

Arbeitspapier

Zielbild Fernwärme

Kernerkenntnisse aus relevanten Szenarien zum
Energiesystem Deutschlands sowie Ableitungen zum
möglichen Zielbild Fernwärme 2045

Bearbeitung durch:

Prognos AG
Malek Sahnoun
Elias Althoff
Marco Wunsch
Nils Thamling
Dominik Rau

Berlin, 19.10.2023

Auftraggeber:

Bundesstelle für Energieeffizienz (BfEE)
beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
Frankfurter Straße 29 – 35
65760 Eschborn

<https://www.bfee-online.de>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Scharnhorststr. 34-37
11019 Berlin

<https://www.bmwk.de>

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	6
1 Einleitung	8
2 Methodik	9
3 Fernwärme in aktuellen Szenarien zur Klimaneutralität	9
3.1 Anschluss an Wärmenetze	9
3.2 Fernwärmeerzeugung	11
3.3 Dekarbonisierung des Erzeugungsmixes der Fernwärme	12
3.4 Rolle von Wasserstoff und Kraft-Wärme-Kopplung zur Fernwärmeerzeugung	14
4 Dimensionen des Zielbilds	17
4.1 Fernwärmeversorgungsgebiete vergrößern	17
4.2 Individuelle Dekarbonisierung der Fernwärmenetze	18
5 Übersicht zum Zielbild der Fernwärme 2045	23
6 Literaturverzeichnis	X

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Zielwerte an den Zubau der Wärmenetzanschlüsse aus der Literatur	10
Tabelle 4-1: Empfohlene Grundsätze für einen breiten Technologiemarkt in Wärmenetzen	21
Tabelle 5-1: Zielbild Fernwärme 2045: Fernwärmeversorgungsgebiete ausweiten	23
Tabelle 5-2: Zielbild Fernwärme 2045: Individuelle Dekarbonisierung der Fernwärmenetze	23

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Gesamte Fernwärmeerzeugung in ausgewählten Szenarien	11
Abbildung 3-2: Anteil der Fernwärme am Endenergieverbrauch in Gebäuden	12
Abbildung 3-3: Erzeugungsmix der Fernwärme in Szenarien	13
Abbildung 3-4: Stromresiduallast in Szenarien	14
Abbildung 3-5: Jahresverlauf der Stromresiduallast im Szenario "Klimaneutrales Stromsystem 2035"	15
Abbildung 3-6: Stromresiduallast im Szenario „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ in Abhängigkeit der Außentemperatur	16

Zusammenfassung

Die Fernwärme spielt eine zentrale Rolle im künftigen Energiesystem und beim Erreichen eines klimaneutralen Deutschlands. Ziel dieses Arbeitspapiers ist es, Kernerkenntnisse aus relevanten Szenarien zu analysieren sowie ein Zielbild für die Fernwärme 2045 abzuleiten.

Die Analyse von Klimaneutralitätsszenarien zeigt die essenzielle und steigende Bedeutung der Fernwärme: Diese soll mehr Gebäude bzw. Menschen erreichen und gleichzeitig dekarbonisiert werden. Den Szenarien zufolge soll dafür die jährliche Zubaurate der neuen Anschlüsse bis 2030 verdreifacht und bis 2045 verfünffacht werden, um eine klimaneutrale Wärmeversorgung im Gebäudebereich erreichen zu können. Darüber hinaus soll laut den gleichen Szenarien die absolute Fernwärmeerzeugung von 125 Terawattstunden (TWh) (2018) auf etwa 165 TWh im Zieljahr (2045) ansteigen und künftig einem Viertel des Gebäudeendenergiebedarfs entsprechen. Neben der Entwicklung der absoluten Fernwärmeerzeugung, ist die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung innerhalb der Netze von großer Bedeutung. Diese erfordert eine maßgeschneiderte Herangehensweise.

Basierend auf der Analyse der Szenarien sowie einschlägigen Arbeiten im Bereich von energiesystemischen Strategien wurden 2 Säulen für ein Zielbild 2045 erarbeitet:

■ Fernwärmeversorgungsgebiete vergrößern

- 1.1. Erweiterung bestehender und Ausbau neuer Netze, insbesondere im urbanen bzw. dicht besiedelten Raum. Eine Verbindung zur kommunalen Wärmeplanung ist zwingend erforderlich.
- 1.2. Anzahl neuer Fernwärmeanschlüsse: mittelfristige Verdreifachung, langfristige Verfünffachung der jährlichen Anschlussraten notwendig

■ Fernwärmenetze individuell dekarbonisieren

- 1.3. Anteil von erneuerbarer Wärme und unvermeidbarer Abwärme bis 2030 deutlich steigern (mindestens 40 %, idealerweise 50 % des Fernwärmeerzeugungsmixes), um fossile Wärmeerzeugung zu reduzieren
- 1.4. Lokale, erneuerbare Wärmepotenziale (oberflächennahe und Tiefengeothermie, Solarthermie, Gewässer) und unvermeidbare Abwärmequellen (Industrie, Rechenzentren, Kläranlagen, Müllverbrennung) ausschöpfen
- 1.5. Lokalspezifische Wärmepotenziale durch ortsunabhängige Luftgroßwärmepumpen ergänzen
- 1.6. Nutzung der in stromgeführten Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) anfallenden Wärme, um Effizienz beim Einsatz von Erdgas/Wasserstoff zu steigern
- 1.7. Limitierter Einsatz von Biomasse unter Berücksichtigung der nationalen Biomassestrategie
- 1.8. Wärmenetze durch den Einsatz von Wärmespeichern und einem breiten Erzeugungsmix flexibilisieren

- 1.9. **Systemdienlicher Einsatz von Technologien:** Abdeckung der Grundlast primär über lokal verfügbaren Quellen und unvermeidbarer Abwärme, Abdeckung der Residuallast mittels flexibler Wärmeerzeuger
- 1.10. **Absenkung der Vorlauftemperatur von Wärmenetzen,** um den Energieverlust zu reduzieren und eine effizientere Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu ermöglichen
- 1.11. **Schneller Ausstieg aus Kohle und Öl. Einsatzreduzierung von Erdgas auf die KWK-Anlagen,** wenn keine Alternative vorliegt

1 Einleitung

Die Energiewende im Gebäudesektor ist ein zentraler Baustein zur Erreichung der klimapolitischen Ziele. Der Handlungsdruck ist dabei gewaltig: 2022 wurden im Gebäudesektor zum dritten Jahr in Folge die Treibhausgas-Reduktionsziele verfehlt. In diesem Zusammenhang gewinnen Wärmenetze immer mehr an Bedeutung.

Um das Potenzial der Wärmenetze auszuschöpfen und deren Beitrag zur Klimaneutralität zu erhöhen, braucht es Leitplanken für den Weg hin zu einer nachhaltigen, kohlenstoffarmen und energiesicheren Wärmeversorgung. Im Rahmen des Projekts „Wärmewende: Die Energiewende im Wärmebereich – Zielbild und Instrumente zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung“ im Auftrag der BfEE wurde dieses Arbeitspapier erarbeitet, um Kernerkenntnisse aus relevanten Szenarien zum Energiesystem Deutschlands zu bündeln sowie Ableitungen zum möglichen Zielbild Fernwärme 2045 zu entwickeln.

Effiziente Nutzung und Bündelung erneuerbarer Energien:

Neben der dezentralen Wärmepumpe ist die klimaneutrale Erzeugung von Fernwärme und deren Verteilung mithilfe von Wärmenetzen ein wesentlicher Baustein der zukünftigen Wärmeversorgung, insbesondere in verdichteten Gebieten. Fernwärmesysteme haben gegenüber Einzelheizungen den Vorteil, dass sie ein breites Technologiespektrum nutzen können. Neben Großwärmepumpen, Elektrokesseln, Heizkraftwerken und Heizwerken mit klimaneutralen Brennstoffen, Solarthermieanlagen und Geothermie kann auch Abwärme aus Industrieanlagen oder der Müllverbrennung genutzt werden. In den Netzen werden mehrere Erzeugungsanlagen sich gegenseitig ergänzen und zudem mithilfe von Wärmespeichern flexibel auf die Wärmenachfrage und die Signale des Stromsystems reagieren.

