

Modellierung von Wärmepumpen in Wärmenetzen und Analyse der Auswirkungen auf das deutsche Stromerzeugungssystem

Christiane Bernath (*), Frank Sensfuß

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Breslauer Str. 48 76139 Karlsruhe,
+49 721 6809-257, christiane.bernath@isi.fraunhofer.de, www.isi.fraunhofer.de

Kurzfassung: Eine verstärkte Nutzung von Sektorkopplungstechnologien wie Großwärmepumpen in Wärmenetzen verändert durch verstärkte Interaktion von Strom- und Wärmesektor die Struktur der Stromnachfrage sowie die Strominfrastruktur, aber auch die Struktur der Wärmebereitstellung. In diesem Beitrag werden diese Auswirkungen anhand einer modellbasierten Szenarioanalyse im Hinblick auf folgende Aspekte untersucht: den Wärmemix in Wärmenetzen, die zukünftige Entwicklung der KWK sowie Auswirkungen auf den Stromsektor und die CO₂-Emissionen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmepumpe eine relevante Erzeugungstechnologie in Wärmenetzen sein kann und dort zu einer kosteneffizienten Dekarbonisierung beitragen kann.

Keywords: Sektorkopplung, Wärmepumpe, Wärmenetze, KWK, Optimierungsmodell

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Im Pariser Abkommen, einem Nachfolgeabkommen für das Kyoto-Protokoll, wird eine Begrenzung der globalen Erderwärmung auf deutlich unter 2°C vorgesehen (UNFCCC 2015). Dafür sollen die weltweiten Treibhausgasemissionen reduziert werden. In diesem Rahmen hat sich auch Deutschland zu Emissionsreduktionen verpflichtet und im Klimaschutzplan 2050 Ziele festgeschrieben und mit strategischen Maßnahmen versehen (BMUB 2016). Bis zum Jahr 2050 soll eine weitgehende Treibhausgasneutralität für Deutschland erreicht werden (BMUB 2016). Im Jahr 2016 betrugen die gesamten Emissionen 909,4 Mio. t CO₂-Äquivalente, von denen rund 85 % energiebedingt sind und bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen (Umweltbundesamt 23.01.2018). Durch den Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nimmt die CO₂-Intensität im Stromsektor immer weiter ab. Zudem belegen Studien, dass zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele ein starker Ausbau erneuerbarer Energien kosteneffizient ist (vgl. z.B. (Pfluger et al. 2017)). Infolge dieser Transformation kann Strom zukünftig ebenso als Energieträger zur Dekarbonisierung anderer Sektoren eingesetzt werden (Gerhardt et al. 2015). Eine Strategie zur Reduktion des fossilen Brennstoffbedarfs ist die Sektorkopplung, welche *„die energietechnische und energiewirtschaftliche Verknüpfung von Strom, Wärme, Mobilität und industriellen Prozessen sowie deren Infrastrukturen“* bezeichnet (BDEW 2017). Das übergeordnete Ziel der Sektorkopplung ist die Dekarbonisierung des Energiesystems zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele (Wietschel et al. 2015). Ein weiteres Ziel ist die Bereitstellung von Flexibilität zum Ausgleich und zur besseren Systemintegration der fluktuierenden erneuerbaren Energien

(Gerhardt et al. 2014). Der verstärkte Einsatz von stromseitigen Sektorkopplungsoptionen führt letztendlich zu einer Erhöhung der Stromnachfrage (Gerhardt et al. 2015). Folglich kann Sektorkopplung nur dann einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, wenn für die Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage vorwiegend erneuerbare Energien genutzt werden (Deutsch et al. 2017). Sektorkopplung kann zu außerdem Effizienzsteigerungen beitragen, wenn die eingesetzte Technologie mit wenig erneuerbarem Strom möglichst viel fossile Brennstoffe substituiert (BMW i 2015).

Im Jahr 2016 entfielen 54 % des deutschen Endenergieverbrauchs auf die Bereitstellung von Nutzwärme in Form von Raumwärme, Prozesswärme und Warmwasser (AGEB 2017). In Haushalten betrug der Anteil der Wärmebereitstellung sogar fast 90 % (AGEB 2017). Für die Wärmeerzeugung werden weiterhin vorwiegend fossile Energieträger wie Erdgas, Erdöl und Kohle verbrannt, während der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Wärmebereich aktuell bei nur 13 % liegt (AGEB 2017; BEE 2017). Folglich ist Sektorkopplung in diesen Anwendungsbereichen ein vielversprechendes Konzept, um die Emissionsintensität bei der Wärmebereitstellung zu verringern. In diesem Kontext wird Sektorkopplung als die Nutzung von erneuerbarem Strom für Anwendungen zur Wärmeerzeugung verstanden. Eine Technologie zur Sektorkopplung von Strom und Wärme, welche zurzeit in der öffentlichen Diskussion eine zentrale Rolle spielt, ist die elektrische Wärmepumpe. Diese kann mit einer hohen Effizienz Wärme auf geringem Temperaturniveau bereitstellen und sowohl in Gebäuden als auch in Wärmenetzen zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Die weiteren Technologien wie direktelektrische Heizungen und Elektrokessel sind hingegen weniger effizient. In den vergangenen Jahren hat die Wärmepumpe im Gebäudebereich stark an Bedeutung gewonnen und im Jahr 2016 wurde die bisher größte Anzahl an Heizungswärmepumpen in Deutschland abgesetzt (BWP 2017). Die elektrische Großwärmepumpe hingegen ist im deutschen Markt bisher kaum vertreten, obwohl sie in einigen skandinavischen Ländern bereits standardmäßig für die Fernwärmeerzeugung eingesetzt wird (Wolf et al. 2014; BWP 2015). Als Hemmnisse für die Umsetzung vorhandener Potenziale werden der regulatorische Rahmen und ungleiche Kostenbelastungen der Energieträger, sowie die vergleichsweise hohen Investitionen genannt (Böttger und Bruckner 2017; Gerhardt et al. 2016; Wolf et al. 2014).

Die Bereitstellung von Wärme kann generell entweder durch dezentrale Anlagen erfolgen oder über ein Wärmenetz, in welches Wärme von zentral installierten Anlagen eingespeist wird. Der Fokus des vorliegenden Beitrags liegt auf den Wärmenetzen, da diese beim Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung erneuerbarer Energien einen wichtigen Beitrag zur Flexibilisierung leisten können (Pfluger et al. 2017). Zudem ist es wesentlich einfacher neue Technologien und Speichersysteme in zentral installierte Wärmenetze zu integrieren als eine derartige Anpassung in vielen einzelnen Haushalten vorzunehmen. Aus diesem Grund bieten Wärmenetze wichtige strategische Flexibilität und sollten erhalten und modernisiert werden (Sensfuß et al. 2017). Die Wärmewende bei Gebäuden kann durch das Zusammenspiel folgender drei Optionen erfolgen: Energieeffizienz, objektnahe Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien und CO₂-arme Wärmenetze (Deutsch et al. 2017). Folglich können Wärmenetze für die Dekarbonisierung im Gebäudesektor eine wichtige Rolle spielen und der zukünftige Beitrag von Wärmenetzen zur Dekarbonisierung des Wärmesektors wird insbesondere bei ambitionierten Klimaschutzzielen für das Jahr 2050 relevant.

Werden zukünftig Technologien wie Großwärmepumpen in Wärmenetze integriert, beeinflusst die dadurch verstärkte Interaktion von Strom- und Wärmesektor die Struktur der Stromnachfrage sowie die Strominfrastruktur. Ziel dieses Beitrags ist die Analyse dieser Auswirkungen auf das deutsche Stromerzeugungssystem. Hieraus leitet sich die zentrale Fragestellung dieses Beitrags ab: *Welche Auswirkungen hat die Integration der neuen Technologie Großwärmepumpe in die Wärmenetze auf die zukünftige Struktur des deutschen Stromerzeugungssystems?* Aus dieser Fragestellung lassen sich folgende inhaltliche Teilfragen ableiten, die für die Analyse herangezogen werden:

- Welche Auswirkungen hat die Integration der neuen Technologie Großwärmepumpe in die Wärmenetze auf die Deckung der Wärmenachfrage?
- Welchen Einfluss hat dies auf die Struktur des Kraftwerkparks und der Stromerzeugung und wie verändern sich dadurch die CO₂-Emissionen?
- Welche Auswirkungen hat die Großwärmepumpe auf die Entwicklung der KWK?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen und zur Analyse der Auswirkungen auf das deutsche Stromerzeugungssystem ist eine modellgestützte Abbildung der Sektorkopplung von Strom und Wärme notwendig. Dazu ist im nächsten Kapitel die Methodik der Untersuchung dargestellt. Im Anschluss daran werden Szenarien und Sensitivitäten definiert sowie die Ergebnisse vorgestellt und analysiert.

