebnisse

Im AMS wird im Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 60 % erreicht. Im KS 80 sind es 83 % und im KS 95 94 %. Im KS 80 werden fossile Wärmeerzeuger (z.B. Erdgaskessel) durch Wärmepumpen ersetzt. Im KS 95 werden in Fernwärmenetzen Elektrodenkessel eingesetzt. Die KWK ist in 2050 in den KS nur noch wenig vorhanden, während im AMS noch ein verhältnismäßig hoher Anteil KWK zur Stromerzeugung eingesetzt wird.[6]

6 Strom aus KWK-Anlagen für die Jahre 2030 und 2050

6.2 Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr (IWES et al. 2015)

Szenarien

1. *Szenario -83 %*
   Reduktion der Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 um 83 %.
2. *Szenario -95 %*
   Reduktion der Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 um 95 %.

Rahmenannahmen

Der Wärmebedarf in Gebäuden wird durch energetische Sanierung und Effizienzsteigerungen stark reduziert.

Ergebnisse

Die KWK-Stromerzeugung im Jahr 2050 ist im ambitionierteren Szenario (95 %) deutlich niedriger als im weniger ambitionierten Szenario (83 %). Im Vergleich zu 2030 nimmt die Stromerzeugung aus KWK im 83 %-Szenario ab.[7] Der Anteil der Fern- und Nahwärme steigt langfristig an. Die bisherigen Wärmenetze auf Hochtemperatur müssen umgerüstet werden zur Nutzung von Gas-KWK, Groß-Wärmepumpen und Solarthermie in Kombination mit PtH. Es erfolgt ein Ausbau mit Fokussierung der Industrie-KWK-Systeme.

7 Vermutlich Nettostromerzeugung, Werte für 2050 und teilweise für 2030

6.3 Energiereferenzprognose (Prognos AG et al. 2014)

Szenarien

1. *Referenzprognose & Trendszenario*
   Bis 2030 wird die wahrscheinliche Entwicklung der Energiemärkte prognostiziert und die Trends werden bis 2050 fortgeschrieben.
2. *Zielszenario*
   In diesem Szenario sollen die Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung umgesetzt werden (mindestens -80 % Treibhausgasemissionen). Dafür werden weiterführende Maßnahmen unterstellt.

Rahmenannahmen

Der Endenergieverbrauch geht in allen Verbrauchssektoren zurück und die Endenergieproduktivität steigt um etwa 2 %. In Haushalten und Gebäude, Handel, Dienstleistungen verringert sich der Energieverbrauch deutlich durch Einsparungen im Gebäudebereich (Absenkung des Raumwärmebedarfs) und effizientere Beleuchtung.

Ergebnisse

Im Trendszenario wird eine Reduktion von 65 %, im Zielszenario von 80 % erreicht. In Referenzprognose und Trendszenario steigt die Stromerzeugung aus KWK bis 2040 an, was durch eine gesteigerte Produktion in der Fernwärmeerzeugung in Biomassekraftwerken (EEG-gefördert) und Steinkohlekraftwerken erreicht wird. Im Zielszenario steigt die Stromerzeugung ebenfalls bis 2040 leicht an. Dort wird zunächst verstärkt die Erdgas-KWK ausgebaut, während langfristig die gekoppelte Erzeugung mit Biomasse in der Industrie zunimmt. Im Zielszenario sind die Werte – bis auf 2020 und 2025 – niedriger als im Trendszenario.[8]

8 Nettostromerzeugung in KWK-Anlagen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050

6.4 Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas (Blesl 2014)

Szenarien

1. *ETS75*
   Für die im ETS erfassten Sektoren und Treibhausgase werden die Emissionsgrenzen übernommen.
2. *C75*
   Es wird eine Emissionsreduktion von 75 % in den EU27 gefordert und im Vergleich zum vorigen Szenario alle Sektoren mit einbezogen.
3. *C75_BEEVPEC*
   Im Vergleich zum C75 werden in diesem Szenario außerdem Ziele zur Primärenergieeinsparung und des Anteils Erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch berücksichtigt.
4. *C90*
   Hier wird das Reduktionsziel für 2050 auf 90 % erhöht.