Reduzierung der Energiekosten:

In Gebieten mit verdichteter Bebauung kann der Anschluss von Gebäuden an Wärmenetze eine kostengünstige Wärmeversorgung im Vergleich zu individuellen Heizungsanlagen ermöglichen. Durch die zentrale Wärmeversorgung können Skaleneffekte genutzt und Kosten eingespart werden. Die Nutzung erneuerbarer Energien in Wärmenetzen reduziert zudem die Abhängigkeit von teuren fossilen Brennstoffen und führt langfristig zu stabilen oder sinkenden Energiepreisen. Dies trägt zur Wirtschaftlichkeit der Wärmenetze bei und entlastet Haushalte und Unternehmen finanziell.

Förderung der regionalen Wertschöpfung:

Wärmenetze schaffen neue Möglichkeiten für regionale Wertschöpfung. Durch den Einsatz lokaler erneuerbarer Energiequellen und den Ausbau der Infrastruktur entstehen neue Arbeitsplätze in den Bereichen Planung, Bau, Betrieb und Wartung von Wärmenetzen. Die Nutzung lokaler Ressourcen führt zu einer Stärkung der regionalen Wirtschaft und einer Reduzierung der Importabhängigkeit von Energierohstoffen. Dies wirkt sich positiv auf die lokale Beschäftigung und die regionale Entwicklung aus.

Beitrag zur Energiesicherheit:

Wärmenetze tragen zur Verbesserung der Energiesicherheit bei, da sie eine zuverlässige Wärmeversorgung gewährleisten, die lokale Potenziale nutzen kann. Durch die Nutzung verschiedener erneuerbarer Energiequellen und ihre Verknüpfung zu Wärmenetzen können Ausfälle oder Engpässe in der Energieversorgung vermieden werden. Die Kombination von erneuerbaren

Energien und effizienter Wärmeversorgung verringert die Abhängigkeit von importierten Energieträgern und trägt zur Sicherung der Energieversorgung bei.

Technisch machbare Dekarbonisierung in Gebieten mit verdichteter Bebauung:

Die Nutzung erneuerbare Energien benötigt in der Regel eine höhere Fläche als die bisher genutzten fossilen Energieträger. Gerade in verdichtet bebauten Gebieten (Innenstädte, Ortskerne, Großwohnsiedlungen, etc.) können Wärmenetze eine Option sein, um erneuerbare Quellen zu nutzen.

2 Methodik

Zur Ableitung des Zielbilds wird in diesem Arbeitspapier folgende Methodik verfolgt:

- Auswertung von Energieszenarien zur Klimaneutralität Deutschlands
- Einbindung von Sektorkopplung bzw. der Verzahnung mit dem Stromsektor durch die Einordnung der Rolle der KWK-Anlagen, der strombetriebenen Wärmepumpen, des fluktuierenden erneuerbaren Stroms und dessen Residuallast in die Wärmeversorgung
- Ableitung von Kriterien für Zielwerte des zukünftigen Fernwärmenetzsystems

3 Fernwärme in aktuellen Szenarien zur Klimaneutralität

Um die Rolle der Fernwärme im zukünftigen Energiesystem zu analysieren, werden für die Fernwärme relevante Kenngrößen in bestehenden Szenarien betrachtet, welche sich die Klimaneutralität zum Ziel gesetzt haben. Für den Vergleich wurde die Studie „Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“ (PrognosC, 2022) herangezogen und mit weiteren Studien ergänzt:

- Klimaneutrales Deutschland 2045 (KNDE45) (PrognosA, 2021)
- Klimaneutrales Stromsystem 2035 (PrognosB, 2022)
- dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität (dena, 2021)
- BDI Klimapfade 2.0 (BDI, 2021)
- BMWK Langfristszenarien (LFS) (BMWK, 2022)
- Ariadne Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 (Ariadne, 2021)
- Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045 (Prognos et al., 2022)

3.1 Anschluss an Wärmenetze

Für eine Einordnung der Bedeutung der Fernwärme in den Szenarien wird zunächst die Zubauraten der Fernwärmeanschlüsse in verschiedenen Szenarien betrachtet und ins Verhältnis zur aktuellen

Anschlussrate gesetzt. In der folgenden Tabelle sind zum einen die Einschätzungen der Fernwärmebranche und zum anderen eine Übersicht der aktuellen Klimaneutralitätsszenarien zu den notwendigen Anschlussraten aufgelistet. Deutlich wird, dass für die Zukunft eine verstärkte Expansion der Wärmenetzanschlüsse erwartet wird, um den steigenden Bedarf an klimafreundlicher Wärmeversorgung zu decken.

Auf dem Fernwärmegipfel¹ im Jahr 2023 wurde von den führenden Akteuren aus der Branche erklärt, dass „mittelfristig jährlich mindestens 100.000 Gebäude neu an Wärmenetze angeschlossen werden sollen“ (BMWK, et al., 2023).

In den Klimaneutralitätsszenarien (KNDE₄₅, Langfristszenarien, Gebäudestrategie Klimaneutralität) werden noch ehrgeizigere Ausbaupfade für Wärmenetzanschlüsse abgeleitet. Bis 2045 sollen bis zu 150.000 Gebäude jährlich neu angeschlossen werden.

Tabelle 3-1: Zielwerte an den Zubau der Wärmenetzanschlüsse aus der Literatur

Zahlen in Wärmenetzanschlüsse = Gebäude für Wohn- und Nichtwohngebäude

Zielwerte		Anzahl der Wärmenetzanschlüsse	
		jährlicher Zubau	
Quellen		bis 2030	bis 2045
Verbandseinschätzungen / Erklärung Fernwärmegipfel	(BMWK, 2023)	mittelfr. mind. 100.000	
Szenario Klimaneutrales Deutschland 2045	(PrognosA, 2021)	80.000-90.000	95.000-105.000
Szenario Langfristszenarien T ₄₅	(ifeu & FraunhoferISI, 2022)	130.000-150.000	
Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045	(Prognos, et al., 2022)	80.000-90.000	105.000-115.000

Quelle: Eigene Darstellung

© Prognos, 2023

Werden die oberen Zahlen in Relation zur aktuellen Anschlussrate gesetzt, wird die notwendige Entwicklungsdynamik deutlich. Entsprechend einer Erhebung des AGFW² (die nur einen Teil der Wärmenetze umfasst) sowie Erklärungen aus der Branche zufolge konnte abgeleitet werden, dass die aktuelle Zubaurate bei ca. 25.000-35.000 neuen Anschlüssen pro Jahr in Wohn- und Nichtwohngebäuden insgesamt liegt (AGFW, 2021).

Es kann festgehalten werden, dass eine deutliche Zunahme der Zubaurate bei mit Fernwärme versorgten Gebäuden stattfinden muss, um die Klimaziele im Gebäudesektor mittel- und langfristig erreichen zu können. Zwischen dem Ist- und Soll-Zustand liegt mittelfristig ca. ein Faktor 3 (bis 2030) und Faktor 5 langfristig (bis 2045) bei der Zunahme der Gebäude, die mit Fernwärme versorgt werden.

¹Auf Einladung des Bundeswirtschafts- und Klimaschutzministeriums sowie des Bundesbauministeriums nahmen an dem Treffen knapp 30 Vertreterinnen und Vertreter von Verbänden aus den Bereichen Wärmewirtschaft, Wohnungs- und Bauwirtschaft, der Industrie, Umwelt und Verbraucherschutz sowie Gewerkschaften teil.

² Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.