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Modell Enertile

Das am Fraunhofer ISI entwickelte Modell Enertile¹ wird zur Optimierung des Energiesystems eingesetzt. Mithilfe des Modells können zu vorgegebenen Rahmenbedingungen kosteneffiziente langfristige Entwicklungspfade zur Dekarbonisierung der Stromversorgung bis zum Jahr 2050 untersucht werden (Pfluger 2014). Für eine größtenteils exogen vorgegebene Strom- und Wärmenachfrage wird der kostenminimale Ausbau und Einsatz von Kraftwerken zur Lastdeckung berechnet. Enertile bietet eine stündliche Auflösung des Kraftwerkseinsatzes sowie einen langen Zeithorizont für den Kraftwerksausbau. Dabei werden konventionelle Kraftwerke, erneuerbare Energien, Strom- und Wärmenetze sowie Energiespeicher berücksichtigt. Die techno-ökonomischen Potenziale für erneuerbare Energien werden mithilfe eines GIS-basierten Modells räumlich hochaufgelöst berechnet. Zudem wird die Stromerzeugung auf Basis von realen Wetterdaten im Modell ermittelt. Für die betrachteten Stützjahre wird ein lineares Optimierungsproblem aufgestellt und die kostenminimale Lösung berechnet.

Als Eingangsdaten fließen unter anderem die Strom- und Wärmenachfrage, techno-ökonomische Parameter für die konventionellen Kraftwerke, Netze und Speicher sowie Kostenpotenzialkurven für die erneuerbaren Energien ein. Weiterhin werden Energieträger- und CO₂-Preise, der Zinssatz, Wetterprofile und politische Restriktionen berücksichtigt. Zu den

¹ www.enertile.eu

Ergebnissen der Optimierung zählen der Zubau und der stündliche Einsatz der Kraftwerke und Technologien, sowie die Kosten und CO₂-Emissionen der Energieerzeugung.

Im Modell Enertile werden zusätzlich zur detaillierten Abbildung des Stromsektors große Wärmenetze als eine Option der Sektorkopplung modelliert (Deac 2017). Bei den Wärmenetzen wird zwischen Industriewärme und Fernwärme unterschieden, da die Wärmenachfragen unterschiedliche Lastprofilverläufe aufweisen. Weiterhin werden Wärmenetze je nach Verfügbarkeit von Kohle als Brennstoff in zwei Kategorien differenziert: Wärmenetz Typ I (Erdgas) und Wärmenetz Typ II (Kohle). In den gasbasierten Wärmenetzen steht nur Erdgas als fossiler Brennstoff zur Verfügung, während in den kohlebasierten Wärmenetzen sowohl Kohle als auch Erdgas eingesetzt werden können. Zur Deckung der exogen vorgegebenen Wärmenachfrage stehen in den Wärmenetzen verschiedene Erzeugungsoptionen zur Verfügung, die modellendogen und kostenoptimiert zugebaut werden. Dazu zählen Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), fossil befeuerte Heizkessel, Elektroheizkessel sowie Wärmespeicher in den Fernwärmenetzen. In den Erzeugungsoptionen der Wärmenetze werden bisher keine Großwärmepumpen berücksichtigt. Die Integration der Großwärmepumpe als Technologieoption in den Wärmenetzen stellt daher eine wichtige und notwendige Modellerweiterung dar.

2.2 Modellierung der Großwärmepumpe

Mithilfe von elektrischen Großwärmepumpen wird aus Umweltwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau und elektrischer Energie Nutzwärme auf einem höheren Temperaturniveau erzeugt. Zur Wärmegewinnung eignen sich diverse Wärmequellen wie Wasser, Erdreich, Abwärme oder Luft. Die Verfügbarkeit dieser Wärmequellen ist teilweise stark abhängig von lokalen Gegebenheiten. Die Kosten einer Wärmepumpe variieren je nach Wärmepumpentyp und Wärmequelle erheblich. Generell sind Wärmepumpensysteme mit hohen Investitionen verbunden, bieten jedoch geringe Wärmegestehungskosten (Wolf et al. 2014). Die Leistungszahl von Wärmepumpen, auch „*coefficient of performance*“ (COP), ist durch das Verhältnis von erzeugter Wärmeleistung zu eingesetzter elektrischer Leistung definiert und abhängig vom Betriebspunkt. Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizsystem, desto höher ist die Leistungszahl. Großwärmepumpen erreichen typischerweise einen COP zwischen 2 und 5, während maximale Werte von bis zu 7 möglich sind (Lambauer et al. 2008). Die realisierbaren Vorlauftemperaturen liegen bei maximal 80 bis 100°C für Hochtemperaturwärmepumpen (Wolf et al. 2014).

Die Großwärmepumpe wird in Enertile als Luftwärmepumpe modelliert, die als Wärmequelle die Außenluft nutzt und daher unabhängig von lokalen Gegebenheiten ist. Dies stellt eine sehr konservative Annahme dar, da in der Realität in den verschiedenen Wärmenetzen auch besser geeignete Wärmequellen, wie z.B. Abwärme oder Erdreich, in gewissem Umfang nutzbar sein sollten. Eine methodische Herausforderung bei der Modellierung von Wärmepumpen besteht darin, die variable Effizienz der Wärmepumpe abzubilden. Da die Effizienz einer Luftwärmepumpe stark von der Temperatur der Außenluft abhängt, wird der COP im Modell in hoher zeitlicher Auflösung als Funktion der Außentemperatur ermittelt. Eine stückweise lineare Näherungsfunktion gibt hierzu den COP der Wärmepumpe bei einer Vorlauftemperatur des Heizsystems von 65°C an. Dieses Temperaturniveau ist für den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe zu hoch und gleichzeitig zu niedrig um die Wärmenachfrage in heutigen

Wärmenetzen vollständig zu decken. Auf Basis der durchschnittlichen Außentemperatur in Deutschland im Jahr 2010 wird der COP der Wärmepumpe für jede Stunde im Modell berechnet. In Abbildung 1 ist die durchschnittliche Außentemperatur und der ermittelte COP der Wärmepumpe für jede Stunde eines Jahres dargestellt. Der COP schwankt zwischen 1,5 und 3,5 und sinkt insbesondere bei tiefen Außentemperaturen stark ab.