Rahmenannahmen

Energieeffizienz trägt in vielen Bereichen zur Senkung der Energienachfrage bei. Es werden Energieeinsparungen durch verbesserte Gebäudedämmung für Wohn- und Nichtwohngebäude realisiert. Zudem wird der spezifische Energieverbrauch für Beleuchtung und elektrische Verbraucher reduziert.

Ergebnisse

Für Deutschland wird im Jahr 2050 je nach Szenario eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zwischen 76 % (ETS75) und 94 % (C90) erreicht. Bis 2030 wird Erdgas verstärkt im Bereich Objekt-KWK und Fernwärmeerzeugung eingesetzt. Der Anteil Erneuerbarer Energien im Bereich der Fernwärme nimmt stark zu, insbesondere die KWK-Stromerzeugung durch Biomasse und Geothermie steigt zukünftig an. Braun- und Steinkohle werden bis 2050 aufgrund der Emissionen verdrängt. CCS wird vermehrt eingesetzt. Generell wächst die Stromerzeugung aus KWK zunächst bis 2030 und nimmt anschließend wieder ab.[9]

9 KWK-Nettostromerzeugung für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050

6.5 KWK-Ausbau (Gores et al. 2014)

Es werden die Spannbreiten (Minimal- und Maximalwerte) der KWK-Stromerzeugung aus verschiedenen Literaturquellen zusammengestellt. Dabei handelt es sich teilweise um Potenziale oder Abschätzungen, die meisten sind jedoch Ergebnisse von Szenarienrechnungen. Für den Vergleich werden nur Werte aus einigen Szenarien übernommen, da die Potenziale eine andere Bezugsgröße wiedergeben und meist deutlich über den Szenarienergebnissen liegen. Die in der Studie angegebenen Minimal- und Maximalwerte zeigen eine große Bandbreite. Nachfolgend sind nur einige Angaben zu den Quellen aufgeführt, die in (Gores et al. 2014) zusammengestellt wurden.

(DIW et al. 2007) enthält eine Übersicht von Szenarien anderer Studien und eigene Modellrechnungen. Die Spannbreiten der KWK-Stromerzeugung in 2030 reichen dabei von minimal *25 TWh* (eigene Modellrechnung) bis zu maximal *150 TWh* (referenziert aus einer anderen Quelle). Beim Minimalwert wird vom Auslaufen der KWK-Förderung ausgegangen und eine brennstoffdifferenzierte Zuteilung im Emissionshandel berücksichtigt. Der Maximalwert wird aus einer These in einer anderen Quelle ermittelt: Auf KWK-Anlagen auf Basis fossiler Energieträger entfallen in 2030 mehr als ein Drittel der Leistung und rund die Hälfte der Stromerzeugung aller Must-run-Anlagen. Mit diesen Anteilen müssten diese Anlagen im Jahr 2030 eine Bruttoleistung von nahezu 30 GW mit einer Bruttostromerzeugung von größenordnungsmäßig 150 TWh aufweisen.

In **(dena 2008)** werden verschiedene Szenarien bei einem verstärkten Ausbau regenerativer Energien und sinkender Strom- und Wärmenachfrage diskutiert. Unter Annahme einer installierten elektrischen Leistung in KWK-Anlagen von rund 26 GW in den Jahren 2020 und 2030 werden etwa *143 TWh* KWK-Strom erzeugt.

(Greenpeace e.V. 2008) beschreibt ein Szenario mit einer KWK-Stromerzeugung von rd. *170 TWh* in 2020. Folgende Annahmen liegen dem Szenario zugrunde: verstärkter Ausbau der Erneuerbaren Energien, Nutzung von dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung, Atomausstieg bis 2023 und Senkung des heutigen Stromverbrauchs bis 2020 um 11 %.

In **(FfE 2009)** werden drei Szenarien für den Zeithorizont bis 2050 untersucht: 1) Referenz, 2) Erhöhte Technikeffizienz und 3) Umweltbewusstes Handeln. Die angegebenen Minimalwerte entstammen Szenario 1 während die Maximalwerte vorwiegend aus Szenario 2 sind. Dort werden eine höhere Technikeffizienz erreicht, ein erhöhter KWK-Ausbau angenommen und CCS ab 2025 bereits in großem Umfang eingesetzt.