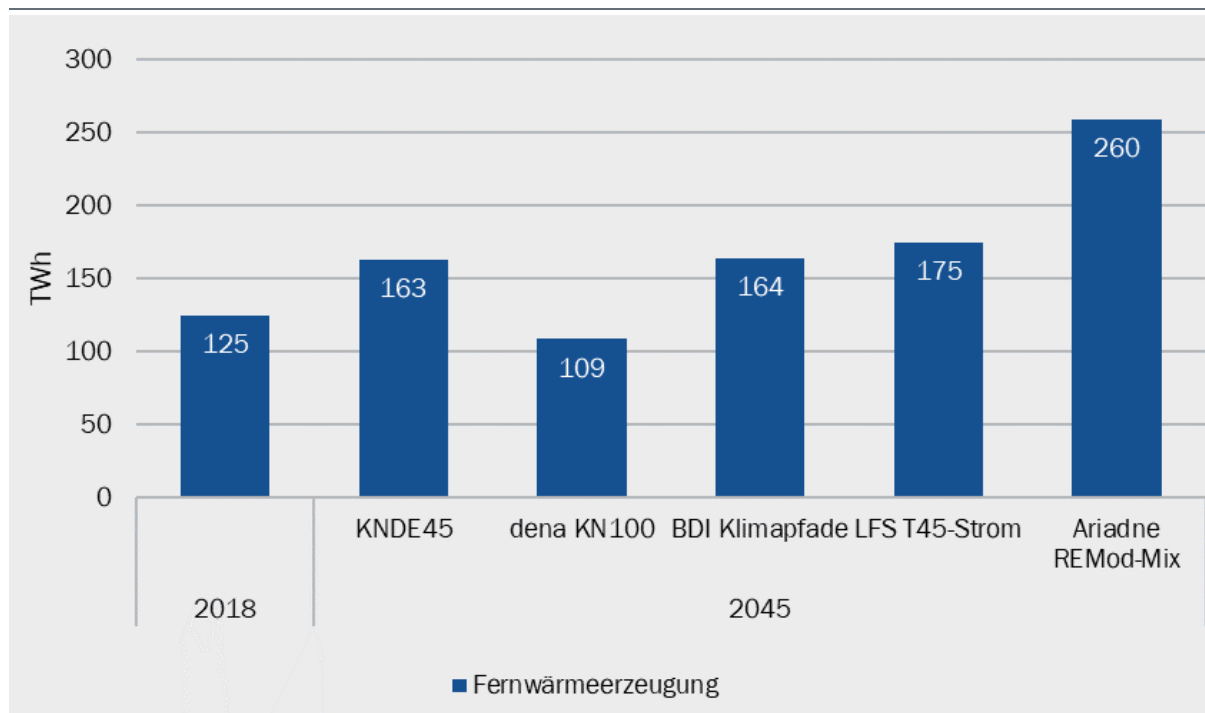
3.2 Fernwärmeerzeugung

Neben den zuvor analysierten Anschlussraten ist die absolute Fernwärmeerzeugung in TWh und deren Verhältnis zum Endenergieverbrauch (EEV) von Gebäuden eine weitere wichtige Größe zur Einordnung der Bedeutung der Fernwärme in den Szenarien.

Die Fernwärme spielt in allen betrachteten Szenarien eine wesentliche Rolle und ist ein fester Bestandteil der zukünftigen Wärmeversorgung. In drei von fünf Szenarien des Big-5 Szenariovergleichs wird berechnet, dass die Fernwärmeerzeugung von aktuell (2018) 125 TWh auf etwa 165 TWh im Zieljahr (2045) ansteigen wird (Abbildung 3-1). Zwei weitere Szenarien weichen von diesem Wert ab und bilden für das Jahr 2045 die Extremwerte von 260 TWh und 109 TWh.

Der EEV des Gebäudesektors, der aus dem EEV privater Haushalte (PHH) und dem des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) besteht, liegt in den Szenarien im Zieljahr 2045 bei etwa 600 TWh. Die durchschnittliche jährliche Fernwärmeerzeugung (165 TWh) entspricht somit etwa einem Viertel des durchschnittlichen jährlichen EEV des gesamten Gebäudesektors in 2045, was sie zu einer zentralen Säule der zukünftigen Wärmeversorgung macht, wobei ein Teil der Fernwärmeerzeugung in der Industrie genutzt wird.

Abbildung 3-1: Gesamte Fernwärmeerzeugung in ausgewählten Szenarien



Quelle: (PrognosC, 2022)

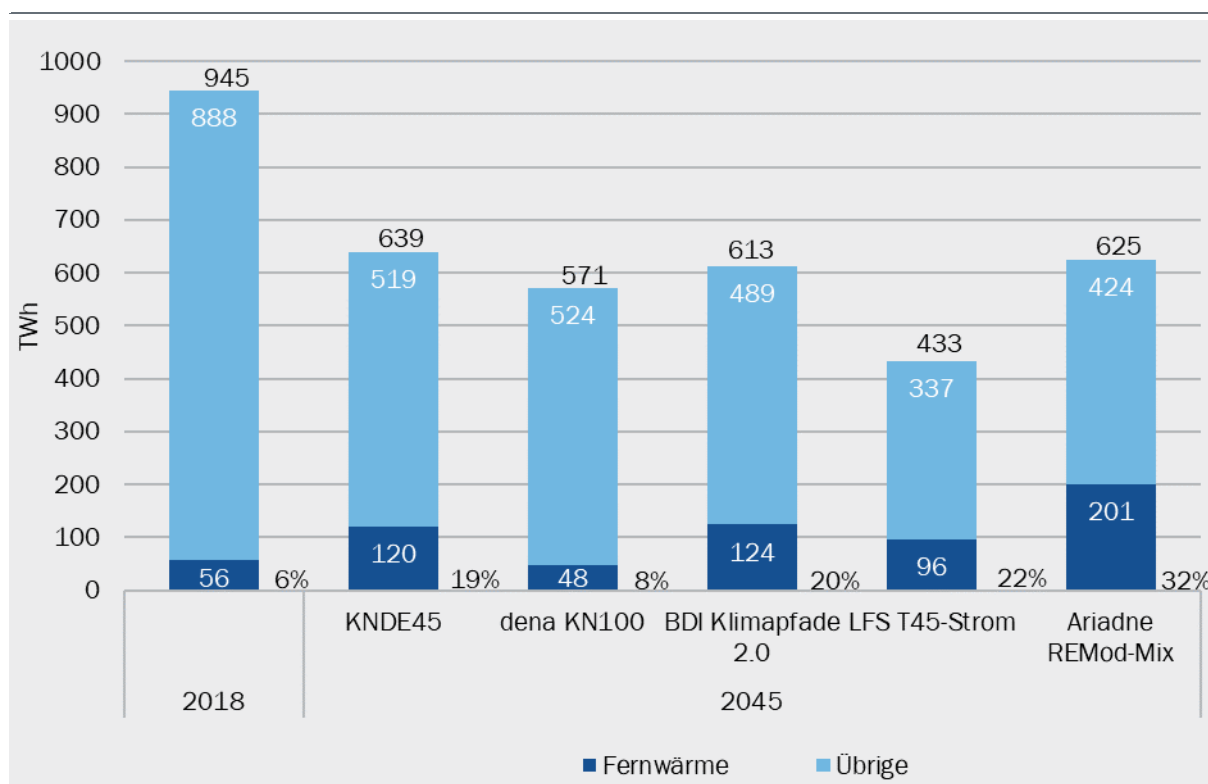
© Prognos, 2023

Die folgende Grafik setzt die Fernwärme in Beziehung zum EEV des Gebäudesektors (Abbildung 3-2). Die zur Deckung des EEV von Gebäuden eingesetzte Fernwärme wird ins Verhältnis zum gesamten EEV des Gebäudesektors gesetzt.

Je nach betrachtetem Szenario variiert der Anteil der Fernwärme am EEV von Gebäuden im Zieljahr 2045 zwischen 8 % und 32 %. Gegenwärtig macht die Fernwärme 6 % des Energieverbrauchs im Gebäudesektor aus. Es wird also in allen Szenarien erwartet, dass die Bedeutung der Fernwärme für die Wärmeversorgung zunehmen wird. Die Dekarbonisierung der Fernwärme hat somit essenziellen Einfluss auf die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung.

Unterschiede zwischen der Fernwärmeerzeugung in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 sind dadurch zu erklären, dass nicht die gesamte in der Fernwärme erzeugte Wärme im Gebäudesektor genutzt wird.