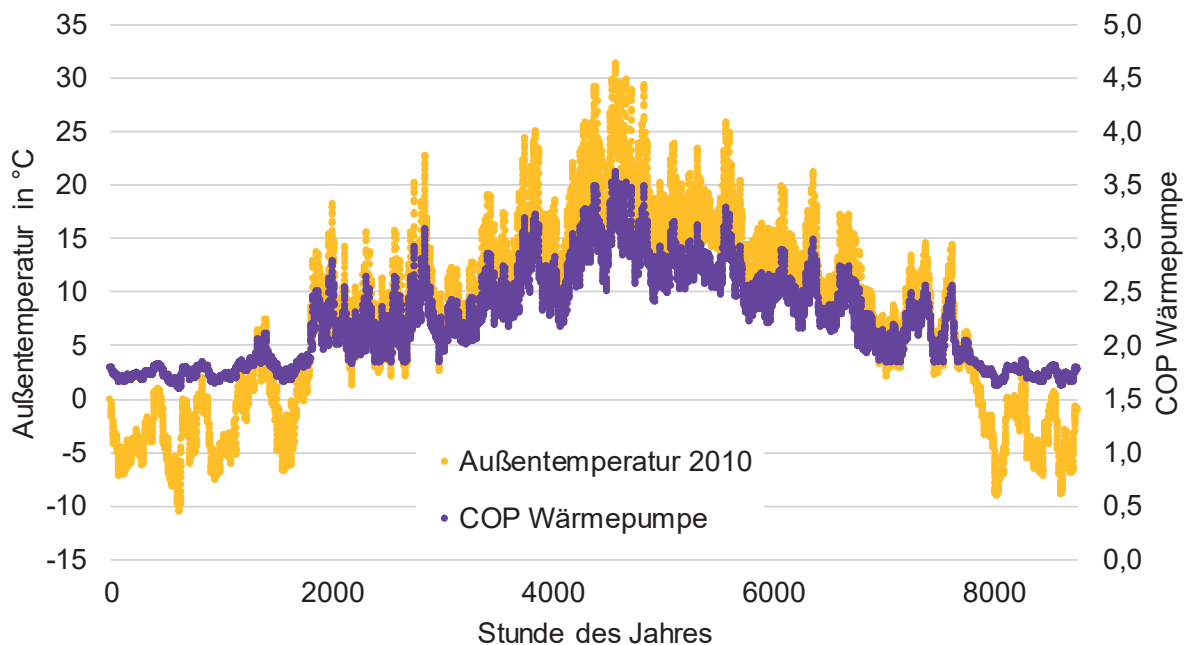


Abbildung 1: Außentemperatur Deutschland 2010 und ermittelter COP der Wärmepumpe

3 Modellbasierte Szenarioanalyse

Zur Beantwortung der in Kapitel 1 aufgeworfenen Fragen werden zunächst die Ergebnisse von zwei Szenarien gegenübergestellt, die sich in der Verfügbarkeit der Großwärmepumpe als Technologieoption unterscheiden. Weiterhin werden Sensitivitätsrechnungen durch Variation relevanter Parameter durchgeführt. Bei den Sensitivitätsrechnungen werden zum einen die Effizienzannahmen der Großwärmepumpe verändert und zum anderen werden die Preise für CO₂ und Gas variiert. In allen Szenarien wird das optimale deutsche Stromversorgungssystem für das Jahr 2050 bestimmt. Deutschland wird in den Szenarien isoliert betrachtet und kann folglich keinen Strom mit Nachbarländern handeln. Durch die Wahl dieser Systemgrenze ist die Flexibilität im Gesamtsystem begrenzt, da Angebot und Nachfrage nicht mit anderen Ländern ausbalanciert werden können. Die einzige Flexibilitätsoption in den Szenarien besteht durch den Wärmesektor. Der kostenminimale Ausbau und Einsatz von Kraftwerken und Technologien im Stromsektor sowie in den Wärmenetzen zur Lastdeckung werden optimiert. Heutige Kraftwerke, die im Jahr 2050 noch am Netz wären, werden dabei nicht berücksichtigt. Somit wird in der optimalen Lösung der für die Preiskonstellation kostenminimale Kraftwerkspark gebaut. Das lineare Optimierungsproblem eines Szenarios wird nur für das einzelne Stützjahr 2050 aufgestellt und die kostenminimale Lösung berechnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die berechneten Szenarien.

Tabelle 1: Übersicht über Szenarien

	Name	Preise		Großwärmepumpe	
		Gas in €/MWh _{th}	CO ₂ in €/t	Verfüg- barkeit	COP- Kurve
Veränderung der Effizienz	COP	40	100	Ja	Standard
	COP--				minus 0,5
	COP++				plus 0,5
	COP3				COP = 3
Veränderung der Preise für CO ₂ und Gas	G20C50	20	50	Nein	-
	G20C50-GWP			Ja	Standard
	G40C50	40		Nein	-
	G40C50-GWP			Ja	Standard
	G20C100	20	100	Nein	-
	G20C100-GWP			Ja	Standard
	G40C100	40		Nein	-
	G40C100-GWP			Ja	Standard
	G20C150	20	150	Nein	-
	G20C150-GWP			Ja	Standard
	G40C150	40		Nein	-
	G40C150-GWP			Ja	Standard

4 Ergebnisse

4.1 Einfluss der Wärmepumpe auf den Wärmemix

Nachfolgend werden die beiden Szenarienergebnisse bei einem Gaspreis von 40 €/MWh_{th} und einem CO₂-Preis von 100 €/t jeweils ohne und mit Großwärmepumpe gezeigt (G40C100 bzw. G40C100-GWP). Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf der Analyse des Einsatzes der Wärmepumpen und den Veränderungen in den Erzeugungsstrukturen der Wärmenetze.

4.1.1 Wärmemix im Szenario mit Großwärmepumpe

Bei Verfügbarkeit der Großwärmepumpe in den Wärmenetzen wird diese Technologieoption in dem Szenarioergebnis zugebaut. Die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen gibt das Verhältnis der über das Jahr erzeugter Wärme zur aufgenommenen elektrischen Energie an. Für die modellierte Wärmepumpe beträgt die Jahresarbeitszahl 2,24. Die Großwärmepumpe trägt insgesamt einen Anteil von rund 29 % zur Deckung der Wärmenachfrage in den vier Wärmenetzen bei. Die Anteile der verschiedenen Technologien zur Wärmeherzeugung in den Wärmenetzen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Anteile der Wärmepumpe sind in den gasbasierten Wärmenetzen höher als in den kohlebasierten Wärmenetzen. Dies liegt an den unterschiedlichen Preisniveaus der fossilen Brennstoffe. Der Gaspreis liegt in diesem Szenario mit 40 €/MWh_{th} deutlich über dem Kohlepreis von 14 €/MWh_{th}. Weiterhin werden die Wärmepumpen in den Fernwärmenetzen nur vergleichsweise wenig eingesetzt. Dieser Unterschied kann folgende Ursache haben: Das Profil der Wärmenachfrage verläuft für Fernwärme und Industrie sehr unterschiedlich. Fernwärme wird vorwiegend von Herbst bis

Frühjahr nachgefragt, während im Sommer die Auslastung eher gering ist. In der Industrie wird die Wärme dagegen ganzjährig auf einem vergleichsweise konstanten Niveau benötigt. Dieser Sachverhalt wirkt sich auf die Auslastung der Anlagen und ihre Energieerzeugungskosten aus. Folglich kann es sein, dass der Einsatz der Großwärmepumpe in diesen Wärmenetzen aufgrund der niedrigeren Auslastung im Sommer weniger kosteneffizient ist.

Tabelle 2: Anteile der Technologien zur Wärmeerzeugung an der Deckung der Wärmenachfrage in Wärmenetzen im Szenario mit Großwärmepumpen (G40C100-GWP)

Wärmenetz		KWK	Fossiler Heizkessel	Elektrokessel	Wärmepumpe
Fernwärme	Kohle	37 %	48 %	15 %	0 %
	Gas	45 %	18 %	19 %	18 %
Industrie-wärme	Kohle	55 %	8 %	13 %	24 %
	Gas	39 %	2 %	5 %	55 %
Insgesamt		42 %	17 %	12 %	29 %

4.1.2 Analyse der Interaktion von Strom- und Wärmeerzeugung

Nachfolgend werden beispielhaft die Strom- und Wärmeerzeugung für eine modellierte Winter- und Sommerwoche im Jahr 2050 gezeigt. Für die Winterwoche wird ein gasbasiertes Fernwärmenetz und für die Sommerwoche ein kohlebasiertes Industrierwärmenetz verwendet.

Abbildung 2 zeigt die stündliche Stromerzeugung in einer Winterwoche. An mehreren Tagen kommt es zu einer starken Windeinspeisung von über 70 GWh. In dieser Zeit wird die KWK-Stromerzeugung deutlich reduziert oder ganz abgeschaltet. Ein Teil des Stroms wird zu diesen Zeitpunkten in Power-to-Heat-Anwendungen genutzt, die sowohl Wärmepumpen und Elektrokessel in den Wärmenetzen, als auch Wärmepumpen in Gebäuden beinhalten. Ebenso wird der Pumpspeicher in diesen Stunden im Pumpbetrieb gefahren. Die gespeicherte Energie wird danach in Zeiten geringer Windeinspeisung zur Deckung von Lastspitzen verwendet.