(WWF Deutschland 2009) vergleicht zwei Szenarien bis 2050: Referenz und Innovation. In beiden Szenarien wird von einer wärmegeführten KWK-Stromerzeugung ausgegangen und es werden vorwiegend Erdgas und Biomasse als Brennstoffe in der KWK eingesetzt. Im Referenzszenario sinkt der Wärmebedarf, während im Innovationsszenario der Wärme- und Strombedarf deutlich abnimmt. Im Referenzszenario werden 2020 rund 77 TWh KWK-Strom erzeugt und im Jahr 2050 sinkt der Wert auf etwa 74 TWh. Im Innovationsszenario sinkt die KWK-Stromerzeugung stark auf nur 28 TWh in 2050, da in diesem ebenfalls ein nicht näher definiertes Emissionsziel erreicht werden soll.

(SRU 2011) untersucht Szenarien bis 2050 zur Erreichung des Ziels einer vollständigen Stromversorgung auf Basis Erneuerbarer Energien. Die KWK-Erzeugung findet ausschließlich auf Basis Erneuerbarer Energien statt, vor allem feste und gasförmige Biomasse, teilweise Geothermie. Variationen betreffen außerdem die Stromnachfrage oder den Anteil von Importstrom zur Erfüllung der Zielerreichung. Die angegebenen Werte sind aus den Szenarien 1.a und 1.b, die eine regenerative elektrische Vollversorgung ausschließlich aus deutschen Potenzialen annimmt. Unterschiede betreffen die Stromnachfrage in 2050: in Szenario 1.a sind es 500 TWh und in Szenario 1.b 700 TWh. In Szenario 1.b werden rund 147 TWh KWK-Strom aus Geothermie erzeugt, die in Szenario 1.a nicht dabei sind. Die restlichen 27 TWh werden aus Biogas erzeugt.

In Abbildung 6-1 sind die Spannbreiten der KWK-Stromerzeugung verschiedener Szenarienrechnungen nach (Gores et al. 2014) zu sehen.

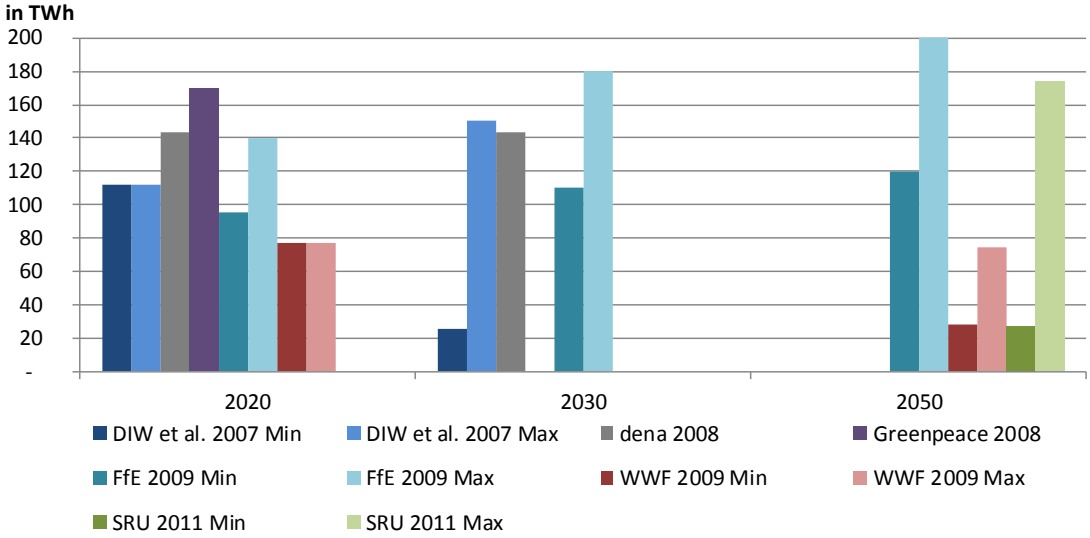


Abbildung 6-1: Vergleich zu Spannbreiten der KWK-Stromerzeugung (eigene Zusammenstellung nach (Gores et al. 2014))