

## **Flexibilisierung der Kraft-Wärme- Kopplung**

---



# **Flexibilisierung der Kraft-Wärme- Kopplung**

---

**Auftraggeber:**

**50Hertz  
Amprion  
TenneT  
TransnetBW**

**FfE-Auftragsnummer:**

**Amprion-03**

**Bearbeiter/in:**

**Jochen Conrad, Simon Greif,  
Britta Kleinertz, Christoph  
Pellinger**

**Fertigstellung:**

**November 2017**

**Impressum:**

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE)

*zum Projekt:*

Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung

*Auftraggeber:*

50Hertz

Amprion

TenneT

TransnetBW

**Kontakt:**

Am Blütenanger 71

80995 München

Tel.: +49 (0) 89 158121-0

Fax: +49 (0) 89 158121-10

E-Mail: [info@ffe.de](mailto:info@ffe.de)

Internet: [www.ffe.de](http://www.ffe.de)

**Wissenschaftlicher Leiter:**

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

**Geschäftsführer:**

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

**Projekt-Manager:**

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. R. Corradini

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Executive Summary</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Herausforderungen der Wärmeversorgung</b> .....	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Historische Entwicklung des Fernwärmebedarfs</b> .....	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Entwicklungspfade</b> .....	<b>8</b>
5.1	Definition der betrachteten Szenarien.....	8
5.2	Zukünftige Entwicklung des Fernwärmebedarfs .....	9
5.2.1	Öffentliche Fernwärmeversorgung .....	9
5.2.2	Fernwärmeversorgung in der Industrie .....	15
5.3	Entwicklung von Wärmeerzeugungs- und Speicherelementen bis 2050.....	16
5.3.1	Abwärmenutzung .....	17
5.3.2	Müllheiz(kraft)werke .....	18
5.3.3	Tiefengeothermie .....	18
5.3.4	Solarthermie.....	21
5.3.5	Wärmepumpe.....	23
5.3.6	Wärmespeicher .....	25
5.3.7	Entwicklung der Elemente in den Szenarien .....	27
<b>6</b>	<b>Entwicklung industrieller KWK</b> .....	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>33</b>



# Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung

## 1 Executive Summary

Zur Erreichung der Klimaziele /BMU-01 16/ sind im Bereich der Wärmeversorgung eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz (z. B. durch Sanierung) und ein weitreichender Wandel der Bereitstellungstechnologien hin zur Nutzung erneuerbarer Energien notwendig. Hieraus ergibt sich die Herausforderung das bestehende System fast vollständig zu transformieren. Speziell für existierende großtechnische Wärmeerzeuger wird dies mit rückläufigen Volllaststunden und verringerter Wirtschaftlichkeit verbunden sein.

Die drei untersuchten Szenarien beinhalten ein Business as Usual-Szenario, ein negatives und ein positives Klimaschutzszenario. Für die Stützjahre 2030, 2035 und 2050 wurden Fernwärmeabsätze und Erzeugungsstruktur bestimmt. Der Fernwärmeabsatz wurde auf Basis des historischen Fernwärmebedarfs, des zukünftigen Potenzials für netzgebundene Wärmeversorgung und einer dem Szenario entsprechenden Ausbaustrategie ermittelt. Im Business as Usual-Szenario sinkt der Fernwärmeabsatz leicht und die Erzeugerstruktur wandelt sich entsprechend der heutigen Geschwindigkeit der Transformation langsam hin zu einer Wärmeerzeugung basierend auf erneuerbaren Energien. Im negativen Klimaschutzszenario geht der Fernwärmeabsatz entsprechend einer angenommenen Sanierungsaktivität zurück und die Wärme wird weiterhin primär über fossile Brennstoffe bereitgestellt. Das andere Extrem stellt das positive Klimaschutzszenario dar. In diesem steigt der Fernwärmeabsatz bis 2050 weiter an, um einen Wandel hin zu mehr erneuerbaren Energien in der Wärmeerzeugung zu ermöglichen. Die Erreichung der in Paris gesteckten Klimaziele ist ausschließlich im positiven Klimaschutz-Szenario zu erwarten. Abschließend wird die zukünftige Rolle der KWK in der Industrie diskutiert und es werden mögliche Entwicklungspfade aufgezeigt.

## 2 Einleitung

Die Entwicklung der KWK-Anlagen ist weitgehend abhängig von der Weiterentwicklung der Fernwärmenetze und der Zusammensetzung der angeschlossenen Wärmeerzeuger. Diese Studie liefert Analysen zukünftiger Entwicklungspfade des Fernwärmesektors in Deutschland und Möglichkeiten zu dessen Flexibilisierung. Der Begriff Fernwärmesektor beinhaltet im Folgenden sowohl Fern- als auch Nahwärme. Die Studie soll als Vorstudie in den Entwurf des Szenariorahmens zum NEP 2030 (Version 2019) einfließen und umfasst die vier Kapitel Herausforderungen der Fernwärmeversorgung, historische Entwicklung des Fernwärmeabsatzes, Entwicklungspfade von Wärmeerzeugern und Speichern sowie Entwicklung industrieller KWK.

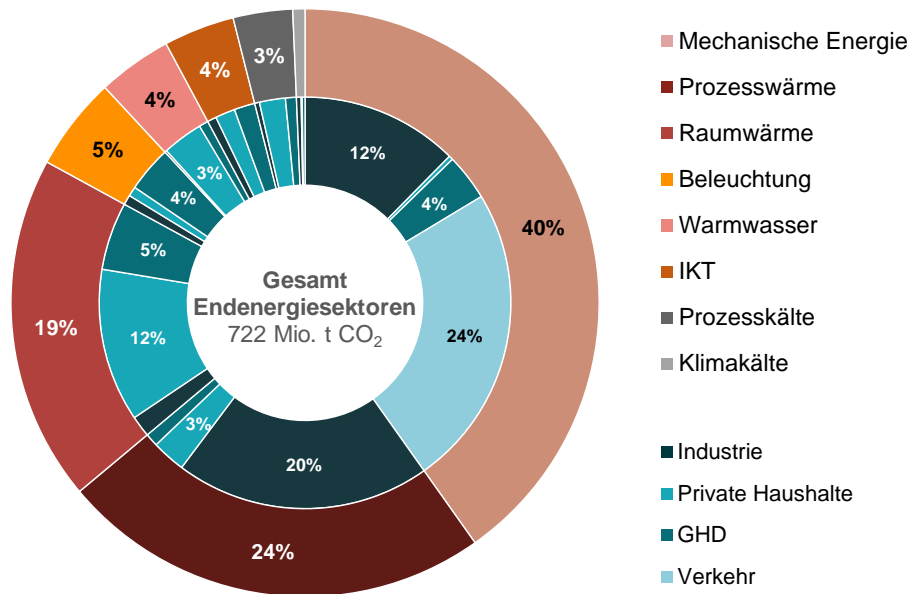
## 3 Herausforderungen der Wärmeversorgung

In diesem Kapitel werden die Herausforderungen der Wärmeversorgung im Allgemeinen und im Fernwärmesektor im Speziellen dargestellt.

Um dem Klimawandel mit den damit verbundenen Umweltauswirkungen entgegen zu wirken, einigten sich 195 Staaten im Jahr 2015 auf das Übereinkommen von Paris /GER-01 16/. Dieses enthält das ambitionierte Ziel, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Im Gegensatz zu anderen Anwendungen (z. B. in der Industrie oder der Landwirtschaft) ist es aus technischer Sicht möglich, die Wärmeversorgung vollständig emissionsfrei zu gestalten. Aus diesem Grund muss die Wärmeversorgung überproportional zur Zielerreichung beitragen. Dies spiegelt sich u. a. in den sektorspezifischen Zielen für das Jahr 2030 wieder, die für den Gebäudebereich überproportional hohe Reduktionsziele festlegen /BMU-01 16/. Somit wäre in der Wärmeversorgung eine (fast) vollständige Verminderung aller Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 zu erwarten. Soll dieses Ziel erreicht werden erfordert dies die zeitnahe Priorisierung und Umsetzung effektiver Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen, welches eine große Herausforderung der Wärmeversorgung darstellt. Die Verminderung von Treibhausgasemissionen in der Wärmeversorgung kann potenziell durch die Reduktion des Energiebedarfs (z. B. Dämmung der Gebäudehülle), die Steigerung der Energieeffizienz (z.B. mittels Wärmerückgewinnung, Reduktion der Verteilverluste), die Nutzung erneuerbarer Energien (z. B. Solarthermie) oder die CO<sub>2</sub>-Abscheidung erreicht werden.

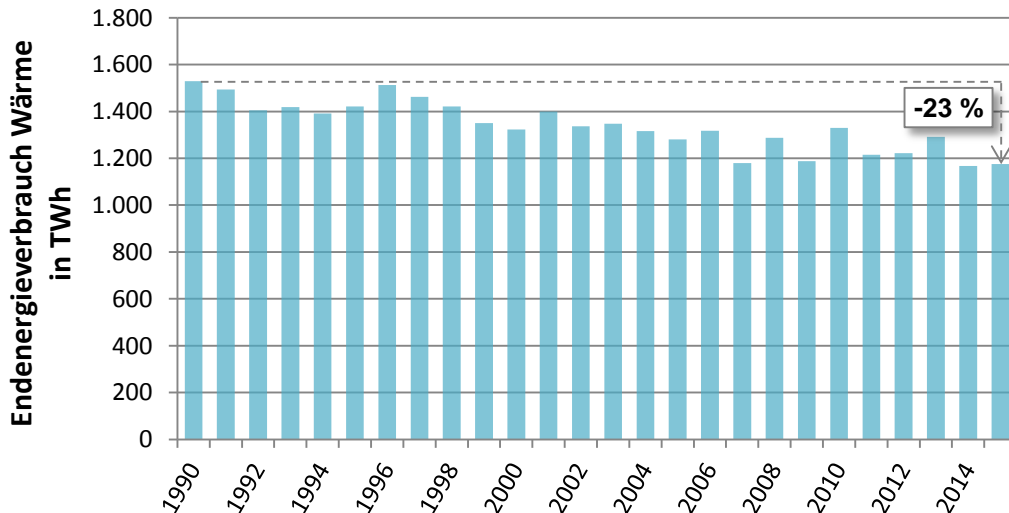
Den mit Abstand größten Teil aller Treibhausgasemissionen stellen in Deutschland die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen dar. In /FFE-13 17/ (vgl. Abbildung 3-1) sind diese nach Anwendungsbereichen (äußerer Ring) und Anwendungssektoren (innerer Ring) für das Jahr 2014 bilanziert. Neben mechanischen Energieanwendungen, welche für rund 40 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich sind, kommt den Wärmeanwendungen mit 47 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Sicht des Klimaschutzes eine außerordentliche Bedeutung zu. Die Bereitstellungen von Prozess- (24 %) und Raumwärme (19 %) überwiegen, während die Bereitstellung von Trinkwarmwasser (4 %) eine untergeordnete Rolle spielt. Während Prozesswärme vor allem in der Industrie benötigt wird, fällt Raumwärmebedarf v. a. in privaten Haushalten an.





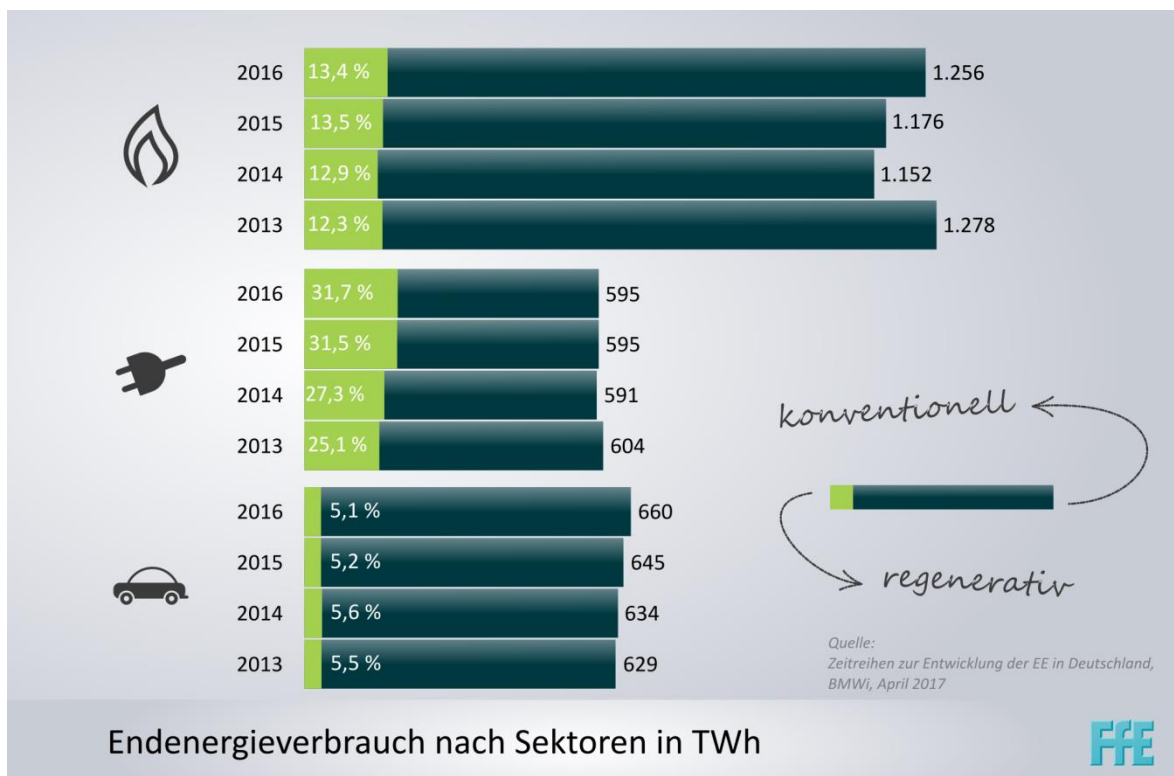
**Abbildung 3-1** Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Anwendungen und Endenergiesektor in Deutschland für das Jahr 2014 (temperaturbereinigt)

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ergeben sich aus dem Endenergieverbrauch und den energieträgerspezifischen Emissionsfaktoren. In Abbildung 3-2 ist die historische Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Wärmeversorgung für die Jahre 1990 bis 2015 dargestellt. Der Verlauf der Daten zeigt eine Abnahme des Wärmeverbrauchs von 1.530 TWh im Jahr 1990 auf 1.180 TWh im Jahr 2015, was einer Reduktion um 23 % gleichkommt. Dies ist u. a. auf die Verordnungen und Gesetze (bspw. EnEV und EEWärmeG) zurückzuführen, die im gleichen Zeitraum die Anforderungen an die energetische Sanierung und den Neubau erhöht haben. Weiter lässt sich erkennen, dass der Endenergiebedarf der Wärmebereitstellung von Jahr zu Jahr variiert, was u. a. auf witterungsbedingte Schwankungen zurückzuführen ist. Aufgrund der dargestellten Entwicklung ist in Zukunft eine weitere Abnahme des Endenergieverbrauchs im Wärmesektor zu erwarten.