Abbildung 3-2: Anteil der Fernwärme am Endenergieverbrauch in Gebäuden



Quelle: (PrognosC, 2022)

© Prognos, 2023

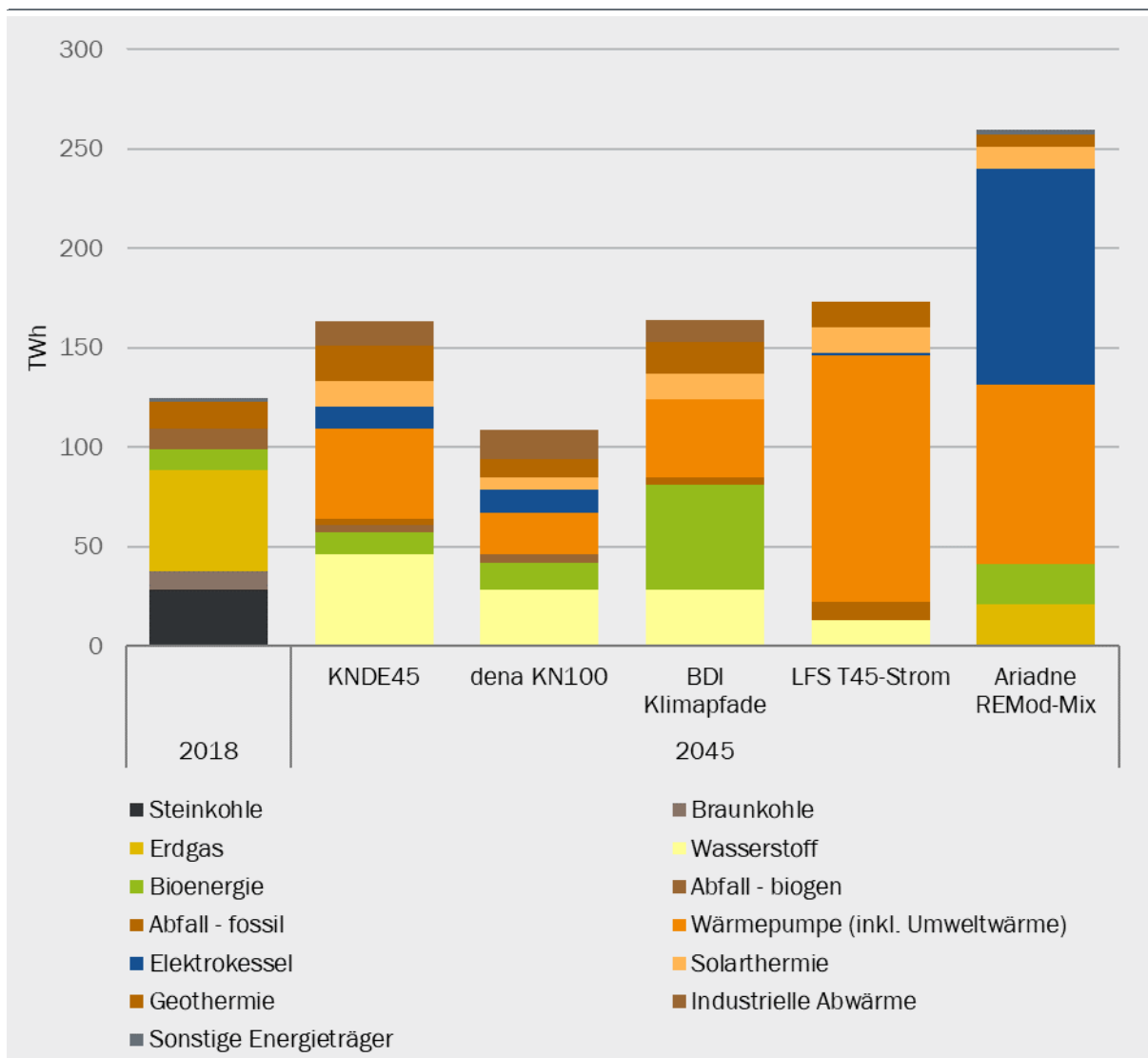
3.3 Dekarbonisierung des Erzeugungsmixes der Fernwärme

Neben der Entwicklung der absoluten Fernwärmeerzeugung ist die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung innerhalb der Netze von großer Bedeutung, welche im Folgenden für die betrachteten Szenarien beleuchtet wird.

Die Dekarbonisierung kann auf vielfältige Art und Weise realisiert werden. Die Szenarien setzen dabei auf unterschiedliche Ansätze, was sich im Erzeugungsmix widerspiegelt. Abbildung 3-3 zeigt, dass in drei der betrachteten Szenarien (KNDE₄₅, BDI 2.0 und dena-Leitstudie) auf einen breiten und heterogenen Erzeugungsmix aus unterschiedlichen Technologien gesetzt wird. Der maximale Anteil einer Technologie an der Gesamterzeugung liegt hier bei 28 %, 26 % und 32 %.

Im Gegensatz dazu setzen die übrigen zwei Szenarien (LFS und Ariadne) stark auf den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrokessel und somit auf Elektrifizierung zur Dekarbonisierung der Fernwärme. Der Anteil der durch Strom erzeugten Wärme liegt im Stromszenario der Langfristszenarien bei 71 % und im Ariadne REMod Szenario bei 76 %. Die folgende Abbildung zeigt den Erzeugungsmix der Fernwärme für das Jahr 2018 und das Jahr 2045 in den genannten Szenarien.

Abbildung 3-3: Erzeugungsmix der Fernwärme in Szenarien



Quelle: (PrognosC, 2022)

© Prognos, 2023

Aus den Szenarien gehen verschiedene Wege zur Dekarbonisierung der Fernwärme hervor. Es existiert somit eine Vielfalt an möglichen Lösungen zur Dekarbonisierung der Fernwärmenetze. Daraus resultiert allerdings auch, dass für jedes Netz eine maßgeschneiderte Herangehensweise sinnvoll ist, um Potenziale bestmöglich zu heben.

Die Wahl der optimalen Technologien und Strategien hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. der Preisentwicklung der jeweiligen Technologie, der regionalen Gegebenheiten, den verfügbaren Ressourcen und den politischen Rahmenbedingungen.

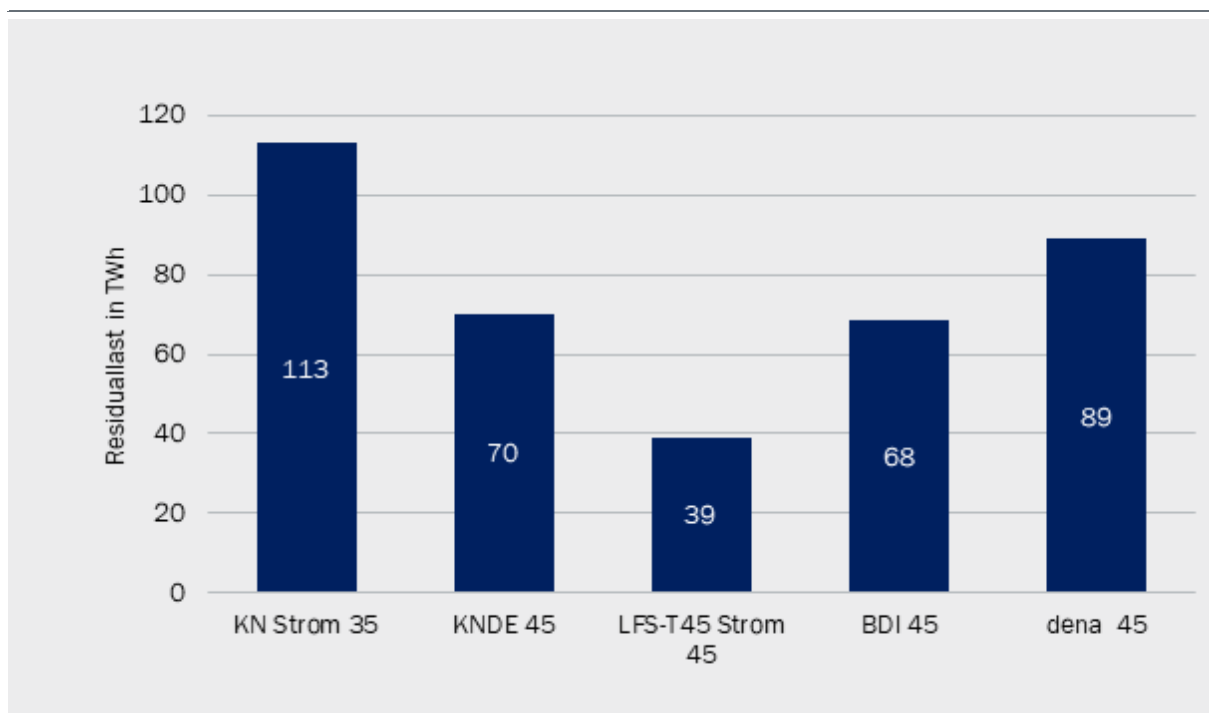
3.4 Rolle von Wasserstoff und Kraft-Wärme-Kopplung zur Fernwärmeerzeugung

Aufgrund der intensiv diskutierten Rolle von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem wird im folgenden Abschnitt die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und insbesondere der H₂-KWK für die Fernwärme beleuchtet.