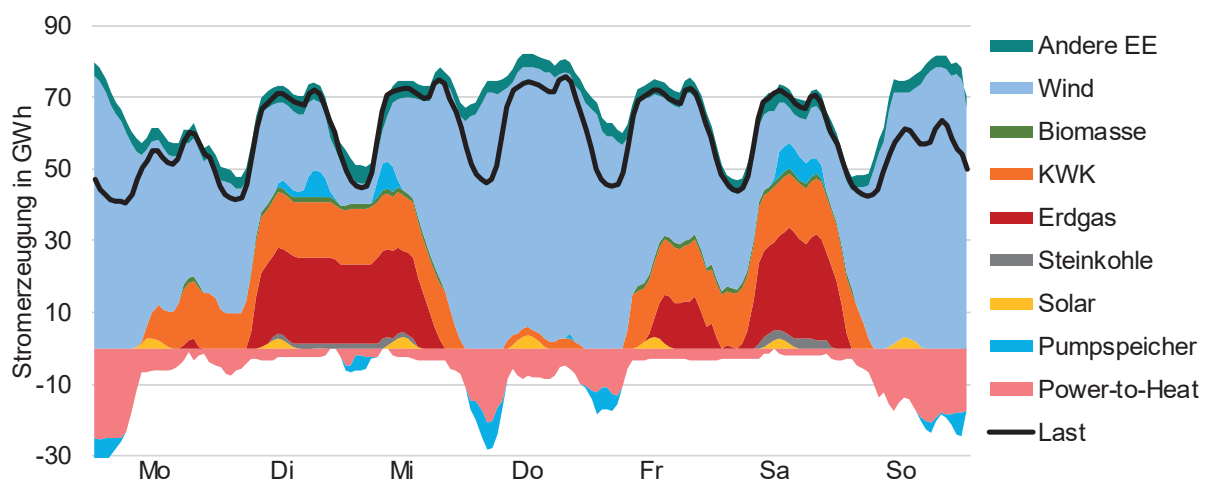


Abbildung 2: Stündliche Stromerzeugung in einer modellierten Winterwoche im Jahr 2050 im Szenario mit Großwärmepumpen (G40C100-GWP)

Abbildung 3 zeigt die stündliche Wärmeerzeugung für dieselbe Woche in einem gasbasierten Fernwärmenetz. Der fossile Heizkessel und die KWK decken den Großteil der Wärmenachfrage. Die Großwärmepumpe trägt fast durchgängig einen Anteil zwischen 15 und 20 % an der Wärmeerzeugung bei und wird nur in wenigen Stunden ganz abgeschaltet, wenn die fossile Erzeugung die Nachfrage nahezu vollständig deckt. In Zeiten starker

Windeinspeisung auf dem Strommarkt wird die KWK heruntergefahren und der Elektrokessel wird zugeschaltet. Der Speicher wird häufig zum Ausgleich der Lastspitzen eingesetzt.

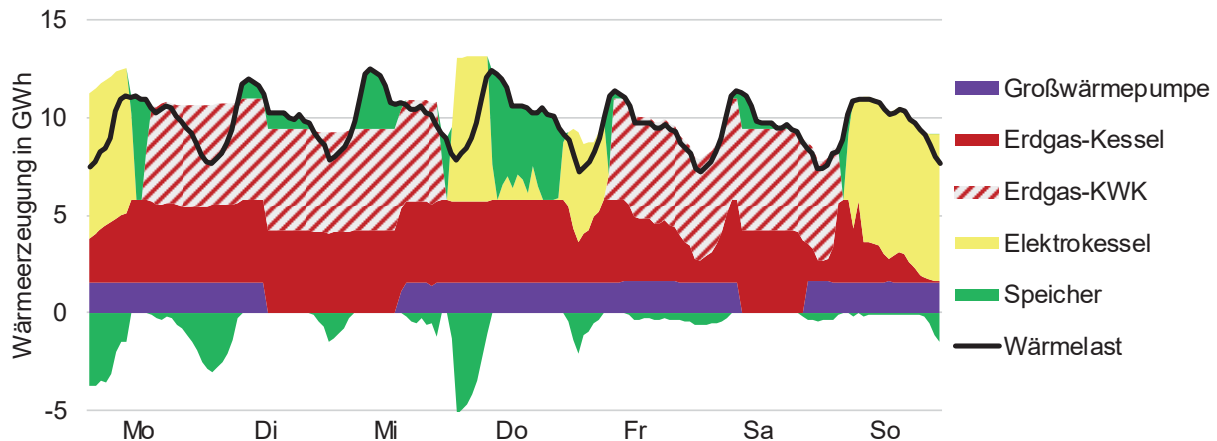


Abbildung 3: Stündliche Wärmezeugung in einer modellierten Winterwoche im Jahr 2050 in einem gasbasierten Fernwärmenetz im Szenario mit Großwärmepumpen (G40C100-GWP)

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Erzeugungsstrukturen auf dem Strommarkt und in einem kohlebasierten Industriewärmenetz für eine Sommerwoche in 2050. Tagsüber wird viel Solarenergie ins Stromnetz eingespeist. Gegen Ende der dargestellten Sommerwoche wird sehr viel Strom aus Windenergie erzeugt. Die KWK-Erzeugung wird für diese Zeit eingestellt, was sich ebenfalls in der Wärmeerzeugung im Industriewärmenetz in Abbildung 5 zeigt. Die KWK-Wärmeerzeugung läuft zunächst konstant durch und wird am Wochenende durch den Elektrokessel und teilweise den fossilen Heizkessel ersetzt. Die Wärmepumpe deckt den restlichen Wärmebedarf im Industriewärmenetz und hat in dieser Woche einen Anteil zwischen 26 und 38 % an der Wärmeerzeugung. Ein Wärmespeicher ist in den Technologieoptionen für dieses Wärmenetz nicht verfügbar und wird folglich nicht berücksichtigt.

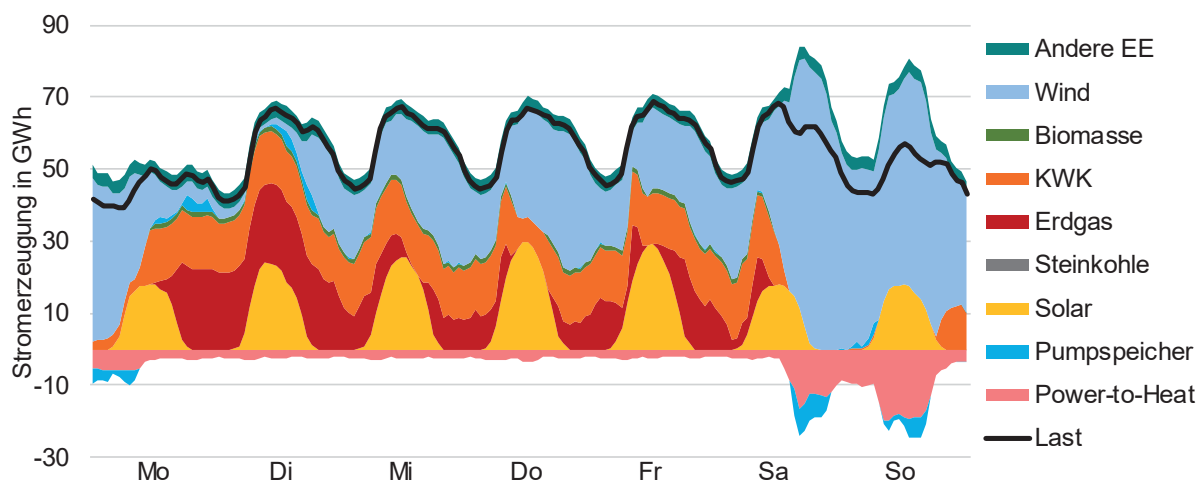


Abbildung 4: Stündliche Stromerzeugung in einer modellierten Sommerwoche im Jahr 2050 im Szenario mit Großwärmepumpen (G40C100-GWP)

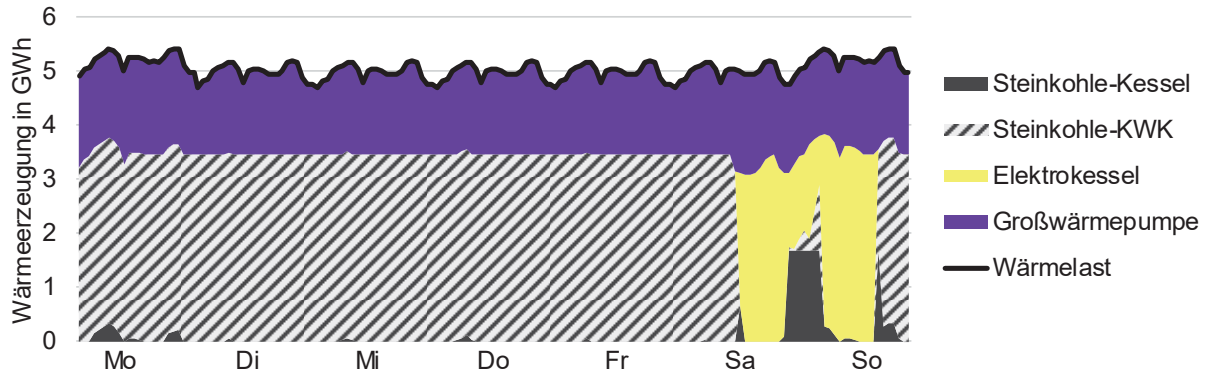


Abbildung 5: Stündliche Wärmeerzeugung in einer modellierten Sommerwoche im Jahr 2050 in einem kohlebasierten Industriewärmenetz im Szenario mit Großwärmepumpen (G40C100-GWP)

Durch die Analyse der Interaktion von Strom- und Wärmeerzeugung zeigt sich, dass Elektrokessel vor allem zu Zeiten hoher Windeinspeisung verwendet werden. In den Wärmenetzen wird die Großwärmepumpe dabei tendenziell über längere Zeiträume betrieben als der Elektrokessel, da diese eine höhere Effizienz hat als der Kessel und für einen dauerhaften Betrieb kostengünstiger ist.