**Abbildung 3-2** Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Wärmebereitstellung, eigene Darstellung nach /BMWI-14 17/

Neben der Reduktion des Endenergieverbrauchs können Treibhausgasemissionen auch durch die Erhöhung des erneuerbaren Anteils an der Wärmeerzeugung reduziert werden. Abbildung 3-3 zeigt den Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung sowie den Anteil erneuerbarer Energien. In den Jahren 2013 bis 2016 wurden ca. 13 % des Endenergieverbrauchs durch erneuerbare Energien bereitgestellt, wobei der Anteil leicht gestiegen ist.



**Abbildung 3-3** Endenergieverbrauch in Deutschland und Anteil erneuerbarer Energien, eigene Darstellung nach /BMWI-04 17/

Eine zielgerichtete Erreichung der Klimaschutzziele kann nur unter Berücksichtigung der Struktur der Wärmeversorgung erfolgen. Diese weist aufgrund des Gebäudebestands, der technologischen Vielfalt an Heizsystemen, der Vielzahl an beteiligten Akteuren und den verschiedenen staatlichen Fördermechanismen eine hohe Heterogenität auf. Dies stellt eine Herausforderung zur Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen dar. Zudem zeigt sich, dass aufgrund der hohen Kombinatorik von Einflussfaktoren auch in Zukunft eine heterogene Struktur der Wärmeversorgung wahrscheinlich ist.

Ein Teil der Wärme wird auch zukünftig leitungsgebunden durch Wärmenetze bereitgestellt. Dies ist vor allem in Gebieten mit hoher Wärmebedarfsdichte wie bspw. Städten oder Industriestandorten zu erwarten. Durch die energetische Sanierung nimmt der Raumwärmebedarf in Fernwärmegebieten ab, durch Nachverdichtung und Neubau erhöht sich der Raumwärmebedarf. Wie sich dies auf die Wärmebedarfsdichte auswirkt wird in Kapitel 4 erörtert.

Die angestrebte Verminderung von Treibhausgasemissionen in der Wärmeversorgung betrifft ebenfalls die Erzeugungstechnologien der Fernwärme und resultiert auch für Betreiber von KWK-Anlagen in neuen Herausforderungen. Rückläufige Strompreise führen aktuell zu geringeren Volllaststunden von KWK-Anlagen. Dies wiederum verursacht sinkende Deckungsbeiträge (Wirtschaftlichkeit) der KWK-Anlage und durch steigende Anteile von Heizwerken zu steigenden Emissionen der Fernwärmeversorgung. Die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen hängt darüber hinaus vom Wärmepreis konkurrierender Bereitstellungstechnologien wie bspw. dezentralen Gas- oder Ölkesseln ab. Zur Erreichung der Klimaziele wird mittel- bis langfristig der Einsatz fossiler Energieträger wie Braun- und Steinkohle an Bedeutung verlieren. Dies bringt für die betroffenen Fernwärmeversorger gravierende Veränderung des Anlagenparks mit sich.

## 4 Historische Entwicklung des Fernwärmebedarfs

Die Basis für die Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Fernwärmebedarfs stellt die Erfassung des aktuellen Bestands an Fernwärmenetzen und der zugehörigen Struktur der Wärmeerzeuger dar. Dementsprechend wird der Fernwärmeabsatz für die unten beschriebene Auswahl an Fernwärmenetzen für die Jahre 2012 bis 2016 analysiert.

Die Aufteilung des Fernwärmeabsatzes nach Sektoren ist in Tabelle 4-1 dargestellt.

**Tabelle 4-1:** *Fernwärmeabsatz je Sektor im Jahr 2012 nach /AGEB-03 17/*

Anwendungssektor	Fernwärmeabsatz in TWh
Industrie	59
GHD	13
PHH	48
Summe	120

In der Modellierung der Übertragungsnetzbetreiber werden aktuell die 29 Fernwärmenetze mit dem höchsten Fernwärmeabsatz detailliert abgebildet. Diese werden um die sechs nächstgrößten Fernwärmenetze ergänzt. Aus den ursprünglichen und den ergänzten Fernwärmenetzen ergeben sich die in Tabelle 4-2 dargestellten Fernwärmenetze. Diese werden im Weiteren detailliert untersucht.

**Tabelle 4-2:** *Detailliert betrachtete Fernwärmenetze*

Fernwärmenetze				
Aachen	Cottbus	Hamburg	Leipzig	Rostock
Berlin	Dresden	Hannover	Mannheim *	Saar *
Bielefeld	Düsseldorf	Ingolstadt	Münster	Ulm *
Bonn	Erfurt	Karlsruhe	München	Weißwasser
Braunschweig	Erlangen	Kassel	Neckar *	Wolfsburg
Bremen	Flensburg*	Kiel	Nürnberg	Wuppertal
Chemnitz	Frankfurt	Köln	Rhein-Ruhr *	Sonstige

Die in Tabelle 4-2 mit Sternchen (\*) gekennzeichneten Fernwärmenetze, stehen für Versorgungsgebiete, welche sich über mehrere Gemeinden erstrecken. Eine Auflistung der Gemeinden, welche diesen Versorgungsgebieten zugrunde liegen erfolgt in Tabelle 4-3. Als Beispiel lässt sich das Versorgungsgebiet Rhein-Ruhr nennen, welches eine Vielzahl von Gemeinden im Ruhrgebiet umfasst. Aktuell sind noch nicht alle dieser Gemeinden über ein gemeinsames Fernwärmenetz verbunden, /FMN-01 16/ zeigt jedoch, dass dies bis 2030 voraussichtlich der Fall sein wird.

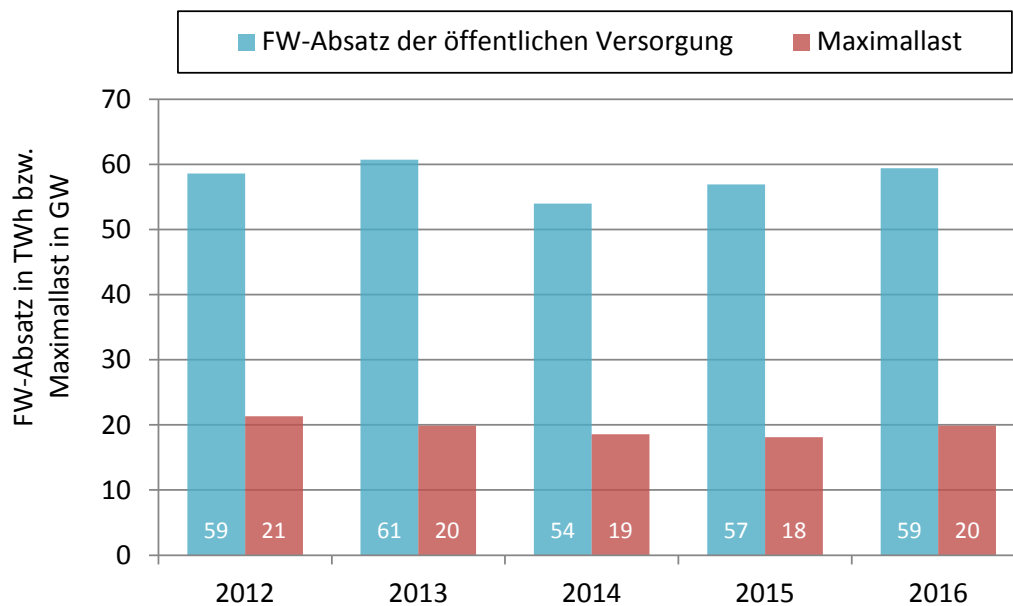
**Tabelle 4-3:** *Fernwärmeschienen und deren angenommenes Versorgungsgebiet*

Flensburg	Mannheim	Neckar	Rhein-Ruhr	Saar	Ulm
Flensburg	Brühl	Esslingen	Bergkamen	Dillingen/ Saar	Ulm
Glücksburg	Heidelberg	Stuttgart	Bochum	Ensdorf	Neu-Ulm
Harrislee	Ketsch		Bottrop	Püttlingen	
Langballig	Mannheim		Castrop-Rauxel	Quierschied	
Süderbrarup	Schwetzingen		Datteln	Saarbrücken	
Tarp	Speyer		Dinslaken	Saarlouis	
Wees			Dortmund	Völklingen	
Weesby			Duisburg	Wallerfangen	
			Essen	Wadgassen	
			Gelsenkirchen		
			Gladbeck		
			Herne		
			Herten		
			Hünxe		
			Lünen		
			Marl		
	Moers				
	Neukirchen-Vluyn				
	Oberhausen				
	Recklinghausen				
	Voerde				

Die detailliert betrachteten Fernwärmenetze machten im Jahr 2012 von den insgesamt 61 TWh Fernwärmeabsatz in PHH und GHD /AGEB-03 17/ rund 86 % aus. In den nicht detailliert dargestellten Netzen lag der Fernwärmeabsatz bei rund 9 TWh.

Der Fernwärmeabsatz schwankt über die Jahre aufgrund verschiedener Einflussparameter, wie beispielsweise dem Wetterjahr und damit der Gradtagzahl<sup>1</sup> (vgl. /FFE-42 17/). Aus diesem Grund wird der Fernwärmeabsatz der öffentlichen Versorgung für den Zeitraum von 2012 bis 2016 angegeben (vgl. Abbildung 4-1). In diesem Zeitraum lag er bei 54 bis 61 TWh. Es ist zu erkennen, dass 2014 als Jahr mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen den geringsten Absatz aufweist.

<sup>1</sup> Die Gradtagzahl ist eine Berechnungsgröße, die den Heizbedarf eines Jahres widerspiegelt.



**Abbildung 4-1:** *Entwicklung des Fernwärmeabsatzes bzw. der Maximallast in der öffentlichen Versorgung (inkl. geringe Anteile Prozesswärme)*

## 5 Entwicklungspfade

Die Beschreibung von drei Entwicklungspfaden bis zum Jahr 2050 umfasst die Abbildung des Fernwärmebedarfs sowie der jeweiligen Elemente. Im Folgenden werden zunächst die drei verschiedenen Szenarien beschrieben um darauf aufbauend die Entwicklungen des Fernwärmebedarfes (Kapitel 5.2) und der relevanten Elemente (Kapitel 5.3) abzuleiten.

### 5.1 Definition der betrachteten Szenarien

Zur Festlegung der zukünftigen Zusammensetzung der Elemente in der Fernwärmebereitstellung ist zwischen verschiedenen Szenarien mit divergierenden Prämissen zu unterscheiden. Diese Prämissen unterschieden sich vor allem bezüglich der politischen Ambitionen die festgelegten Energie- und Klimaziele zu erreichen. Diese sehen bis 2050 eine Reduktion der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen (THG) um 80 % bis 95 % vor. Soll das THG-Reduktionsziel von 95 % erreicht werden, dürfen sowohl in der Energiewirtschaft als auch in den Verbrauchssektoren in 2050 nahezu keine THG-Emissionen mehr auftreten (siehe /BMUB-06 15, /BMWI-13 10/, /UBA-07 13/). Daher muss im Rahmen der Energiewende auch eine Wärmewende vollzogen werden. Unter diesen Rahmenbedingungen werden die drei Szenarien Business as Usual, negatives Klimaschutz- und positives Klimaschutzszenario als mögliche Entwicklungen gesehen.

#### Business as Usual (BAU)

In diesem Szenario wird die aktuelle Energiepolitik fortgeschrieben. In den vergangenen Jahren wurde kein relevanter Ausbau der Fernwärmenetze betrieben. Der durch Sanierung zurückgegangene Wärmebedarf wurde über eine Nachverdichtung in bereits

vorhandenen Fernwärmegebieten kompensiert. Diese Entwicklung wird im Business as Usual-Szenario fortgeführt. Da sich der Fokus zur Umsetzung der Energiewende aktuell von der Strombereitstellung löst und auch ein Wandel der Wärmebereitstellung einsetzt, wird angenommen, dass der Einsatz von erneuerbaren Energien in der Fernwärmebereitstellung an Bedeutung gewinnt. Für die zukünftige Entwicklung der Elemente werden somit historische Markt- und Technologieentwicklungen (bspw. sinkende Preise an Regelleistungsmärkten bzw. Zubau industrieller KWK-Anlagen entsprechend aktuellem Trend) als Grundlage verwendet.

### **Negatives Klimaschutz-Szenario (MIN)**

In diesem Szenario überwiegt die Trägheit des Energieversorgungssystems bezogen auf die Entwicklung des Fernwärmesystems. Es findet keine forcierte Nachverdichtung in Fernwärmegebieten statt und auch der Wandel hin zu erneuerbaren Wärmequellen bleibt aus. Die aktuellen wirtschaftlichen Bedingungen ändern sich nicht, sodass Wärmeerzeuger aus konventionellen Brennstoffen weiterhin wirtschaftlicher sind und daher den Großteil des Wärmebedarfes bereitstellen.

### **Positives Klimaschutz-Szenario (MAX)**

In diesem Szenario wird angenommen, dass die Integration von erneuerbaren Energien in die Wärmeversorgung forciert wird. Wärmenetze ermöglichen ab einer kritischen Wärmebedarfsdichte (siehe Kapitel 5.2) die Nutzung von wirtschaftlichen und technischen Skaleneffekten in der Wärmeversorgung sowie eine bessere Integration fluktuierender Wärmeerzeuger als die Einzelversorgung /UNEP-01 15/, /UBA-02 07/. Unter anderem sind thermische Verluste großtechnischer Wärmespeicher, aufgrund eines besseren Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses, spezifisch kleiner als bei Wärmespeichern in Wohngebäuden. Daher wird in diesem Szenario eine Erweiterung und Verdichtung von zentralen und dezentralen Wärmenetzen angenommen.

Zur Erreichung der Klimaziele muss die Wärmebereitstellung in 2050 nahezu ausschließlich auf erneuerbaren Energiequellen wie Solarthermie, Geothermie und Biomasse sowie Abwärme und Müll beruhen. Des Weiteren können Technologien wie Hochtemperatur-Wärmepumpen eine wichtige Rolle spielen.

## **5.2 Zukünftige Entwicklung des Fernwärmebedarfs**

Der Fernwärmebedarf wird in die zwei Kategorien Industrie und öffentliche Versorgung (private Haushalte und Gewerbe-Handel-Dienstleistung) differenziert, da sich die Charakteristik der Lastgänge deutlich unterscheidet.

### **5.2.1 Öffentliche Fernwärmeversorgung**

Die öffentliche Fernwärmeversorgung versorgt überwiegend private Haushalte (PHH) sowie Betriebe des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD). Somit deckt sie Teile des Bedarfs an Raumwärme, Trinkwarmwasser und Prozesswärme in diesen Sektoren. Knapp 90 % der öffentlichen Fernwärme wurden in den letzten fünf Jahren für die Bereitstellung von Raumwärme eingesetzt, dies erfolgte Großteils in PHH /BMWI-14 17/. Es ist zu erwarten, dass der Raumwärmebedarf durch die energetische Sanierung von Gebäuden, auch in mit Fernwärme versorgten Gebieten, zukünftig reduziert wird. Der demographische Wandel hingegen kann durch Zuzug in vielen

Städten zu einer lokal geringeren Reduktion des Wärmebedarfs führen. Diese beiden für die Fernwärmeversorgung essenziellen Einflussfaktoren werden bei der Erstellung der Szenarien berücksichtigt.