In einem Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien besteht die Kernaufgabe von Kraftwerken – und ebenso in KWK betriebenen Kraftwerken - darin, die stromseitige Residuallast zu decken. Die Laufzeit der Kraftwerke richtet sich daher nach dem Strombedarf – sie sind stromgeführt.

Um die Laufzeiten der Kraftwerke weiter einzugrenzen und einen möglichen Nutzen der anfallenden Wärme zu bestimmen, wird daher im Folgenden eine Betrachtung der Residuallast in Klimaneutralitätsszenarien vorgenommen. Die Stromresiduallast beschreibt in der folgenden Betrachtung den Anteil des Stromverbrauchs, der nicht direkt durch Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft, Speicher oder Importe gedeckt werden kann und daher von brennstoffbasierten Kraftwerken bereitgestellt werden muss.

Abbildung 3-4: Stromresiduallast in Szenarien



Quelle: (BMWK, 2022), (PrognosA, 2021), (PrognosB, 2022), (BDI, 2021), (dena, 2021)

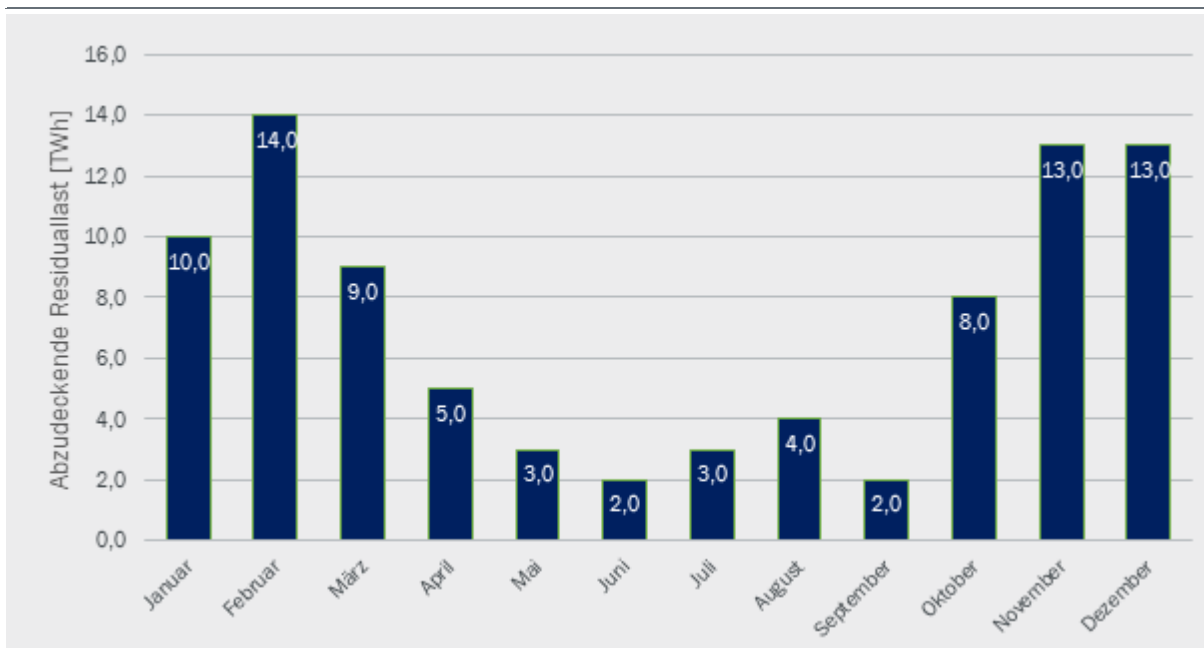
© Prognos, 2023

Grundsätzlich zeigt die Auswertung, dass auch in klimaneutralen Energiesystemen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien eine Stromresiduallast vorhanden ist und somit ein Bedarf an Kraftwerken besteht. Dieser variiert je nach Szenario und liegt für das Zieljahr der betrachteten Szenarien zwischen 39 TWh und 113 TWh (Abbildung 3-4). Das Zieljahr ist mit Ausnahme der Studie Klimaneutrales Stromsystem 2035 (PrognosB, 2022) in allen Szenarien auf das Jahr 2045 festgelegt.

Um die Sinnhaftigkeit des Betriebs der notwendigen Kraftwerke in Kraft-Wärme-Kopplung einzuordnen, wird eine detaillierte Analyse des Szenarios "Klimaneutrales Stromsystem 2035" vorgenommen.

Abbildung 3-5 zeigt den Verlauf der Stromresiduallast über das Jahr. Es wird deutlich, dass im genannten Szenario etwa 75 % der Residuallast in den Wintermonaten (Oktober bis März) anfällt und somit tendenziell zur kalten Jahreszeit.

Abbildung 3-5: Jahresverlauf der Stromresiduallast im Szenario "Klimaneutrales Stromsystem 2035"
(PrognosB, 2022)

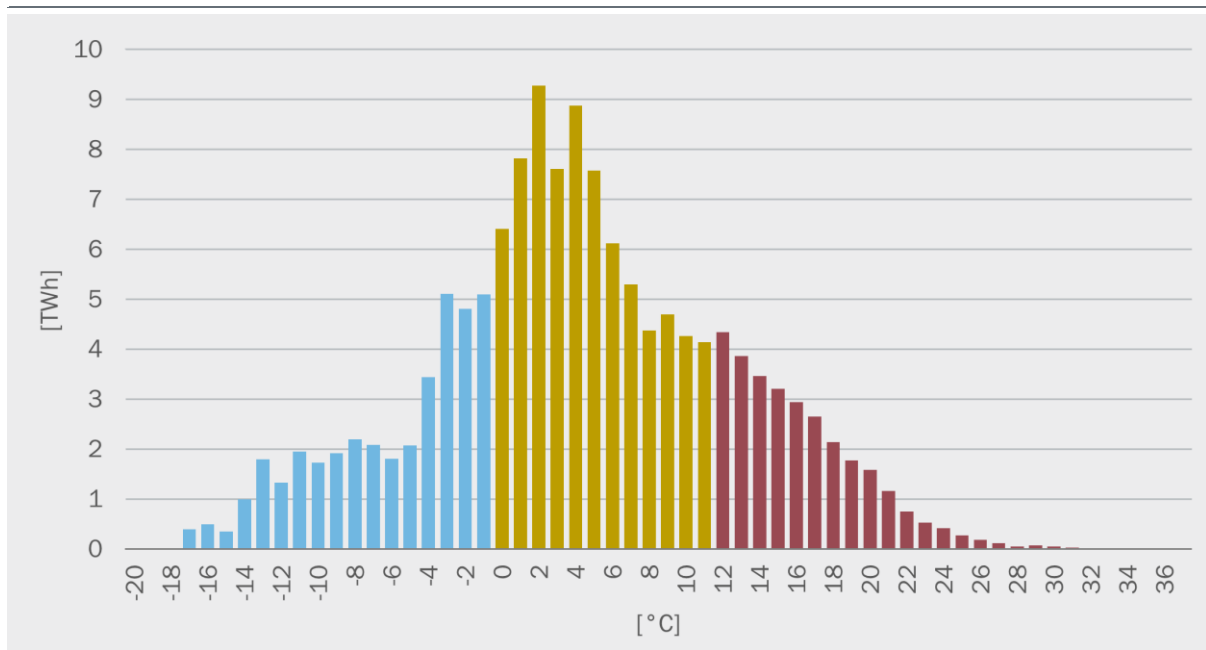


Quelle: (PrognosB, 2022)

© Prognos, 2023

Um diese Tendenz näher zu beleuchten, werden die stündlichen Daten der Residuallast mit den jeweils vorherrschenden Temperaturen verknüpft. So lässt sich die Stromresiduallast in Abhängigkeit der Temperatur darstellen – abgebildet in der folgenden Grafik.

Abbildung 3-6: Stromresiduallast im Szenario „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ in Abhängigkeit der Außentemperatur



Quelle: (PrognosB, 2022)

© Prognos, 2023

Es wird deutlich, dass etwa 25 % der Stromresiduallast bei Temperaturen unter 0°C anfällt (blaue Balken). Weitere 50 % der Last treten zu Stunden mit Temperaturen zwischen 0 °C und 11°C auf (gelbe Balken). Diese Erkenntnis unterstreicht, dass es häufig eine Überschneidung zwischen dem Wärmebedarf und der Stromresiduallast gibt und eine Nutzung der anfallenden Wärme durchaus möglich ist. Durch Nutzung von Wärmespeichern wird die Menge der nutzbaren Wärme durch Stromerzeugung für die Deckung der Stromresiduallast weiter erhöht.

Neben der reinen Nutzbarkeit der anfallenden Wärme hängt die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Wasserstoff in der Fernwärme an weiteren Faktoren – beispielsweise der Verfügbarkeit von Wasserstoff an den KWK-Standorten und den wirtschaftlichen Volllaststunden des Standorts. Diese Bedingungen müssen für jeden Standort individuell geprüft werden.

Dennoch legt die Auswertung der Szenarien nahe, dass auch bei steigenden Anteilen erneuerbarer Energien im Energiesystem der Einsatz von Wasserstoff in KWK-Anlagen in der Fernwärme – begrenzt durch die Stromresiduallast – durchaus sinnvoll sein kann. Grundvoraussetzung ist hier der stromgeführte Betrieb der Kraftwerke.

4 Dimensionen des Zielbilds

Damit die Fernwärme die tragende Rolle einnehmen kann, welche ihr in den beschriebenen Szenarien zugerechnet wird, sind grundlegende Schritte nötig. Diese Schritte lassen sich in zwei Hauptdimensionen einteilen:

- Die Vergrößerung des Versorgungsgebiets der Fernwärme
- Die Dekarbonisierung der Fernwärmenetze

4.1 Fernwärmeversorgungsgebiete vergrößern

In Abschnitt 3.1 und Abschnitt 3.2 wird deutlich, dass in nahezu allen Szenarien von einer starken Erhöhung der Fernwärmeerzeugung ausgegangen wird. Dies bedeutet, dass auch die Fernwärmeversorgungsgebiete vergrößert werden müssen, damit die erzeugte Wärme abgenommen werden kann. Damit die Fernwärme also ihren größtmöglichen Nutzen in der Wärmeversorgung erfüllen kann, ist es sinnvoll, das Fernwärmeversorgungsgebiet zu maximieren. Dafür ist nötig:

Die Erweiterung bestehender und den Ausbau neuer Netze

Zum Ausbau neuer Netze bzw. zur Erweiterung bestehender Netze sind Kriterien zu entwickeln, die eine effiziente Wärmeversorgung ermöglichen. Grundsätzlich gilt: Je höher die Wärmedichte, umso besser eignen sich die Gebiete für die zentrale Versorgung. Im Haupt-Szenario der Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045 wird eine Erschließung aller Gebiete mit einer Wärmedichte von mehr als 140 Megawattstunden pro Hektar (MWh/ha) zur Erreichung der 130 TWh an durch Wärmenetze bereitgestellte Endenergie im Jahr 2045 vorausgesetzt (Prognos, et al., 2022). In der Wärmedichte als Größe werden Trassenlängen nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Entwicklung eines Zielbilds für die Fernwärme ist ein geeigneter, praktikabler Indikator für die Vorauswahl von Gebieten, die sich für zentrale Wärmeversorgung präqualifizieren, von zentraler Bedeutung. Die „Wärmeliniedichte“ als Quotient aus der Wärmemenge, die innerhalb eines Leitungsabschnitts an die dort angeschlossenen Verbraucherinnen und Verbraucher abgesetzt wird, und der Länge dieses Leitungsabschnitts eignet sich gut als Indikator. Obwohl in manchen Bundesländern bereits Wärmekataster/-atlanten entwickelt worden sind, bleibt die Empirie auf bundesweiter Ebene lückenhaft. Um einen sinnvollen Zielwert der Wärmeliniedichte zur Erweiterung bestehender und neuer Netze entwickeln zu können, ist eine Verbesserung der Datenqualität und -zugänglichkeit, beispielsweise in Form eines Wärmenetzregisters, zwingend erforderlich. Eine Schnittstelle zum Gesetz der kommunalen Wärmeplanung ist in diesem Zusammenhang empfehlenswert.

Aus den Wärmeliniedichten kann sich das Anschlusspotenzial bestimmen lassen. Letzteres unterscheidet sich stark zwischen städtischen und ländlichen Gebieten. Das räumliche **Fernwärmeanschlusspotenzial** ist neben der Information über die ggf. bereits vorhandene Fernwärmeerzeugung und den Potenzialen der lokalen Erneuerbaren Energie (EE) und Abwärme, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird, ein weiterer essenzieller Indikator für das Zielbild

der Fernwärme. Einer Potenzialanalyse im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) zur Folge sind von den insgesamt 1.640 Verwaltungsgemeinden, die für eine leitungsgebundene Wärmeversorgung infrage kommen, jeweils 45 % als städtisch und 55 % als ländlich einzuordnen. Laut der gleichen Studie beträgt das Fernwärmeanschlusspotenzial der 45 % städtischen Gemeinden 90 % des gesamten Fernwärmepotenzials in TWh (ifeu, IREES, & Prognos, 2021). Es kann demzufolge festgehalten werden, dass die Erweiterung bestehender und neuer Netze überwiegend im urbanen bzw. dicht besiedelten Bereichen erfolgen und ggf. die räumlich umgebenden EE- und Abwärmepotenziale genutzt werden sollte.

Anzahl neuer Fernwärmeanschlüsse

Wie bereits unter Abschnitt 3.1 hergeleitet ist eine deutliche Zunahme der absoluten Zubaurate bei mit Fernwärme versorgten Gebäuden essenziell, um die Klimaziele im Gebäudesektor mittel- und langfristig erreichen zu können. Die Zubaurate soll zwischen dem Ist- und Soll-Zustand mittelfristig um einen Faktor 3 (bis 2030) und bis Faktor 5 langfristig (bis 2045) gesteigert werden.

4.2 Individuelle Dekarbonisierung der Fernwärmenetze

Neben der Vergrößerung des durch Fernwärme zu versorgenden Gebietes ist die Dekarbonisierung der Erzeugung innerhalb der Netze essenziell. Die in Abschnitt 3.3 dargestellte Vielfalt der möglichen Lösungen verdeutlicht, dass die Dekarbonisierung der Fernwärmeerzeugung eine komplexe Herausforderung darstellt, die eine maßgeschneiderte Herangehensweise erfordert. Im Folgenden werden verschiedene Aspekte beleuchtet, welche für die Dekarbonisierung sinnvoll sind.

Lokale, erneuerbare Wärmepotenziale und unvermeidbare Abwärmequellen ausschöpfen

Neben der Steigerung der Gebäudeanschlüsse und des Wärmenetzausbaus ist für eine zielkonforme Ausgestaltung auch die Dekarbonisierung von (bestehenden) Wärmenetzen erforderlich. Durch die Ausnutzung lokal verfügbarer Potenziale an erneuerbaren Energien bzw. unvermeidbarer Abwärme können Wärmenetze auch zur Energiesicherheit beitragen. Darüber hinaus reduziert die Nutzung der lokalen Potenziale den Bedarf zum Einsatz von ortsunabhängigen EE-Wärmepotenzialen (Biomasse und Wasserstoff). In allen betrachteten Szenarien wird von einem starken Ausbau der EE-Wärmeerzeugung (siehe Abschnitt 3.3) ausgegangen. Dennoch variiert die Verfügbarkeit lokaler Potenziale von Gemeinde zu Gemeinde sehr stark. Laut einer Analyse zum wirtschaftlichen Potenzial für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung im Auftrag des UBA (ifeu, IREES, & Prognos, 2021) können 506 städtische Gemeinden im Schnitt 24 % ihrer Fernwärmeversorgung mit ortsabhängigen Potenzialen (Solarthermie, oberflächennahe und Tiefengeothermie, Müllverbrennung, Abwärme aus Industrie und Kläranlagen) abdecken, während die restlichen 240 städtischen Gemeinden im Schnitt einen Anteil von 89 % schaffen. Nicht eingerechnet sind ortsunabhängige Potenziale, beispielsweise die Großwärmepumpen mit Luft als Wärmequelle, die eine klimaneutrale Wärmeversorgung überall sicherstellen können. Dennoch variieren die Möglichkeiten vor Ort stark und es kann daher keine pauschale EE-Quote für jedes Netz, sondern nur übergeordnet über alle Fernwärmenetze definiert werden. In diesem Zusammenhang ist ein Anteil von mindestens 40 % bzw. idealerweise 50 % erneuerbare Wärme und unvermeidbare Abwärme bis 2030 und nahezu 100 % des Fernwärmeerzeugungsmixes bis 2045 insgesamt anzustreben. Die individuellen Dekarbonisierungsoptionen und -pfade werden mithilfe der kommunalen Wärmeplanung und Transformationsplänen der jeweiligen Kommunen ausgelotet. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die vielen einzelnen Transformationspläne und kommunalen

Wärmeplanungen mit dem bundesweiten Zielbild rückzukoppeln, um das Gesamtziel nicht aus den Augen zu verlieren. Auch zum Gebäudeenergiegesetz ist in diesem Rahmen eine Schnittstelle herzustellen.