4.1.3 Veränderungen im Wärmemix

Durch den Einsatz der Großwärmepumpe in den Wärmenetzen werden die anderen Wärmeerzeugungstechnologien verdrängt. In Abbildung 6 ist die Differenz der Wärmeerzeugung gegenüber dem Szenario ohne Großwärmepumpe gezeigt. Wie im vorherigen Abschnitt bereits gezeigt, trägt die Großwärmepumpe in den Wärmenetzen unterschiedlich stark zur Wärmeerzeugung bei. Durch den Einsatz der Großwärmepumpe wird in den gasbasierten Wärmenetzen die fossile Erzeugung und der Elektrokessel verdrängt. Im gasbasierten Industriewärmenetz wird die Wärmepumpe besonders stark zur Wärmeerzeugung eingesetzt und die anderen Erzeugungstechnologien wie die Erdgas-KWK verdrängt. Insgesamt wird die erdgasbasierte Wärmeerzeugung stärker von der Großwärmepumpe verdrängt als die kohlebasierte Wärmeerzeugung. Im kohlebasierten Fernwärmenetz wird die Großwärmepumpe nur wenig eingesetzt. Dennoch findet in diesem Wärmenetz ein Wechsel von fossilem Heizkessel zu KWK und Elektrokessel statt. Diese Verschiebungen lassen sich wie folgt erklären. Die Großwärmepumpe verdrängt vorwiegend die Erdgas-KWK. Da die Steinkohle-KWK in diesem Szenario günstiger ist, wird diese im Gegenzug erhöht. Die durch Steinkohle-KWK erzeugte Wärme wird in den kohlebasierten Wärmenetzen zur Deckung der Nachfrage eingesetzt und der gleichzeitig erzeugte Strom wird in den anderen Wärmenetzen für den Betrieb der Wärmepumpe genutzt. Weiterhin wird der Steinkohlekessel verdrängt und dafür Großwärmepumpen aufgrund ihrer höheren Effizienz verwendet.

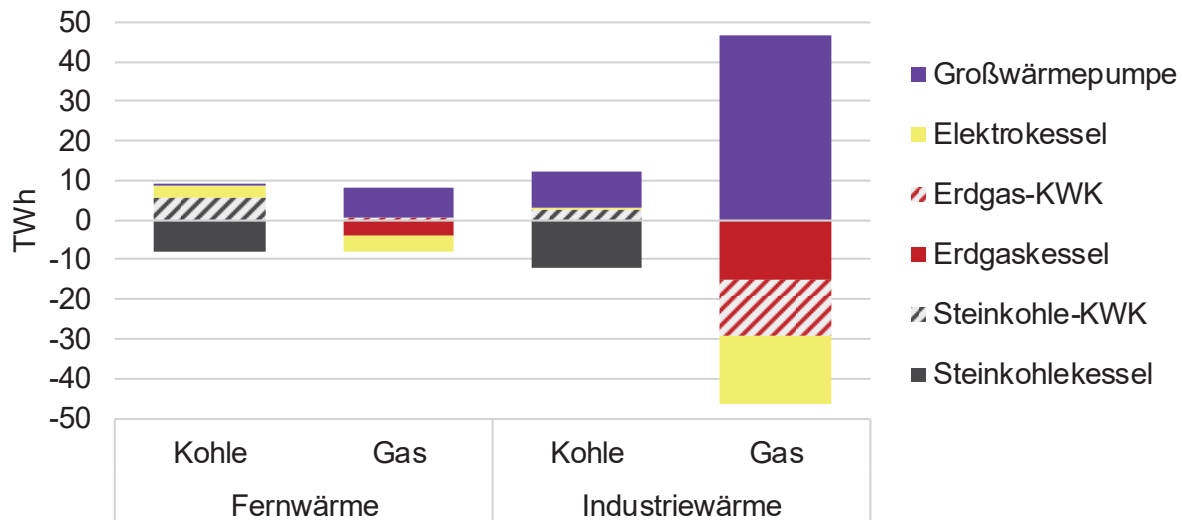


Abbildung 6: Differenz der Wärmeerzeugung in den vier Wärmenetzen im Szenario mit Großwärmepumpe (G40C100-GWP) gegenüber dem Szenario ohne Großwärmepumpe (G40C100)

4.2 Einfluss der Effizienz der Großwärmepumpe auf den Wärmemix

Im Szenarienvergleich in diesem Abschnitt wird die Effizienz der Großwärmepumpe variiert, um die Sensibilität der Ergebnisse auf diesen Inputparameter zu untersuchen. Hierzu werden zwei Sensibilitäten berechnet, in denen die COP-Kennlinie der Wärmepumpe um 0,5 nach unten bzw. nach oben verschoben wird. Die Verschiebung nach unten resultiert in einer niedrigeren mittleren Effizienz (Szenario COP--) und analog nach oben mit einer höheren mittleren Effizienz (Szenario COP++). Weiterhin wird ein Szenario mit einem konstanten COP von 3 berechnet (Szenario COP3), der bei einer anderen Wärmequelle mit einem konstanten Temperaturniveau wie beispielsweise Erdwärme möglich wäre. Die Nutzung anderer Wärmequellen kann mit einer Erhöhung der Investition einhergehen. Die Investitionen für eine Erdwärmepumpe beispielsweise wären deutlich höher als die einer Luftwärmepumpe. Außerdem wäre diese Wärmequelle möglicherweise nicht an allen Standorten in ausreichendem Ausmaß vorhanden. Dies wurde aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der Szenarien in diesem Fall nicht berücksichtigt. Für die insgesamt vier Szenarien sind in Tabelle 3 die Werte der Jahresarbeitszahl der modellierten Wärmepumpe aufgeführt.

Tabelle 3: Vergleich der Jahresarbeitszahlen der Großwärmepumpe

Szenario	COP--	COP	COP++	COP 3
Jahresarbeitszahl	1,76	2,24	2,69	3,00

In Abbildung 7 wird der Wärmemix der Wärmenetze für die vier Szenarien gegenübergestellt. Bei nur leichter Verschiebung der COP-Kennlinie nach unten bzw. oben ändern sich die Anteile der Wärmepumpe an der Deckung der Nachfrage erheblich von 29 % auf 12 % bzw. 49 %. Bei Annahme eines fixen COP von 3 werden insgesamt 76 % der Wärmenachfrage von Wärmepumpen gedeckt. In diesem Szenario wird in den gasbasierten Netzen sogar ein Anteil von über 90 % erreicht. Der Einsatz der Wärmepumpe führt zur Reduktion und Verdrängung aller anderen Erzeugungstechnologien. Aus diesen Ergebnissen folgt, dass die Annahmen zur Effizienz der Wärmepumpe einen maßgeblichen Einfluss darauf haben, in welchem Ausmaß diese zur Wärmeerzeugung in den Wärmenetzen eingesetzt wird. Die Sensibilität der

Ergebnisse bezüglich diesem Inputparameter zeigt, dass eine realitätsnahe und zeitlich hohe Auflösung des COP im Modell vonnöten ist. Die korrekte Abbildung des COP stellt jedoch aufgrund seiner Variabilität eine methodische Herausforderung dar und muss insbesondere im Hinblick auf alternative Wärmequellen weiterentwickelt werden.