Der Fernwärmebedarf wird in den drei Szenarien auf Basis des Fernwärmepotenzials in den entsprechenden Städten ermittelt. Die Strategie zur Erschließung dieses Potenzials und somit die resultierende Höhe unterscheiden sich in den drei Szenarien. Als Resultat erhält man den Fernwärmebedarf je Szenario und Stützjahr (2015, 2030 und 2050).

### Potenzialermittlung

Die Berechnung des Fernwärmepotenzials erfolgt durch eine deutschlandweite Auswertung der Wärmebedarfsdichte. Diese bestimmt sich aus dem Wärmebedarf und dessen räumlichen Bezug. Hierfür werden statistische Daten bezogen auf die vorhandene Gebäudestruktur, Wärmebedarfe und räumliche Daten miteinander kombiniert. Aus dem ffe Regionalisierten Energiesystemmodell (FREM) /FFE-39 14/ wird der Wärmeverbrauch für PHH und GHD pro Gemeinde entnommen. Dieser wurde abgeleitet aus den Energiedaten des Bundesamtes für Wirtschaft und Industrie /BMWI-14 17/ aus dem Jahr 2012. Um die Wärmeverbräuche kleinräumig zu verteilen werden Geodaten herangezogen. Die Wohnfläche der Wohngebäude steht in einem 100 m Zensusraster zur Verfügung, dass aus dem Zensusatlas der statistischen Ämter des Bundes und der Länder des Jahres 2015 abgeleitet ist. Die GHD-Flächen werden dem Digitalen Landschaftsmodell DLM 250 /BGK-01 17/, Open Street Map-Daten /OSM-03 15/ und dem Urban Atlas /EEA-01 15/ entnommen. Des Weiteren wird die Versiegelung des Copernicus Programms von 2015 mit einer Auflösung von 100 m verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der statistischen Daten zum Energiebedarf erfolgte in /FFE-04 16/. Die verwendeten Datensätze können in **Tabelle 5-1** nachvollzogen werden.

Tabelle 5-1: *Zur Fernwärmepotenzialermittlung genutzte Datensätze*

Daten	Datentyp/Auflösung	Quelle
Wärmeverbrauch	Numerische Statistik	/BMWI-14 17/
Zensusdaten	Raster / 100 m	/DESTATIS-08 15/
Versiegelung	Raster / 100 m	/EEA-04 16/
DLM 250	Vektor / Polygon	/BGK-01 17/

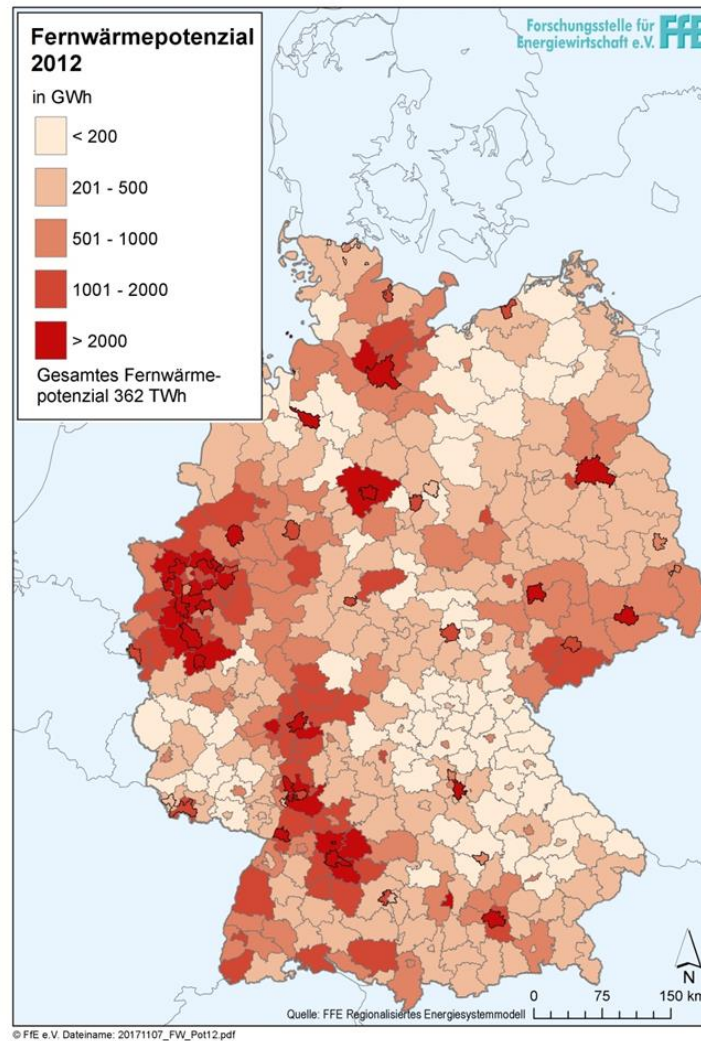
Die Verschneidung dieser Daten ermöglicht eine Auswertung des Wärmebedarfs in Form von Rasterdaten, wobei Deutschland in einer Auflösung von 100 m x 100 m abgebildet ist. Jedes dieser Pixel wird durch seinen derzeitigen Wärmebedarf charakterisiert. Zur Abbildung des zukünftigen Wärmebedarfs werden diese Rasterdaten linear mit der erwarteten Bevölkerungsentwicklung und der Reduktion des Raumwärmebedarfs skaliert. Die Entwicklung der Bevölkerungszahl wirkt sich sowohl auf den Raumwärme- als auch den Trinkwarmwasserbedarf aus. Hiervon nicht beeinflusst wird die Prozesswärme in GHD. Die Bevölkerungsentwicklung wird für alle drei Szenarien gleich angesetzt. Dafür werden die Annahmen zur Bevölkerungszahl 2030 /ÜNB- 01 16/ bzw. für 2050 /DESTATIS-07 15/ mit Hilfe der Daten aus /BBR-01 12/



räumlich verteilt. Die Bevölkerungszahl in den FW-Gebieten reduziert sich bis zum Jahr 2030 auf 99 % und bis zum 2050 auf 93 % im Vergleich zu 2012.

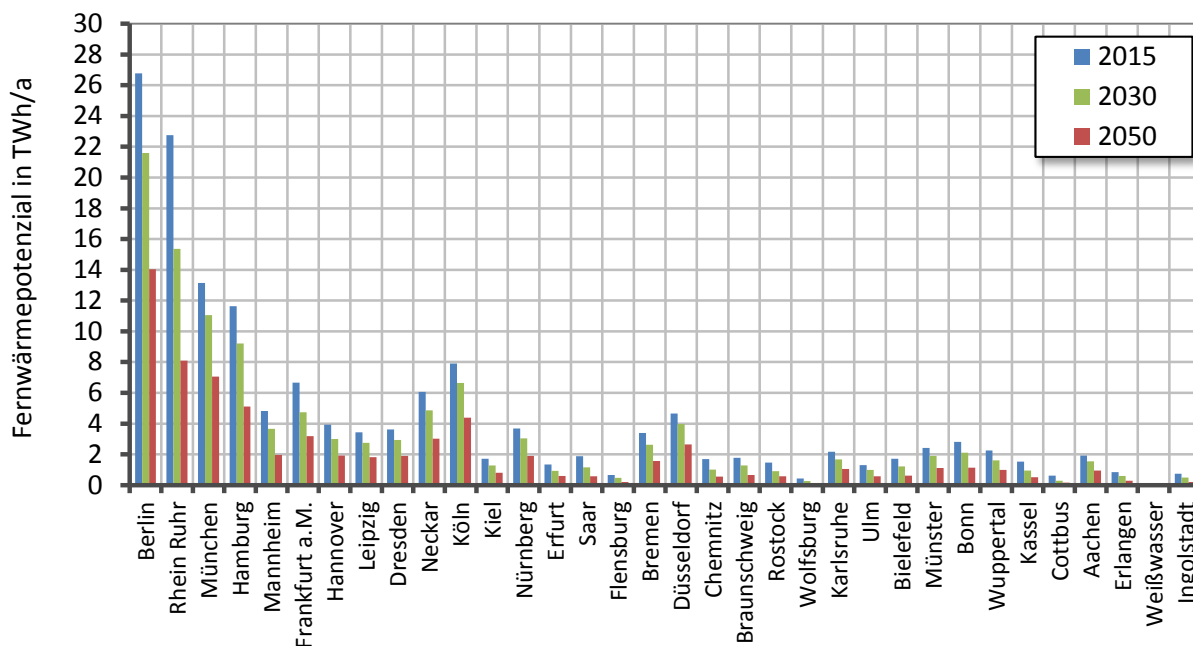
Neben der Entwicklung der Bevölkerung, spielt die Sanierung bzw. der Neubau von Gebäuden eine wichtige Rolle, da sie den Raumwärmebedarf in den Sektoren PHH und GHD reduzieren. Im Szenario MIN und BAU wird nach dem Referenzszenario aus /BMWI-01 14/ bis zum Jahr 2030 eine Reduktion des Endenergiebedarfs für Raumwärme um 21 % und bis zum Jahr 2050 um 43 % festgesetzt. Für das MAX-Szenario wird hingegen eine Reduktion des Endenergiebedarfs für Raumwärme um 28 % und bis zum Jahr 2050 um 51 % gemäß des Zielszenarios aus /BMWI-01 14/ festgelegt.

Unter Berücksichtigung von Bevölkerungsentwicklung und der Reduktion des Raumwärmebedarfs kann auch der zukünftige Wärmebedarf in Form von Rasterdaten abgebildet werden. Die Rasterdaten enthalten die Wärmebedarfsdichte je Pixel (100x100 m). Diese Information wird als Indikator genutzt, um die Eignung zur Realisierung von Wärmenetzen feststellen zu können. Zur Ermittlung von Potenzialgebieten für Fernwärme wird entsprechend /SWEN-01 10/ ein Schwellwert von 400 MWh pro Hektar und Jahr definiert. In Abbildung 5-1 ist das hierdurch ermittelte Potenzial für netzgebundene Wärmeversorgung je Landkreis im Jahr 2012 dargestellt.



**Abbildung 5-1:** *Fernwärmepotenzial in den Sektoren private Haushalte bzw. Gewerbe, Handel und Dienstleistung im Jahr 2012 je Landkreis; Detailliert betrachtete Netze sind schwarz umrandet*

Die schwarz umrandeten Landkreise in Abbildung 5-1 entsprechen denjenigen der ausgewählten und detailliert untersuchten Fernwärmenetze. Für diese ergibt sich beispielhaft in den Szenarien MIN und BAU folgende Entwicklung des Fernwärmepotenzials für die Jahre 2030 und 2050 (siehe Abbildung 5-2).



**Abbildung 5-2:** Entwicklung des Fernwärmepotenzials nach Gebieten für die Szenarien MIN und BAU

Es zeigt sich, dass das Fernwärmepotenzial unter den getroffenen Annahmen zukünftig deutlich abnimmt und stark von der Entwicklung des spezifischen Raumwärmebedarfs und weniger von der Demographie abhängig ist. Für das MAX-Szenario ergibt sich ein sehr ähnliches Bild, wobei die Reduktion des Potenzials geringfügig höher ausfällt.

### Fernwärmebedarf

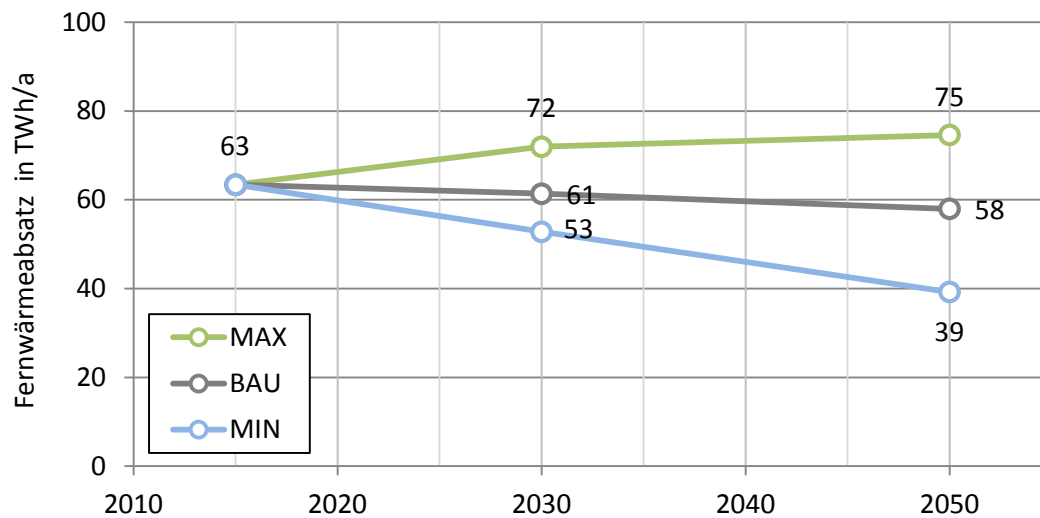
Aufbauend auf den Potenzialen für Fernwärme werden die drei Szenarien zur Entwicklung des Fernwärmebedarfs ermittelt. Hierbei unterscheidet sich je nach Szenario die Strategie zur Erschließung des Fernwärmepotenzials (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Strategien zur Erschließung des Fernwärmepotenzials

Szenario	Beschreibung
Business as Usual Szenario (BAU):	Nachverdichtung kompensiert rückläufigen Fernwärmebedarf
Negatives Klimaschutzszenario (MIN):	Bestandserhaltung (kein Ausbau/ Rückbau) führt zu rückläufigem Fernwärmebedarf
Positives Klimaschutzszenario (MAX):	Forcierter Fernwärmenetzausbau

Im MAX-Szenario wird für die bereits vorhandenen Fernwärmenetze von einer intensiven Erschließung der Potenzialgebiete ausgegangen. Hierbei werden sukzessive jene Gebiete erschlossen, die in dem Zeithorizont von 30 Jahren weiterhin ein Potenzialgebiet darstellen. Im BAU-Szenario wird der durch Sanierung sinkende Fernwärmeabsatz über Nachverdichtung des Fernwärmenetzes kompensiert. Im MIN-Szenario hingegen wird das bestehende Fernwärmenetz nicht verändert, wodurch sich

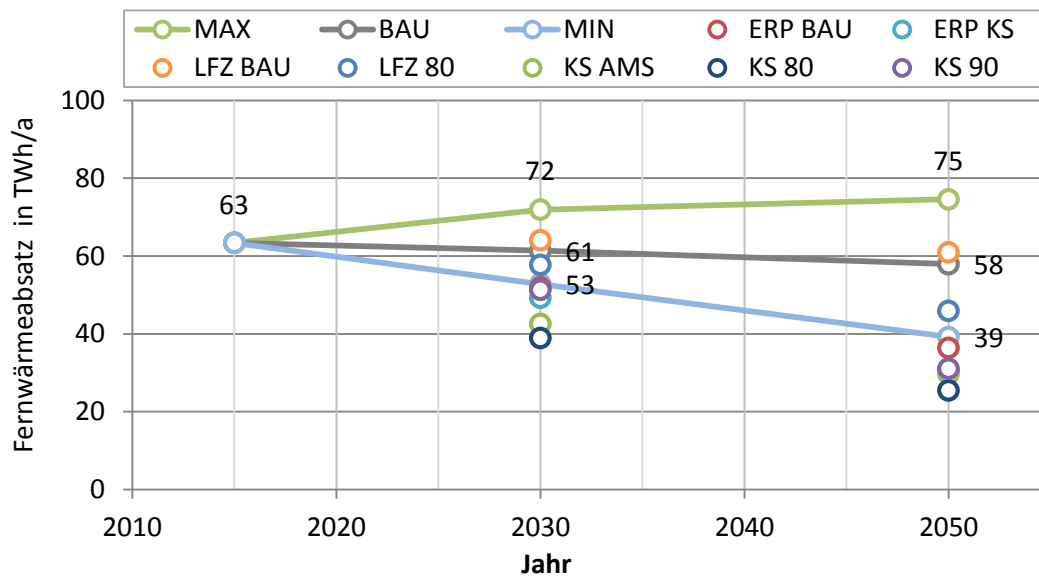
der Absatz reduziert. Der resultierende Fernwärmeabsatz ist in Abbildung 5-3 dargestellt.