Lokalspezifische Wärmepotenziale durch ortsunabhängige Luftgroßwärmepumpen ergänzen

Da die lokalen Potenziale, wie bereits erwähnt, die vollständige Wärmeversorgung in der Regel nicht abdecken, bedarf es an zusätzlichen Technologien, die den Grund- und Spitzlastbedarf decken. Großwärmepumpen sind in allen einschlägigen Szenarien grundlegender Bestandteil der Fernwärmeversorgung (siehe Abschnitt 3.3) und sollen dort eingesetzt werden, wo lokale EE und Abwärmequellen fehlen.

Nutzung der in stromgeführten KWK-Anlagen anfallenden Wärme, um Effizienz beim Einsatz von Erdgas/Wasserstoff zu steigern

Die effiziente Nutzung von Wasserstoff ist ein viel diskutiertes Thema angesichts seiner begrenzten Verfügbarkeit. Auch in der Fernwärme bietet der Einsatz von grünem Wasserstoff interessante Möglichkeiten.

Insbesondere stromgeführte KWK-Anlagen offenbaren einen vielversprechenden Ansatz. Diese Anlagen – ebenso wie reine Kraftwerke – werden primär dazu dienen, die Residuallast im Stromnetz abzudecken. Die anfallende Wärme ist Nebenprodukt. Dennoch kann und sollte die zu Zeiten positiver Stromresiduallast erzeugte Wärme weitestgehend genutzt werden, um weitere Effizienzgewinne in der Nutzung des Wasserstoffs zu erreichen.

Neben der reinen Nutzbarkeit der anfallenden Wärme hängt die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Wasserstoff in der Fernwärme an weiteren Faktoren - beispielsweise der Verfügbarkeit von Wasserstoff an den KWK-Standorten und den wirtschaftlichen Volllaststunden des Standorts. Diese Bedingungen müssen für jeden Standort individuell geprüft werden.

Limitierter Einsatz von Biomasse unter Berücksichtigung der nationalen Biomassestrategie

Die Nutzung von Biomasse birgt zwar Potenziale, jedoch sind diese begrenzt und sollten daher mit Bedacht eingesetzt werden. Vorzugsweise sollte dabei Biomasse nur aus Abfall- oder Reststoffen genutzt werden, um eine nachhaltige und ressourcenschonende Energiegewinnung zu gewährleisten.

Eine Möglichkeit, Biomasse einzusetzen, besteht in **zentralen Feuerungsanlagen**. Im Vergleich zum dezentralen Bereich sind hier Filter für Feinstaub und andere Schadstoffe einfacher umzusetzen, was zu einer effektiven Emissionsreduktion führen kann. Zudem bieten zentrale Anlagen die Möglichkeit, negative Emissionen durch CO₂-Abscheidung zu generieren, ein Verfahren, das als BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) bekannt ist. Dies trägt dazu bei, den Kohlenstoffkreislauf zu schließen.

Wichtig ist jedoch, die **nationalen Biomassestrategien und kleinräumigen Potenziale** angemessen zu berücksichtigen. Eine sorgfältige Planung und Umsetzung sind notwendig, um ökologische und soziale Restriktionen zu beachten und negative Auswirkungen zu minimieren. Nur so kann eine effiziente Biomassennutzung unter nachhaltigem Ressourcenmanagement stattfinden.

Insgesamt gilt es also, die **begrenzten Potenziale von Biomasse** verantwortungsbewusst zu nutzen, vorrangig auf Abfall- und Reststoffe zu setzen und **in Kombination mit technologischen Lösungen (BECCS)** für eine umweltfreundliche Energieerzeugung einzusetzen.

Wärmenetze durch den Einsatz von Wärmespeichern und einem breiten Erzeugungsmix flexibilisieren

Wärmespeicher spielen eine entscheidende Rolle, wenn es um die Schaffung von Flexibilität in Wärmenetzen geht. Sie ermöglichen eine Entkopplung von Strompreissignalen von der aktuellen Wärmelast, was zu einer optimierten Nutzung von Ressourcen und einer erhöhten Effizienz führt.

Ein wichtiger Anwendungsfall liegt in der Speicherung der von in KWK-Anlagen erzeugten Wärme. In Zeiten positiver Stromresiduallast, in denen jedoch keine unmittelbare Wärmenachfrage besteht, kann die erzeugte Wärme gespeichert werden.

Dasselbe Prinzip gilt auch für Wärmepumpen und Power-to-Heat-Anlagen (PtH-Anlagen), welche sich nach dem Strompreis richten. In Zeiten geringer Strompreise kann so Wärme produziert werden, selbst wenn keine unmittelbare Wärmelast vorhanden ist.

Beide Anwendungsfälle verringern zum einen den Wärmegehaltungspreis innerhalb der Netze und erhöhen zum anderen die Flexibilität im Gesamtenergiesystem. Durch die effiziente Nutzung von Wärmespeichern und die gezielte Steuerung von Wärmepumpen und PtH-Anlagen können Phasen hoher erneuerbarer Stromerzeugung und geringer Last effektiv genutzt werden, wodurch das gesamte Energiesystem stabiler und ressourceneffizienter wird.

Zusätzlich ermöglichen saisonale Wärmespeicher, die im Sommer durch Solarthermie und günstigen Solarstrom geladen werden können, Wärme im Winter nutzbar zu machen. Auch ein breiter Technologiemix innerhalb der Netze erhöht die Flexibilität. So ergänzen sich beispielsweise KWK-Anlagen und Wärmepumpen/PtH-Anlagen sehr gut, wie im folgenden Punkt erläutert.

Systemdienlicher Einsatz der Wärmeerzeugungstechnologien

Wie bereits aufgeführt bietet sich bei der Dekarbonisierung von Wärmenetzen eine Vielfalt von möglichen Lösungen, die u. a. von regionalen Gegebenheiten stark abhängen. Auch wenn dies eine maßgeschneiderte Herangehensweise auf regionaler Ebene erfordert, werden an dieser Stelle Grundsätze zur optimalen Auswahl von Technologien bzw. Transformationsstrategien erarbeitet. Diese Grundsätze sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 4-1: Empfohlene Grundsätze für einen breiten Technologiemit in Wärmenetzen

Grundlast	Residuallast
Lokal verfügbare erneuerbare Wärmepotenziale	Großwärmepumpen und KWK
<ul style="list-style-type: none"> ■ Weitestgehende Nutzung lokaler EE- und Abwärmepotenziale (Geothermie, Müllverbrennung, Umweltwärme und unvermeidbare Abwärme) ■ Tiefe Geothermie und Abfall eignen sich gut zur Lastsicherung, insbesondere im Winter ■ Ausnutzung der Potenziale der unvermeidbaren Abwärme (Rechenzentren, Industrie etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ KWK-Anlagen folgen Stromresiduallast Wärmeseitig: ■ Bei positiver Wärmeresiduallast und positiver Stromresiduallast wird die Wärmelast vorwiegend mit KWK gedeckt ■ Bei positiver Wärmeresiduallast und negativer Stromresiduallast wird die Wärmelast vorwiegend elektrisch gedeckt

Quelle: Eigene Darstellung

© Prognos, 2023

Insbesondere für die Deckung der Wärmeresiduallast ergänzen sich KWK-Anlagen und Wärmepumpen bzw. PtH-Anlagen sehr gut:

- Wenn viel EE im Stromsystem erzeugt wird, sind die Netze tendenziell stark belastet und der Strompreis gering, die Großwärmepumpen decken in diesen Zeiten große Teile der Wärmelast und erhöhen den Nutzungsgrad der erneuerbaren Stromerzeugung.
- Wenn wenig erneuerbarer Strom im Stromsystem erzeugt wird, ist der Strombedarf und -preis tendenziell hoch. Die KWK deckt in dieser Zeit die Wärmelast und erzeugt dabei wertvollen Strom.

Temperaturniveaus von Wärmenetzen absenken

Niedrigere Temperaturen in Wärmenetzen bieten verschiedene Vorteile: Sie reduzieren den Energieverlust, ermöglichen eine effizientere Nutzung erneuerbarer Energiequellen, tragen zur Sicherheit bei und gewährleisten die Deckung verschiedener Wärmeforderungen:

- **Minimierung von Wärmeverlusten:** Ein niedrigeres Temperaturniveau in Wärmenetzen reduziert die Energiemengen, die während des Transports der Wärme verloren gehen. Dies trägt dazu bei, dass die Wärme effizienter von der Erzeugungsquelle zu den Verbraucherinnen und Verbrauchern gelangt.
- **Erfüllung von Wärmeforderungen:** Sowohl neu errichtete Wärmenetze als auch ältere Gebäude mit ineffizienter Wärmeabgabeinfrastruktur können ausreichend mit Wärme versorgt werden, wenn das Temperaturniveau bis zu 85°C beträgt. Selbst bei höheren Anforderungen, wie dem Bedarf an Dampf, ist es möglich, diese durch zusätzliche Wärmezufuhr an dezentralen Punkten zu erreichen.
- **Optimale Nutzung erneuerbarer Energiequellen:** Durch die Wahl eines niedrigeren Temperaturniveaus können erneuerbare Energiequellen, wie Wärmepumpen, Solarenergie und Geothermie, effektiver eingesetzt werden. Diese Quellen sind besser darauf ausgelegt, Wärme bei moderaten Temperaturen zu erzeugen.
- **Sicherheits- und Kostenvorteile:** Temperaturen unter 100°C werden aus Gründen der Sicherheit und der Kostenoptimierung bevorzugt. Durch die Begrenzung der Temperaturen

lassen sich potenzielle technische Probleme minimieren und Sicherheitsrisiken reduzieren, was zu einer wirtschaftlicheren Lösung beiträgt.

Als Richtgröße in der Literatur wird eine Vorlauftemperatur im Winter von maximal 85°C bei Neubau- bzw. 95 °C bei Bestandsnetzen empfohlen (ifeu, Adelphi, Pricewaterhousecoopers, Ecofys, & AEE, 2017).

Ausstieg aus Kohle, Öl und Erdgas

Um klimaneutrale Wärmenetze in 2045 zu erreichen, ist eine langfristige Ausstiegsstrategie aus den fossilen Energieträgern unvermeidlich. In diesem Zusammenhang wird die folgende Strategie für das Zielbild der Fernwärme empfohlen:

- Zeitnaher Ausstieg aus der Kohle
- Gleichzeitiger Ausstieg aus Öl
- Erdgasausstieg bzw. -reduzierung

Als erste Säule zum fossilen Ausstieg gilt es, aus der kohlenstoffintensiven Kohle möglichst bald auszusteigen. Aktuell speisen mehr als 45 kohlebetriebene Kraftwerke Wärme in die Netze ein, was aktuell rund 20 % der Nettowärmeerzeugung ausmacht (BDEW, 2023). Auch wenn der Öleinsatz nur noch eine kleine Rolle in Wärmenetzen spielt (ca. 1 % der Wärmeezeugung), soll der Ausstieg auch eingeleitet werden. Da Wärmenetze mit langen Investitionszyklen verbunden sind, sollen Fehlanreize für Investitionen in Erdgas unbedingt vermieden bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Dafür soll bei reinen Heizkraftwerken (HKW) kein Erdgas mehr eingesetzt bzw. ein schrittweiser Ausstieg eingeleitet werden. Sinnvoll ist es, Erdgas nur noch bei KWK-Anlagen bedingt einzusetzen.

5 Übersicht zum Zielbild der Fernwärme 2045

Zusammengefasst ergeben sich aus den Erkenntnissen der vorherigen Kapitel zwei Säulen, welche die nötigen Schritte zu einer zielführenden Entwicklung der Fernwärme zusammenfassen:

- Fernwärmeversorgungsgebiete ausweiten
- Individuelle Dekarbonisierung der Fernwärme

Tabelle 5-1: Zielbild Fernwärme 2045: Fernwärmeversorgungsgebiete ausweiten

Fernwärmeversorgungsgebiete ausweiten		Indikatoren	
		quantitativ	qualitativ
1	Erweiterung bestehender und Ausbau neuer Netze		✓ Identifikation von geeigneten Wärmelinien
2	Anzahl neuer Fernwärmeanschlüsse (Gebäudeanschlüsse)	✓	x3 mehr Zubaurate bis 2030 x5 mehr Zubaurate bis 2045

Quelle: Eigene Darstellung

© Prognos, 2023

Tabelle 5-2: Zielbild Fernwärme 2045: Individuelle Dekarbonisierung der Fernwärmenetze

Individuelle Dekarbonisierung der Fernwärmenetze		Indikatoren	
		quantitativ	qualitativ
1	Lokale, erneuerbare Wärmepotenziale und unvermeidbare Abwärmequellen ausschöpfen		✓
2	Lokalspezifische Wärmepotenziale durch ortsunabhängige Luftgroßwärmepumpen ergänzen		✓
3	Nutzung der in stromgeführten KWK-Anlagen anfallenden Wärme, um Effizienz beim Einsatz von Erdgas/Wasserstoff zu steigern		✓
4	Limitierter Einsatz von Biomasse unter Berücksichtigung der nationalen Biomassestrategie		✓
5	Wärmenetze durch den Einsatz von Wärmespeichern und einem breiten Erzeugungsmix flexibilisieren		✓
6	Systemdienlicher Einsatz der Wärmeerzeugungstechnologien		✓
7	Temperaturniveaus von Wärmenetzen absenken		✓
8	Ausstieg aus Kohle, Öl und Erdgas		✓

kommunal zu betrachten

6 Literaturverzeichnis

- AGFW. (2021). *Hauptbericht*. Abgerufen am 18.10.2023 von <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>
- Ariadne. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045*.
- BDEW. (14. August 2023). *Flexible Erneuerbare für die Fernwärme*. Abgerufen am 18.10.2023 von <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/generation/serie-zur-waermewende-teil-2-flexible-erneuerbare-fuer-die-energiewende/>
- BDI. (2021). *Klimapfade 2.0*. Bundesverband der Deutschen Industrie.
- BMWK. (2022). *Langfristszenarien 3: Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Fraunhofer ISI, consentec, ifeu, TU Berlin.
- BMWK, 8KU, AGFW, BDEW, BEE, Bundesverband Fernwärmeleitungen, B.KWK, BMWSB, BSW, Bundesverband Geothermie, BVES, BWP, DENEFF EDL_HUB, DGRV, DMB, Deutscher Städtetag, DGB, DUH, eco Verband, GdW, Rohrleitungsbauverband, Städte und Gemeindebund, VEDEC, ver.di., VKU, vzbv, ZIA. (2023). *Mehr Tempo bei der Transformation der Wärmeversorgung – Wärmenetze klimaneutral um- und ausbauen. Fernwärmegipfel*. Berlin: BMWK.
- dena. (2021). *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*. Deutsche Energie-Agentur GmbH.
- ifeu, & Fraunhofer ISI. (2022). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Energienachfrage Gebäudesektor*. Abgerufen am 18.10.2023 von https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/20221117_LFS3_Webinar_Gebaeude_Geraete_PHH_GHD.pdf
- ifeu, Adelphi, Pricewaterhousecoopers, Ecofys, & AEE. (2017). *Wärmenetzsysteme 4.0. Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme "Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen"*.
- ifeu, IREES, & Prognos. (2021). *Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung. Beitrag zur Berichtspflicht EnEff-RL, Artikel 14 Anhang VIII*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen am 18.10.2023 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-08-05_cc_54-2021_effiziente_waerme-kaelteversorgung.pdf
- Prognos, FIW München, ITG Dresden, ifeu, Öko-Institut, Adelphi, dena, BBH, EY Law. (2022). *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045*. Berlin. Abgerufen am 18.10.2023 von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebäudestrategie-klimaneutralitaet-2045.pdf?__blob=publicationFile&v=6

PrognosA. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut. Abgerufen am 18.10.2023 von https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf

PrognosB. (2022). *Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann*. Agora Energiewende, Prognos, Consentec. Abgerufen am 18.10.2023 von https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE_KNStrom2035/A-EW_264_KNStrom2035_WEB.pdf

PrognosC. (2022). *Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien*. Stiftung Klimaneutralität.