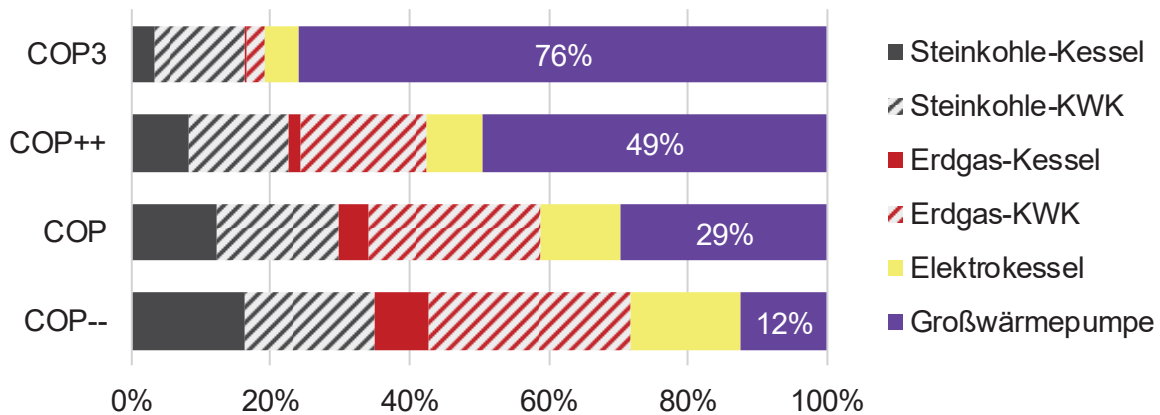


Abbildung 7: Wärmemix der Wärmenetze bei Veränderung der Effizienz der Großwärmepumpe

4.3 Einfluss des CO₂- und Gaspreises

Da die Preise für CO₂-Emissionen und Gas großen Einfluss auf das Optimierungsergebnis haben können, werden diese im Folgenden systematisch variiert. Der Gaspreis wird entweder mit 20 oder mit 40 €/MWh_{th} festgelegt, während die CO₂-Preise entweder 50, 100 oder 150 €/t betragen. Für jede Kombination dieser Preise wird jeweils ein Szenario ohne und mit Großwärmepumpe berechnet (vgl. Tabelle 1). Diese insgesamt 12 Szenarien werden auf Veränderungen im Wärmemix der Wärmenetze und im Stromsektor sowie hinsichtlich einer Emissionsreduktion analysiert. Die Veränderungen werden über die Differenz der Werte im Szenario mit Großwärmepumpe gegenüber dem Szenario ohne Großwärmepumpe veranschaulicht.

4.3.1 Veränderungen im Wärmemix

In Abbildung 8 ist die Differenz der Wärmeerzeugung bei verschiedenen Gas- und CO₂-Preisen gezeigt. Generell sinkt die fossile und steigt die strombasierte Wärmeerzeugung mit zunehmendem CO₂-Preis. Bei einem niedrigen Gaspreis verdrängt der Einsatz der Großwärmepumpe mit steigendem CO₂-Preis zunehmend die erdgasbasierte Wärmeerzeugung. Aufgrund des niedrigen Gaspreises werden auch in den kohlebasierten Wärmenetzen vorwiegend der Erdgaskessel und die Erdgas-KWK zur Wärmeerzeugung verwendet. Dies liegt an den gewählten Randbedingungen der Szenarien, durch welche nur das Jahr 2050 optimiert wird und bestehende Kraftwerke nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden keine Kohlekraftwerke gebaut und eingesetzt. Durch den Einsatz der Großwärmepumpen werden daher bei diesem Gaspreis auch vor allem die erdgasbasierten Technologien ersetzt. Bei einem höheren Gaspreis werden dagegen beide fossile Brennstoffe durch die Wärmepumpen verdrängt. Das Szenario mit einem Gaspreis von 40 €/MWh_{th} und einem CO₂-Preis von 100 €/t ist die einzige Konstellation, in der durch den Einsatz der Großwärmepumpen die Steinkohle-KWK zunimmt. Dieses Szenario wurde in Abschnitt 4.1

bereits detailliert für die vier Wärmenetztypen analysiert und der Anstieg der Steinkohle-KWK mit der Verdrängung der Erdgas-KWK in den gasbasierten Netzen in Verbindung gebracht.

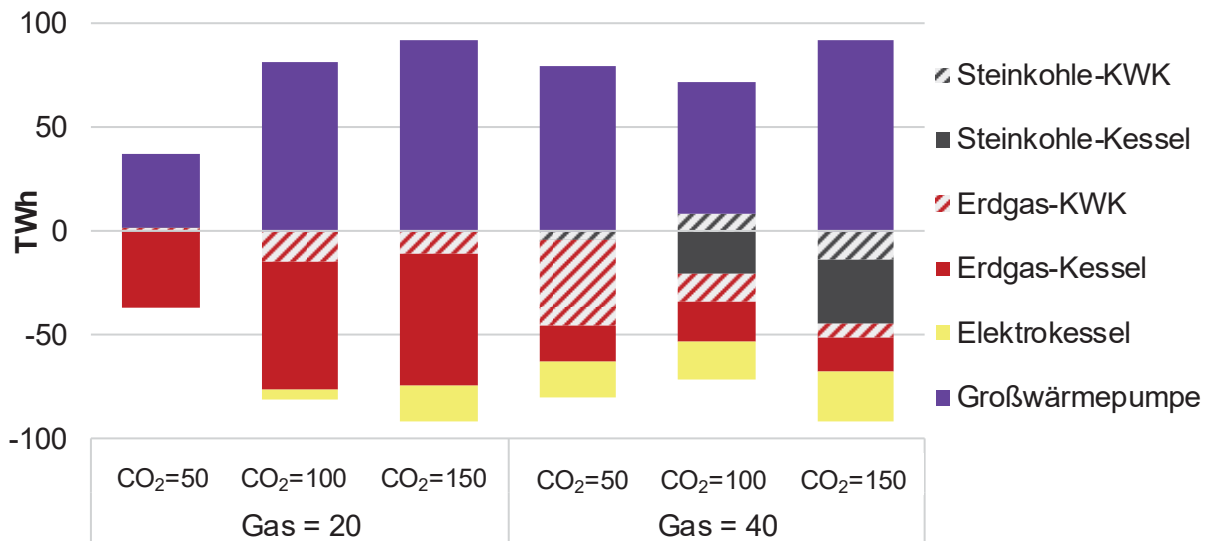


Abbildung 8: Differenz der Wärmeerzeugung in den Wärmenetzen in Szenarien mit Großwärmepumpe gegenüber den Szenarien ohne Großwärmepumpe bei verschiedenen Gas- und CO₂-Preisen

4.3.2 Veränderungen im Stromsektor

Die verschiedenen Preiskonstellationen haben Einfluss auf die Stromerzeugung und die installierte Kraftwerksleistung. Dazu ist in Abbildung 9 die Differenz der Stromerzeugung und der installierten Leistung dargestellt. Technologien, die in der Legende ein „minus“ vorangestellt haben, stellen eine Stromverbrauchsgröße dar und verhalten sich gegenläufig zu den anderen Technologien. Dies betrifft beispielsweise die Power-to-Heat-Anlagen, zu denen Elektrokessel und Wärmepumpen zählen. In den Szenarien mit Großwärmepumpe gibt es folglich mehr Power-to-Heat-Anlagen, die in die Abbildung jedoch aufgrund des Stromverbrauchs mit einem negativen Vorzeichen eingehen und daher unterhalb der x-Achse dargestellt werden.

In den Szenarien mit Großwärmepumpe wird meist mehr Strom aus Erdgas erzeugt und die KWK verdrängt. Die Verdrängung der KWK ist für die Wärmeseite bereits in Abschnitt 4.3.1 erläutert. Der erhöhte Strombedarf durch den Einsatz der Wärmepumpen führt bei einem niedrigen Gaspreis zum Anstieg der Stromerzeugung aus Erdgas. Aufgrund höherer spezifischer Emissionen kann sich die Steinkohle trotz niedrigerer Brennstoffkosten nicht gegen Erdgas durchsetzen. Solange der CO₂-Preis auf einem mittleren oder höheren Niveau liegt, ist die Steinkohle selbst bei einem höheren Gaspreis nicht konkurrenzfähig. Bei einem niedrigen CO₂-Preis von 50 €/t kommt es jedoch durch den Einsatz der Großwärmepumpe zu einem Verschiebungseffekt: Ein großer Teil der Stromerzeugung aus KWK und Erdgas wird durch Steinkohlestrom ersetzt. Dieser Effekt kann wie folgt erklärt werden. Die Großwärmepumpe ist auf der Wärmeseite eine günstigere Erzeugungsoption als die Erdgas-KWK und führt zur Verdrängung dieser Technologie in den Wärmenetzen. Zudem ist die Stromerzeugung aus Kohle in dieser Preiskonstellation kosteneffizienter als Erdgas und wird zur Deckung des Strombedarfs der Wärmepumpen eingesetzt. Zusätzlich führt das Wegfallen von Erdgas-KWK auf der Stromseite zu einer weiteren Erhöhung der Stromerzeugung aus Steinkohle.