**Abbildung 5-3:** *Entwicklung des Fernwärmeabsatzes je Szenario*

Der Rückgang des Fernwärmeabsatzes je Netz entspricht im MIN-Szenario dem Produkt aus Reduktion des Raumwärmebedarfs und Bevölkerungsentwicklung. Der Fernwärmeabsatz liegt im Jahr 2030 bei 53 TWh und im Jahr 2050 bei lediglich 39 TWh. Im BAU-Szenario hingegen wird der Absatz von 63 TWh entsprechend der Strategie über die Jahre möglichst konstant gehalten. Da dies nicht in allen untersuchten Fernwärmenetzen möglich ist kommt es zu einer leichten Reduktion auf 61 bzw. 58 TWh. Im MAX-Szenario wird der Absatz durch Erweiterungen der Fernwärmenetze bis zum Jahr 2030 auf 72 TWh und im Jahr 2050 auf 75 TWh erhöht.

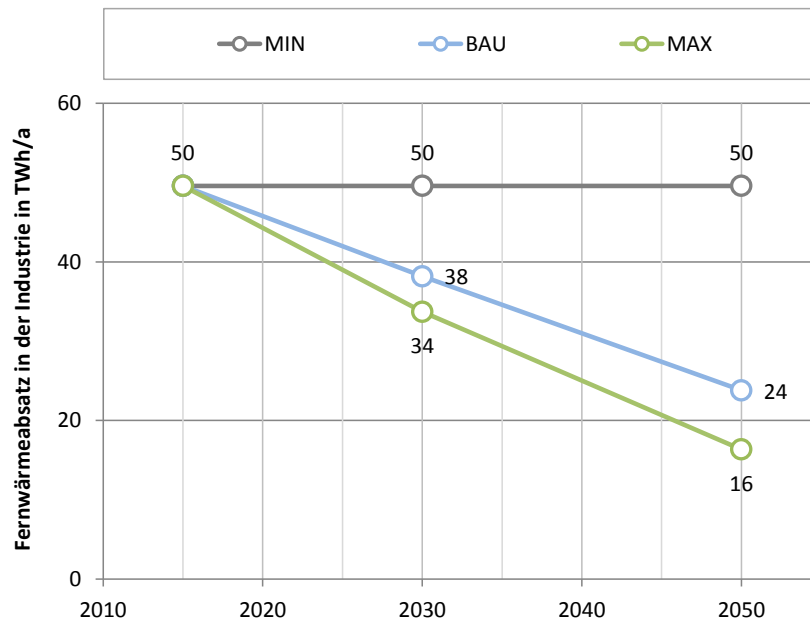
Der Vergleich mit anderen Studien zeigt, dass diese mehrheitlich von einem Rückgang des Fernwärmeabsatzes ausgehen und sich somit im Bereich der Szenarien MIN und BAU befinden (siehe Abbildung 5-4). Bei den Werten „KS“ handelt es sich um Klimaschutzenszenarien mit einer erhöhten Sanierungsrate. Eine erhöhte Sanierungsrate ist ebenfalls Bestandteil des Max-Szenarios. Im Gegensatz zu der in der Abbildung zitierten Quelle und im Einklang mit /UNEP-01 15/, /UBA-02 07/ und /EWI-01 17/ wird im Max-Szenario davon ausgegangen, dass Fernwärmenetze dazu beitragen die Wärmewende kosteneffizient umzusetzen und deshalb ausgebaut werden.



**Abbildung 5-4:** Entwicklung des Fernwärmeabsatzes in den Szenarien im Vergleich zu /BMWI-01 14/, /BMUB-06 15/ und /FIS-01 17/

### 5.2.2 Fernwärmeversorgung in der Industrie

Der Bedarf an Fernwärme in der Industrie betrug im Jahr 2015 rund 50 TWh /BMWI-14 17/. Im Gegensatz zu PHH und GHD ist der Fernwärmeabsatz in der Industrie maßgeblich durch den Bedarf an Prozesswärme geprägt. Dieser wiederum ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. In dieser Studie wird von einer Erhöhung der Energieeffizienz ausgegangen. Beispiele hierfür sind effizientere Elektromotoren, Kleben statt Schweißen von Metallteilen, Brennwertnutzung und Wärmerückgewinnung. Die Struktur der Industrie sowie konjunkturelle Einflüsse werden als konstant angesetzt. Bis zum Jahr 2050 nimmt der Endenergieverbrauch im BAU-Szenario um 52 % bzw. im MAX-Szenario um 67 % ab /BMWI-01 14/. Im MIN-Szenario stagniert der Endenergieverbrauch auf heutigem Niveau. In Abbildung 5-5 ist die Entwicklung des Fernwärmeabsatzes erkennbar.



**Abbildung 5-5:** Fernwärmeversorgung in der Industrie für die Szenarien

Im MIN-Szenario ist keine Veränderung des Fernwärmeabsatzes erkennbar. Der Absatz im BAU-Szenario hingegen reduziert sich um rund die Hälfte während dieser im MAX-Szenario um 68 % bis zum Jahre 2050 sinkt.

### 5.3 Entwicklung von Wärmeerzeugungs- und Speicherelementen bis 2050

Neben der Entwicklung des Fernwärmebedarfs werden Szenarien für die Entwicklungen von Erzeugungs- und Speicherelementen in Fernwärmenetzen entwickelt. Hierbei werden die thermische Leistung und die erwartete Wärmeerzeugung der jeweiligen Elemente je Entwicklungspfad festgelegt. Die zu betrachtenden Elemente lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- Abwärme
- Müllheiz(kraft)werke
- Wärmequellen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien (Biomasse, Tiefengeothermie und Solarthermie)
- Power-to-Heat-Anlagen (Großwärmepumpen und Elektrodenheizkessel)
- Wärmespeicher

Die Beschreibung der Elemente erfolgt in den Unterkapiteln mithilfe eines Technologiesteckbriefes. Danach wird die angenommene Entwicklung der thermischen Leistung und der Wärmeerzeugung des Elements je Szenario erläutert.

#### Übergeordnete Festlegungen

Die Verwendung von erneuerbaren Wärmeerzeugern ist nur gekoppelt mit einer Absenkung der Systemtemperaturen möglich. Daher müssen die Temperaturen der Wärmenetze in Szenarien mit relevantem Anteil erneuerbarer Energien abgesenkt

werden. Je nach Szenario wird von einer unterschiedlich schnellen und starken Absenkung des Temperaturniveaus der Wärmenetze ausgegangen.

Die notwendige Wärmeerzeugung berechnet sich aus dem in Kapitel 5.2 ermittelten Fernwärmebedarf zuzüglich eines Verlustkoeffizienten der Wärmenetze von 12 %, welcher dem Durchschnitt der Jahre 2000 bis 2015 entspricht (nach /AGFW-04 04/ bis /AGFW-01 16/). Im Klimaschutzszenario wird davon auszugehen, dass die sinkenden Verteilverluste durch die Verluste der notwendigen Wärmespeicher kompensiert werden.

In /BMWI-01 14/ wird von einem starken Zuwachs der Nutzung von Biomasse in der gesamten Energieversorgung ausgegangen. Andere Studien erwarten einen konstant bleibenden bis sinkenden Einsatz der Biomasse in Haushalten und eine zunehmende Nutzung in der Energiewirtschaft /ÖKO-04 14/, /ISI-02 17/. Für die vorliegende Studie wird jedoch in allen Szenarien von einer konstant bleibenden Nutzung von Biomasse in der Bereitstellung von Fernwärme ausgegangen. Diese Annahme beruht auf folgenden Aspekten. In Deutschland wird von einem nachhaltigen Biomassepotenzial von ca. 1.000 PJ ausgegangen /ÖKO-04 14/, /AEE-04 14/. Bereits in der Industrie besteht ein nicht-elektrifizierbarer Wärmebedarf (bei Temperaturen  $> 500$  °C) von 1.000 PJ (abgeleitet aus /BLESL-01 13/). Gesamtsystemisch sind die Verbrennung der Biomasse in Hochtemperaturprozessen der Industrie sowie die Verwendung zur Herstellung von Green Fuels wie bspw. Kerosin zu priorisieren. Damit steht in keinem hier aufgestellten Szenario zusätzliche Biomasse für die Verwendung in der Energiewirtschaft zur Verfügung.

### **5.3.1 Abwärmenutzung**

Das Element Abwärmenutzung wird aufgrund der Heterogenität der Abwärmequellen nicht als Technologiesteckbrief beschrieben, es werden lediglich die Potenziale zur Flexibilisierung und die entwickelten Szenarien erläutert.

#### **Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse**

Technisch eignen sich Prozesse in der Industrie für Demand Side Management im Stromnetz sowie in Fernwärmenetzen. Hier bestehen allerdings weitreichende Restriktionen. Generell werden Industrieprozesse möglichst kontinuierlich betrieben, sodass die Anlagen optimal ausgelastet sind. Während Demand Side Management stromintensiver Prozesse zu erheblichen Kosteneinsparungen bzw. Einnahmen führen kann, ist die Flexibilisierung der Abwärme aufgrund der niedrigen Vergütung für die Einspeisung nicht wirtschaftlich darstellbar.

Zur Modellierung dieses Elements eignet sich aus o. g. Grund eine kontinuierliche Wärmequelle.

#### **Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr**

Zur genauen Bestimmung der Entwicklung der Abwärme in Fernwärmenetzen sind weitreichende Annahmen zur Effizienzsteigerung von thermischen Prozessen und der Entwicklung der notwendigen Temperaturniveaus in der Industrie notwendig. Diese Daten liegen allerdings nicht regionalisiert vor, sodass keine detaillierten Aussagen zur Verfügbarkeit für die Nutzung in Fernwärmenetzen der öffentlichen Versorgung getroffen werden können. Aktuell macht Abwärme zwar einen geringen Anteil an der

gesamten Wärmeenergie aus. Demgegenüber wird aktuell von einem Abwärmepotenzial von 88 TWh in Deutschland auf Temperaturen über 140 °C ausgegangen /AGFW-02 13/.

Im MIN- und BAU-Szenario wird die Wärmebereitstellung aus Abwärme konstant angenommen. Für das MAX-Szenario wird festgelegt, dass der Endenergiebedarf in der Industrie bis 2050 um 34 % sinkt /BMWI-01 14/, womit eine Reduktion des Abwärmepotenzials um 34 % einhergeht. Es wird angenommen, dass die Regularien der Abwärmeeinspeisung in Wärmenetze so gestaltet werden, dass ca. 10 % von den verbleibenden 70 TWh bis 2050 in die Wärmenetze integriert werden können. Hierfür wird von einem kontinuierlichen Zuwachs von 2020 an ausgegangen, sodass sich für 2030 eine in die Fernwärmenetze eingespeiste Abwärmemenge von 2,3 TWh ergibt. Diese Abwärmemenge wird entsprechend des Anteils der bereits im Wärmenetz vorhandenen Abwärmemenge an der deutschlandweiten Einspeisung von Abwärme auf die Fernwärmenetze verteilt.

### **5.3.2 Müllheiz(kraft)werke**

Das Element Müllheiz(kraft)werk wird ebenfalls bezogen auf das Potenzial zur Flexibilisierung sowie die angenommene Entwicklung der Wärmebereitstellung abhängig vom Szenario dargestellt.

#### **Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse**

Theoretisch eignen sich diese Müllheiz(kraft)werke für Demand Side Management in Fernwärmenetzen. Hier bestehen allerdings ebenfalls weitreichende Restriktionen. Speziell für die Abgaswerte und somit die Kontinuität des Verbrennungsprozesses von Müllheiz(kraft)werken gelten strenge Regeln. Zudem sollte die Verbrennung des Abfalls aus hygienischen Gründen kontinuierlich erfolgen /IWES-05 15/. Die Flexibilisierung der Müllheiz(kraft)werke wird daher auch für die zukünftige Wärmeversorgung ausgeschlossen.

Um die Fernwärmeerzeugung aus Müllheiz(kraft)werken zu modellieren, eignet sich aus o. g. Grund eine kontinuierliche Fahrweise.

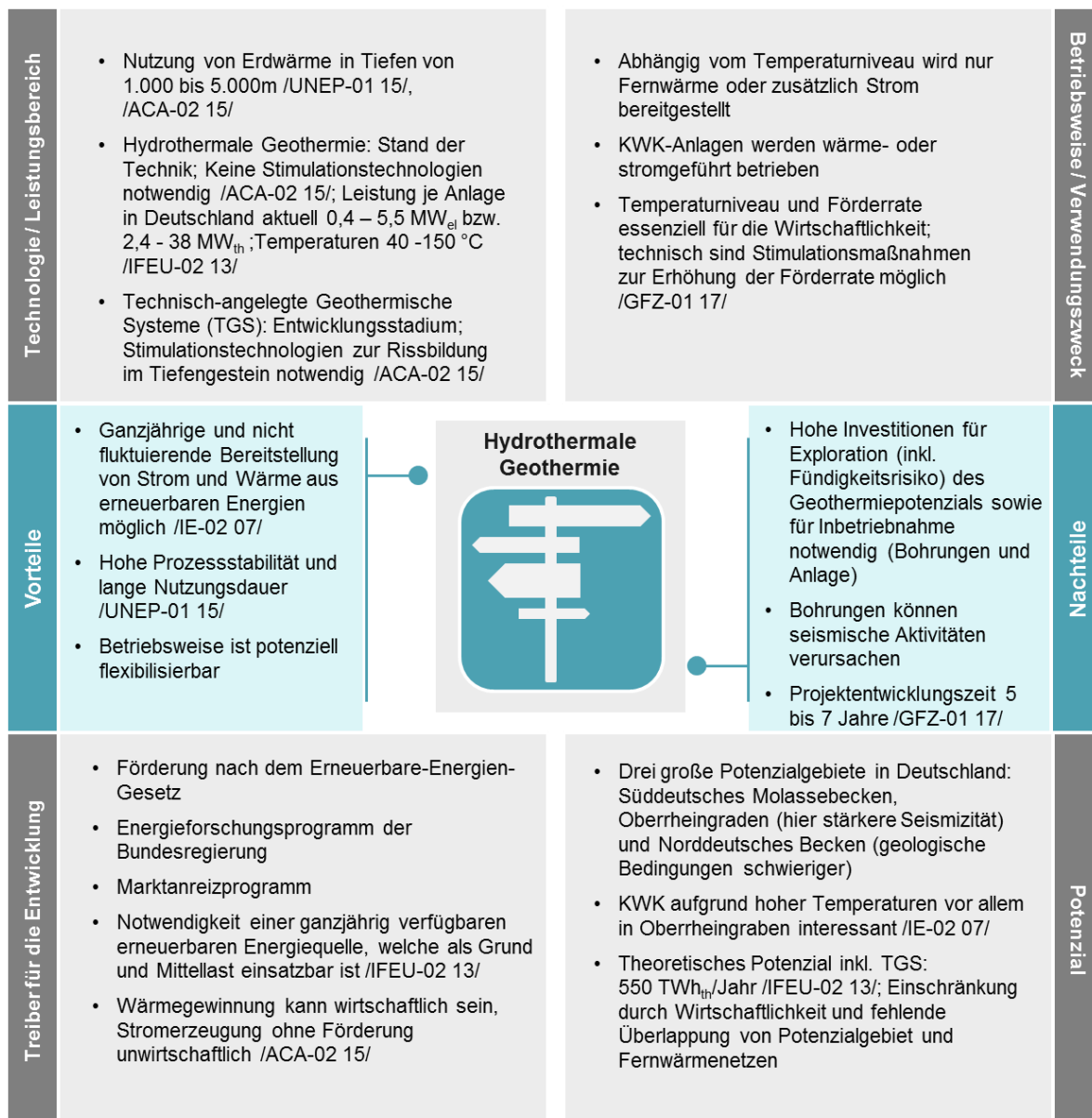
#### **Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr**

Das Aufkommen von Wärme aus Müllheiz(kraft)werken wird als konstant angenommen. Andere Studien legen eine Reduktion der Wärmebereitstellung aus Müll-KWK-Anlagen zu Grunde, z. B. in /ÖKO-04 14/ von 2012 bis 2050 abhängig vom Szenario um 25 % bzw. 46 %. Der Anteil der Wärme aus Müll macht in 2015 lediglich einen Anteil von 10 % an der Fernwärmebereitstellung aus und eine Variation wäre nur im MAX-Szenario anzunehmen. Da in diesem Szenario jedoch ebenfalls eine Zunahme des Fernwärmeabsatzes vorliegt, hätte eine Variation der bereitgestellten Wärme aus Müllheiz(kraft)werken ohnehin einen geringen Effekt auf das Gesamtsystem.

### **5.3.3 Tiefengeothermie**

Dieser Abschnitt beinhaltet die Beschreibung der Technologie *Tiefengeothermie*. Diesbezüglich wird zunächst ein Überblick in Form eines Steckbriefes gegeben (vgl. Abbildung 5-6). Anschließend werden die Potenziale und Hemmnisse zu Flexibilisierung bzw. die angesetzten Entwicklungen je Szenario und Stützjahr beschrieben.





**Abbildung 5-6:** Steckbrief des Wärmeerzeugers hydrothermale Geothermie /UNEP-01 15/, /ACA-02 15/, /IFEU-02 13/, /GFZ-01 17/, /IE-02 07/ und /UNEP-01 15/

### Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse

Aus wirtschaftlichen Gründen werden aktuell ausschließlich stromerzeugende Anlagen kontinuierlich betrieben. Die Betriebsweise von KWK-Anlagen richtet sich nach dem Strom- bzw. Wärmepreis sowie der Erzeugerstruktur des Fernwärmesystems. Technisch ist eine Flexibilisierung der Anlagen mit Lasttransienten von bis zu 15 % der Leistung pro Minute möglich /ACA-02 15/. Hemmnisse zur Flexibilisierung bestehen bei geothermisch betriebenen KWK-Anlagen vor allem in den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Wie oben beschrieben kann der Einsatz von Geothermieanlagen individuell unterschiedlich sein. KWK-Anlagen werden dabei in der Regel konstant betrieben, Anlagen zur reinen Wärmeerzeugung hingegen orientieren sich am Wärmelastgang des entsprechenden Fernwärmenetzes.

### Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr

In 2016 wurden aus tiefer Geothermie 151 GWh<sub>el</sub> und 969 GWh<sub>th</sub> erzeugt /BMWI-14 17/. Bei den drei Potenzialregionen zur Gewinnung von geothermischer Energie handelt es sich um das Norddeutsche Becken im Norden Deutschlands, den Oberrheingraben im Südwesten und das Molassebecken im Süden Deutschlands. Im Norddeutschem Becken wurden bisher keine Fernwärmeprojekte umgesetzt aber Potenziale bestehen unter anderem in Berlin, Hamburg, Bremen und Hannover /IE-02 07/, /IFEU-02 13/.

Die Tiefengeothermie ist aktuell noch am Anfang ihrer Lernkurve, sodass weitreichende Potenziale zur Kostensenkung und Effizienzsteigerung bestehen /ACA-02 15/, /GFZ-01 17/. Inwiefern diese Potenziale gehoben werden können ist jedoch unsicher. Zudem ist Geothermie aktuell nur mit Hilfe von Förderprogrammen wirtschaftlich. /BMU-14 11/

Mit der aktuellen hydrothermalen Technik ist ein theoretisches Potenzial mit einer Leistung von 480 MW<sub>el</sub> erschließbar /ACA-02 15/. Werden tiefer liegende Gesteinsschichten mithilfe der noch im Entwicklungsstadium befindlichen petrothermalen Geothermie erschlossen, vervielfachen sich die Potenziale auf bis zu 33 GW<sub>el</sub> /ACA-02 15/. Das tatsächlich erschließbare Geothermiepotenzial ist somit stark davon abhängig, ob sich die aktuell nicht wirtschaftliche und technisch nicht ausgereifte petrothermale Geothermie durchsetzt. Des Weiteren sind die Entwicklungen der Genehmigungspraxis für Geothermiebohrungen noch nicht absehbar. /ACA-02 15/, /GFZ-01 17/

Im MIN-Szenario wird eine Absenkung der Förderungen der Geothermie in Forschung und Umsetzung angenommen. Zudem wird angenommen, dass die ab 2018 umzusetzenden Ausschreibungen zu einem Stillstand des Ausbaus führen. Daher bleibt die Energieerzeugung aus Geothermieanlagen sowohl in 2030 als auch in 2050 auf dem heutigen Stand. In beiden Jahren des MIN-Szenarios wird angenommen das die Anzahl der Vollaststunden der in 2016 entspricht, also 2.468 Stunden /LIAG-01 17/.

In der aktuellen Politik wird im Bereich der Wärmeerzeugung der Fokus auf die Nutzung von Biomasse gelegt. Daher werden nur geringe Kostensenkung anderer Technologien wie Geothermie erreicht. Im BAU-Szenario wird ein Ausbau der Geothermie angelehnt an /BMWI-01 14/ angenommen. Diese Fortschreibung hin zu einer Wärmeerzeugung aus Geothermie von 2,8 TWh<sub>th</sub> im Jahr 2030 spiegelt zudem den aktuellen Trend wieder. Dabei weisen die KWK-Anlagen eine installierte elektrische Leistung von 230 MW<sub>el</sub> auf. Außerdem wird in /BMWI-01 14/ angenommen, dass die Wärmebereitstellung aus Geothermie in 2050 der in 2030 entspricht. Diese Annahme wird für das BAU-Szenario dieser Studie ebenfalls als realistisch erachtet. In den beiden Jahren des BAU-Szenarios wird ebenfalls angenommen das die Anzahl der Vollaststunden der in 2016 entspricht, also 2.468 Stunden /LIAG-01 17/.

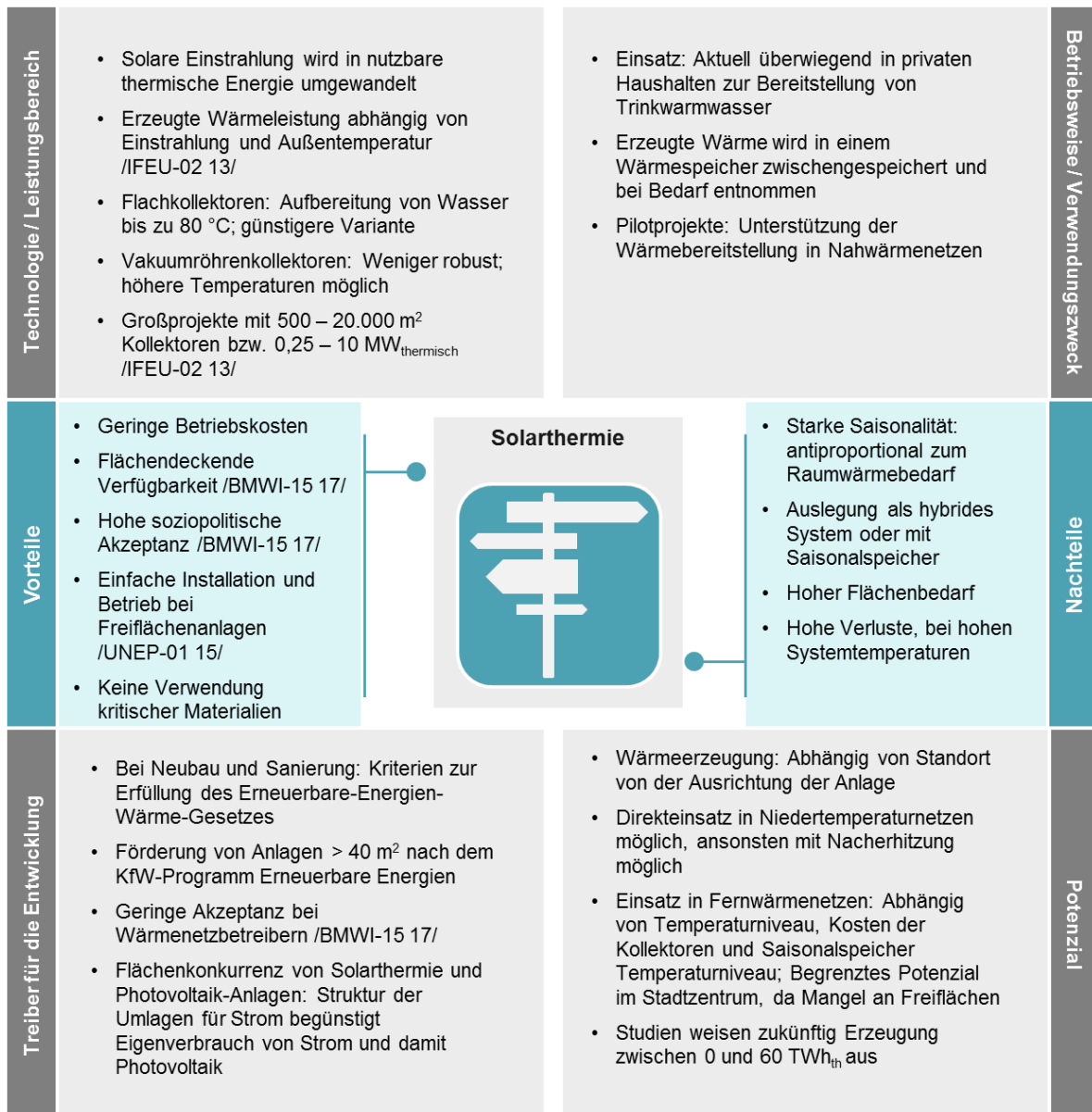
Im Gegensatz zum BAU-Szenario wird im MAX-Szenario angenommen, dass die oben ausgewiesenen hydrothermalen Potenziale in Deutschland bis 2050 erschlossen werden. Aus dem theoretischen elektrischen Potenzial und dem Verhältnis von Strom- und Fernwärmeerzeugung bestehender Geothermieanlagen kann das theoretische thermische Potenzial abgeleitet werden. Dabei gilt die Annahme, dass das Verhältnis von gekoppelter und ungekoppelter Erzeugung aus Geothermie konstant bleibt. Hieraus ergibt sich ein theoretisches thermisches Potenzial von 2,4 GW<sub>th</sub>. Zwar weist die

petrothermale Geothermie ein sehr viel höheres Potenzial aus. Dieses kann jedoch mit aktueller Technik und aufgrund von reduzierten, aber weiterhin vorhandenen, Vorbehalten in der Bevölkerung nicht gehoben werden. Die Volllaststunden der Anlagen werden gemäß des in /ACA-02 15/ genannten Korridors für Geothermieanlagen auf 3.000 Stunden angehoben. Es ergibt sich eine geothermische Wärmeerzeugung von 7,2 TWh in 2050 bei 480 MW<sub>el</sub> (nach /ACA-02 15/). Unter der Annahme dass Geothermie kontinuierlich zugebaut wird, ergibt sich für 2030 eine Wärmeerzeugung aus Geothermie von 3,5 TWh.

Die Geothermie wird in Fernwärmenetzen in Potenzialgebieten (z.B. München) ausgebaut. Die Verteilung des gesamten Geothermiepotenzials erfolgt entsprechend dem Fernwärmeabsatz abzüglich der bereitgestellten Abwärme sowie Wärme aus Biomasse und Müllheiz(kraft)werken. Es erfolgte kein Zubau in Netzen ohne Potenzial.

### **5.3.4 Solarthermie**

Dieser Abschnitt beinhaltet die Beschreibung der Technologie *Solarthermie*. Diesbezüglich wird zunächst ein Überblick in Form eines Steckbriefes gegeben (vgl. Abbildung 5-7). Anschließend werden die Potenziale und Hemmnisse zu Flexibilisierung bzw. die angesetzten Entwicklungen je Szenario und Stützjahr beschrieben.



**Abbildung 5-7:** Steckbrief des Wärmeerzeugers Solarthermieanlage nach /IFEU-02 13/, /BMWI-15 17/ und /UNEP-01 15/

### Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse

Der Ertrag von Solarthermieanlagen ist abhängig von der Intensität der solaren Einstrahlung und damit zeitlichen und regionalen Schwankungen unterworfen. Zwar kann die erzeugte thermische Leistung reduziert und somit Flexibilität bereitgestellt werden, jedoch ist dies aktuell aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll.