Ein weiterer Effekt lässt sich im Szenario mit Großwärmepumpe und einem Gaspreis von 20 €/MWh_{th} sowie einem CO₂-Preis von 100 €/t beobachten. Gegenüber dem Szenario ohne Großwärmepumpe wird vergleichsweise viel Wind- und Solarenergie zugebaut. Bei einem niedrigen Gas- und CO₂-Preis ist die fossile Stromerzeugung dem zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien zur Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage durch die Großwärmepumpen aus Kostensicht vorzuziehen. Bei einem höheren CO₂-Preis von 100 €/t wird dieses Verhältnis umgekehrt, da ein stärkerer Dekarbonisierungsdruck auf den Stromsektor wirkt, weshalb in diesem Fall die erneuerbaren Energien verstärkt zugebaut werden. Dies wird ebenfalls durch die zusätzliche Stromnachfrage durch die Großwärmepumpen verschärft. Darüber hinaus wird bei dieser Preiskonstellation die Stromerzeugung im Vergleich zum Szenario ohne Großwärmepumpe am stärksten gesteigert. Bei einer weiteren Erhöhung des CO₂-Preises müssten demnach noch mehr erneuerbare Energien eingesetzt werden. Dies geschieht allerdings nicht, da hiermit gleichzeitig eine noch stärkere Abregelung einhergehen würde. Ein zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien wäre daher kontraproduktiv, solange nicht genügend Flexibilität im Gesamtsystem vorhanden ist. Dies ist in diesem Fall der Wahl von Deutschland als alleinige Modellregion geschuldet, wodurch ein Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung mit den Nachbarländern nicht möglich ist. Bei einem höheren Gaspreis fehlen ebenso die Flexibilitätsoptionen, was durch eine zunehmende Erhöhung der Abregelung bei steigendem CO₂-Preis in den Szenarien deutlich wird.

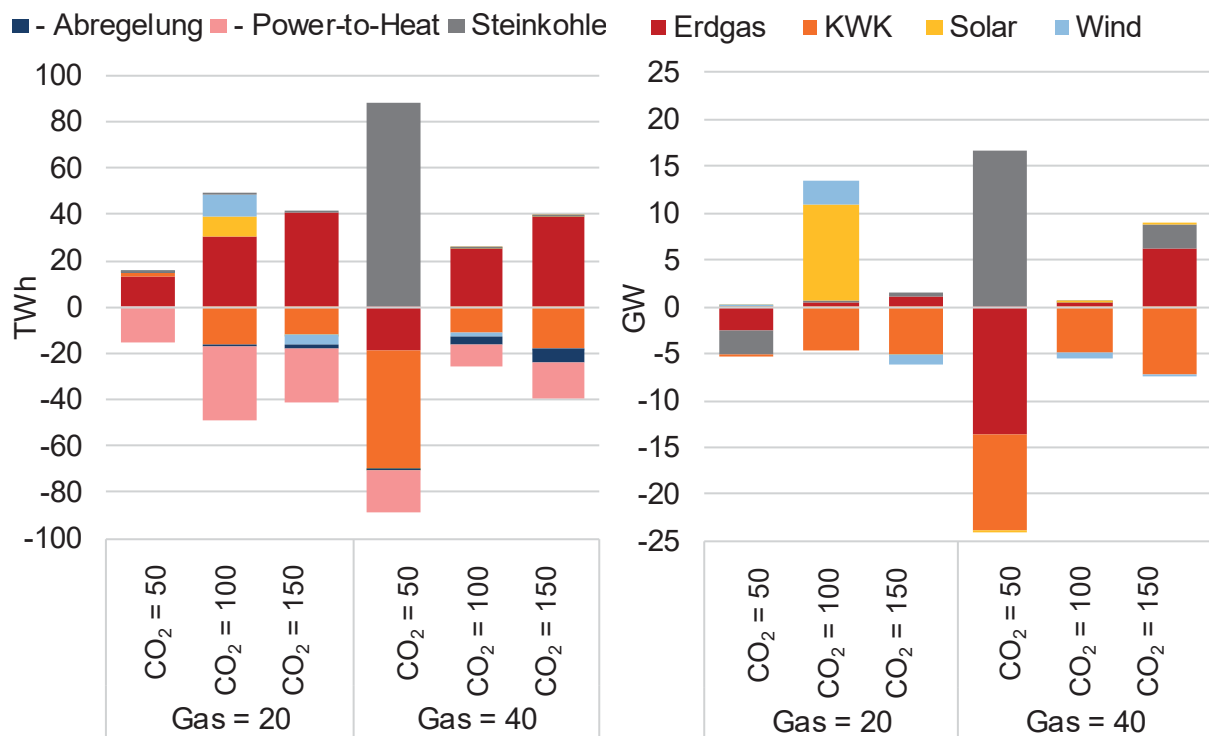


Abbildung 9: Differenz der Stromerzeugung in TWh und der installierten Leistung in GW von Szenarien mit Großwärmepumpe gegenüber Szenarien ohne Großwärmepumpe bei verschiedenen Gas- und CO₂-Preisen (Technologien, die in der Legende ein „minus“ vorangestellt haben, stellen eine Stromverbrauchsgröße dar und verhalten sich gegenläufig zu den anderen Technologien)

4.3.3 Beitrag zur Emissionseinsparung

Abschließend wird für die Szenarien untersucht, inwiefern die Integration der Großwärmepumpe zu einer Emissionseinsparung beitragen kann. Die relativen Veränderungen der Emissionen sind in Abbildung 10 für die Strom- und Wärmeerzeugung dargestellt. Die Emissionen der Stromerzeugung fallen in den Szenarien mit Großwärmepumpe teilweise deutlich höher aus. Dies liegt daran, dass der Stromverbrauch in diesen Szenarien zwischen 2 und 7 % höher liegt und ein Teil der zusätzlichen Last durch die Großwärmepumpen mit konventionellen Energieträgern gedeckt wird. Im Szenario bei einem Gaspreis von 40 €/MWh_{th} sowie einem CO₂-Preis von 50 €/t sind die Emissionen der Stromerzeugung besonders hoch, da in dieser Preiskonstellation viel Kohle eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 4.3.2). Im Gegensatz zur Stromerzeugung fallen die Emissionen der Wärmeerzeugung mit Großwärmepumpe niedriger aus, da die fossile Wärmeerzeugung durch die Großwärmepumpe verdrängt wird. Sobald die Emissionen im Stromsektor geringer ansteigen als die Einsparungen in der Wärmeerzeugung wird insgesamt eine Emissionsreduktion erzielt. Insgesamt gilt, je höher der CO₂-Preis, desto größer ist die Emissionsreduktion durch den Einsatz der Großwärmepumpe.

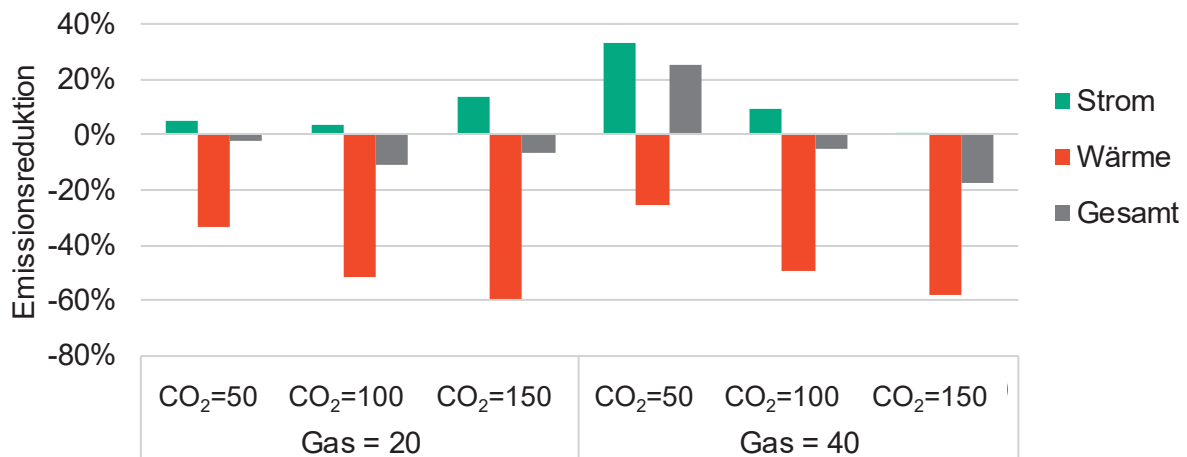


Abbildung 10: Emissionsreduktion von Szenarien mit Großwärmepumpe gegenüber Szenarien ohne Großwärmepumpe bei verschiedenen Gas- und CO₂-Preisen

5 Zusammenfassung

Durch in Wärmenetze integrierte Sektorkopplungstechnologien wie Großwärmepumpen wird die Interaktion von Strom- und Wärmesektor erhöht. Dies hat Auswirkungen auf die Struktur der Stromnachfrage sowie auf die Strominfrastruktur. In diesem Beitrag wurden die Auswirkungen anhand einer modellbasierten Szenarioanalyse im Hinblick auf folgende Aspekte untersucht: den Wärmemix in Wärmenetzen, die zukünftige Entwicklung der KWK sowie Auswirkungen auf den Stromsektor und die CO₂-Emissionen.