Um die Fernwärmeerzeugung aus Solarthermie zu modellieren, eignet sich aus o. g. Grund eine Fahrweise in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung.

### Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr

Aktuell ist die Einbindung der Solarthermie aufgrund hoher Systemtemperaturen in Fernwärmenetzen nicht umsetzbar. Aktuelle Projekte konzentrieren sich auf Nahwärmenetze mit niedrigen Temperaturen.

Im MIN-Szenario wird von konstant bleibenden Temperaturen in Fernwärmenetzen ausgegangen. Daher wird hier die Wärmeerzeugung aus Solarthermie in Fernwärmenetzen sowohl in 2030 als auch in 2050 mit 0 TWh angesetzt.

Im BAU-Szenario wird erwartet, dass die Temperaturen der Wärmenetze langsam abgesenkt werden. Aktuell liegt die Wärmeerzeugung der Solarthermie in Deutschland bei 30 GWh, somit machte sie weniger als 1 % der Wärmeerzeugung aus. Allerdings sind aktuell einige Projekte in Umsetzung und Planung. Daher wird von einer Zunahme der Wärmeerzeugung aus Solarthermie auf 5 TWh in 2050 ausgegangen. Da aktuell jedoch kein relevanter Zubau von Solarthermieanlagen in Fernwärmenetzen zu verzeichnen ist, wird für 2030 mit einer Wärmeerzeugung aus Solarthermieanlagen von 0 TWh in Fernwärmenetzen gerechnet.

Das MAX-Szenario zielt auf eine Wärmeerzeugung basierend auf erneuerbaren Energien ab. Aufgrund des limitierten und regionalen Potenzials von Geothermie sowie des limitierten Potenzials der Anwendung von Wärmepumpen in Wärmenetzen mit hohen Temperaturen, muss die Solarthermie in diesem Szenario einen relevanten Beitrag leisten. In /ÖKO-04 14/ werden im Klimaschutzszenario zur Erreichung einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1990 zu 2050 um 80 % eine Zunahme der Solarthermie in der zentralen Energieversorgung auf 32 % der Wärmeerzeugung angenommen. Für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95 % sogar auf 40 % der Wärmeerzeugung. Da hiermit enormer Flächenbedarf und Kosten für Saisonalspeicher einhergehen würden, wird der maximale Anteil der Solarthermie an der Wärmebereitstellung auf 30 % und somit auf 26 TWh in 2050 limitiert. Wird ab 2020 von einem kontinuierlichen Zuwachs der Solarthermieleistung ausgegangen, ergibt sich für 2030 eine Wärmeerzeugung aus Solarthermieanlagen von 8 TWh.

Da die Verwendung von Solarthermieanlagen keinen besonderen regionalen Restriktionen unterliegt, erfolgt die Verteilung der Wärmeerzeugung aus Solarthermie entsprechend dem Fernwärmeabsatz der einzelnen Netze (Bedarf abzüglich Wärme aus Biomasse, Abfall, Abwärme und Geothermie). In allen Szenarien werden angelehnt an /ÖKO-04 14/ 1330 Vollaststunden angenommen.

### **5.3.5 Wärmepumpe**

Der Technologiesteckbrief zu Hochtemperatur-Wärmepumpen ist dem Bericht „Kurzstudie Power-to-X - Ermittlung des Potentials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB“ zu entnehmen.

#### **Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse**

Technisch gesehen sind Hochtemperatur-Wärmepumpen flexibel steuerbar, sowie teillastfähig. Aktuell ist in Fernwärmenetzen keine relevante Leistung an Wärmepumpen vorhanden, sodass ihr Flexibilisierungsgrad nicht aus Betriebserfahrung abgeleitet werden kann. Es lassen sich jedoch aufgrund aktueller Rahmenbedingungen Aussagen hierzu ableiten. Generell ist ein netz- oder systemdienlicher Betrieb von Power-to-Heat-Anlagen, abgesehen von einer Vergütung über den Regelleistungsmarkt, aktuell nicht wirtschaftlich darstellbar. Die Beschaffung macht im Gegensatz zu den zu zahlenden Steuern und Umlagen nur einen geringen Anteil des Strompreises aus. Daher ist eine Flexibilisierung von Power-to-Heat-Anlagen aktuell nicht wirtschaftlich. Für die Wärmeversorgung wird deshalb ein wärmegeführter Betrieb unterstellt.

Aufgrund der verhältnismäßig hohen Investitionen von Wärmepumpen wird angenommen, dass der Fokus der Betreiber mittelfristig auf einem Dauerbetrieb der Anlagen liegt. Durch den Flexibilitätsbedarf in einem Energiesystem mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien wird davon ausgegangen, dass Wärmepumpen langfristig nicht mehr kontinuierlich betrieben werden, sondern Flexibilität bereitstellen.

### **Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr**

Hochtemperatur-Wärmepumpen sind aktuell auf Grund hoher Investition und Betriebskosten in Fernwärmenetzen nicht wirtschaftlich. Zwar werden die Kosten in Zukunft sinken, die Wirtschaftlichkeit ist jedoch essenziell von der Entwicklung der Besteuerung von Strom im Verhältnis zu fossilen Energieträgern abhängig. Aktuelle Entwicklungen des Einsatzes von Hochtemperatur-Wärmepumpen in Fernwärmenetzen in Schweden und Dänemark zeigen, dass diese unter anderen Marktbedingungen aber wirtschaftlich betrieben werden können.

Im MIN-Szenario werden weder in 2030 noch in 2050 Hochtemperatur-Wärmepumpen in der Fernwärme eingesetzt.

Bis 2030 ist auch im BAU-Szenario in Deutschland nicht mit einer relevanten Wärmeerzeugung aus Hochtemperatur-Wärmepumpen in Fernwärmenetzen zu rechnen, daher werden hier 0 TWh angesetzt. Auch in 2050 werden unter Annahme aktueller Rahmenbedingungen keine Hochtemperatur-Wärmepumpen in der Fernwärmebereitstellung eingesetzt.

Um im MAX-Szenario null Emissionen in der Energiewirtschaft in 2050 zu erreichen, wird ein Bedarf von 32 TWh mit Hilfe von Hochtemperatur-Wärmepumpen gedeckt. Dies entspricht dem Wärmebedarf abzüglich der bereitgestellten Wärme aus Abwärme, Abfall, Geothermie, Solarthermie und 4 TWh fossiler Erzeugung. Die Wärmepumpen werden als gesicherte Leistung mit 4.000 Volllaststunden betrieben. Mit der Annahme dass diese ab 2020 kontinuierlich installiert werden, kann in 2030 mit einer installierten thermischen Leistung von 2,7 GW in Fernwärmenetzen gerechnet werden. Da diese dann in Grundlast laufen ergibt sich mit 7.000 Volllaststunden für 2030 eine erzeugte Wärmemenge aus Hochtemperatur-Wärmepumpen von 18,7 TWh.

Der Technologiesteckbrief „Elektro(den)heizkessel“ ist dem Bericht „Kurzstudie Power-to-X - Ermittlung des Potentials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB“ zu entnehmen.

### **Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse**

Der Leistungsgradient von zentralen Anlagen kann als hoch eingestuft werden, da diese in der Lage sind, in < 15 s auf Nennleistung zu fahren /SWFL-02 12/. Bezüglich der Dimensionierung von Elektro(den)heizkesseln in Fernwärmenetzen zeichnet sich durch die bereits installierten Anlagen eine deutliche Tendenz ab. Elektro(den)heizkessel werden i.d.R. auf die Minimallast des Fernwärmenetzes ausgelegt. So wird sichergestellt, dass sie zu jeder Zeit in das Fernwärmenetz einspeisen können. Die minimale Tagesenergiemenge des Fernwärmebezuges liegt typischerweise bei ca. 10 % der maximalen Tagesenergiemenge.

### **Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr**

Laut § 13 Absatz 6a EnWG (Version Juli 2017) dürfen die ÜNB mit KWK-Anlagenbetreibern Verträge zur Abschaltung von KWK-Anlagen und gleichzeitiger Zuschaltung von PtH-Anlagen zu Zeiten hoher Belastung der Übertragungsnetze abschließen /ENWG-01 17/. Hierfür müssen die Anlagen sich im Netzausbaubereich, nach § 36c Absatz 1 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), befinden. Sowohl die Investition in die PtH-Anlage als auch die entstandenen Stromkosten sind vom ÜNB zu erstatten. Des Weiteren ist eine Vergütung zu zahlen. Insgesamt darf eine maximale Leistung von 2 GW kontrahiert werden. Dieses Abregeln und Zuschalten darf nur eingesetzt werden, wenn die Bereitstellung der Wärme notwendig ist und vorrangige Mechanismen zur Netzstabilisierung wie Regelenergie nicht wirken. /ENWG-01 17/

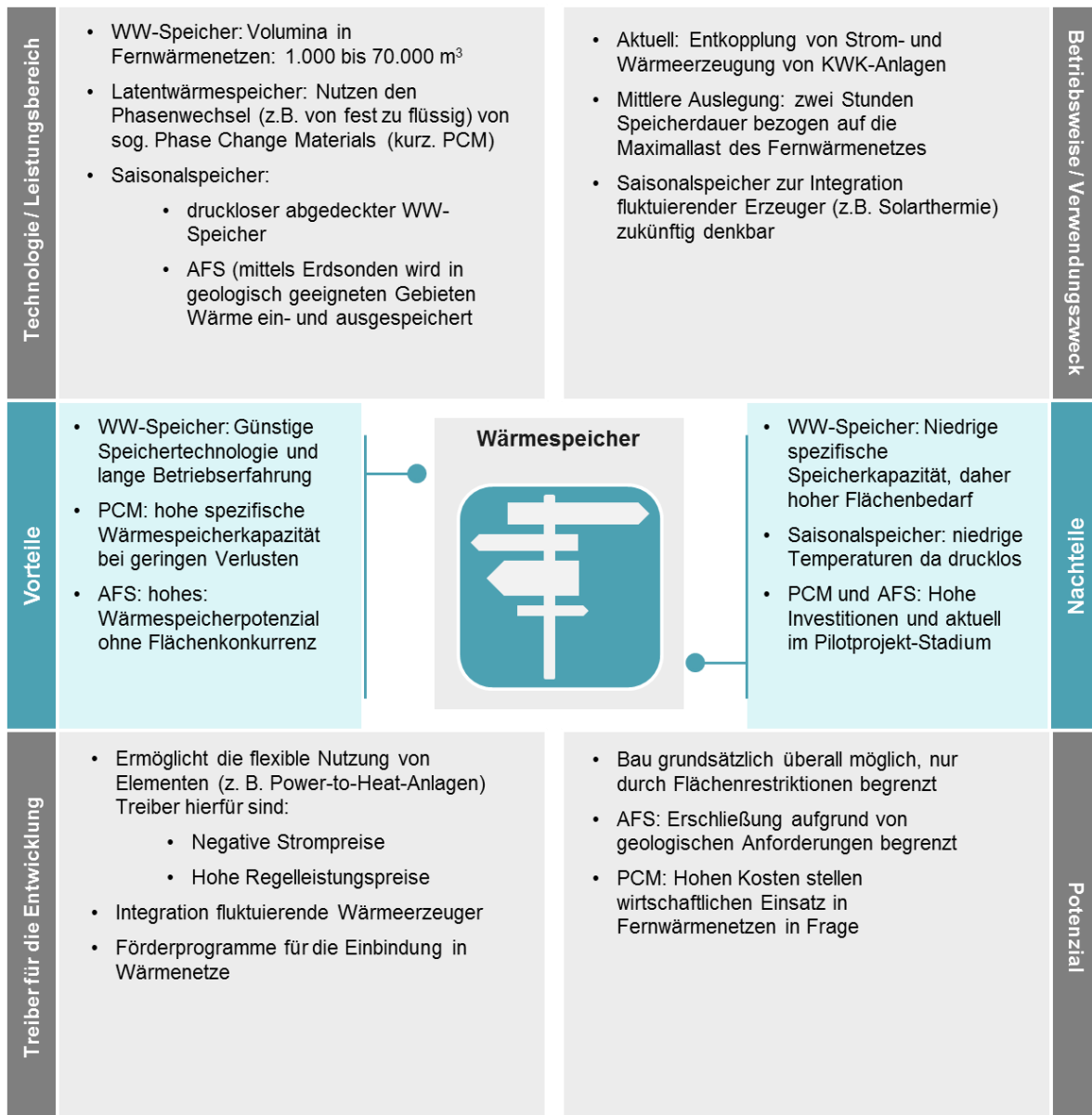
Die vorliegenden Strompreiszeitreihen und Annahmen zur Entwicklung der fossilen Energiepreise aus dem Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Version 2017) lassen darauf schließen, dass im Jahr 2030 in 383 Stunden die Wärmegestehungskosten aus Strom unter den der Wärmegestehungskosten aus Erdgas-Heizwerken liegen. In diesen Stunden ist Einsatz der EHK aus Sicht des Betreibers im Vergleich zu Erdgas-Heizwerken wirtschaftlich. Für zusätzliche Elektrodenheizkessel, für welche der Betreiber die Investitionen selber zu tragen hätte, ist jedoch kein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Daher besteht die Leistung der verbauten EHK in allen Szenarien aus den vorgehaltenen 2 GW nach EnWG zuzüglich der bereits vorhandenen, geplanten und in Bau befindlichen PtH-Anlagen. Die Verteilung der Zubauleistung erfolgt entsprechend dem Fernwärmeabsatz der Netze im Netzausbaubereich (Bedarf abzüglich Wärme aus Biomasse, Abfall, Geothermie und Solarthermie).

Es liegen keine Informationen zum notwendigen Einsatz der EHK für die Netzentlastung vor. Daher wird in allen Szenarien in 2030 und 2050 abgeleitet aus obiger Überlegung von einer Anzahl von 400 Betriebsstunden ausgegangen. Daraus folgt eine Wärmeerzeugung aus Elektrodenheizkesseln von 0,8 TWh in beiden Jahren.

### **5.3.6 Wärmespeicher**

Im Steckbrief wird zwischen verschiedenen Speichertechnologien unterschieden:

- Warmwasserspeicher (WW)
- Latentwärmespeicher
- Aquiferspeicher (AFS)



**Abbildung 5-8:** Steckbrief der Wärmespeicher

### Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse

Wärmespeicher werden aktuell bereits zur Bereitstellung von Flexibilität für den Strom- und Wärmemarkt eingesetzt. Des Weiteren kann das Wasservolumen des Fernwärmenetzes als Wärmespeicher genutzt werden. Dies geschieht indem die Systemtemperatur des Wärmenetzes variiert wird /IWES-05 15/. Die Nutzung dieser Flexibilität ist durch die technischen Gegebenheiten der Fernwärmeversorgung beschränkt. Aktuell stellt die Regelung von Wärmeübertragern eines der großen Herausforderungen zur Nutzung dieser Potenziale dar. Häufig können durch Kalkablagerungen oder falsche Dimensionierung der Wärmeübertrager die im Rücklauf erforderlichen niedrigen Temperaturen nicht erreicht werden. Um die Flexibilisierung der Vorlauftemperaturen im Wärmenetz zu ermöglichen, wäre eine intelligente Regelung der Wärmeübertrager in allen Hausübergabestationen essenziell. Dies ist aus heutiger Sicht nicht abzusehen.



### Angesetzte Entwicklungen je Szenario und Stützjahr

Der Ausbau von Wärmespeichern ist zum einen durch die Flexibilisierung von Wärmeerzeugern (z. B. KWK-Anlagen) sowie die Einbindung fluktuierender Wärmeerzeuger wie Solarthermie begründet. Die Auswertung der Wärmespeicher in Fernwärmenetzen zeigt eine Speicherdauer von rund 2 h bezogen auf die thermische Maximallast.

Im MIN – Szenario erfolgt kein weiterer Zubau von Wärmespeichern weder in 2030 und 2050, da keine relevanten Energiemengen aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Im BAU – Szenario erfolgt bis 2030 ein langsamer Zubau von Wärmespeichern, um in allen Netzen eine Speicherdauer von mindestens 2 Stunden in Bezug auf dessen Maximallast zu erreichen. Die vorhandene Speicherkapazität bleibt dann bis 2050 konstant. Im MAX – Szenario geht mit der Zunahme der Maximallast auch ein Zubau der Wärmespeicher einher, sodass weiterhin das 2 h-Kriterium erfüllt wird.

### 5.3.7 Entwicklung der Elemente in den Szenarien

In den folgenden drei Abbildungen werden die in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.6 beschriebenen Entwicklungen der Fernwärmeerzeugung aggregiert dargestellt.

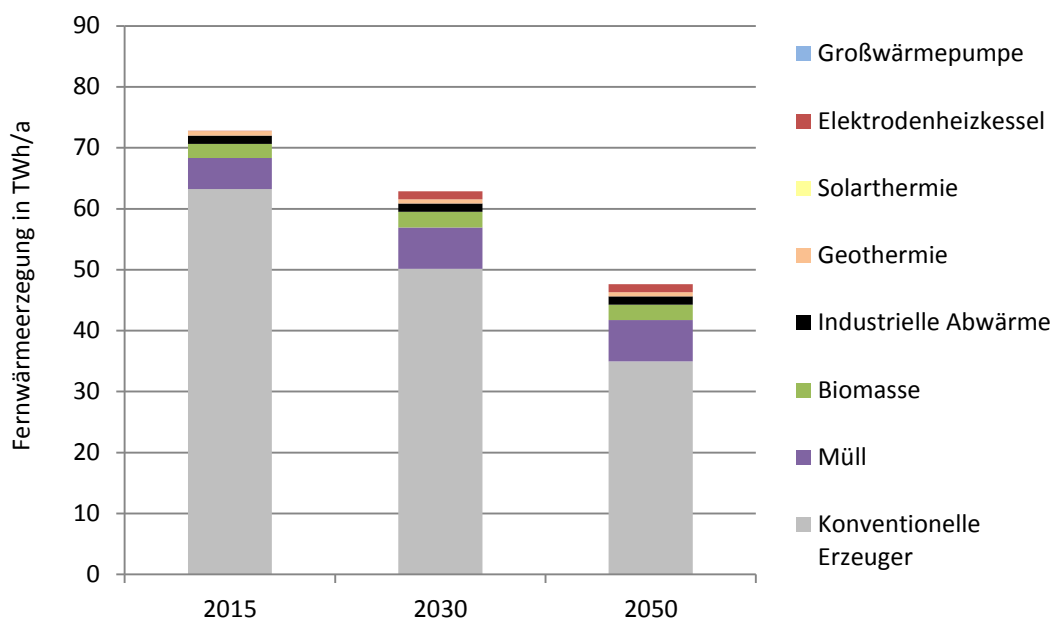


Abbildung 5-9: Entwicklung der Elemente im MIN-Szenario

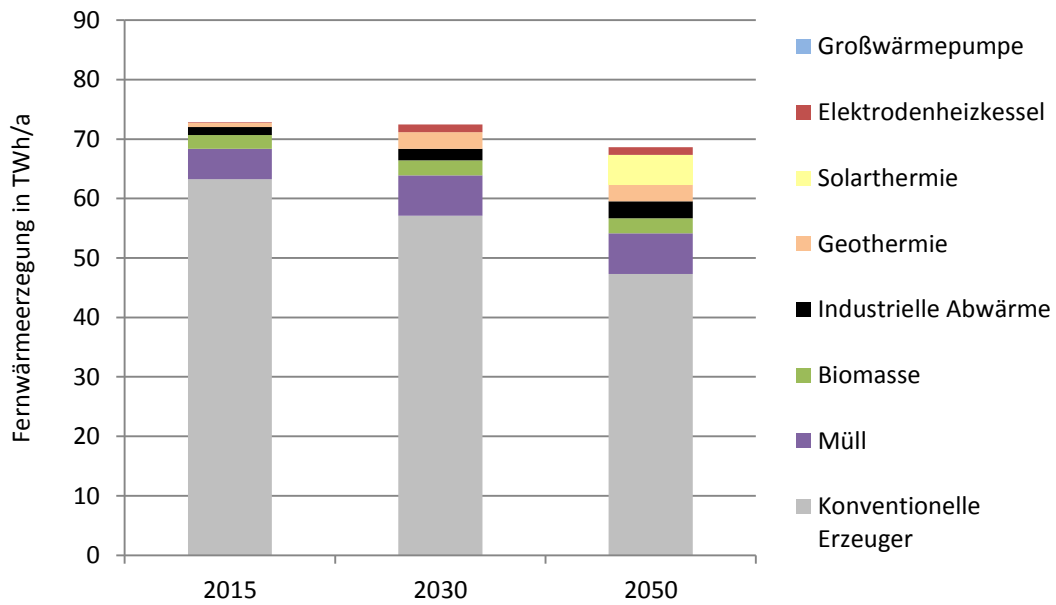


Abbildung 5-10: Entwicklung der Elemente im BAU-Szenario

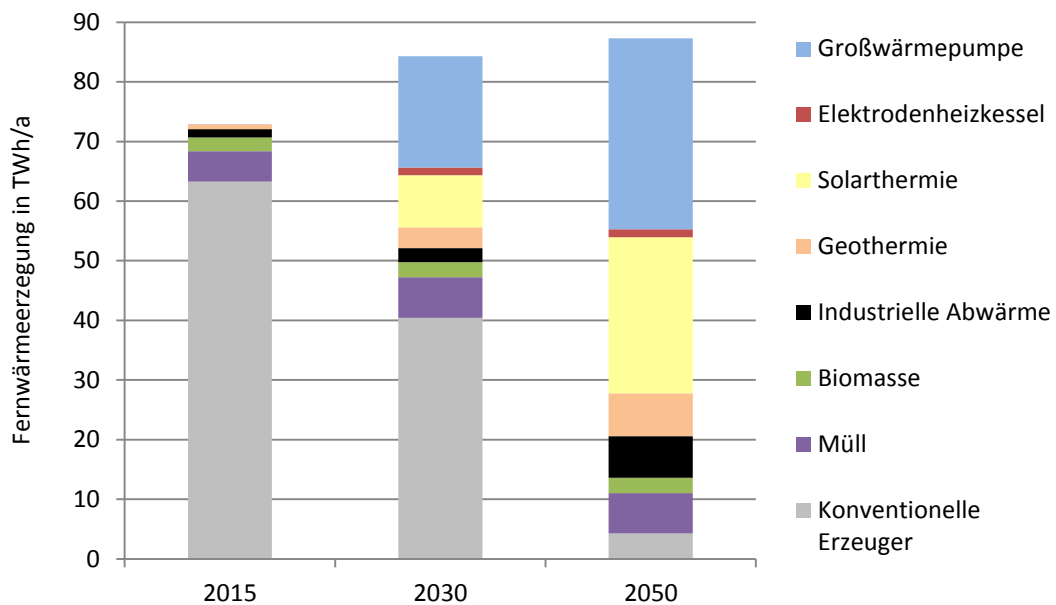


Abbildung 5-11: Entwicklung der Elemente im MAX-Szenario

## 6 Entwicklung industrieller KWK

In diesem Kapitel wird zunächst die Gruppe der industriellen KWK-Anlagen anhand eines Technologiesteckbriefes erläutert. Daraufhin werden die drei in Kapitel 5.1 beschriebenen Szenarien um die Abbildung der Höhe des durch KWK gedeckten Wärmebedarfs erweitert. Zuletzt werden Potenziale und Hemmnisse zur Flexibilisierung der industriellen KWK beschrieben.

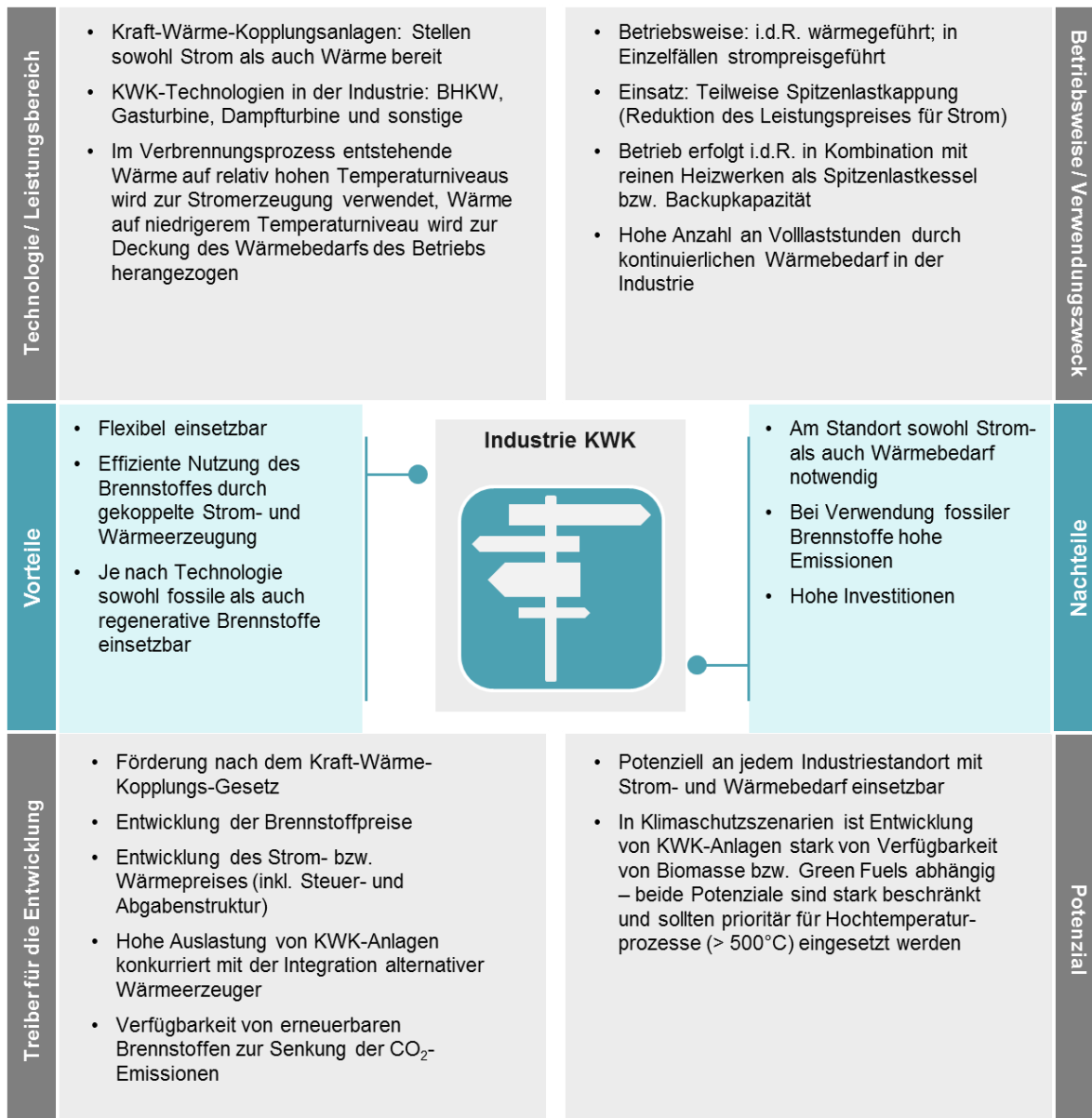
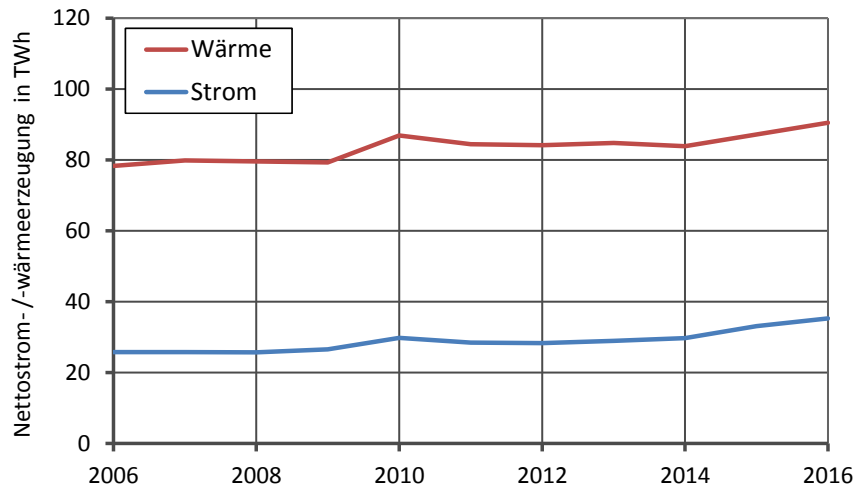


Abbildung 6-1: Steckbrief der industriellen KWK-Anlagen

### Bestandsentwicklung

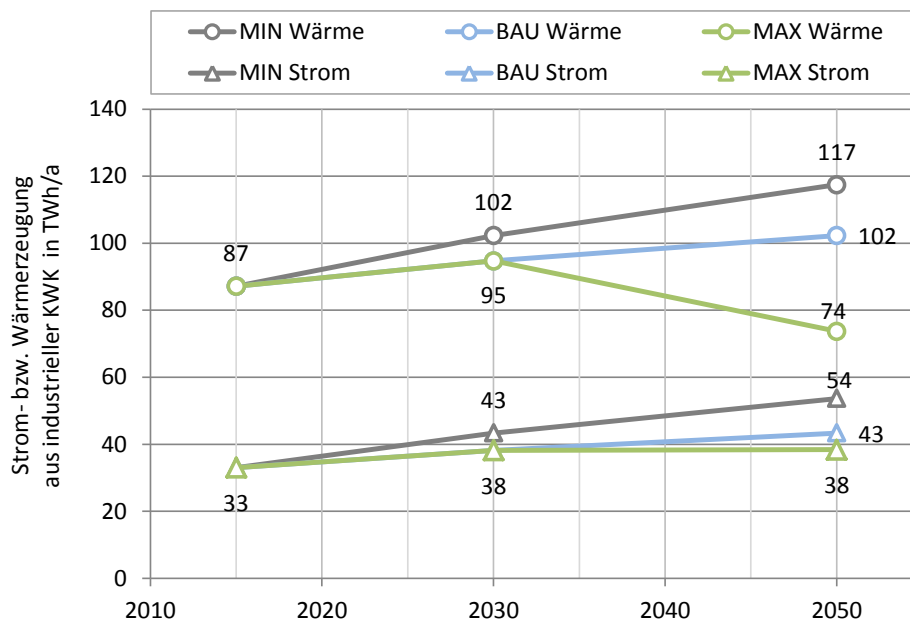
Der Bestand von KWK-Anlagen in der Industrie hat in den letzten Jahren zugenommen, was sich in der Strom- und Wärmeerzeugung niederschlägt (vgl. Abbildung 6-2). Die Stromkennzahl (Verhältnis aus Strom- zu Wärmeerzeugung) hat sich über die Jahre leicht erhöht.



**Abbildung 6-2:** *Nettostrom- & -wärmeproduktion in industrieller KWK in TWh /DESTATIS-12 16/*

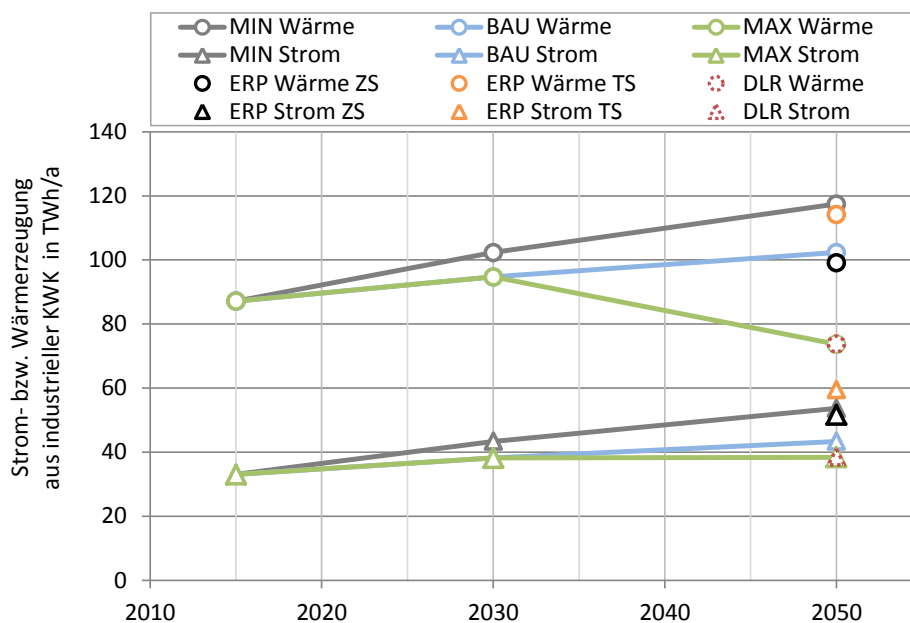
### Entwicklungspfade

Seit der Änderung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes /KWKG-01 16/ im Jahr 2016 sind die Förderbedingungen für KWK-Anlagen in der Industrie weniger vorteilhaft als zuvor. Dies hat eine sinkende Aktivität von Planung und Neubau der Anlagen zur Folge. Aus der Änderung der Förderbedingungen lässt sich ableiten, dass der langfristige Trend der Strom- und Wärmeproduktion industrieller KWK-Anlagen (vgl. Abbildung 6-2) im BAU-Szenario nicht in gleichem Maße fortgeschrieben werden kann. Deshalb wird in diesem Szenario von einer Halbierung der Zubaurate bis 2030 ausgegangen und diese ebenfalls bis 2050 festgehalten. Im MIN-Szenario wird hingegen davon ausgegangen, dass das Förderniveau zukünftig wieder die Höhe vor dem KWKG 2016 erreicht, weshalb eine Fortschreibung des Zubautrends der letzten 10 Jahre bis 2050 angenommen wird. Die langfristige Entwicklung im MAX-Szenario basiert auf /DLR-02 12/ und beinhaltet eine geringfügige Zunahme der Stromerzeugung bei gleichzeitiger Abnahme der Wärmeproduktion in KWK in der Industrie. Diese Erhöhung der Stromkennzahl lässt sich durch einen Technologiewechsel u. a. Ersatz von Gasturbinen durch Gasmotoren erklären. In Abbildung 6-3 ist die Strom- und Wärmeproduktion in den drei Szenarien dargestellt.



**Abbildung 6-3:** Wärme- bzw. Stromerzeugung von KWK in der Industrie je Szenario

Ein Vergleich der Ergebnisse mit /BMWI-01 14/ zeigt, dass sich diese hinsichtlich der langfristigen Entwicklung der KWK in der Industrie recht stark unterscheiden (vgl. Abbildung 6-4). In /BMWI-01 14/ wird sowohl im Trend- als auch im Zielszenario von einer Zunahme der Wärme- bzw. Stromerzeugung von industrieller KWK ausgegangen. Entsprechend der Stellungnahme in Kapitel 5.3 ist der Einsatz von Biomasse in Niedertemperaturanwendungen nicht zu priorisieren. Aus diesem Grund wird im MAX-Szenario ein Rückgang der industriellen KWK entsprechend /DLR-02 12/ angenommen.



**Abbildung 6-4:** Wärme- bzw. Stromerzeugung von industrieller KWK je Szenario und Vergleich mit den Studien /BMWI-01 14/, /DLR-02 12/

### **Flexibilisierungsgrad – Potenziale und Hemmnisse**

Technisch zeichnen sich KWK-Anlagen durch eine hohe Flexibilität aus. Verschiedene in /IWES-05 15/ diskutierte wirtschaftliche Gründe sprechen jedoch gegen eine Flexibilisierung. Beispielsweise *wird das „Flexibilitätpotenzial theoretisch flexibler Kraftwerke [...] nicht ausgenutzt, da die Anreize zur Spotmarktoptimierung eingeschränkt sind“ /IWES-05 15/.*

Ein diskontinuierlicher Betrieb von Erdgas befeuerten KWK-Anlagen ist aufgrund der Struktur der Gasbezugskosten unwirtschaftlich, da festgelegte Gasmengen abgenommen werden müssen. Darüber hinaus müssen KWK-Anlagen keine Energiesteuern auf ihren Erdgasbezug zahlen, Heizkessel hingegen schon.

Für KWK-Anlagen die mit Biogas betrieben werden, gibt es zusätzliche Hemmnisse zur Flexibilisierung des Betriebs. Die Vergütung für die Anlagen bestimmt sich nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz. Eine Flexibilisierung der Erzeugung des Vergärungsprozesses ist denkbar, allerdings mit hohen Anforderungen an die Betriebsführung verbunden. Für alle Anlagen gilt, dass sowohl Brennstoff als auch Wärmespeicher die Flexibilisierung ermöglichen können. Die eingeführte Flexibilitätsprämie für Biogasanlagen reicht jedoch aktuell nicht aus, um die notwendigen zusätzlichen Investitionen zu refinanzieren. Zudem betrifft diese Vergütung nur einen Teil der Biomasse basierten Energiebereitstellungspfade.

Des Weiteren werden KWK-Anlagen zu Zeiten in denen eine Spitzenlast auftreten könnte durchgefahen, um eine Erhöhung des zu zahlenden Leistungspreises zu verhindern. Zu diesen Zeitpunkten sind sie somit nicht flexibel einsetzbar.

## 7 Literaturverzeichnis

- ACA-02 15** Clauser, Christoph; Elsner, Peter: Geothermische Kraftwerke - Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“ in: Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung), 2015
- AEE-04 14** Knebel, Alexander; Kunz, Claudius: Potenziale der Bioenergie. Berlin: Forschungsradar Energiewende, 2014
- AGEB-03 17** Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2016. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2017
- AGFW-01 16** AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW): . Frankfurt am Main: AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW), 2016
- AGFW-02 13** IFEU; GEF: Transformationsstrategien Fernwärme - TRAFO - Ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW. Frankfurt am Main: Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW), 2013
- AGFW-04 04** Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 2003 - Technische Bestands- und Veränderungsdaten zur Fernwärmeversorgung in Deutschland 2003. Frankfurt am Main: Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft - AGFW - e.V., 2004
- BBR-01 12** Schlömer, Claus: Raumordnungsprognose 2030 - Bevölkerung, private Haushalte, Erwerbspersonen. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2012
- BGK-01 17** Digitales Landschaftsmodell 1:250000 (AAA-Modellierung); Leipzig: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - GeoDatenZentrum (BKG), 2017.
- BLESL-01 13** Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- BMU-01 16** Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU), 2016
- BMU-14 11** Weinmann, Thorsten: Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß § 65 EEG - Endbericht Vorhaben Iib (Geothermie). Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2011
- BMUB-06 15** Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut

- e.V., 2015
- BMWI-01 14** Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
- BMWI-04 17** Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- BMWI-13 10** Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: Bundesregierung, 2010
- BMWI-14 17** Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- BMWI-15 17** Giovannetti, Federico; Kastner, Oliver; Lampe, Carsten; Reineke-Koch, Rolf; Park, Sunah; Steinweg, Jan: Technologiebericht 1.4: Solare Wärme und Kälte in: Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Saarbrücken: Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES) gGmbH, 2017
- DESTATIS-07 15** Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2015
- DESTATIS-08 15** Ergebnisse ohne Grenzen: der Zensus-Atlas in: [www.zensus2011.de](http://www.zensus2011.de) (Abruf am 23.11.2015). Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015
- DESTATIS-12 16** Produzierendes Gewerbe - Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden 2015 in: Fachserie 4 Reihe 6.4. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2016
- DLR-02 12** Nitsch, Joachim; et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Leitstudie 2011. Bonn: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung, 2012
- EEA-01 15** Urban Atlas. Copenhagen: European Environment Agency (EEA), 2015
- EEA-04 16** Erdbeobachtungsprogramm Copernicus: Pan-European - Reference Data. <http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products>. Copenhagen: European Environment Agency (EEA), 2016
- ENWG-01 17** Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017



- EWI-01 17** Hecking, Harald: Energiemarkt 2030 und 2050 - Der Beitrag von Gas- und Wärminfrastruktur zu einer effizienten CO<sub>2</sub>-Minderung. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, 2017.
- FFE-04 16** Pelling, Christoph; Schmid, Tobias; et al.: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Hauptbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2016
- FFE-13 17** Rasch, M.; Regett, A.; Pichlmaier, S.; Conrad, J.; Greif, S.; Guminski, A.; Rouyrre, E.; Orthofer, C.; Zipperle, T.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK Ausgabe 03/2017, S. 38-42. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017
- FFE-39 14** Corradini, Roger; Gallet, Marc; Conrad, Jochen; Schmid, Tobias: Globale Herausforderungen, regionale Lösungen - FFE-Regionalisiertes-Energiesystem-Model (FREM): Flächendeckendes, räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes Energiesystemmodell. In: BWK Ausgabe 12/2014, S. 28-33. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2014
- FFE-42 17** Conrad, Jochen; Greif, Simon: Dynamik der Energiewende - Wie lassen sich Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen quantifizieren? in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung. Wien: Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe der TU Wien (ESEA), 2017
- FIS-01 17** Pfluger, Benjamin; Tersteegen, Bernd; Franke, Bernd: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Grüner Weg 1 | 52070 Aachen: Bernd Franke ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2017
- FMN-01 16** Herberhold, Gregor: Duisburg hängt am größten Fernwärmenetz Europas . In: <https://www.waz.de/staedte/duisburg/duisburg-haengt-am-groessten-fernwaermenetz-europas-id11877123.html>. (Abruf am 2017-07-14) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6uy6RbTxh>); Essen: FUNKE MEDIEN NRW GmbH, 2016.
- GER-01 16** Bals, Christoph; Kreft, Sönke; Weischer, Lutz: Wendepunkt auf dem Weg in eine neue Epoche der globalen Klima- und Energiepolitik - Die Ergebnisse des Pariser Klimagipfels COP 21. Bonn: Germanwatch e.V., 2016
- GFZ-01 17** Heumann, Arnd; Huenges, Ernst: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologiebericht TF 1.2 Tiefengeothermie in: Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Potsdam: Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), 2017
- IE-02 07** Geothermische Strom- und Wärmeerzeugung in Deutschland und Europa - Stand und Perspektiven. Leipzig: Institut für Energetik

- und Umwelt gGmbH, 2007
- IFEU-02 13** Paar, Angelika et al.: Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), 2013
- ISI-02 17** Pfluger, Benjamin; Tersteegen, Bernd; Franke, Bernd: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2017
- IWES-05 15** Jansen, Malte; Richts, Christoph; Gerhardt, Norman; Lenck, Thorsten; Heddrich, Marie-Louise: Strommarkt-Flexibilisierung - Hemmnisse und Lösungskonzepte. Kassel, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2015
- KWKG-01 16** Gesetz zur Änderung der Bestimmungen zur Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung und zur Eigenversorgung - KWKG. Bonn: Bundesanzeiger Verlag, 2016
- LIAG-01 17** GeotIS - Direct use from measured and calculated values in Germany in: <https://www.geotis.de/geotisapp/templates/summationsall.php?bulletin=D> (Abruf: 06.11.2017)). Hannover: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, 2017
- ÖKO-04 14** Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2014
- OSM-03 15** OpenStreetMap (OSM) - Die freie Wiki-Weltkarte. Veröffentlicht unter der freien CC-BY-SA-Lizenz durch OpenStreetMap und Mitwirkende. <http://www.openstreetmap.org/>, 2015
- SWEN-01 10** Wellstein, Jürg: Fernwärme hat mehr Potenzial In: Swiss Engineering STZ. Zürich: Swiss Engineering STV, 2010
- SWFL-02 12** Holdensen, Peer: Halle für Flensburgs "Stromheizung" termingerech fertig - Stadtwerke Flensburg feiern Richtfest in: [http://www.stadtwerke-flensburg.de/home/unternehmen/presse/pressemeldungen/detailansicht/article/halle-fuer-flensburgs-stromheizung-termingerech-fertig-stadtwerke-flensburg-feiern-richtfest.html?tx\\_ttnews\[backPid\]=743&cHash=b3d0f847f9](http://www.stadtwerke-flensburg.de/home/unternehmen/presse/pressemeldungen/detailansicht/article/halle-fuer-flensburgs-stromheizung-termingerech-fertig-stadtwerke-flensburg-feiern-richtfest.html?tx_ttnews[backPid]=743&cHash=b3d0f847f9). Flensburg: Stadtwerke Flensburg GmbH, 2012
- UBA-02 07** Hanke, Thomas; Schüle, Ralf; Pietzner, Katja: Netzgebundene Wärmeversorgung - Anregungen für Kommunen und andere Akteure in: Climate Change 19/07. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2007
- UBA-07 13** Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2013
- UNEP-01 15** District energy in cities - Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy. Paris, Frankreich: United Nations Environmental Programme - Division of Technology,

Industry and Economics, 2015