Ist die Großwärmepumpe als Technologieoption verfügbar, wird diese in den Szenarien zugebaut. Dadurch trägt sie zur Deckung der Wärmenachfrage in den vier Wärmenetzen bei. Hierdurch wird die fossile Wärmeerzeugung verdrängt und die KWK teilweise deutlich reduziert. Die Analyse der Interaktion von Strom- und Wärmeerzeugung für eine modellierte Winter- und Sommerwoche im Jahr 2050 zeigt, dass der Elektrokessel vor allem zu Zeiten hoher Windenergieeinspeisung eingesetzt wird, während die Großwärmepumpe tendenziell

über längere Zeiträume betrieben wird. Dies liegt vor allem an der höheren Effizienz der Großwärmepumpe. In welchem Ausmaß die Großwärmepumpen in den Wärmenetzen zur Wärmezeugung eingesetzt werden wird maßgeblich von den Annahmen zur Effizienz der Großwärmepumpe beeinflusst. Bereits eine geringfügige Veränderung des COP der modellierten Wärmepumpe kann zu großen Unterschieden in den Ergebnissen führen.

Mit zunehmendem CO₂-Preis sinkt die fossile und steigt die strombasierte Wärmezeugung. Im Stromsektor wird in den Szenarien mit Großwärmepumpe häufig mehr Strom aus Erdgas erzeugt, wobei dafür nur vergleichsweise wenig neue Kraftwerksleistung installiert wird. Die KWK nimmt in annähernd allen Szenarien ab. Bei einem Gaspreis von 20 €/MWh_{th} und einem CO₂-Preis von 100 €/t wird mit Großwärmepumpe erheblich mehr Wind- und Solarenergie zugebaut. Ein Vergleich der Emissionen zeigt, dass insgesamt eine Reduktion erzielt wird, solange die Steigerung der Emissionen im Stromsektor niedriger ausfallen als die Einsparungen in der Wärmezeugung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmepumpe zukünftig eine relevante Erzeugungstechnologie in Wärmenetzen darstellen kann und dort zu einer kosteneffizienten Dekarbonisierung beitragen kann. Eine realitätsnahe Abbildung des COP der modellierten Wärmepumpen ist aufgrund der Sensibilität der Ergebnisse auf diesen Inputparameter essentiell. Die Modellierung der Wärmepumpen muss in dieser Hinsicht insbesondere für andere Wärmequellen als Außenluft weiterentwickelt werden. Welche Technologien zur Deckung der zusätzlichen Stromnachfrage eingesetzt werden hängt maßgeblich von Annahmen zu Gas- und CO₂-Preis ab. Um hierbei allerdings einen Beitrag zum Klimaschutz leisten zu können, ist der Einsatz von erneuerbaren Energien notwendig. Die kosteneffiziente Integration erneuerbarer Energien im Stromsektor erfordert jedoch ein hohes Maß an Flexibilität um die fluktuierende Erzeugung ausgleichen zu können. In den gezeigten Ergebnissen für Deutschland ist ein Ausgleich mit den Nachbarländern nicht möglich, wodurch nicht ausreichend Flexibilität im Gesamtsystem vorhanden ist. Die Berücksichtigung anderer Flexibilitätsoptionen und die Ausweitung auf den europäischen Strom- und Wärmesektor ist für zukünftige Untersuchungen anzustreben.

6 Literatur

AGEB (Hg.) (2017): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2016. AG Energiebilanzen e.V. Berlin.

BDEW (Hg.) (2017): 10 Thesen zur Sektorkopplung. Positionspapier. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin.

BEE (Hg.) (2017): Trend-Prognose und BEE-Zielszenario. Entwicklung der Erneuerbaren Energien bis 2020. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. Berlin.

BMUB (Hg.) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin.

BMWi (Hg.) (2015): Ein Strommarkt für die Energiewende. Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Böttger, Diana; Bruckner, Thomas (2017): Auswirkungen von Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeversorgung in Deutschland. 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, 2017.

BWP (Hg.) (2015): BWP-Branchenstudie 2015. Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. Daten zum Wärmepumpenmarkt bis 2015 und Prognosen bis 2030. Unter Mitarbeit von Michael Koch, Alexander Sperr, Holger Thamm, Volker Weinmann, Egbert Tippelt, Sabine Höfener und Jörg Rummeni. Bundesverband Wärmepumpe e.V. Berlin.

BWP (2017): 17 Prozent Marktwachstum machen 2016 zum Wärmepumpen-Rekordjahr. Bundesverband Wärmepumpe e.V. 23.01.2017. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/17-prozent-marktwachstum-machen-2016-zum-waermepumpen-rekordjahr/>, zuletzt geprüft am 23.01.2018.

Deac, Gerda (2017): Auswirkungen der Kopplung von Strom- und Wärmemarkt auf die künftige Integration der Erneuerbaren Energien und die CO₂-Emissionen in Deutschland. Dissertation. unveröffentlicht.

Deutsch, Matthias; Gerhardt, Norman; Sandau, Fabian; Becker, Sarah; Scholz, Angela; Schumacher, Patrick; Schmidt, Dietrich (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie. Hg. v. Agora Energiewende. Berlin.

Gerhardt, Norman; Hochloff, Patrick; Richts, Christoph; Müller, Thorsten; Hilpert, Johannes; Antoni, Oliver; Schulz, Wolfgang (2014): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten. Studie. Hg. v. Agora Energiewende. Fraunhofer IWES.

Gerhardt, Norman; Sandau, Fabian; Kessler, Alois; Kleimaier, Martin (2016): Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an

erneuerbaren Energien. Heat supply in flexible energy supply systems with high shares of renewable energies. Von Smart Grids zu Smart Markets 2015. Kassel, 2016.

Gerhardt, Norman; Sandau, Fabian; Scholz, Angela; Hahn, Henning; Schumacher, Patrick; Sager, Christina et al. (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. Endbericht. Kassel.

Lambauer, J.; Fahl, U.; Ohl, M.; Blesl, M.; Voß, A. (2008): Industrielle Großwärmepumpen. Potenziale, Hemmnisse und Best-Practice-Beispiele. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER).

Pfluger, Benjamin (2014): Assessment of least-cost pathways for decarbonising Europe's power supply. A model-based long-term scenario analysis accounting for the characteristics of renewable energies. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Diss., 2013. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Pfluger, Benjamin; Tersteegen, Bernd; Franke, Bernd; Bernath, Christiane; Tobias; Bossmann et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 0: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Consentec GmbH (Consentec); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU), zuletzt geprüft am 06.01.2017.

Sensfuß, Frank; Deac, Gerda; Bernath, Christiane (2017): Vorabanalyse Langfristige Rolle und Modernisierung der Kraft-Wärme-Kopplung. Kurzpapier. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Umweltbundesamt (23.01.2018): Klimagasemissionen stiegen im Jahr 2016 erneut an. Dessau-Roßlau. Stallmann, Martin; Ittershagen, Martin; Poetschke, Felix; Schoen, Laura. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/pm-2018-04_thg_2016.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2018.

UNFCCC (2015): Paris Agreement English. Online verfügbar unter http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.

Wietschel, Martin; Haendel, Michael; Schubert, Gerda; Köppel, Wolfgang; Degünther, Charlotte (2015): Kurz- und mittelfristige Sektorkopplungspotentiale. Kurzstudie. Hg. v. Umweltbundesamt. Karlsruhe.

Wolf, Stefan; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.; Jakobs, R. (2014): Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland. Hg. v. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart.