

FFE

Wärmenetze

Entwicklung der Wärmenetze und
deren Wärmeerzeuger in Deutschland



2022

Wärmenetze

Entwicklung der Wärmenetze und
deren Wärmeerzeuger in Deutschland

Herausgeber:



Forschungsstelle für
Energiewirtschaft e.V.
Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158121-0
Mail: info@ffe.de
Web: www.ffe.de

Abschlussbericht zum Projekt:

Wärmenetze

Entwicklung der Wärmenetze und deren Wärmeerzeuger in Deutschland

Veröffentlicht am:

27. Januar 2022

FfE-Auftragsnummer:

Amprion-06

Bearbeiter/in:

Tobias Schmid

Joachim Ferstl

Management FfE e.V.

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

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

Management FfE GmbH

Geschäftsführer:

Dr.-Ing. S. von Roon

Inhalt

1	Ausgangssituation	1
2	Zielsetzung	3
3	Methodischer Ansatz	4
4	Wärmeeinspeisung.....	5
4.1	Wärmestatistik in Deutschland	5
4.2	Szenarien.....	9
5	Zeitreihen.....	19
5.1	Temperaturdaten	19
5.2	Regressionsmodell.....	20
5.3	Postprozessierung der Wärmezeitreihen	23
5.4	Effekt der Gebäudesanierung	24
5.5	Wärmenetze der Industrie	29
6	Literatur	30
7	Anhang	32
7.1	Statistische Daten.....	32
7.2	Potenzial für Fernwärmenetze.....	37

1 Ausgangssituation

Vorgängergutachten

Im Rahmen des Gutachtens der FfE zum Thema „Flexibilisierung der Kraft-Wärme-Kopplung“ aus dem Jahr 2017 wurden bereits drei mögliche Entwicklungen der KWK-Anlagen und Wärmenetze für die Stützjahre 2030, 2035 und 2050 erstellt. Die Untersuchung umfasst sowohl den Fernwärmeabsatz als auch die Erzeugungsstruktur. Die drei Szenarien unterschieden sich dabei sowohl in der Höhe des Fernwärmeabsatzes, als auch in der hinterlegten Erzeugungsstruktur.

Die regionale Auflösung umfasste die 35 Wärmenetze in Abbildung 1-1. Die Wärmenetze bilden teilweise mehrere Gemeinden bzw. Städte umfassende Wärmenetzregionen (siehe *). Diese Wärmenetze bildeten 2012 rund 86 % des gesamten Wärmeabsatzes in Deutschland ab. Die übrigen Wärmenetze wurden als aggregiertes Wärmenetz abgebildet.

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

Abbildung 1-1: Detailliert betrachtete Fernwärmenetze

Folgende drei Szenarien wurden betrachtet:

Business as Usual (BAU)

Fortschreibung der aktuellen Energiepolitik; kein relevanter Ausbau der Wärmenetze; Nachverdichtung kompensiert Sanierung; Wandel der Wärmebereitstellung zu Erneuerbaren Energien

Negatives Klimaschutz-Szenario (MIN)

Keine forcierte Nachverdichtung; Ausbleibender Wandel der Wärmebereitstellung;

Positives Klimaschutz-Szenario (MAX)

Erweiterung und Verdichtung der Wärmenetze; Stärkere Integration von Erneuerbaren Energien in die Wärmebereitstellung; Ausbau von Geothermie, Solarthermie und Hochtemperatur-Wärmepumpe

Die Entwicklung des Fernwärmeabsatzes des Vorgängergutachtens ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

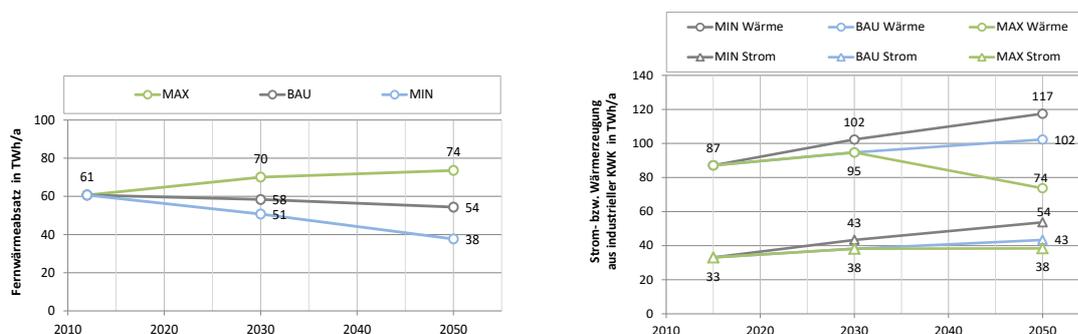


Abbildung 1-2: Szenarien aus dem Vorgängergutachten

AGORA Klimaneutrales Deutschland 2045

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ weist einen Weg zur Treibhausgasklimaneutralität bis 2045 auf und beschreibt eine Strategie unter Berücksichtigung von Investitionszyklen und Verhaltensveränderungen. Bereits im Jahr 2030 wird eine Treibhausgasreduktion um 65 % erreicht.

Im Gebäudesektor werden eine Sanierungsrate von 1,6 % pro Jahr, 6 Mio. Wärmepumpen und ein starker Ausbau der Wärmenetze angesetzt. Die Fernwärme wird zu einer grünen Fernwärme umgebaut und gewinnt insbesondere im urbanen Raum an Bedeutung. Die Fernwärmeerzeugung steigt unter diesen Annahmen von 125 TWh auf bis zu 166 TWh im Jahr 2045, siehe Abbildung 1-3. Dabei erfolgt die Erzeugung zu etwa gleichen Teilen aus Wasserstoff, Wärmepumpen und anderen Technologien wie Bioenergie, Abwärme, Geothermie oder Solarthermie.

Abbildung 21: Fernwärmeerzeugung

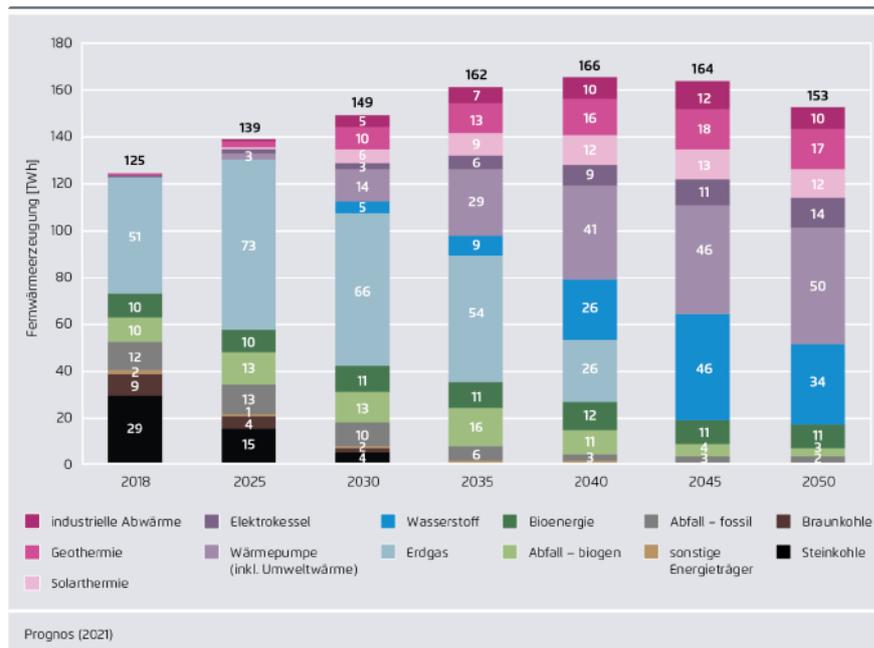


Abbildung 1-3: Fernwärmeerzeugung nach „Klimaneutrales Deutschland 2045“

Im Rahmen der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ erfolgt keine regional differenzierte Ausweisung der Ergebnisse. Diese Regionalisierung bildet eine der zentralen Aufgaben des vorliegenden Gutachtens.

2 Zielsetzung

Im Gutachten wird ein räumlich und zeitlich aufgelöster Datensatz zur Abbildung der Nah- und Fernwärme in Deutschland erzeugt. Dabei werden sowohl Wärmenetze der allgemeinen Versorgung, als auch der Industrie betrachtet. Die Wärmeeinspeisung wird differenziert nach verschiedenen Energieträgern. In drei Szenarien wird die Entwicklung der Wärmenetze bis 2050 in Anlehnung an die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ betrachtet. Die Zeitreihen der Fernwärmelast berücksichtigen verschiedene Sanierungsraten und daraus resultierende Heizgrenztemperaturen (die maximale Außentemperatur bis zu der ein Gebäude beheizt werden muss). Über das mitgelieferte Tool können auch Zeitreihen für andere Wetterjahre erstellt werden.

Ziel ist die Beantwortung der folgenden Forschungsfragen (orientiert am Lastenheft):

1. Wie entwickelt sich der Wärmebedarf der Wärmenetze in Deutschland in der öffentlichen und nichtöffentlichen Versorgung sowie in der Heizwärme? Welche Energieträger werden genutzt und wie viel Strom wird erzeugt? Was sind die wesentlichen Wirkzusammenhänge und Treiber der Wärmenetzversorgung?
2. Wie kann die jährliche Wärmenachfrage unter Berücksichtigung von Lastprofilen und Temperaturkennlinien in stundenscharfen Profilen dargestellt werden?
3. Wie entwickelt sich der derzeitige Bestand und weitere Wärmeerzeuger bis zum Jahr 2040? Wie sind diese regional zu verteilen?

3 Methodischer Ansatz

Im ersten Teil des Gutachtens wird die Wärmeeinspeisung in Wärmenetze für die Gegenwart und für verschiedene Szenarien bestimmt. Im zweiten Teil erfolgt die Berechnung der Zeitreihen. Auch hier für die Gegenwart und, unter Berücksichtigung der Gebäudesanierung, für die Zukunft.

Abbildung 3-1 stellt den nachfolgend beschriebenen methodischen Ansatz übersichtlich dar.

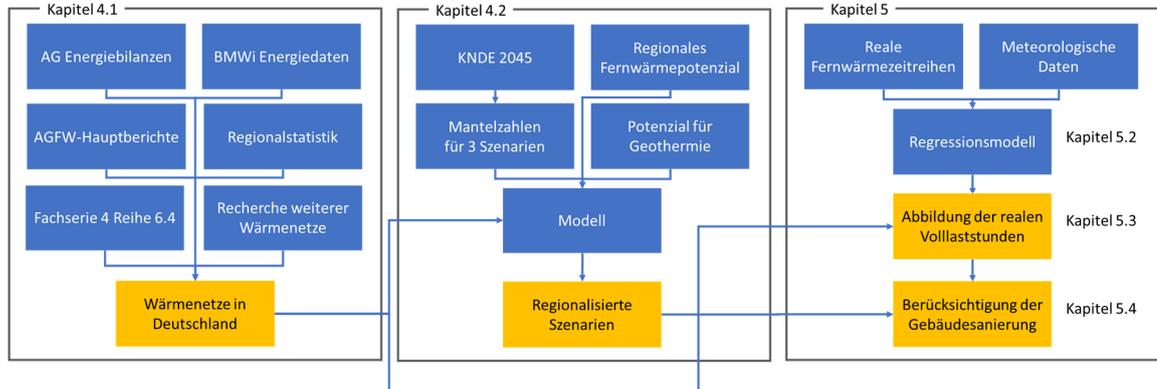


Abbildung 3-1: Aufbau des Gutachtens

Die aktuelle Einspeisung in Wärmenetze wird in Kapitel 4.1 durch eine umfangreiche Analyse zahlreicher statistischer Datenquellen abgebildet. Dabei bilden Quellen auf nationaler Ebene den Rahmen, kleinräumigere Quellen die regionale Verteilung ab. Durch den Abgleich der verschiedenen Daten wird ein konsistentes Bild der verschiedenen Wärmenetze gewährleistet. Wenn vorhanden, wird als Referenzjahr das Jahr 2019 gewählt, abweichend das aktuellste Jahr. Soweit verfügbar, werden auch Daten zu den verwendeten Energieträgern und der Jahreshöchstlast bzw. Volllaststunden kleinteilig erhoben.

Die drei Szenarien des Gutachtens orientieren sich an der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ und sind Gegenstand von Kapitel 4.2. Sie unterscheiden sich dabei unter anderem durch den Anteil der dezentralen bzw. zentralen Wärmeenerzeugung und den Sanierungsraten. Die Szenarien wurden zunächst auf nationaler Ebene definiert und im Nachgang regionalisiert. Dabei wird das regionale Fernwärmepotenzial berücksichtigt.

Die Berechnung der Zeitreihen in Kapitel 5 erfolgt für das Wetterjahr 2012 mit ERA5-Land-Daten. Das Modell ist ein Regressionsmodell und basiert auf historischen Zeitreihen einiger Fernwärmenetze in Deutschland, siehe Kapitel 5.2. Durch die nachgelagerte Anpassung der Zeitreihen in Kapitel 5.3 werden die realen Volllaststunden der Wärmenetze abgebildet.

Die Zeitreihen der Fernwärmenetze sind konsistent zu den Heizgrenztemperaturen des Gebäudebestands. Die fortschreitende Sanierung der Gebäude in den drei Szenarien führt zu einer Verschiebung der Heizgrenztemperaturen, diese Modellerweiterung wird in Kapitel 5.4 beschrieben.

Das Modell ist übertragbar auf verschiedene Wetterjahre. Die notwendigen Zeitreihen der Temperatur in regionaler Auflösung für die Jahre 1998 bis 2020 und ein entsprechendes Tool sind Gegenstand des Gutachtens.

4 Wärmeeinspeisung

In diesem Kapitel wird zunächst die Einspeisung von Wärme in Wärmenetze in Deutschland nach allgemeiner Versorgung und Industrie-Wärmenetze differenziert. Die Auswertung der AGFW-Hauptberichte ermöglicht eine regional aufgelöste Betrachtung für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung. Die Regionalstatistik vervollständigt dieses Bild um die Wärmenetze der Industrie. Die AGORA-Studie „Klimaneutrales Deutschland“ /PROG-01 21/ bildet die Basis für die drei Szenarien dieser Untersuchung.

4.1 Wärmestatistik in Deutschland

Die Zusammenführung verschiedener Statistiken ergibt einen umfassenden Blick auf die leitungsgebundene Wärmebereitstellung in Deutschland. Die zitierten Tabellen der Quellen sind auch im Anhang zu dieser Arbeit dargestellt.

AG Energiebilanzen

Die von der AG Energiebilanzen veröffentlichten Auswertungstabellen weisen für das Jahr 2019 (Stand 2020, AGEb-Tabelle 5.1) eine Wärmeerzeugung (netto) in KWK-Anlagen von insgesamt 225,8 TWh aus. Die Werte in der aktuell veröffentlichten Datei (Stand 2021, AGEb-Tabelle 5.1) liegen für das Jahr 2019 etwas niedriger. Die KWK-Wärmeerzeugung ist nach Energieträger differenziert.

Die KWK-Wärmeerzeugung entfällt zu ungefähr gleichen Teilen auf die allgemeine Versorgung (95,4 TWh_{th}, AGEb-Tabelle 5.3) und Industriekraftwerke (89,6 TWh_{th}, AGEb-Tabelle 5.4). Die Wärmeerzeugung der Industriekraftwerke wird im Weiteren den Industrie-Wärmenetzen zugewiesen. Die Einspeiser (40,7 TWh_{th}, AGEb-Tabelle 5.5) tragen zur gesamten KWK-Wärmeerzeugung bei, werden jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet.

Nicht Gegenstand der Statistik sind die Heizwerke, die Verluste in den Wärmenetzen und die Aufteilung nach Anwendungen.

BMWi Energiedaten

In der Gesamtausgabe der Energiedaten des BMWi, Tabellenblatt 7 ist der Endenergiebedarf für verschiedene Anwendungsbereiche und Sektoren ausgewiesen. Der Endenergiebedarf für Fernwärme beträgt – über alle Sektoren – 112 TWh_{th}. Unter Berücksichtigung eines KWK-Anteils von ca. 90 % (siehe AGFW-Hauptberichte) ergibt sich ein konsistentes Bild zu den AG Energiebilanzen, Wärmeerzeugung der allgemeinen Versorgung.

Knapp die Hälfte des Endenergieverbrauchs entfällt auf den Sektor Industrie (48,7 TWh_{th}), der Rest auf die Sektoren private Haushalte (52,7 TWh_{th}) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (10,6 TWh_{th}). Rund 54,8 TWh_{th} werden für die Bereitstellung von Raumwärme verwendet.

Wegen dem hohen Anteil des Sektors Industrie an der allgemeinen Versorgung liegen die Volllaststunden vieler Wärmenetze höher, als bei einer reinen Bereitstellung von Raumwärme zu erwarten wäre.

Die Quelle differenziert nicht nach Heizwerken und KWK-Anlagen und weist keine Netzverluste aus.

AGFW-Hauptberichte

Die AGFW Hauptberichte der Jahre 2007 bis 2019 liefern detaillierte Daten zu 284 Unternehmen. Da nicht jedes Jahr alle Unternehmen an den Hauptberichten teilnehmen, wurde für jedes Unternehmen

der aktuellste verfügbare Datensatz bestimmt. Dabei wurden unter anderem Änderungen bei den Unternehmensnamen berücksichtigt.

Der finale Datensatz bildet eine Wärmenetzeinspeisung von 102 TWh_{th} ab, dies entspricht etwa 90 % der allgemeinen Versorgung. Die Einspeisung wird nach Energieträgern und Technologie, Heißwasser- und Dampfnetz, KWK und Heizwerke differenziert. Einspeisung und die Abgabe an andere Wärmenetze werden differenziert ausgewiesen, somit können die Wärmeverluste des Wärmenetzes bestimmt werden. Die thermische Höchstlast ist ausgewiesen, die Vollbenutzungsstunden der Wärmenetze werden berechnet.

Bei der Aufbereitung der Daten wurde berücksichtigt, dass einige Wärmenetze ihre Wärme aus vorgelagerten Wärmenetzen beziehen. Somit konnte eine Doppelbilanzierung verhindert werden.

Die ausgewiesene Produktionswärme (ca. 6 TWh_{th}) wurde nicht mit dem hohen Anteil des Sektors Industrie nach BMWi Energiedaten (Industrie: 48,7 TWh_{th}) in Einklang gebracht und wird im Weiteren nicht verwendet. Falls im Rahmen von nachfolgenden Auswertungen notwendig, wurde der Anteil der Industriewärme über die Betrachtung der Vollbenutzungsstunden geschätzt. Bis 1.650 h/a wird keine Industriewärme bzw. Prozesswärme angesetzt. Höhere Vollbenutzungsstunden ergeben sich aus der Industrie- bzw. Prozesswärme. Mit dieser groben Abschätzung resultiert eine Wärmenetzeinspeisung von ca. 50TWh_{th}, dieser Wert ist – unter Berücksichtigung der Netzverluste – in guter Übereinstimmung mit den BMWi Energiedaten. Eine detaillierte Betrachtung war in dieser Untersuchung nicht notwendig.

Die AGFW-Hauptberichte liefern ein sehr detailliertes, wenn auch nicht vollständiges Bild der Fernwärmenetze der allgemeinen Versorgung.

Nicht-AGFW Wärmenetze der allgemeinen Versorgung

Nicht alle Wärmenetze sind über die AGFW-Hauptberichte erfasst. Aus der Differenz zwischen den BMWi-Energiedaten (alle Wärmenetze der allgemeinen Versorgung) und den AGFW-Hauptberichten ist die Wärmenetzeinspeisung in Nicht-AGFW-Wärmenetze der allgemeinen Versorgung bestimmt.

Für die Verortung wird das regional aufgelöste Fernwärmepotenzial verwendet. Dieses wurde – unter anderem – im Rahmen von /SCHM/ und /COP4EE/ erstellt und verfeinert. Die Daten des Zensus-Atlas, statistische Daten zum Gebäudebestand und der Versiegelung werden zu einem Fernwärmepotenzialraster kombiniert. Dieses wird auf Gemeindeebene aggregiert, siehe Abbildung 4-1, und mit den bestehenden Wärmenetzen nach AGFW Hauptbericht abgeglichen. Die meisten Gebiete mit hohem Fernwärmepotenzial korrelieren mit den Wärmenetzen der AGFW (dargestellt als Säulen). Gemeinden mit hohem Potential und fehlenden Wärmenetz werden zur nationalen Bilanz fehlenden Wärmenetzeinspeisungen verortet.

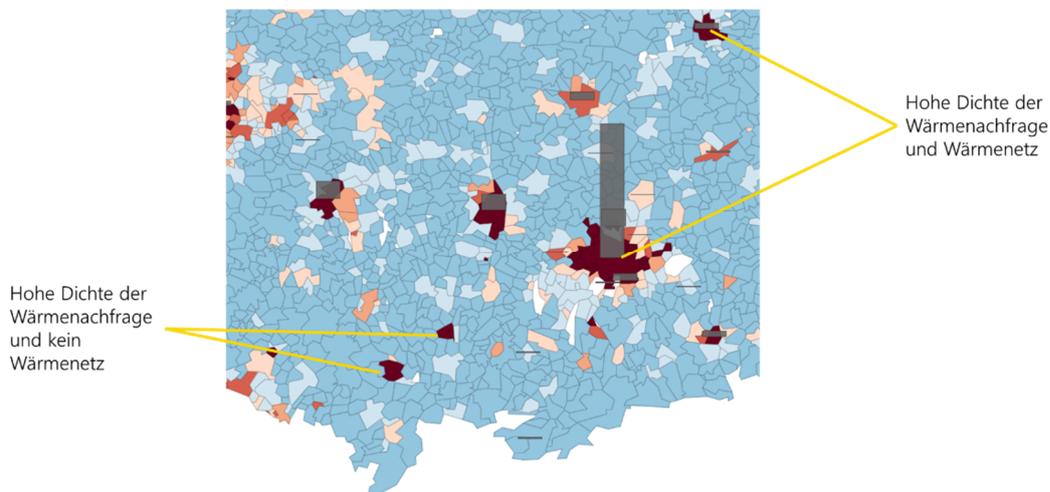


Abbildung 4-1: Fernwärmepotenzial und nach AGFW bereits erfasste Wärmenetze

Regionalstatistik zu Industrie-Wärmenetze

Die AG Energiebilanzen beziffern bereits die KWK-Wärmeerzeugung der Industrierwärmenetze auf nationaler Ebene. Die regionale Auflösung ergibt sich durch die Tabelle 43531-01-02-4 der Regionalstatistik (<https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/>).

Die Daten der Regionalstatistik sind nicht vollständig veröffentlicht. Einige Informationen unterliegen der Geheimhaltung, bzw. werden nicht genannt um eine Rückrechnung auf andere, geheim zuhaltende Informationen zu vermeiden. In DemandRegio wurde diese Statistik aufbereitet und als offener Datensatz veröffentlicht. Die langjährige Erfassung der Statistik, eigene Recherchen sowie dem Abgleich mit Beschäftigtenzahlen je Landkreis und Wirtschaftszweig ergeben ein vollständiges Bild der industriellen Wärmenetze.

Fachserie 4 Reihe 6.4

Destatis veröffentlicht die Fachserie 4 Reihe 6.4 zum Thema „Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden“. Die Statistik beschreibt die Wärme- und -Stromerzeugung aus industriellen KWK-Anlagen, sowie reine Stromerzeugungsanlagen und Heizwerke.

In Tabelle 2.1 wird eine Wärmeerzeugung von 99,4 TWh_{th} und eine Stromerzeugung von 53,4 TWh_{el} ausgewiesen. Hiervon entfallen 88,7 TWh_{th} und 33,0 TWh_{el} auf KWK-Anlagen. Diese Werte entsprechen exakt den Angaben aus den AG Energiebilanzen zum Stand der Berichtserstellung.

Die Angaben aus der Fachserie 4 Reihe 6.4 ergänzen die industriellen Wärmenetze um die Heizwerke. Analog zu den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung trägt auch hier der KWK-Anteil an der Wärmebereitstellung ca. 90 %.

Regionalisierung

Die Aufbereitung verschiedener Quellen resultiert in verschiedenen regionalen Auflösungen der Zwischenergebnisse. Diese werden nachfolgend dargestellt, im finalen Datensatz wurden alle Ergebnisse auf Ebene der Wärmenetze bzw. Bundesländer aggregiert. Die regionalisierten Wärmenetze sind in Abbildung 4-2 dargestellt.

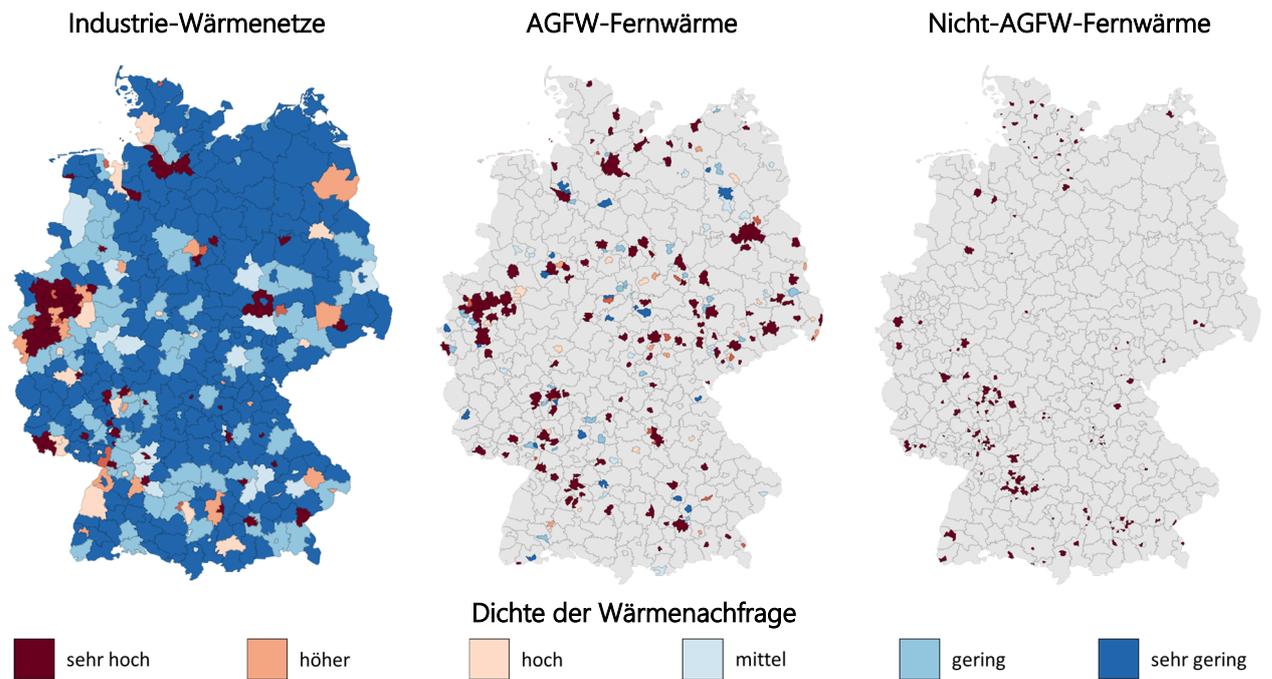


Abbildung 4-2: Wärmenetze in Deutschland

Industrie-Wärmenetze gibt es in allen Landkreisen, die Verteilung zeigt jedoch ausgeprägte Schwerpunkte. Die AGFW-Fernwärmenetze decken das gesamte Bundesgebiet mit hoher räumlicher Auflösung ab. Die Nicht-AGFW-Fernwärmenetze entsprechen ca. 10 % der Wärmenetzeinspeisung der allgemeinen Versorgung und wurden über ein Modell in Abhängigkeit des Fernwärmepotenzials verteilt.

Zusammenfassung

Insgesamt wurden fünf statistische Quellen sowie ein Ansatz zur Regionalisierung der Nicht-AGFW-Wärmenetze der allgemeinen Versorgung kombiniert. Die verschiedenen Statistiken ergeben ein weitestgehend konsistentes Bild der leitungsgebundenen Wärmebereitstellung in Deutschland. Abbildung 4-3 gibt dieses Bild wieder. Dabei ist zu beachten, dass die verschiedenen Statistiken auf unterschiedlichen Jahren basieren, woraus sich Differenzen ergeben.

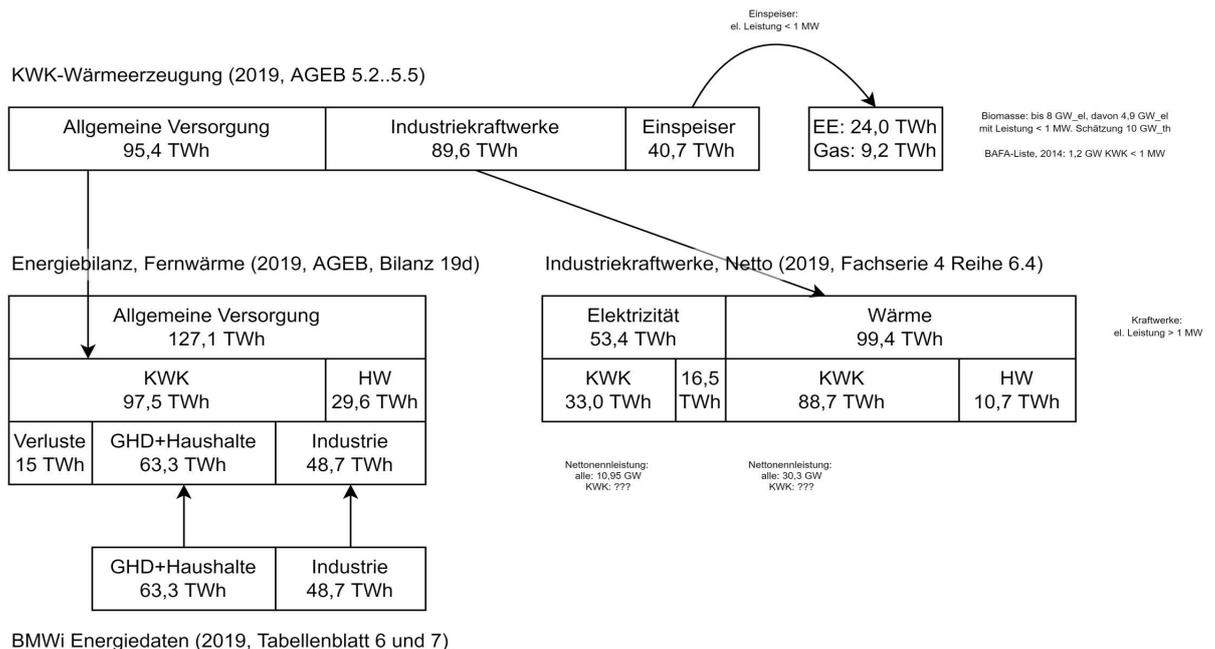


Abbildung 4-3: Leitungsgebundene Wärmebereitstellung in Deutschland

4.2 Szenarien

Diese Untersuchung soll unterschiedliche Entwicklungspfade für die leitungsgebundene Wärmebereitstellung aufzeigen. Die Erreichung der Klimaschutzziele bis 2045 ist eine wichtige Randbedingung. Da keine vollständige Abbildung des Energiesystems geplant ist, werden die Ergebnisse der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ als Referenz gewählt, daraus drei Szenarien abgeleitet und diese schließlich kleinteilig regionalisiert.

Szenarien nach Klimaneutrales Deutschland 2045

In der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (KNDE2045) von Prognos, Öko-Institut und Wuppertal Institut wird ein Pfad zur Erreichung der Klimaschutzziele bis 2045 beschrieben. „Der Pfad ist realistisch, das Ziel wird innerhalb der üblichen Investitions- und Lebenszyklen sowie unter Wahrung von Wirtschaftlichkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz erreicht.“ /PROG-01 21/. Die Maßnahmen adressieren die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Industrie, Gebäude, Landwirtschaft und Abfall.

Die Sanierungsrate im Gebäudesektor beträgt 1,6 % pro Jahr, 15 Mio. Wärmepumpen werden bis zum Jahr 2045 installiert und es erfolgt ein starker Ausbau der Wärmenetze. Die drei Szenarien in dieser Untersuchung orientieren sich für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung an diesen Ergebnissen. Abbildung 4-4 stellt die Zahlen für die Fernwärmenetze der allgemeinen Versorgung nach Szenario „KNDE2045“ dar.

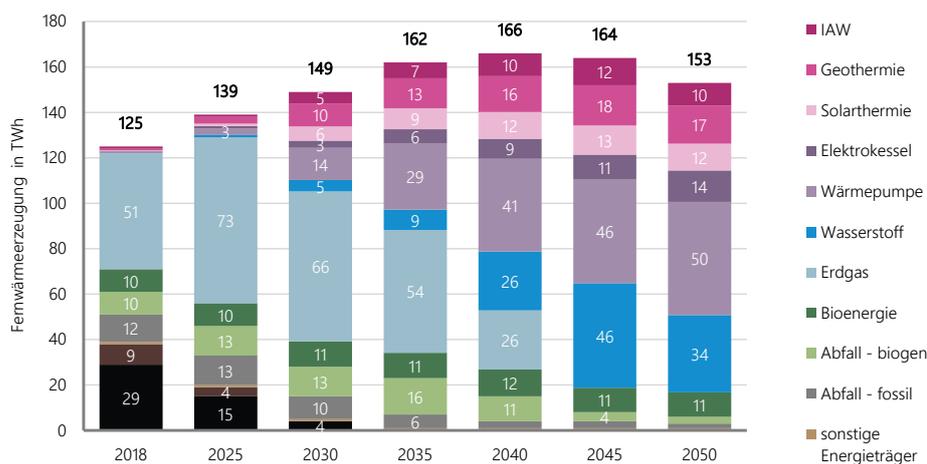


Abbildung 4-4: Fernwärmeerzeugung der allgemeinen Versorgung, Szenario „KNDE2045“; eigene Darstellung; Zahlen nach /PROG-01 21/

Die Darstellung der industriellen Wärmenetze berücksichtigt ebenfalls Ergebnisse der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“. Die Dampfbereitstellung aus Wasserstoff, KWK-Anlagen wird durch Elektrodenkessel und Hochtemperaturwärmepumpen sowie klimafreundliche Energieträger substituiert. Diese Annahmen werden auf die Industrie-Wärmenetze in der vorliegenden Untersuchung übertragen. Der industrielle Endenergieverbrauch als der der allgemeinen Fernwärmeversorgung (/PROG01 21/, Abbildung 25) sinkt von 49 TWh auf 22 TWh. Diese Zahlen wurden für die allgemeine Versorgung bestimmt, werden nachfolgend aber auch für die Industrie-Wärmenetze übernommen. Zudem entspricht der Rückgang von rund 50 TWh_{th} der aktuellen Wärmebereitstellung aus KWK-Anlagen in den Wirtschaftszweigen C17 und C20 (Papier, Pappe, chemische Erzeugnisse). Diese Wärme-/Dampfbereitstellung wird nach „KNDE2045“ durch Elektrodenkessel und Hochtemperatur-Wärmepumpen ersetzt.

Der Einsatz von Erneuerbaren Energien und sonstigen Energieträgern wurde als konstant angesetzt. Die Energieträger Erdgas, Mineralöle, Braunkohle und Steinkohle gehen bis 2040 linear zurück auf den Wert

Null. Wasserstoff liefert den verbleibenden Anteil der Wärmebereitstellung. Die Wärmebereitstellung durch Elektrodenkessel und Wärmepumpen wird nicht den industriellen Wärmenetzen zugeordnet.

Abbildung 4-5 stellt die Zahlen für die Industrie-Wärmenetze in Anlehnung an das Szenario „KNDE2045“ dar.

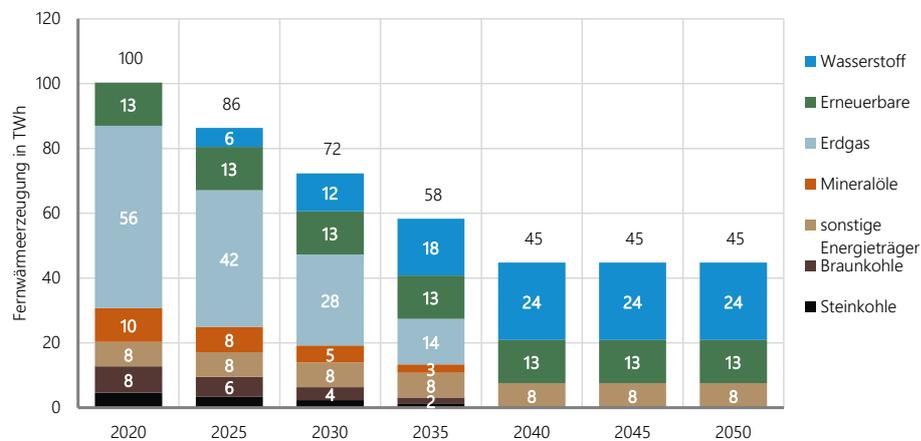


Abbildung 4-5: Industrie-Wärmenetze, Szenario in Anlehnung an „KNDE2045“; eigene Darstellung; Zahlen nach /PROG-01 21/

Szenarien der Untersuchung: Allgemeine Versorgung

Aus dem Szenario „KNDE2045“ werden die drei Szenarien dieser Untersuchung entwickelt. Die resultierenden Szenarien stellen abweichende Entwicklungen zum Szenario „KNDE2045“ dar, sollen aber weiterhin eine Erreichung der Klimaschutzziele ermöglichen. Dies konnte nicht explizit im Rahmen dieser Untersuchung überprüft werden.

Im Szenario „Trend“ werden folgende Annahmen für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung getroffen:

- Geringere Sanierungsrate: 1,0 % pro Jahr
- Leichter Rückgang des Wärmebedarfs der Gebäude
- Nachverdichtung kompensiert den rückläufigen Fernwärmeabsatz in Folge der Gebäudesanierung
- Wärmebereitstellung aus Abfall, Braunkohle, Steinkohle und sonstigen Energieträgern entspricht dem Szenario „KNDE2045“
- Wärmebereitstellung aus den anderen Energieträgern entspricht den Anteilen im Szenario „KNDE2045“
- Zur Erreichung der Klimaschutzziele sind Gebäude außerhalb von wärmenetzversorgten Gebieten stärker zu sanieren oder verstärkt auf CO₂-freie Wärmeerzeugungstechnologien bzw. Energieträger umzustellen.

Das Szenario „Zentral“ entspricht für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung dem Szenario „KNDE2045“:

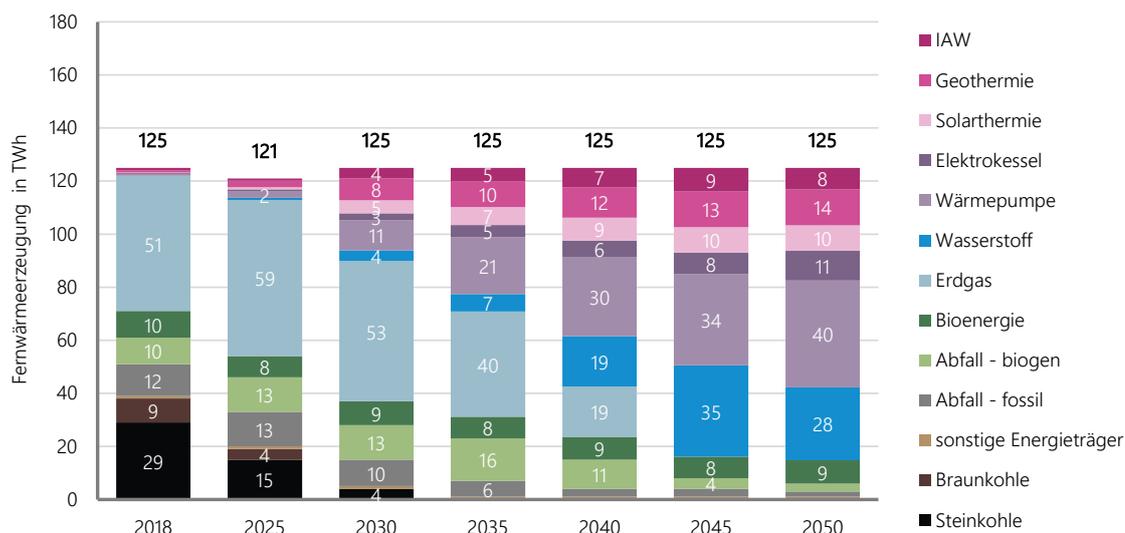
- Sanierungsrate: 1,5 bis 1,75 % pro Jahr
- Deutlicher Rückgang des Wärmebedarfs der Gebäude
- Hohe Nachverdichtung zur Erreichung des Fernwärmeabsatzes
- Wärmebereitstellung nach Energieträgern entspricht dem Szenario „KNDE2045“
- Die Klimaschutzziele werden wie im Szenario „KNDE2045“ erreicht.

Im Szenario „Dezentral“ werden folgende Annahmen für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung getroffen:

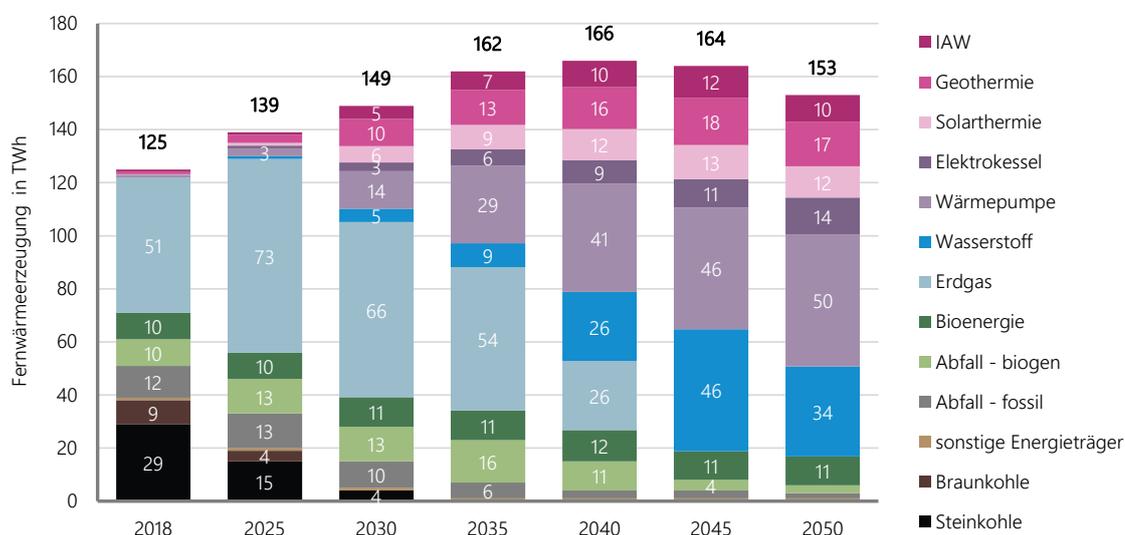
- Höhere Sanierungsrate: 1,5 bis 2,0 % pro Jahr
- Starker Rückgang des Wärmebedarfs der Gebäude
- Nachverdichtung basiert auf dem Szenario „Trend“
- Wärmebereitstellung aus Abfall, Braunkohle, Steinkohle und sonstigen Energieträgern entspricht dem Szenario „KNDE2045“
- Wärmebereitstellung aus den anderen Energieträgern entspricht den Anteilen im Szenario „KNDE2045“

Abbildung 4-6 stellt die Fernwärmeerzeugung der allgemeinen Versorgung nach Energieträgern für die drei Szenarien der Untersuchung dar. Die größte Fernwärmeerzeugung wird im Szenario „Zentral“ durch einen umfassenden Ausbau der Wärmenetze erreicht. Im Szenario „Dezentral“ resultiert die geringste Fernwärmeerzeugung, da zum einen der Gebäudebestand besser saniert wird, zum anderen die bestehenden Wärmenetze weniger ausgebaut werden. Im Szenario „Trend“ gleichen sich die Effekte der geringeren Gebäudesanierung und dem geringeren Ausbau der Wärmenetze aus, so dass die Fernwärmeerzeugung nahezu konstant bleibt.

Szenario „Trend“



Szenario „Zentral“



Szenario „Dezentral“

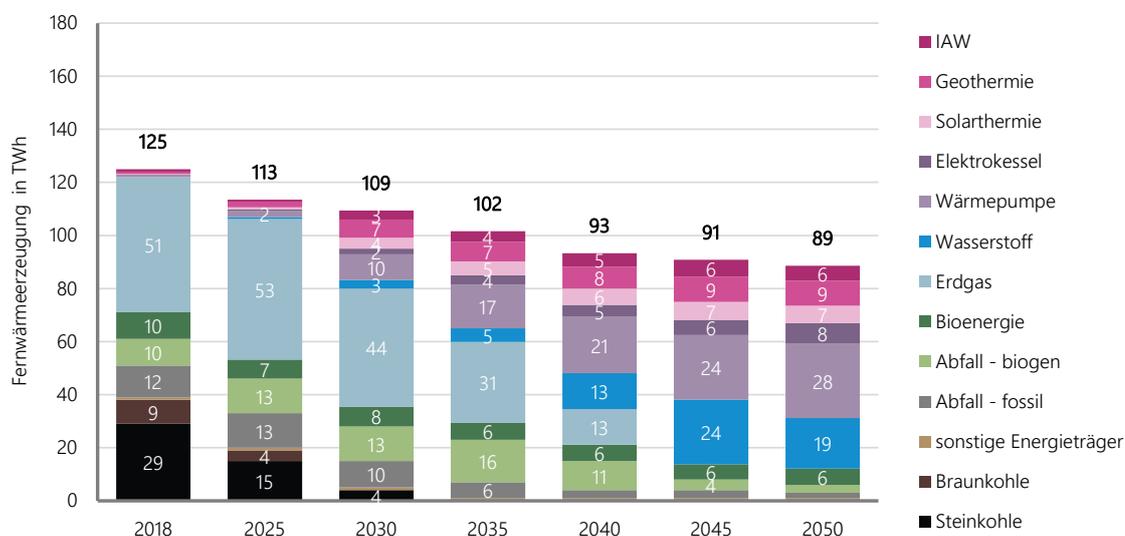


Abbildung 4-6: Mantelzahlen der drei Szenarien für die allgemeine Versorgung

Szenarien der Untersuchung: Industrielle Wärmenetze

Das Szenario „KNDE2045“ ist Basis für die Entwicklung von drei Szenarien für die vorliegende Studie. Die resultierenden Szenarien stellen abweichende Entwicklungen zum Szenario „KNDE2045“ dar, sollen aber weiterhin eine Erreichung der Klimaschutzziele ermöglichen. Dies konnte nicht explizit im Rahmen dieser Untersuchung überprüft werden.

Im Szenario „Trend“ werden folgende Annahmen für die industriellen Wärmenetze getroffen:

- Rückgang der Fernwärmeerzeugung nur halb so hoch wie im Szenario „KNDE2045“
- Die Wärmebereitstellung aus Steinkohle, Braunkohle, Mineralöle, Erneuerbare und sonstige Energieträger entspricht dem Szenario „KNDE2045“
- Verzögerter Ausstieg aus der Wärmebereitstellung aus Erdgas
- Wärmebereitstellung aus Wasserstoff zur Deckung der restlichen Fernwärmeerzeugung

Das Szenario „Zentral“ entspricht für die industriellen Wärmenetze dem Szenario „KNDE2045“:

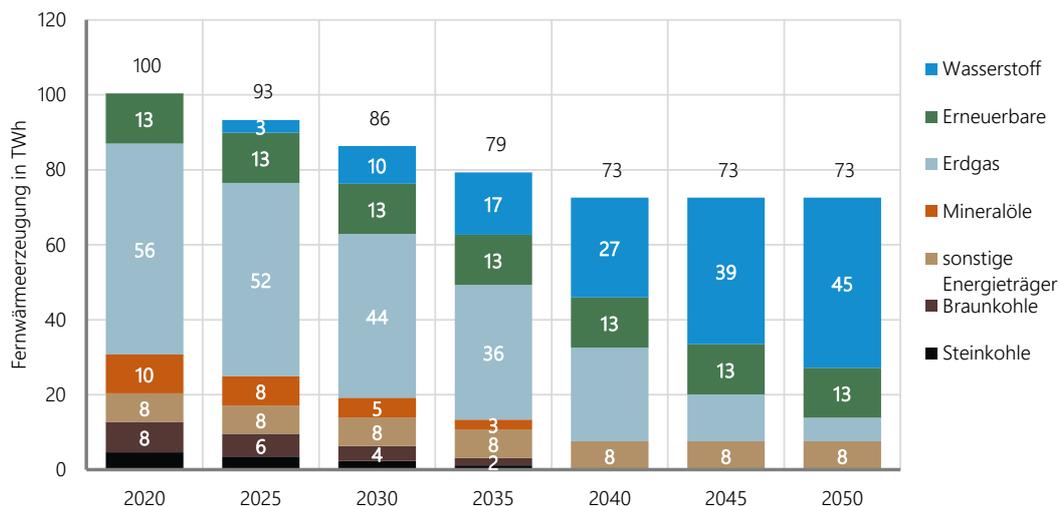
- Rückgang der Fernwärmeerzeugung berücksichtigt den Entfall von KWK-Anlagen zur Dampfbereitstellung in den Wirtschaftszweigen C17 und C20 (Papier, Pappe, chemische Erzeugnisse) mit einer KWK-Wärmebereitstellung von 50 TWh_{th}.
- Wärmeerzeugung aus Erdgas, Mineralöle, Braunkohle und Steinkohle geht bis 2040 linear auf den Wert Null zurück
- Wärmeerzeugung aus Erneuerbaren und sonstigen Energieträgern ist konstant
- Wärmebereitstellung aus Wasserstoff zur Deckung der restlichen Fernwärmeerzeugung

Im Szenario „Dezentral“ werden folgende Annahmen für die industriellen Wärmenetze getroffen:

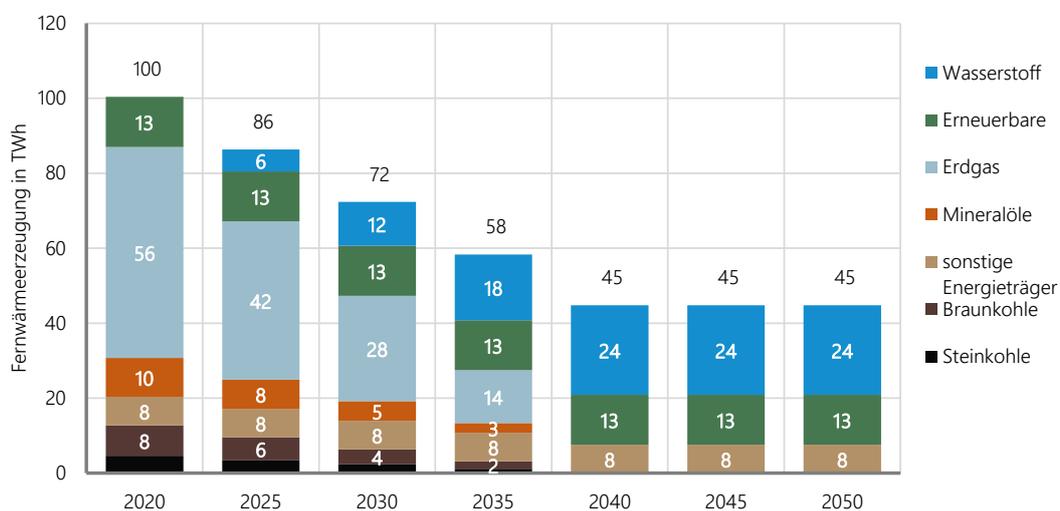
- Stärkerer Rückgang durch den Entfall weiterer KWK-Anlage im Vergleich zum Szenario „Zentral“
- Wärmeerzeugung aus Erdgas, Mineralöle, Braunkohle und Steinkohle geht bis 2040 linear auf den Wert Null zurück
- Wärmeerzeugung aus Erneuerbaren und sonstigen Energieträgern ist konstant
- Wärmebereitstellung aus Wasserstoff zur Deckung der restlichen Fernwärmeerzeugung

Abbildung 4-7 stellt die industrielle Fernwärmeerzeugung nach Energieträgern für die drei Szenarien der Untersuchung dar. Die größte Fernwärmeerzeugung wird – analog zu den Szenarien der allgemeinen Versorgung – im Szenario „Dezentral“ erreicht. Hier jedoch nicht durch die geringe Nachverdichtung, sondern durch die verstärkte Umstellung der Dampfbereitstellung von KWK-Anlagen hin zu Elektrodenkessel, Hochtemperaturwärmepumpen und CO₂-freien Energieträgern. Im Szenario „Trend“ werden weniger KWK-Anlagen ersetzt, die Wärmebereitstellung aus Wasserstoff und Erdgas ist höher. Das Szenario „Zentral“ entspricht dem Szenario „KNDE2045“.

Szenario „Trend“



Szenario „Zentral“



Szenario „Dezentral“

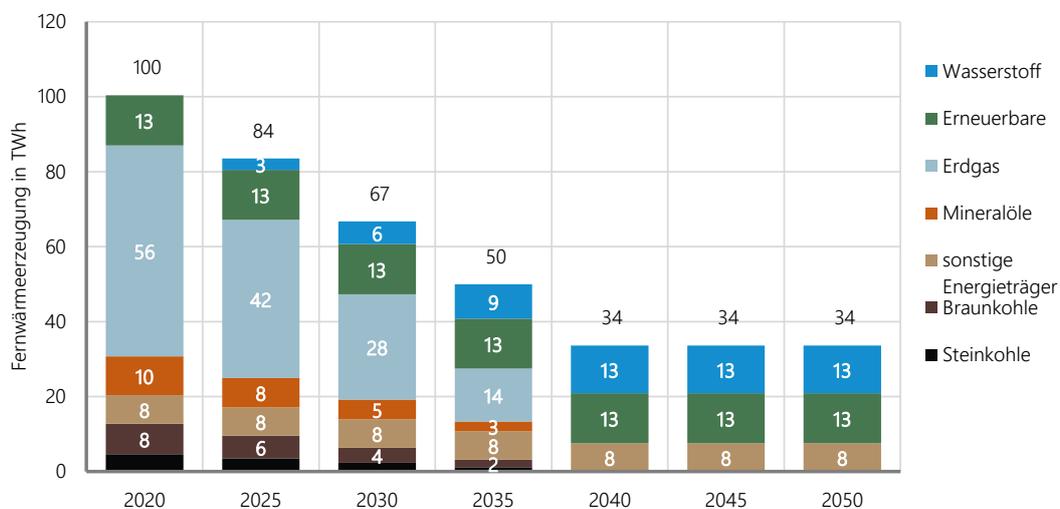


Abbildung 4-7: Mantelzahlen der drei Szenarien für die industriellen Wärmenetze

Regionalisierung

Für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung und der Industrie gibt es drei Szenarien zur Fernwärmeeinspeisung differenziert nach Energieträgern. Die bestehenden Wärmenetze der allgemeinen Versorgung liegen auf Ebene der Gemeinden bzw. Wärmenetze vor und weisen die Fernwärmeeinspeisung differenziert nach Energieträgern aus. Für die industriellen Wärmenetze ist die regionale Auflösung die Landkreis-Ebene, die Fernwärmeerzeugung ist nicht nach Energieträgern differenziert.

Die Regionalisierung berücksichtigt folgende Aspekte:

- Fernwärmenetz der allgemeinen Versorgung
 - Die aktuellen Anteile Prozesswärme und Raumwärme je Wärmenetz
 - Die aktuelle Wärmeerzeugung nach Energieträger
 - Die Entwicklung des Wärmebedarfs der Wohngebäude
 - Das regionale Fernwärmepotenzial für den Ausbau der Wärmenetze
- Wärmenetze der Industrie
 - Die aktuelle Wärmeerzeugung nach Energieträger aus nationalen Statistiken
 - Die aktuelle Wärmeerzeugung nach Energieträger von benachbarten Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung

Die Umsetzung für Wärmenetze der allgemeinen Versorgung und Industrie wird nachfolgend beschrieben und die Ergebnisse an exemplarischen Wärmenetzen visualisiert. Die drei Wärmenetze sind:

- Flensburg: Eine Region mit einem sehr hohen Anschlussgrad an das Wärmenetz
- Hamburg: Ein Wärmenetz mit einem hohen Anteil Steinkohle an der Erzeugung
- Berlin: Ein großes Wärmenetz mit vielen verschiedenen Energieträgern

Allgemeine Versorgung

Die Regionalisierung berechnet für jedes Stützjahr die resultierende Wärmenetzeinspeisung je Energieträger und Wärmenetz. Abbildung 4-8 zeigt den schematischen Modellablauf. Die Gebäudesanierung reduziert den bestehenden Wärmeabsatz. Die Differenz zur Mantelzahl des Szenarios ergibt den Wärmenetzausbau auf nationaler Ebene. Die Regionalisierung erfolgt mit den verfügbaren Potenzialen. Die resultierende Wärmenetzeinspeisung ergibt sich aus der verbliebenen Wärmenetzeinspeisung und dem Ausbau der Wärmenetze. Das Verfahren wird iterativ für alle Stützjahre angewendet.

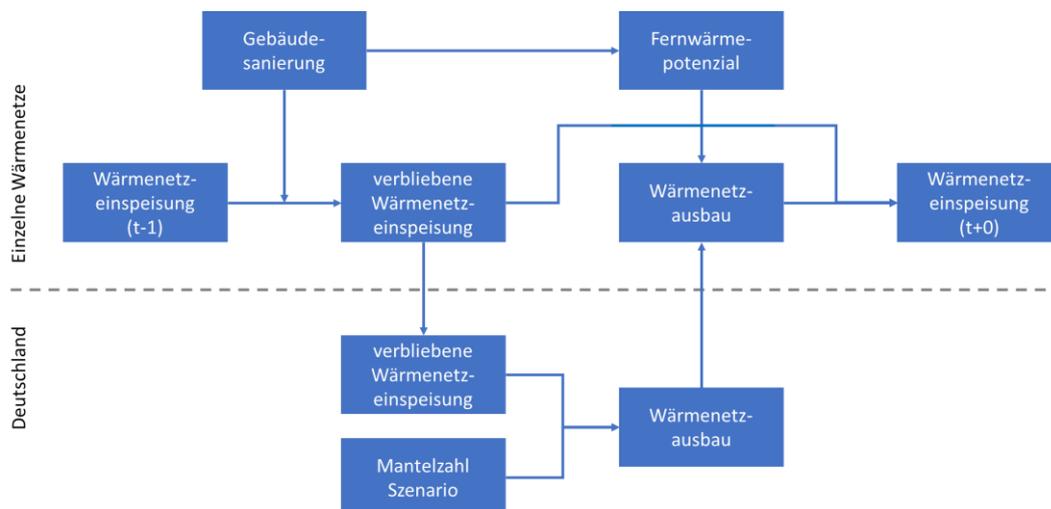


Abbildung 4-8: Berechnung der Wärmenetzeinspeisung

Im Anschluss wird die nach Energieträgern differenzierte Wärmenetzeinspeisung berechnet, siehe schematischer Modellablauf in Abbildung 4-9. Die bestehende Wärmenetzeinspeisung je Energieträger ($t-1$) wird dabei proportional zur Entwicklung der gesamten Wärmeeinspeisung und zur relativen Entwicklung der Wärmenetzeinspeisung des Energieträgers auf nationaler Ebene reduziert. Die relative Veränderung ist auf einen maximalen Wert von eins beschränkt, somit ist die vorläufige Wärmenetzeinspeisung je Energieträger ($t-0$) immer kleiner der Wärmenetzeinspeisung je Energieträger ($t-1$).

Nach diesem Schritt resultiert in allen Wärmenetzen eine ungedeckte Wärmenetzeinspeisung. Auf nationaler Ebene resultiert eine noch nicht verteilte Wärmenetzeinspeisung je Energieträger. Diese noch nicht verteilte nationale Wärmenetzeinspeisung je Energieträger wird proportional zur ungedeckten Wärmenetzeinspeisung verteilt.

Folgende energieträgerspezifische Besonderheiten sind abgebildet:

- Kein Zubau von Steinkohle oder Braunkohle
- Keine Wärmenetzeinspeisung aus Geothermie an geografisch nicht geeigneten Standorten
- Industrielle Abwärme, Berechnung der „vorläufigen Wärmenetzeinspeisung“: maximal eine Verdreifachung der bestehenden Wärmenetzeinspeisung aus industrieller Abwärme

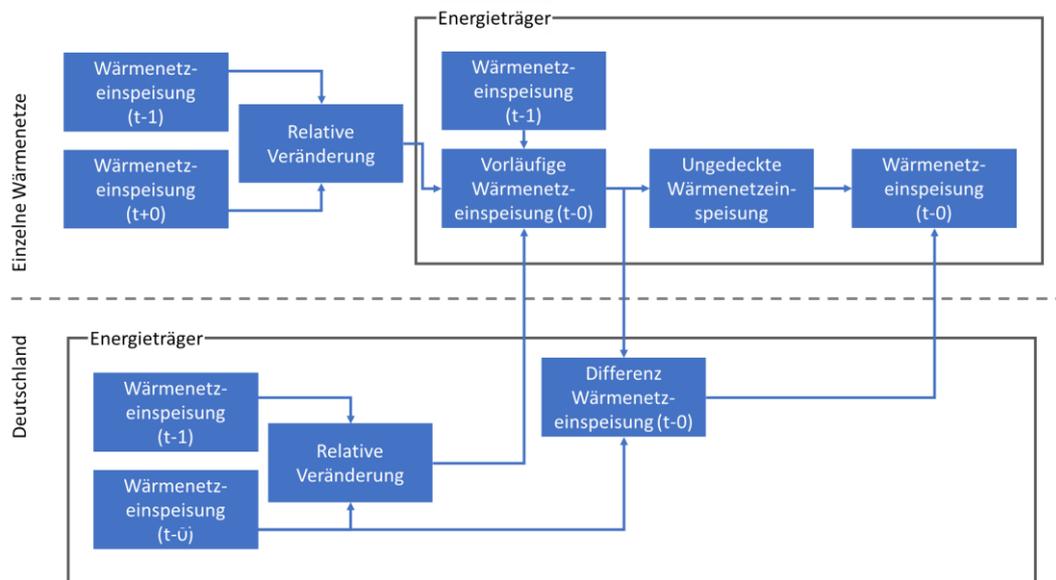


Abbildung 4-9: Berechnung der Wärmenetzeinspeisung nach Energieträger

Abbildung 4-10 stellt die Wärmenetzeinspeisung für die drei Szenarien und für die drei ausgewählten Wärmenetze differenziert nach Energieträger dar. Auf die Beschriftung der y-Achse wird verzichtet, die Skalierung der y-Achse ist in allen drei Szenarien je Wärmenetz gleich gewählt. Die Ergebnisdatei enthält die konkreten Zahlen.

In Flensburg ist die Wärmenetzeinspeisung in allen Szenarien rückläufig. Ein Ausbau des Wärmenetzes kann nicht erfolgen, da das Potenzial weitestgehend erschlossen ist. In Szenarien mit stärkerer Gebäudesanierung ist der Rückgang der Wärmenetzeinspeisung größer.

In Hamburg wird die Wärmenetzeinspeisung bereits 2025 deutlich umgebaut. Die in den Mantelzahlen hinterlegte rückläufige Wärmenetzeinspeisung aus Steinkohle führt zu einem steigenden Bedarf an Erdgas bevor langfristig Großwärmepumpen, Geothermie und Wasserstoff die Wärmenetzeinspeisung übernehmen.

Berlin nutzt unterschiedliche Energieträger zur Wärmenetzeinspeisung. Zunehmend wird diese auf Wärmepumpen, Geothermie und Wasserstoff umgestellt. Das hohe Fernwärmepotenzial führt im Szenario „Zentral“ zu einer ansteigenden Wärmenetzeinspeisung.

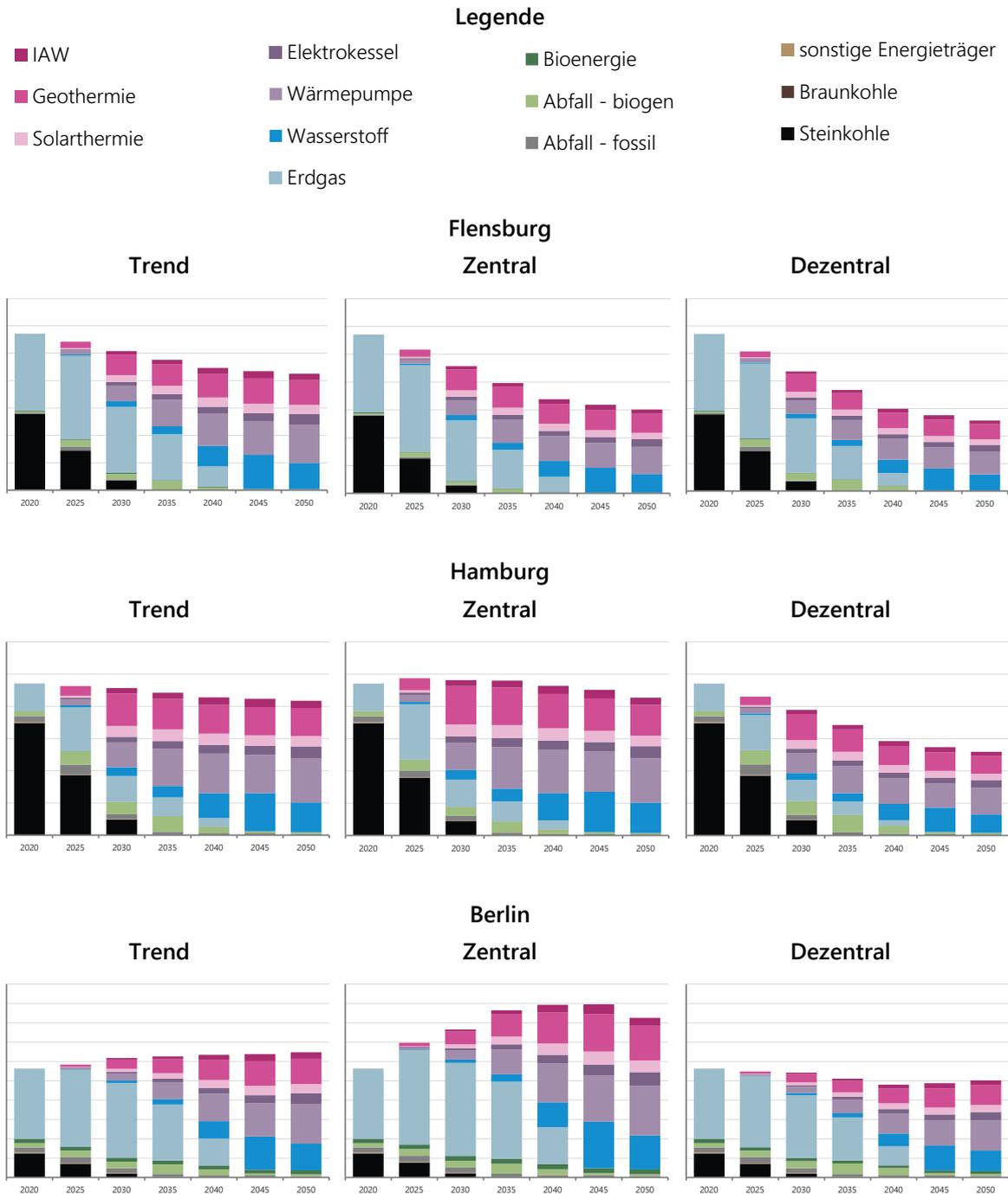


Abbildung 4-10: Szenarien zur Wärmenetzeinspeisung für die drei ausgewählten Wärmenetze der allgemeinen Versorgung

Industrie Wärmenetze

Die Regionalisierung berechnet für jedes Stützjahr die resultierende Wärmenetzeinspeisung in Wärmenetzen der Industrie. Im Gegensatz zu den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung liegt für das Startjahr der Betrachtung keine nach Energieträgern differenzierte Einspeisung vor. Die Verteilung der industriellen Wärmeerzeugung aus Braun- und Steinkohle basiert auf den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung. Die industrielle Wärmebereitstellung aus Braunkohle erfolgt somit nur in

Landkreisen die auch in den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung Braunkohle einsetzen. Die verbleibende Wärmenetzeinspeisung wird zu gleichen Anteilen nach nationalen Mantelzahlen gedeckt. Die Fortschreibung erfolgt analog zu Abbildung 4-9.

Die Entwicklung verläuft in allen betrachteten Wärmenetzen recht ähnlich. Bei den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung bildet das regionale Fernwärmepotenzial die Basis für die regional differenzierte Entwicklung. Ohne einen vergleichbaren Indikator resultieren keine Unterschiede. Die Wärmeeinspeisung aus Erneuerbaren Energien und sonstigen Energieträger bleibt erhalten, die Differenz zur gesamten Wärmenetzeinspeisung wird langfristig durch Wasserstoff gedeckt. Die zur Bereitstellung von Prozessdampf benötigten Hochtemperaturwärmepumpen und Elektrodenkessel sind nicht Bestandteil der Wärmenetzeinspeisung.

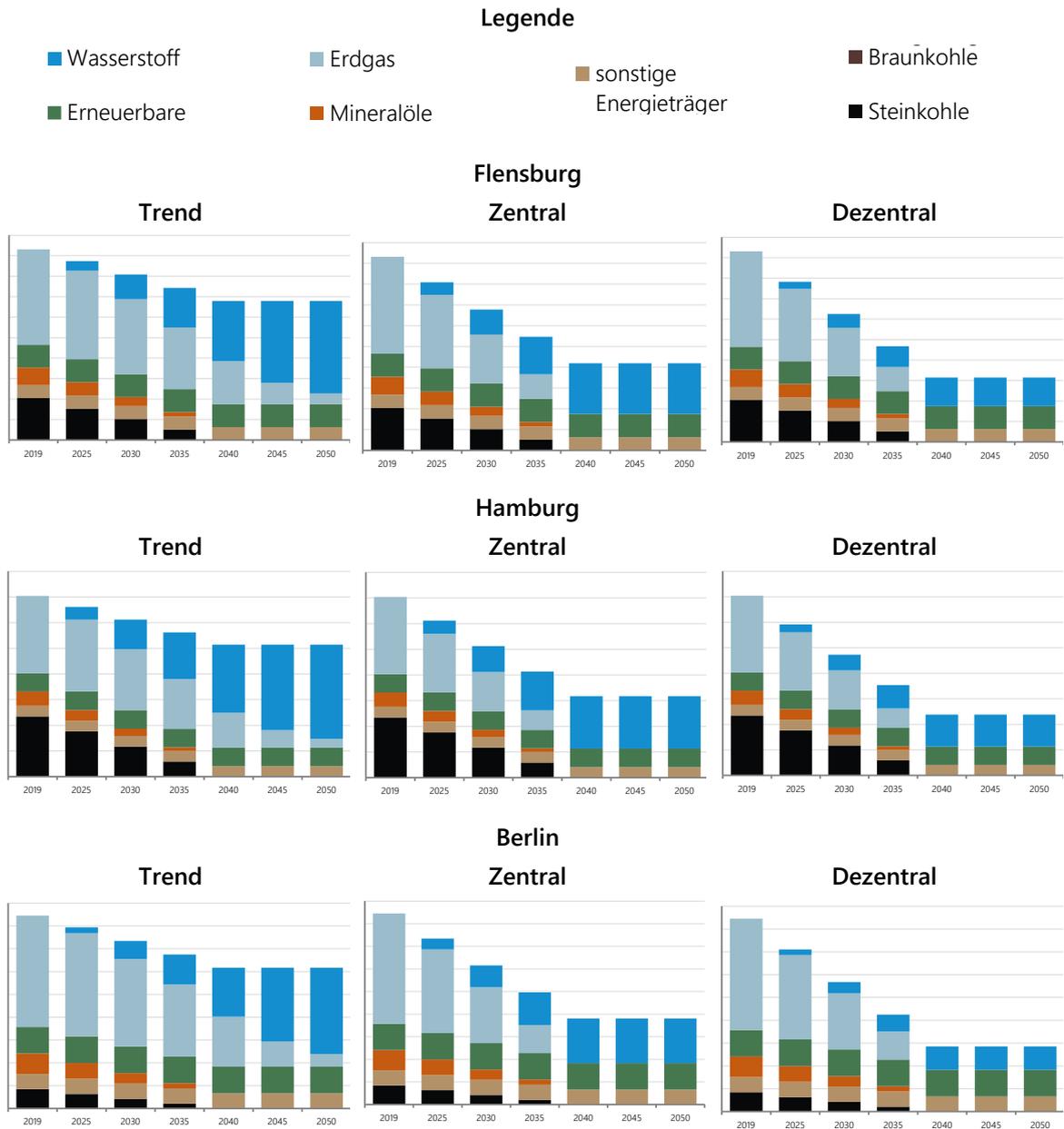


Abbildung 4-11: Szenarien zur Wärmenetzeinspeisung für die drei ausgewählten Wärmenetze der Industrie

5 Zeitreihen

Das Modell zur Berechnung von Fernwärmezeitreihen basiert auf Zeitreihen der Außentemperatur je Landkreis und realen Fernwärmezeitreihen. Nachgelagert werden die Zeitreihen angepasst, um höhere reale Volllaststunden oder den Effekt der Gebäudesanierung abzubilden.

5.1 Temperaturdaten

Die Untersuchung verwendet die Außentemperatur in 2 m Höhe des ERA5-Land Datensatzes vom ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Diese Daten liegen flächendeckend als Raster mit einer Gitterweite von 9 km für alle Jahre ab 1981 vor. Die Analyse verwendet die Daten für die Jahre 1998 bis 2020.

Durch die Wahl eines fiktiven Messpunktes je Landkreis reduziert sich die Menge der benötigten Daten. Für jeden Landkreis wird der Mittelpunkt der größten Siedlung als Messpunkt definiert. Für diesen Messpunkt wird die Zeitreihe der Außentemperatur extrahiert. Ein guter Indikator für die Modellierung von Fernwärmezeitreihen ist das gewichtete 72-Stunden-Mittel, dieses wird nach Gleichung (5-1) berechnet.

$$T_{72h}(t) = \frac{\sum_{i=0}^{71} (72 - i) \cdot T(t - i)}{\sum_{i=1}^{72} i} \tag{5-1}$$

- T Temperatur
- T_{72h} Gewichtetes 72-Stunden-Mittel der Temperatur
- t Stunde des Jahres

Ferner werden die Gradtagszahlen für verschiedene Wetterjahre bestimmt, um eine Klimabereinigung von Verbrauchswerten durchzuführen. Die Gradtagszahl basiert auf einer Tagesmitteltemperatur von 12 °C und ist eine charakteristische Größe für den Jahresheizwärmebedarf.

Abbildung 5-1 visualisiert eine Auswahl an Temperaturzeitreihe. Für Flensburg wird die aktuelle und die gleitende Außentemperatur für das Wetterjahr 2020 gegenübergestellt. Der zweite Teil der Abbildung vergleicht verschiedene Wetterjahre. Hier sind eine besonders kalte Woche im Wetterjahr 2012 und ein insgesamt kaltes Wetterjahr 2010 zu erkennen.

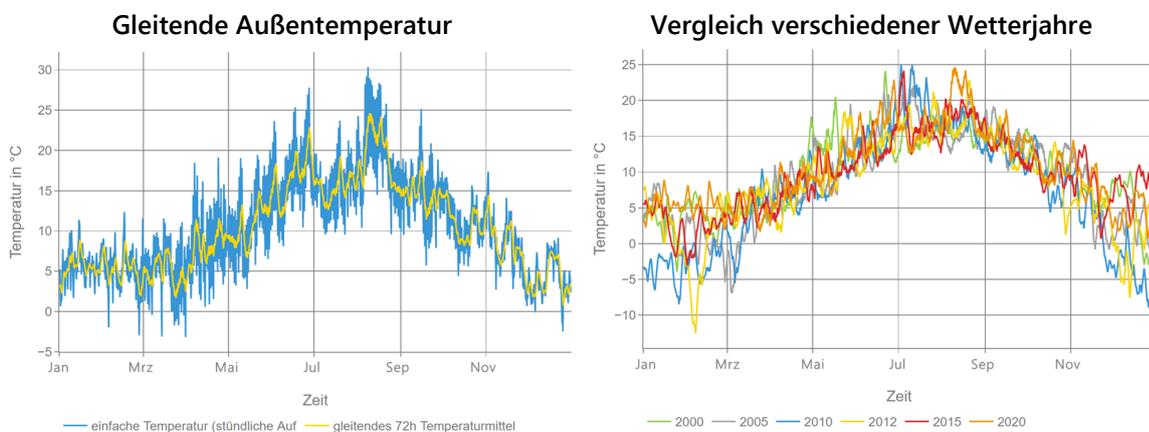


Abbildung 5-1: Visualisierung ausgewählter Temperaturdaten für Flensburg

5.2 Regressionsmodell

Die Basis für das Regressionsmodell bilden 17 historische Zeitreihen der Fernwärmelast in Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung. Diese Daten werden nach Typtag und Außentemperatur klassifiziert, bevor ein lineares Regressionsmodell aufgebaut wird. Die resultierenden synthetischen Zeitreihen werden abschließend visualisiert und bewertet.

Reale Zeitreihen

Reale Zeitreihen liegen für folgende Wärmenetze und Jahre in stündlicher Auflösung vor:

- Berlin: 2007
- Düsseldorf: 1998
- Flensburg: 2014, 2015, 2016
- Hannover: 2003
- Karlsruhe: 2001
- München: 1998
- Rosenheim: 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011

Abbildung 5-2 zeigt exemplarische Zeitreihen und Jahresdauerlinien. Eine Korrektur von Datenausreißern und Datenlücken wurde zuvor durchgeführt.

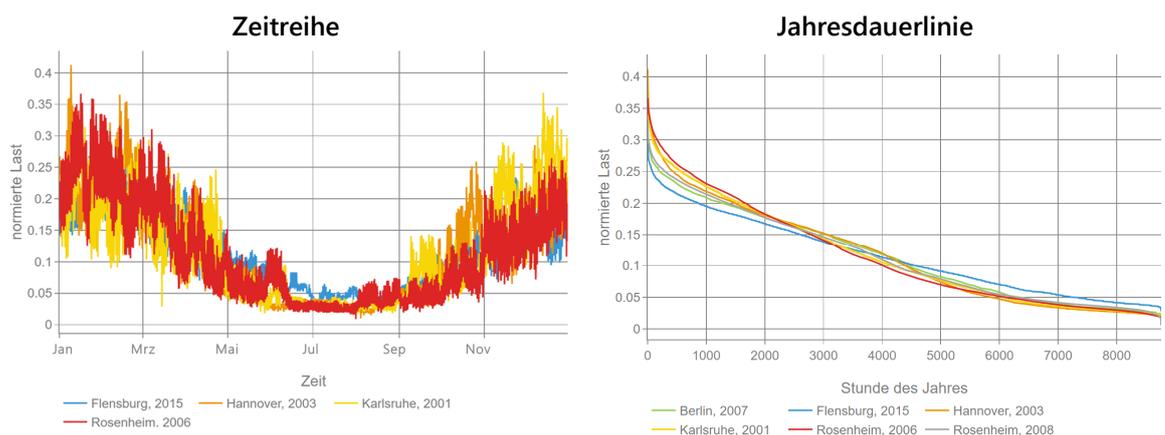


Abbildung 5-2: Visualisierung ausgewählter Temperaturdaten für Flensburg

Die normierte Last ist in Abbildung 5-3 in Abhängigkeit der Außentemperatur und dem gleitenden 72-h-Mittel der Außentemperatur dargestellt. Für hohe Außentemperaturen resultiert eine konstante Wärmenachfrage. Die Last steigt mit sinkender Außentemperatur und folgt dabei einer Sigmoidfunktion. Die Wahl einer gleitenden Außentemperatur reduziert die Streuung der Last-Werte.

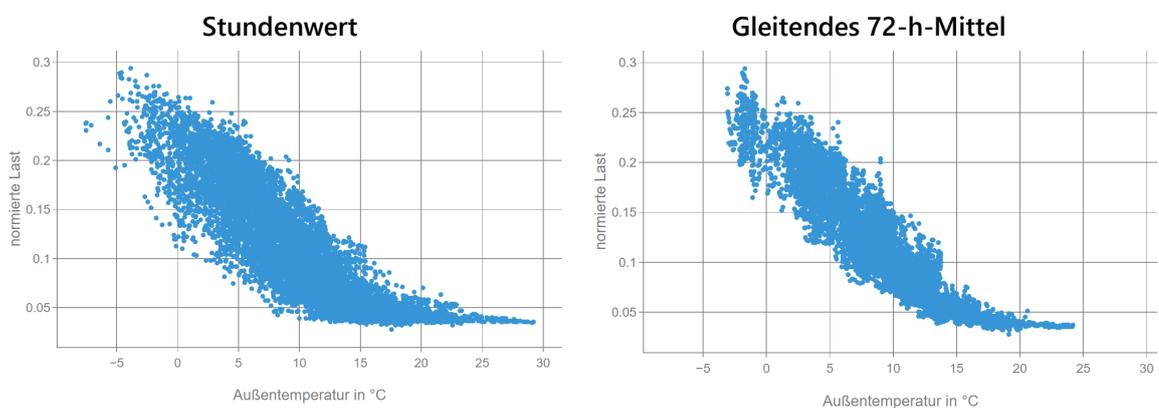


Abbildung 5-3: Fernwärmelast in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturdaten

Modellansatz

Eine abschnittsweise lineare Regression bildet die Basis für das Modell. Alternative Ansätze wie eine (asymmetrische) Sigmoid-Funktion oder ein linearer Trend (ohne Temperaturbereiche) wurden nicht gewählt. Die Modellierung von Sigmoid-Funktionen ist bei niedrigen Außentemperaturen in Folge der meist geringen Anzahl an Datenpunkten schwierig. Ein linearer Zusammenhang für Temperaturen unterhalb der Heizgrenztemperatur bildet den abflachenden Kurvenverlauf nicht ab und würde zu einer Überschätzung der Jahreshöchstlast führen.

Zunächst werden die Lastdaten nach Typtag (Werktag und Wochenende) und Stunde des Tages differenziert. Die resultierenden Zusammenhänge in Abbildung 5-4 zeigen eine geringere Streuung. Während die Last in Stunde 7 auch bei niedrigen Temperaturen mit großer Steigung zunimmt, sinkt die Steigung für Stunde 14 bei Temperaturen kleiner 5 °C.

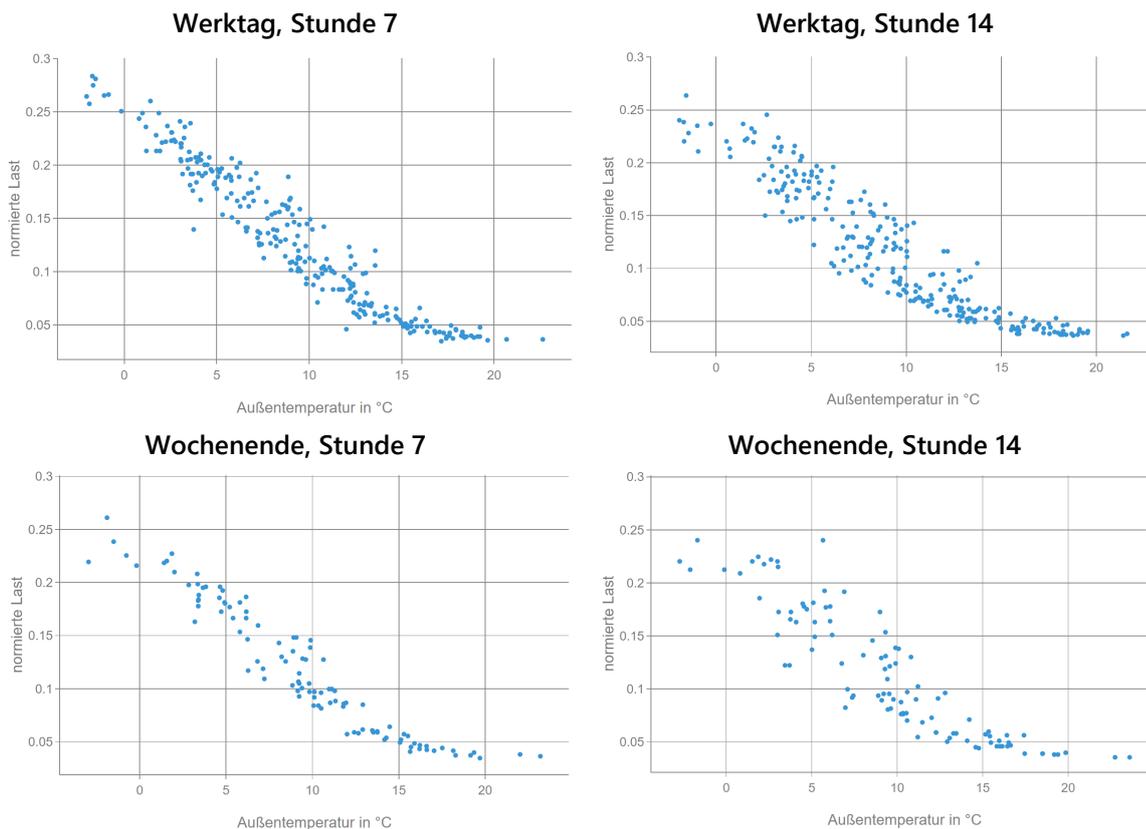


Abbildung 5-4: Fernwärmelast zu ausgewählten Tagen und Stunden in Abhängigkeit von der gleitenden Außentemperaturdaten

Die Berechnung der linearen Regressionen erfolgt für folgende Temperaturbereiche:

- kleiner 0 °C
- 0-5 °C
- 5-10 °C
- 10-15 °C
- 15-20 °C
- größer 20 °C

Sollten in einem Temperaturintervall nicht genügend Datenpunkte vorliegen (kleiner fünf), werden zusätzlich die Datenpunkte des benachbarten Temperaturintervalls verwendet.

Zwei Typtage, 24 Stunden und sechs Temperaturbereiche führen zu 288 lineare Regressionen und somit zu 576 Parametern für jede der 17 historischen Fernwärmezeitreihen. Entfernt werden Ergebnisse, die auf einer unzureichenden Datenbasis basieren. Zum Beispiel liegen für den Temperaturbereich kleiner

0 °C bei einigen Wärmenetzen nur wenige Messpunkte vor. Die Mittelung der übrigen Parameter ergibt den finalen Satz an Regressionsgrößen zur Beschreibung des abschnittsweise linearen Zusammenhangs.

Validierung

Der Vergleich zwischen Rohdaten und berechneten Zeitreihen ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Die synthetische Zeitreihe basiert auf den mittleren Regressionsparametern aller betrachteten Wärmenetze und nicht den spezifischen Regressionsparametern des dargestellten Wärmenetzes. Der typische zeitliche Verlauf der Last wird durch die synthetischen Daten stimmig abgebildet. Die Jahresdauerlinie weist einen ähnlichen Verlauf auf und sowohl die Winter- als die Sommerwoche werden gut abgebildet. Kleinere, untertägige Schwankungen der Rohdaten geben die synthetischen Daten nicht wieder.

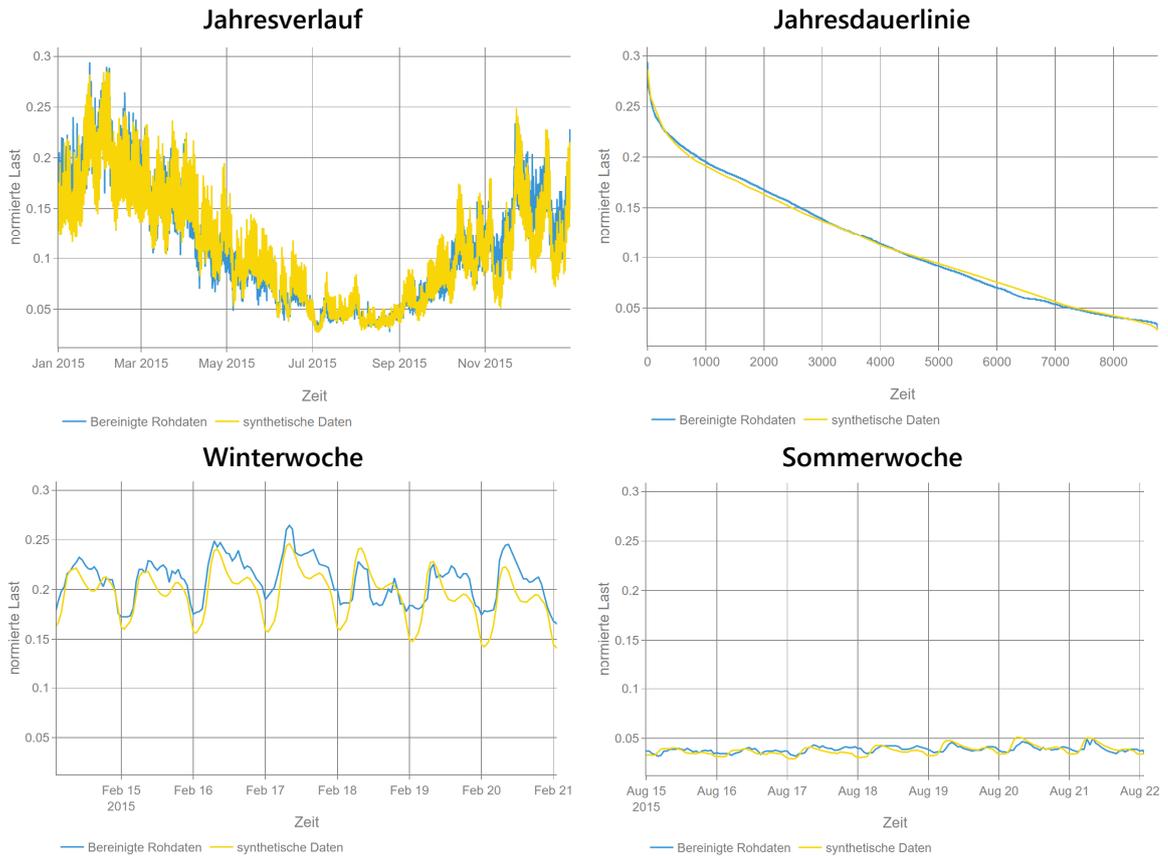


Abbildung 5-5: Vergleich zwischen realer und modellierter Zeitreihe

Die Abweichungen zwischen den realen und modellierten Zeitreihen variiert zwischen den Wetterjahren und ist nachfolgend für Flensburg ausgewertet:

Parameter	2014	2015	2016
nRMSE (normiert auf mittlere Last)	14,5 %	15,8 %	14,8 %
nRMSE (normiert auf die maximale Last)	4,9 %	6,1 %	5,3 %
MAPE (mean absolute percentage error)	12,1 %	13,7 %	12,2 %
R ²	0,93	0,90	0,93

Durch die nachgelagerten Prozessierungsschritte (z.B. eine Anpassung an die realen Vollbenutzungsstunden der Wärmenetze) wird die Korrelation zwischen synthetischen und realen Zeitreihen weiter verbessert. Insbesondere bei Wärmenetzen mit sehr hohen bzw. sehr niedrigen Vollbenutzungsstunden ist eine deutliche Verringerung der Abweichung zu erwarten.

5.3 Postprozessierung der Wärmezeitreihen

Die AGFW-Hauptberichte liefern für die Wärmenetze der allgemeinen Versorgung die Jahressumme der Fernwärmeeinspeisung und die Jahreshöchstlast und somit auch die Vollbenutzungsstunden der Wärmenetze. Diese variieren – vermutlich in Abhängigkeit des Anteils der Prozesswärme – zwischen 1.000 und 5.000 h/a.

Die Vollbenutzungsstunden der Fernwärmezeitreihen des Regressionsmodells betragen im Mittel 3.000 h/a. Im Rahmen einer Postprozessierung der Wärmezeitreihen des Regressionsmodells werden zu den realen Vollbenutzungsstunden passende Zeitreihen generiert.

Im ersten Schritt werden unplausible Vollbenutzungsstunden identifiziert und korrigiert. Die minimalen Vollbenutzungsstunden werden auf 1.000 h/a, die maximalen Vollbenutzungsstunden auf 6.500 h/a gesetzt.

Im nächsten Schritt wird bei Wärmenetzen mit hohen Volllaststunden ein Band konstanter Last unter die modellierte Fernwärmezeitreihe eingefügt. Die Höhe des Bandes steigt mit den Volllaststunden. Die resultierenden Zeitreihen bilden noch nicht die Wärmehöchstlast und die Energiemenge richtig ab.

Die folgenden beiden Schritte werden iterativ ausgeführt. Die Erreichung des Zielwertes für die Volllaststunden stellt das Abbruchkriterium für diese Iteration dar. Nach Abbruch der Iteration wird ein letztes Mal Gleichung (5-2) angewendet.

- Anpassung an die Jahresenergiemenge nach Gleichung (5-2)

$$P(t) = P(t) \frac{P_{Summe}^{Ziel}}{\int P(t) dt} \quad (5-2)$$

$P(t)$ Fernwärmezeitreihe
 P_{Summe}^{Ziel} Zielwert für den Summe der Fernwärmezeitreihe

- Anpassung an die Jahreshöchstlast nach Gleichung (5-3)

$$P(t) = P(t) \left[\frac{P(t) - \text{Min}_t(P(t))}{\text{Max}_t(P(t)) - \text{Min}_t(P(t))} \times \left(\frac{P_{Max}^{Ziel}}{\text{Max}_t(P(t))} - 1 \right) + 1 \right] \quad (5-3)$$

$P(t)$ Fernwärmezeitreihe
 $\text{Min}_t()$ Zeitliches Minimum einer Zeitreihe
 $\text{Max}_t()$ Zeitliches Maximum einer Zeitreihe
 P_{Max}^{Ziel} Zielwert für den maximalen Wert der Fernwärmezeitreihe

Visualisierung

Die Ergebnisse der Postprozessierung sind in Abbildung 5-6 für ein Wärmenetz dargestellt. Die Postprozessierung senkt die maximale Last im Winter ab und hebt die Last im Sommer an. Die untertägige Charakteristik bleibt erhalten.

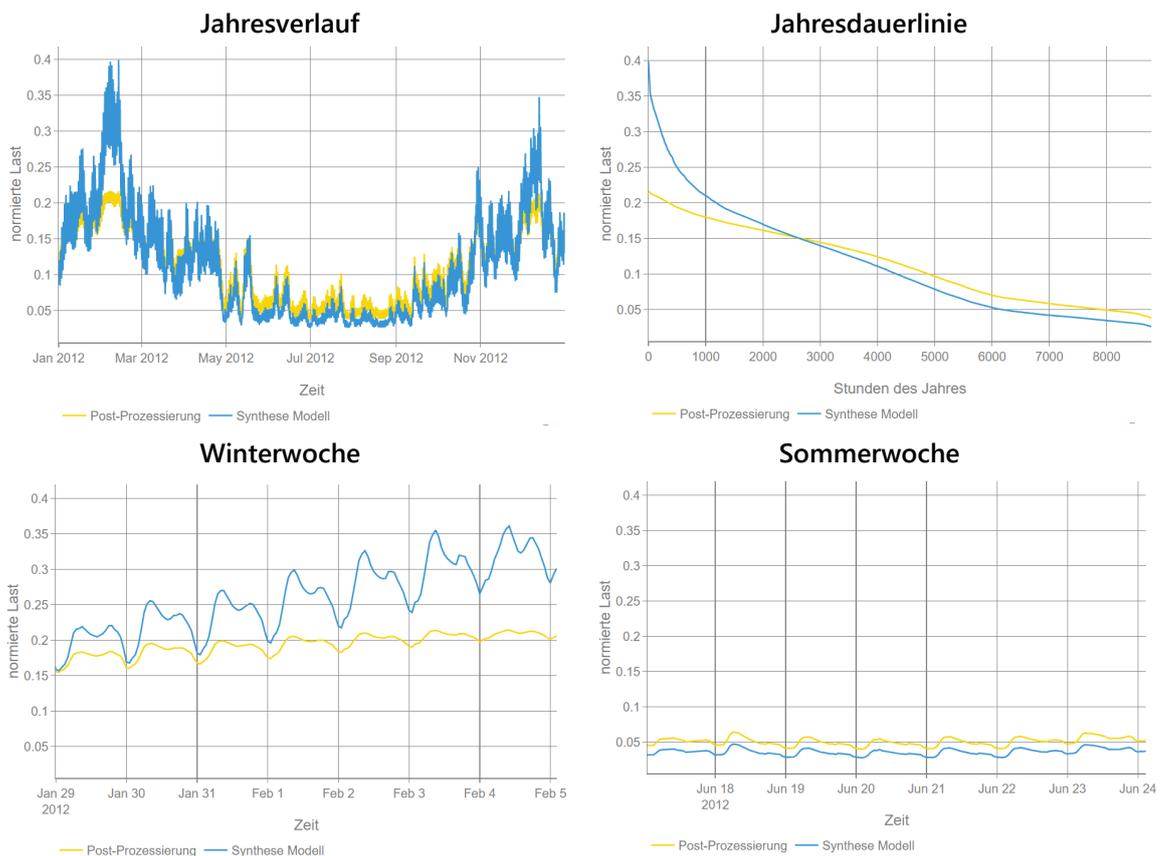


Abbildung 5-6: Effekt der Postprozessierung der Fernwärmezeitreihen

5.4 Effekt der Gebäudesanierung

Im Rahmen der Untersuchung wird eine umfassende Gebäudesanierung unterstellt. Der gesamte Wärmebedarf sinkt je nach Szenario um rund 30 %. Die Berücksichtigung der Gebäudesanierung im Rahmen der Zeitreihen ist Ziel dieses Kapitels.

Die energetische Sanierung der Gebäude erhöht den Wärmeübergangswiderstand der Gebäudehülle und verändert die Zeitreihe der Wärmenachfrage durch zwei Effekte. Bei niedrigen Außentemperaturen sinken die Wärmeverluste und damit die Heizlast. Bei mittleren Außentemperaturen genügen die inneren Gewinne und solaren Gewinne um den Wärmebedarf zu decken; die Heizung kann komplett ausgeschaltet bleiben. Es kommt zu einer Verschiebung der Heizgrenztemperatur zu kleineren Werten. Beide Effekte sind in Abbildung 5-7 dargestellt.

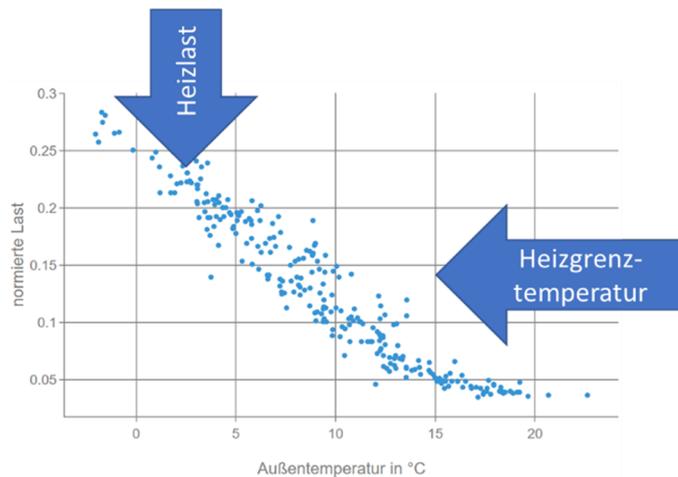


Abbildung 5-7: Effekt der energetischen Sanierung auf die Modellierung von Zeitreihen

Die Effekte können im Regressionsmodell mit geringem Aufwand berücksichtigt werden. Für die Parametrisierung des Regressionsmodell wurden zunächst verschiedene Studien ausgewertet. Die Erkenntnisse, Herausforderungen und der resultierende Forschungsbedarf sind nachfolgend dargestellt.

Literatur

Basierend auf einer Auswahl an Literatur wird die Wirkung der Gebäudesanierung auf den Jahresenergieverbrauch und die Jahreshöchstlast diskutiert. Dabei ist insbesondere die Entwicklung des Verhältnisses zwischen Wärmeverbrauch und Höchstlast von Interesse, da an diesem die Validierung der Fernwärmezeitreihen erfolgt.

Die Warmwasserbereitstellung hat einen großen Einfluss auf die Auswertungen und wird berücksichtigt.

Auch die Häufigkeitsverteilung der Außentemperatur hat einen großen Einfluss auf das Verhältnis zwischen Wärmeverbrauch und Höchstlast. In Gebieten mit vielen Stunden knapp unterhalb der Heizgrenztemperatur sinkt der Wärmeverbrauch deutlich schneller als die Höchstlast. In Regionen mit vielen sehr kalten Stunden sinken Wärmeverbrauch und Jahreshöchstlast im gleichen Verhältnis.

Im Netzentwicklungsplan Gas /FFE-34 14/ ist die Entwicklung des Leistungsbedarfs im Kontext eines rückläufigen Erdgasverbrauchs bereits diskutiert worden. Dabei wurden unter anderem solarthermischen Anlagen, der Tausch von Heizkesseln, energetische Sanierung und der Neubau von Gebäuden berücksichtigt. Die Warmwasserbereitung ist Teil der Diskussion. Abbildung 5-8 zeigt die Auswirkung der verschiedenen Maßnahmen auf die Vollbenutzungsstunden. Anbei zwei Beispiele für die betrachteten Maßnahmen:

- Heizkesseltausch: Der Leistungsbedarf sinkt bei dieser Maßnahme stärker als der Energieverbrauch.
- Solarthermie & Kesseltausch: Diese Maßnahme hat einen sehr starken Einfluss auf den Energieverbrauch (insbesondere Warmwasser), jedoch nur einen geringen Effekt auf den Leistungsbedarf

Für die Jahre 2020 bis 2025 wird in der Studie im Mittel ein Faktor zwischen Verbrauchsreduktion und Leistungsreduktion von etwa 3:1 angegeben. Eine Verbrauchsreduktion von 30 % entspricht somit einer Leistungsreduktion um 10 %. Im Detail hängt dieses Verhältnis von der Art und Tiefe der energetischen Sanierung ab.

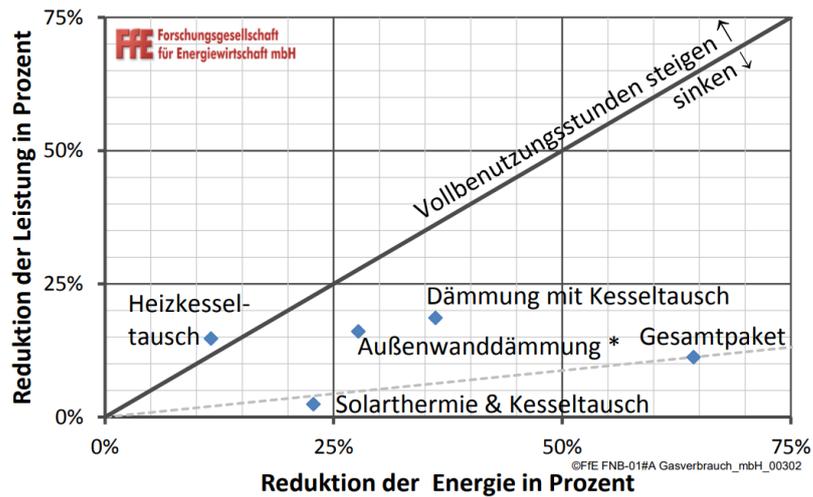


Abbildung 5-8: Auswirkungen von typischen Sanierungsmaßnahmen auf die Vollbenutzungsstunden

In der Studie „Wirksam Sanieren: Chancen für den Klimaschutz“ /COGT-01 15/ wurden 180 energetisch sanierte Gebäude untersucht. Der Fokus lag auf dem erreichten Sanierungserfolg. Aus den Anlagensteckbriefen geht die Reduktion der Gebäudeheizlast und des Wärmeverbrauchs mit Trinkwarmwasser hervor. Es ergibt sich meist ein Verhältnis von Reduktion der Heizlast zur Reduktion des Wärmeverbrauchs von 1:1.

Weitere Literaturwerte für den Heizwärmebedarf und die Heizlast sind in Abbildung 5-9 dargestellt. Eine Sanierung eines durchschnittlichen Gebäudes nach /BSHT-01 21/ von 140-180 kWh/m² auf 100-120 kWh/m² entspricht einer Reduktion um 31 %. Die Heizlast sinkt dabei von 55-75 W/m² auf 40-60 W/m², bzw. um 17 %. Für andere Sanierungstiefen ergeben sich abweichende Verhältnisse. Für die relevante Sanierung ergibt sich ein Verhältnis von 2:1.

	Heizwärmebedarf (HWB)	Heizlast	Trinkwarmwasserbedarf
Bis 1977	280-360 kWh/m ² a [2]	70 – 180 W/m ² [2]	
1977 - 1983	195 kWh/m ² [3] 200 – 260 kWh/m ² [2]	70 - 130 W/m ² 60 – 95 W/m ² [2]	13 kWh/m ² a [3]
1984-1994	115 kWh/m ² [3] 140 – 180 kWh/m ² [2]	60 - 100 W/m ² 55 – 75 W/m ² [2]	13 kWh/m ² a [3]
1995 - 2001	75 kWh/m ² [3] 100 – 120 kWh/m ² [2]	40 – 60 W/m ² [2]	13 kWh/m ² a [3]
2002 - EnEV	70 – 80 kWh/m ² [2]	35 – 40 W/m ² [2]	13 kWh/m ² a [3]
KfW 100	67 kWh/m ² [3]	30 - 35 W/m ² [1]	13 kWh/m ² a [3]
KfW 70	42 kWh/m ² [3] 70 kWh/m ² a [2]	15 - 30 W/m ² [1]	13 kWh/m ² a [3]
KfW 40	17 kWh/m ² [3] 40 kWh/m ² a [2]	10 - 15 W/m ² [1]	13 kWh/m ² a [3]
Passivhaus	13 kWh/m ² [3]	10 W/m ² [1]	13 kWh/m ² a [3]

Abbildung 5-9: Gegenüberstellung: Heizwärmebedarf und Heizlast

- [1] /GEWE-01 21/
- [2] /BSHT-01 21/
- [3] /FFE-79 21/

Zwischenfazit

Die Betrachtung der verschiedenen Quellen ergibt kein einheitliches Gesamtbild. Es ist zu erwarten, dass die Heizlast weniger stark sinkt, als der Wärmeverbrauch. Abweichende Ergebnisse für Einzelobjekte können auch Folge einer Überdimensionierung der Heizkessel sein. Ferner ist die Art und Tiefe der energetischen Sanierung zur berücksichtigen.

Umsetzung im Modell

Im Modell wird die Wärmenachfrage durch abschnittsweise lineare Zusammenhänge abgebildet, siehe Gleichung (5-4). Für verschiedene Heizgrenztemperaturen werden Zeitreihen berechnet und daraus die resultierenden Werte für den Jahreswärmeverbrauch und die Heizlast bestimmt. In Gleichung (5-5) wird die Verschiebung der Heizgrenztemperatur eingefügt. Die geringere Heizlast ist durch den Parameter a' in Gleichung (5-6) gegeben. Dieser wird über den empirisch bestimmten Zusammenhang in Gleichung (5-7) substituiert. Ausgehend von einer Variablen, hier der Verschiebung der Heizgrenztemperatur, sind der Jahreswärmeverbrauch und die Heizlast bestimmt.

$$P(t) = a T(t) + b \quad (5-4)$$

Verschiebung d. Heizgrenztemperatur $P(t) = a (T(t) - \Delta T) + b \quad (5-5)$

Reduktion der Heizlast $P(t) = a' (T(t) - \Delta T) + b \quad (5-6)$

Reduktion der Variablenanzahl $P(t) = \left(1 - 0,8 \frac{\Delta t}{10 \text{ }^\circ\text{C}}\right) a (T(t) - \Delta T) + b \quad (5-7)$

$P(t)$ Fernwärmezeitreihe
 a, b, a' Parameter des linearen Zusammenhangs
 ΔT Verschiebung der Heizgrenztemperatur

Abbildung 5-10 zeigt die resultierenden Werte für den Wärmeverbrauch und die Heizlast basierend auf Gleichung (5-7). Im Rahmen dieser Untersuchung werden verschiedene Szenarien mit einer Reduktion des Wärmeverbrauchs von rund 30 % betrachtet. Die Heizlast ohne Warmwasser geht um rund 20 % zurück, mit Warmwasser um rund 25 %.

Verschiebung der Heizgrenztemperatur	ohne Warmwasser		mit Warmwasser	
	Wärmeverbrauch	Heizlast	Wärmeverbrauch	Heizlast
0 °C	100 %	100 %	100 %	100 %
1 °C	82 %	89 %	85 %	89 %
2 °C	67 %	78 %	74 %	79 %
3 °C	53 %	68 %	64 %	70 %
4 °C	42 %	58 %	54 %	60 %

KN 2045 

Abbildung 5-10: Gegenüberstellung: Heizwärmebedarf und Heizlast

Visualisierung

Der Effekt der Gebäudesanierung auf Fernwärmezeitreihen ist in Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 dargestellt. In Abbildung 5-11 zeigt die resultierenden Zeitreihen, in Abbildung 5-12 sind resultierenden Zeitreihen auf die gleiche Energiemenge skaliert (renormiert).

In Abbildung 5-11 „Jahresdauerlinie“ ist der deutliche Rückgang des Wärmeverbrauchs und der Höchstlast zu erkennen. Die Verschiebung der Heizgrenztemperatur zeigt sich im „Jahresverlauf“ in Abbildung 5-12. In Abbildung 5-12 „Jahresdauerlinie“ ist ein erwähnenswertes Ergebnis zu beobachten. Die Sanierung führt zunächst zu einer steigenden Last, später zu einer sinkenden Last. Da es sich hier um eine renormierte Darstellung handelt, ist dieser Effekt dem steigenden Anteil des Warmwasserverbrauchs am gesamten Wärmeverbrauch geschuldet.

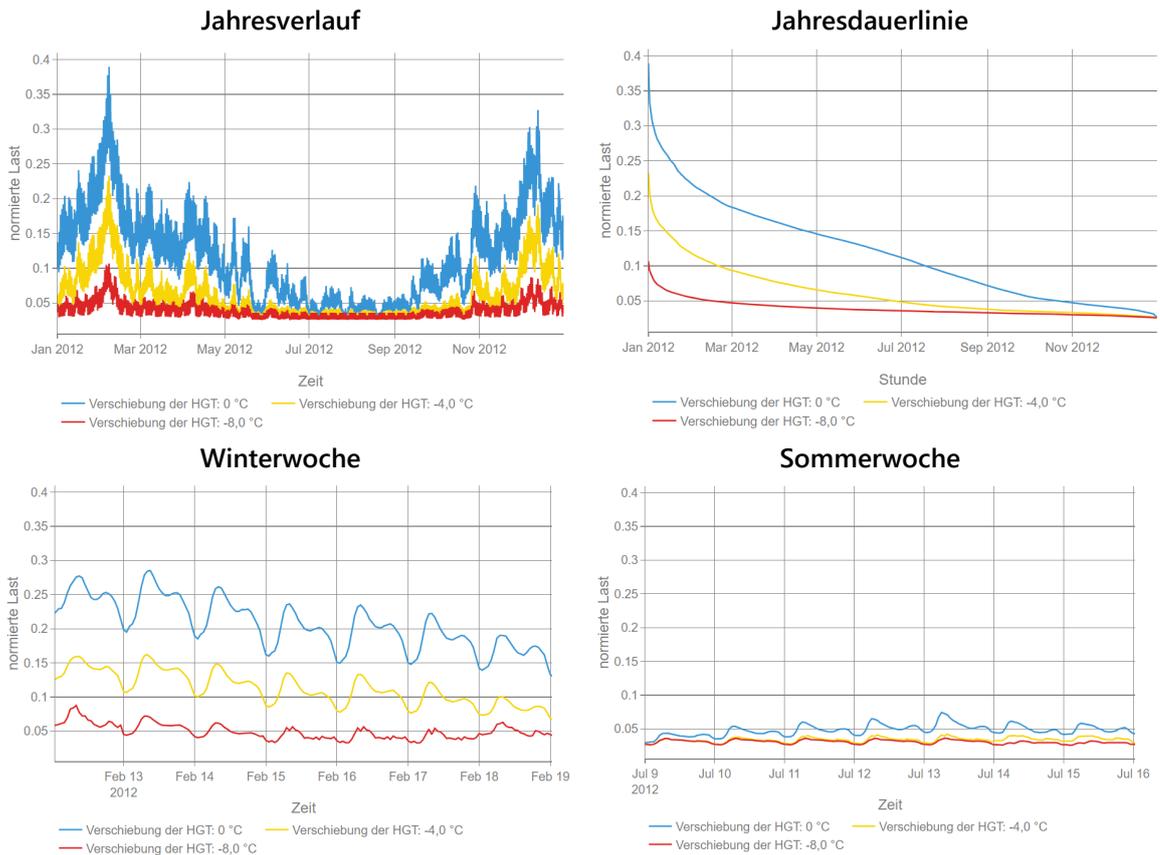


Abbildung 5-11: Effekt der Gebäudesanierung auf die Fernwärmezeitreihe

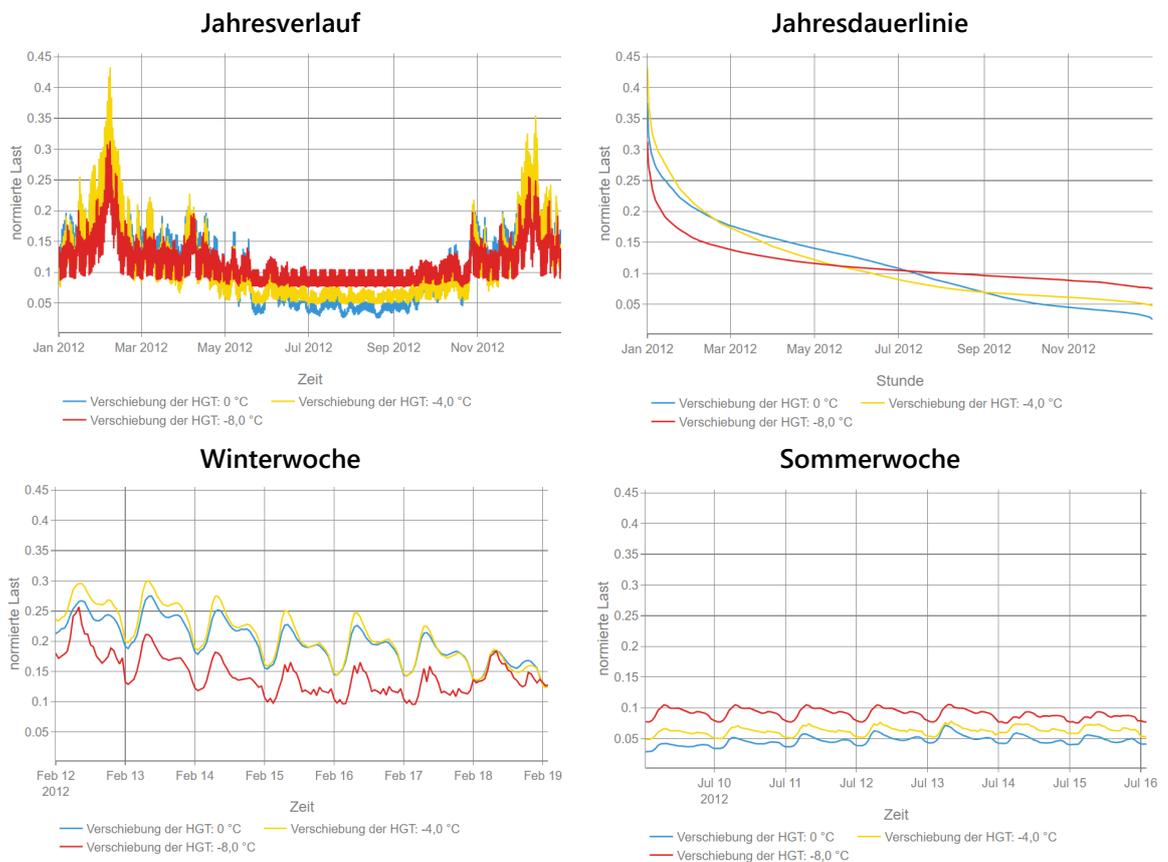


Abbildung 5-12: Effekt der Gebäudesanierung auf die Fernwärmezeitreihe (renormierte Zeitreihen)

Fazit und Ausblick

Der dargestellte Ansatz ist zur Berechnung von Fernwärmezeitreihen für verschiedene Sanierungszustände geeignet. Der Jahreswärmeverbrauch geht im Modell stärker zurück, als die maximale Heizlast. Die Literaturrecherche zum Verhältnis des Rückgangs hat jedoch kein eindeutiges Ergebnis gebracht. Sollten hier eindeutige Erkenntnisse vorliegen, können diese im bestehenden Ansatz realisiert werden.

5.5 Wärmenetze der Industrie

Das bestehende Regressionsmodell benötigt für die Berechnung der Zeitreihen die Vollbenutzungsstunden der industriellen Wärmenetze. Die Veröffentlichungen der AG Energiebilanz, die BMWi Energiedaten und die AGFW-Hauptberichten enthalten hierzu keine Informationen. Im Rahmen der Fachserie 4 Reihe 6.4 sind für das Jahr 2019 folgende Zahlen enthalten:

- Tabelle 2.1, Gesamte Wärmeerzeugung: 30,3 GW_{th} und 99,4 TWh_{th} → 3.300 h/a
- Tabelle 2.8.2, KWK Wärmeerzeugung: 88,7 TWh_{th} → ??? h/a
- Tabelle 2.1: Gesamte Stromerzeugung: 11,0 GW_{el} und 53,4 TWh_{el} → 4.850 h/a
- Tabelle 2.5.2, KWK Stromerzeugung: 33 TWh_{el} → ??? h/a

Die Volllaststunden der gesamten Stromerzeugung sind mit 4.850 h/a wie erwartet hoch. Die Teilmenge der KWK-Anlagen hat – basierend auf den thermischen Angaben – mit 3.000 h/a relativ geringe Vollbenutzungsstunden. Analog zu den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung beträgt der KWK-Anteil an der Wärmeerzeugung 90 %.

Eine regionale differenzierte Betrachtung dieser Analyse ist nicht möglich. Das Modell verwendet einheitlich 3.300 h/a für die Wärmenetze (siehe Fachserie 4 Reihe 6.4) und einen KWK-Anteil von 90 %. Abbildung 5-13 zeigt eine exemplarische Zeitreihe des Wärmenetzes und basierend auf einem KWK-Anteil von 90 % eine mögliche resultierende Zeitreihe für die industriellen KWK-Anlagen.

Die unter diesen Annahmen resultierenden Volllaststunden für die industriellen KWK-Anlagen betragen 5.700 h/a. Basierend auf der KWK-Wärmeerzeugung von 88,7 TWh resultiert eine thermische Leistung der industriellen KWK-Anlagen von ca. 15,5 GW und eine elektrische Leistung von ca. 5,8 GW.

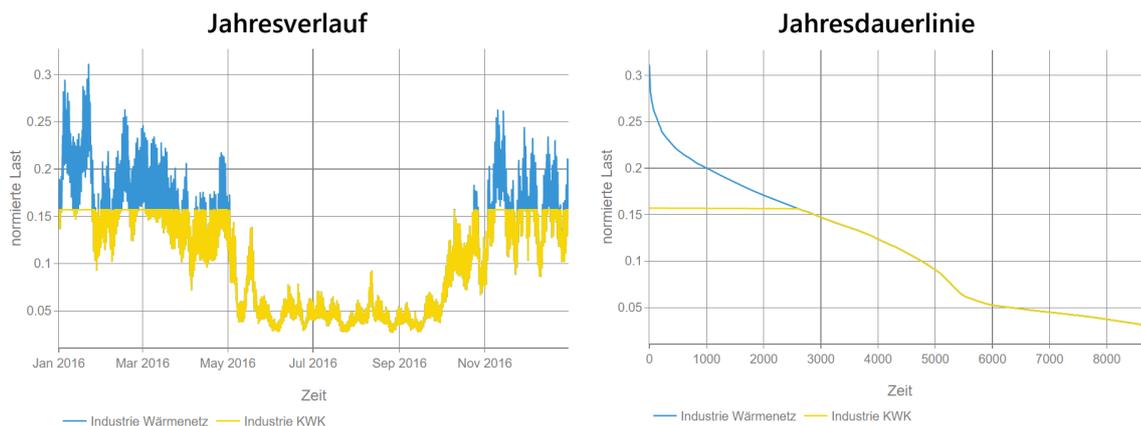


Abbildung 5-13: Zeitreihen für Wärmenetze der Industrie

6 Literatur

- BKG-01 17** Geographische Gitter für Deutschland - GeoGitter. Frankfurt am Main: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2017.
- BMWI-01 17** Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- COGT-01 15** Jahnke, Katy et al.: Wirksam Sanieren: Chancen für den Klimaschutz - Feldtest zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden. Berlin: co2online gemeinnützige GmbH, 2015.
- CORR-01 13** Corradini, Roger: Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale für Gebäude mit einer Wohneinheit. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum. Herausgegeben durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München 2013 – ISBN 978-3-941802-26-1; ISBN-A 10.978.3941802/261.
- DELPHI-01 16** COP4EE - Projektwebsite. <http://cop4ee.geoway.de>. Potsdam: DELPHI IMM GmbH, 2016
- DESTATIS-12 14** Zensus 2011 - Gebäude und Wohnungen - Übersicht über Merkmale und Merkmalsausprägungen, Definitionen. Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014
- DESTATIS-08 15** Ergebnisse ohne Grenzen: der Zensus-Atlas in: www.zensus2011.de (Abruf am 23.11.2015). Wiesbaden: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015
- DIN-01 07** DIN V 18599-10 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2007
- DLR-03 12** Gils, Hans Christian: A GIS-based Assessment of the District Heating Potential in Europe. Graz: 12. Symposium Energieinnovation, 15.-17.2.2012, 2012
- DWD-01 08** Gradtagszahlen Deutschland. Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 2008
- EEA-04 16** Erdbeobachtungsprogramm Copernicus: Pan-European - Reference Data. <http://land.copernicus.eu/pan-european/satellite-derived-products>. Kopenhagen: European Environment Agency (EEA), 2016
- EUT-01 17** Heat Roadmap Europe - The second version of the fourth Pan-European Thermal Atlas: <http://www.heatroadmap.eu/peta.php>; Flensburg: Europa-Universität Flensburg; Halmstadt University; Aalborg University, 2017.
- FFE-05 02** Geiger, B.; Carter, M.; Mühlbacher, H.: Warmwasserbereitung - Vergleich zentraler und dezentraler Warmwasserversorgung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2002
- FFE-01 12** Beer, Michael; et al.: flex: Flexibilisierung der Betriebsweise von KWK - Projekt im Verbund "Eneff:Stadt - Chancen und Risiken von KWK im politischen Umfeld". München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2012. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/779648722.pdf>
- FFE-02 12** Schmid, Tobias; et al.: Masterplan: Optimierte Energieversorgung - Projekt im Verbund "Eneff:Stadt - Chancen und Risiken von KWK im politischen Umfeld". München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2012. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/779649419.pdf>
- FFE-04 12** Schmid, Tobias; Beer, Michael; Corradini, Roger: Energiemodell der Wohngebäude in: BWK Bd. 64 (2012) Nr. 1/2. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2012
- FFE-34 14** Gobmaier, Thomas Dr.-Ing.; Eberl, Benedikt; von Roon, Serafin Dr.-Ing.: Studie über Einflussfaktoren auf den zukünftigen Leistungsbedarf der Verteilnetzbetreiber. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014 – ISBN: 978-3-945029-97-8; ISBN-A: 10.978.3945029/978

- FFE-79 21** Kleinertz, Britta et al.: Klimaneutrale Wärme München 2035 - Ermittlung der Möglichkeiten zur Umsetzung von Lösungspfaden für eine klimaneutrale Wärmeversorgung in der Landeshauptstadt München. München & Freiburg: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH & Öko-Institut e.V., 2021.
- GEWE-01 21** Ermittlung der Gebäudeheizlast (Wärmebedarf). In: https://www.fa-gerrit-weber.de/index.php?linkziel_links=/technik/gebaeudeheizlast. (Abruf am 2021-10-04); Görlitz: Fa. Gerrit Weber, 2021.
- GFEM-01 04** Kennziffernkatalog - Investitionsvorbereitung in der Energiewirtschaft 2004. Neuenhagen/Berlin: Gesellschaft für EnergieManagement mbH/EnergyConsulting, 2004
- IBSHT-01 21** Energetische, thermodynamische und bauphysikalische Begriffe und Zusammenhänge. In: http://energieberatung.ibs-hlk.de/eb_begr.htm. (Abruf am 2021-10-04); Friedersdorf: IBS Ingenieurbüro für Haustechnik Schreiner, 2021.
- IER-06 07** Blesl, Markus Dr.: KWK-Potentiale. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 2007
- IER-02 08** Blesl, M.; Kempe, S.; Ohl, M.; Fahl, U.; König, A.; Jenssen, T.; Eltrop, L.: Wärmetlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 2008
- ISI-05 09** Schlomann, Barbara; Gruber, Edelgard; Geiger, Bernd; Kleeberger, Heinrich; Wehmhörner, Urs; Herzog, Till; Konopka, Daria-Maria: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2004 bis 2006 - Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Karlsruhe, München, Nürnberg: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2009
- ISI-01 11** Schlomann, Barbara; Kleeberger, Heinrich; Linhardt, Antje; Gruber, Edelgard; Schiller, Werner: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010 - Projektnummer 53/09 Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), Karlsruhe, 2011
- ISI-03 15** Schlomann, Barbara; Wohlfarth, Katharina; Kleeberger, Heinrich; Hardi, Lukas; Geiger, Bernd; Pich, Antje; Gruber, Edelgard; Gerspacher, Andreas; Holländer, Edith; Roser, Annette: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013 - Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Nürnberg: GfK Retail and Technology GmbH, 2015
- PROG-01 21** Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Berlin: Prognos AG, 2021.
- REC-01 01** Recknagel, Dipl.-Ing. Hermann; Sprenger, Dipl.-Ing. Eberhard; Schramek, Prof. Dr.-Ing Ernst-Rudolf: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. München: Oldenbourg Verlag, 2001
- SCHM-01 18** Schmid, Tobias: Dynamische und kleinräumige Modellierung der aktuellen und zukünftigen Energienachfrage und Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität München, geprüft von Prof. Wagner, Ulrich und Prof. Kolbe, Thomas H.: München, 2018.
- SOLPOT-01 14** Regional differenzierte Solarthermie-Potentiale auf Gemeindeebene - Web-Portal der Wüstenrot-Stiftung, Ludwigsburg und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE). München: FfE e.V., 2014, Abrufbare Ergebnisse unter <http://www.solarthermiepotentiale.de>
- SWEN-01 10** Wellstein, Jürg: Fernwärme hat mehr Potenzial In: Swiss Engineering STZ. Zürich: Swiss Engineering STV, 2010
- TEC-01 05** Energie Kennwerte - Hilfen für den Wohnungswirt. Eschborn: Techem AG, 2005
- WS-01 18** Corradini, Roger et al.: Energierationalität im Eigenheim - Effiziente Energieversorgung von Wohngebäuden. Ludwigsburg: Wüstenrot Stiftung, 2018.

7 Anhang

7.1 Statistische Daten

In Kapitel 4.1 erfolgte eine Zusammenführung verschiedener Statistiken zu einen umfassenden Blick auf die leitungsgebundene Wärmebereitstellung in Deutschland. Nachfolgend werden ausgewählte Tabellen dieser Quellen dargestellt.

AG Energiebilanzen

Die von der AG Energiebilanzen veröffentlichten Auswertungstabellen weisen für das Jahr 2019 (Stand 2020, Tabelle 5.1) eine Wärmeerzeugung (netto) in KWK-Anlagen von insgesamt 225,8 TWh aus. Die Werte in der aktuell veröffentlichten Datei (Stand 2021, Tabelle 5.1) liegen etwas niedriger. Die KWK-Wärmeerzeugung ist nach Energieträger differenziert.

Tabelle 7-1: KWK-Wärmeerzeugung im Rahmen der Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, AGEB

5.1 Erzeugung und Brennstoffeinsatz der Kraft-Wärme-Kopplung			
Blatt	Energieträger	Einheit	2019
5.1	KWK-Stromerzeugung (netto)	TWh	114,0
5.1	KWK-Wärmeerzeugung (netto)	TWh	225,8
5.1	Summe KWK-Erzeugung (netto)	TWh	339,8
5.1	Brennstoffeinsatz KWK-Strom	PJ	739
5.1	Brennstoffeinsatz KWK-Wärme	PJ	779
5.1	Summe Brennstoffeinsatz KWK	PJ	1.518

Die KWK-Wärmeerzeugung entfällt zu ungefähr gleichen Teilen auf die allgemeine Versorgung (95,4 TWh_{th}, Tabelle 5.3) und Industriekraftwerke (89,6 TWh_{th}, Tabelle 5.4). Die Wärmeerzeugung der Industriekraftwerke wird im weiteren den Industrie-Wärmenetze zugewiesen. Die Einspeiser (40,7 TWh_{th}, Tabelle 5.5) tragen zur gesamten KWK-Wärmeerzeugung bei, werden jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet.

Nicht Gegenstand der Statistik sind die Heizwerke, die Verluste in den Wärmenetzen und die Aufteilung nach Anwendungen.

Tabelle 7-2: KWK-Wärmeerzeugung im Rahmen der Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, AGEB

5.2 Kraft-Wärme-Kopplung - gesamt							
Blatt	Energieträger	Stromerzeugung		Wärmeerzeugung		Brennstoffeinsatz	
		Einheit	2019	Einheit	2019	Einheit	2019
5.2	Steinkohle	TWh	9,7	TWh	27,4	TWh	165
5.2	Braunkohle	TWh	4,3	TWh	14,3	TWh	84
5.2	Mineralöle	TWh	2,0	TWh	10,0	TWh	51
5.2	Gase	TWh	62,5	TWh	105,1	TWh	717
5.2	Erneuerbare Energien	TWh	32,2	TWh	52,4	TWh	409
5.2	Sonstige Energieträger	TWh	3,4	TWh	16,6	TWh	93
5.2	Insgesamt	TWh	114,0	TWh	225,8	TWh	1.518

5.3 Kraft-Wärme-Kopplung - Allgemeine Versorgung							
Blatt	Energieträger	Stromerzeugung		Wärmeerzeugung		Brennstoffeinsatz	
		Einheit	2019	Einheit	2019	Einheit	2019
5.3	Steinkohle	TWh	8,7	TWh	23,2	TWh	141
5.3	Braunkohle	TWh	3,0	TWh	7,1	TWh	46
5.3	Mineralöle	TWh	0,1	TWh	0,2	TWh	1
5.3	Gase	TWh	28,5	TWh	40,2	TWh	299
5.3	Erneuerbare Energien	TWh	5,4	TWh	14,6	TWh	104
5.3	Sonstige Energieträger	TWh	2,2	TWh	10,2	TWh	64
5.3	Insgesamt	TWh	47,8	TWh	95,4	TWh	655

5.4 Kraft-Wärme-Kopplung - Industriekraftwerke							
Blatt	Energieträger	Stromerzeugung		Wärmeerzeugung		Brennstoffeinsatz	
		Einheit	2019	Einheit	2019	Einheit	2019
5.4	Steinkohle	TWh	1,0	TWh	4,2	TWh	24
5.4	Braunkohle	TWh	1,3	TWh	7,2	TWh	37
5.4	Mineralöle	TWh	1,8	TWh	9,6	TWh	48
5.4	Gase	TWh	24,7	TWh	50,9	TWh	320
5.4	Erneuerbare Energien	TWh	3,0	TWh	11,3	TWh	66
5.4	Sonstige Energieträger	TWh	1,2	TWh	6,5	TWh	29
5.4	Insgesamt	TWh	32,9	TWh	89,6	TWh	524

5.5 Kraft-Wärme-Kopplung - Einspeiser							
Blatt	Energieträger	Stromerzeugung		Wärmeerzeugung		Brennstoffeinsatz	
		Einheit	2019	Einheit	2019	Einheit	2019
5.5	Steinkohle	TWh	0,0	TWh	0,0	TWh	0
5.5	Braunkohle	TWh	0,0	TWh	0,0	TWh	0
5.5	Mineralöle	TWh	0,2	TWh	0,3	TWh	2
5.5	Gase	TWh	9,3	TWh	14,0	TWh	99
5.5	Erneuerbare Energien	TWh	23,8	TWh	26,4	TWh	239
5.5	Sonstige Energieträger	TWh	0,0	TWh	0,0	TWh	0
5.5	Insgesamt	TWh	33,3	TWh	40,7	TWh	340

BMWi Energiedaten

In der Gesamtausgabe der Energiedaten des BMWi, Tabelle 7 ist der Endenergiebedarf für verschiedene Anwendungsbereiche und Sektoren ausgewiesen. Der Endenergiebedarf für Fernwärme beträgt – über alle Sektoren – 112 TWh_{th}. Unter Berücksichtigung eines KWK-Anteils von ca. 90 % ergibt sich ein konsistentes Bild zu den AG Energiebilanzen, Wärmerzeugung der allgemeinen Versorgung.

Knapp die Hälfte des Endenergieverbrauchs entfällt auf den Sektor Industrie (48,7 TWh_{th}), der Rest auf die Sektoren private Haushalte (52,7 TWh_{th}) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (10,6 TWh_{th}). Rund 54,8 TWh_{th} werden für die Bereitstellung von Raumwärme verwendet.

Ein hoher Anteil des Fernwärmebezugs aus der allgemeinen Versorgung entfällt auf den Sektor Industrie. Es ist zu erwarten, dass die Volllaststunden vieler Wärmenetze der allgemeinen Versorgung höher liegen, als bei einer reinen Bereitstellung von Raumwärme zu erwarten wäre.

Die Quelle differenziert nicht nach Heizwerken und KWK-Anlagen und weist keine Netzverluste aus.

Tabelle 7-3: Auszug aus den BMWi Energiedaten, Tabelle 6 und 7

BMWi Energiedaten, Tabelle 6 und 7		2019
Fernwärme	PJ	403,2
Fernwärme	TWh	112,0
..davon		
Industrie	PJ	175,2
Private Haushalte	PJ	189,8
GHD	PJ	38,2
Industrie	TWh	48,7
Private Haushalte	TWh	52,7
GHD	TWh	10,6
..davon		
Raumwärme	PJ	197,3
Warmwasser	PJ	21,3
Prozesswärme	PJ	169,7
Raumwärme	TWh	54,8
Warmwasser	TWh	5,9
Prozesswärme	TWh	47,1

AGFW-Hauptberichte

Die AGFW Hauptberichte der Jahre 2007 bis 2019 liefern detaillierte Daten zu 284 Unternehmen. Da nicht jedes Jahr alle Unternehmen an den Hauptberichten teilnehmen, wurde für jedes Unternehmen der aktuellste verfügbare Datensatz bestimmt. Dabei wurden unter anderem Änderungen bei den Unternehmensnamen berücksichtigt.

Die AGFW-Hauptberichte liefern ein sehr detailliertes, wenn auch nicht vollständiges Bild der Fernwärmenetze der allgemeinen Versorgung.

Tabelle 7-4: Aggregierte Daten aus den aufbereiteten AGFW-Hauptberichten

AGFW-Hauptberichte mit Aufbereitung		
Parameter	Wert	
	Einheit	2019+
Wärmeinspeisung gesamt	TWh	102,5
..davon Dampfnetze	TWh	10,1
..davon Wassernetze	TWh	92,1
Wärmeabgabe an Kunden	TWh	89,9
..davon Produktionswärme	TWh	5,8
Verluste	TWh	12,7
Strom aus KWK	TWh	36,3
Wärme aus KWK	TWh	62,0
Wärme aus HW	TWh	16,3
Wärmebezug	TWh	17,4
unbekannte Quelle	TWh	6,8

Fachserie 4 Reihe 6.4

Destatis veröffentlicht die Fachserie 4 Reihe 6.4 zum Thema „Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden“. Die Statistik beschreibt die Wärme- und -Stromerzeugung aus industriellen KWK-Anlagen, sowie reine Stromerzeugungsanlagen und Heizwerke.

In Tabelle 2.1 wird eine Wärmeerzeugung von 99,4 TWh_{th} und eine Stromerzeugung von 53,4 TWh_{el} ausgewiesen. Hiervon entfallen 88,7 TWh_{th} und 33,0 TWh_{el} auf KWK-Anlagen. Diese Werte entsprechen exakt den Angaben aus den AG Energiebilanzen zum Stand der Berichtserstellung.

Die Angaben aus der Fachserie 4 Reihe 6.4 ergänzen die industriellen Wärmenetze um die Heizwerke. Analog zu den Wärmenetzen der allgemeinen Versorgung beträgt auch hier der KWK-Anteil an der Wärmebereitstellung ca. 90 %.

Tabelle 7-5: Aggregierte Daten aus den aufbereiteten AGFW-Hauptberichten

Fachserie 4 Reihe 6.4					
Tabelle	Parameter	Stromerzeugung		Wärmeerzeugung	
		Einheit	2019	Einheit	2019
2.1	Stromerzeugungsanlagen	TWh _{brutto}	53,4	TWh _{netto}	99,4
2.5.1	Stromerzeugungsanlagen	TWh _{netto}	49,5		
2.5.2 & 2.6.2	KWK-Anlagen	TWh _{netto}	33,0	TWh _{netto}	88,7
--	Kraftwerke	TWh _{netto}	16,5	TWh _{netto}	0,0
--	Heizwerke	TWh _{netto}	0,0	TWh _{netto}	10,7
--	BMW _i , Tabelle 21, 2017	TWh	56,8		

Übersicht

Tabelle 7-6 stellt die verschiedenen statistischen Daten zusammen. Relevante und quellenübergreifende Informationen sind farbig gekennzeichnet.

7.2 Potenzial für Fernwärmenetze

Das Potenzial für die Nachverdichtung und die Erweiterung der Wärmenetze ist einer der Datensätze im Rahmen der Regionalisierung in Kapitel 4.1. Die regionale Verteilung des Wärmeverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser wurde unter anderem in /SCHM-01 18/ und /DELPHI-01 16/ beschrieben und wird nachfolgend kurz dargestellt und ist schematisch in Abbildung 7-1 dargestellt. Im Rahmen des Gutachtens erfolgte keine Aktualisierung der Datenbasis.

Detaillierte Gebäudedatenbank einzelner Gemeinden und Städte liefern Kennwerte für die verschiedenen Gebäudetypen. Im FfE-Wohngebäudemodell wird mit diesen Kennwerten und den statistischen Daten zum Gebäudebestand eine zu den BMWi-Energiedaten /BMW-01 17/ konsistente Abbildung des Energieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser erreicht. Die kleinräumige Verteilung auf das 100 m-Gitter des Zensus /DESTATIS-12 14/ wird im Anschluss an die statistische Vorarbeit berechnet. Unter anderem werden folgende Quellen genutzt: /FFE-04 12/, /IER-02 08/, /GFEM-01 04/, /TEC-01 05/, /FFE-01 12/, /SOLPOT-01 14/, /WS-01 18/, /REC-01 01/, /FFE-05 02/, /DIN-01 07/, /GFEM 01-04/, /DWD-01 08/, /CORR-01 13/, /DESTATIS-08 15/, /EEA-04 16/, /BKG-01 17/

Eine detaillierte Analyse des Wärmeverbrauchs im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen basierend auf eigenen Erhebungen erfolgt in /ISI-05 09/, /ISI-01 11/, /ISI-03 15/. Die dort gewählte Differenzierung des Sektors GHD nach Gruppen- und Splitzebene orientiert sich dabei teilweise an den Wirtschaftszweigen (WZ). Die Gegenüberstellung erfolgt in /ISI-03 15/, Tabelle 1-1. Die kleinräumige Verteilung erfolgt hier über die „GHDI-Flächen“ (siehe auch /SCHM-01 18/).

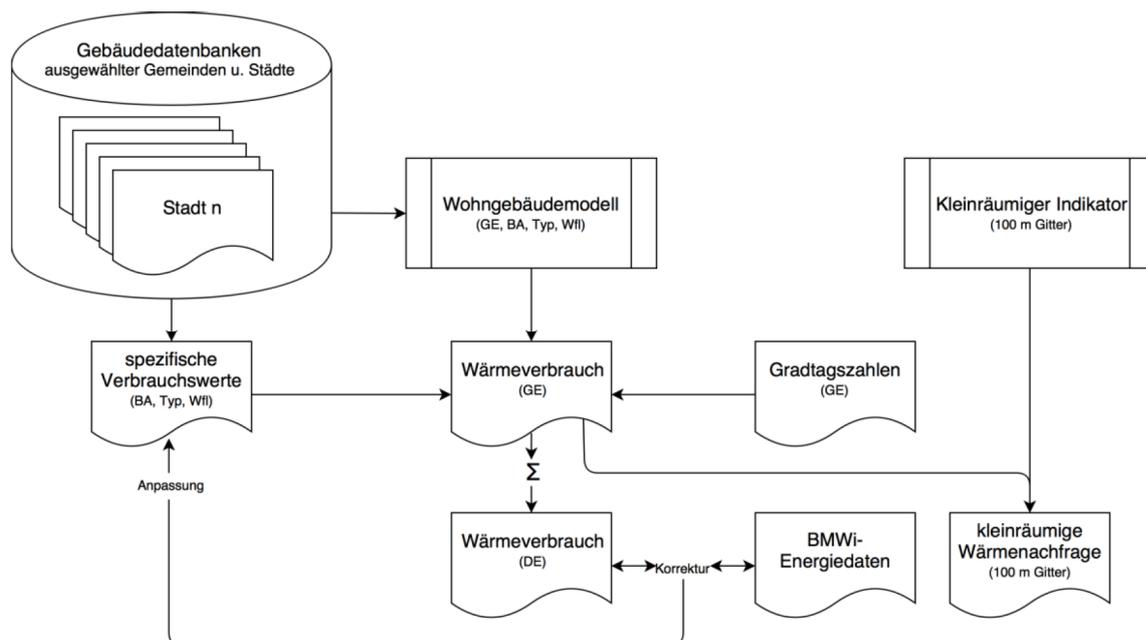


Abbildung 7-1: Modellierung des kleinräumigen Wärmebedarfs

Nachfolgend sind exemplarische Ergebnisse für die Städte Teltow und Olching dargestellt. Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 zeigen den Wärmebedarf (Raumwärme und Warmwasser) zum Zeitpunkt der Datenerhebung. Siedlungsschwerpunkte bilden Bereiche mit hoher Wärmebedarf, Neubaugebiete sind – wie im Nord-Osten von Olching zu erkennen – noch nicht erfasst. Dieser Mangel ist bei der Bilanzierung des Potenzials für Wärmenetze nicht erheblich und hat nur einen geringen bzw. keinen Einfluss auf das Potenzial für Wärmenetze.

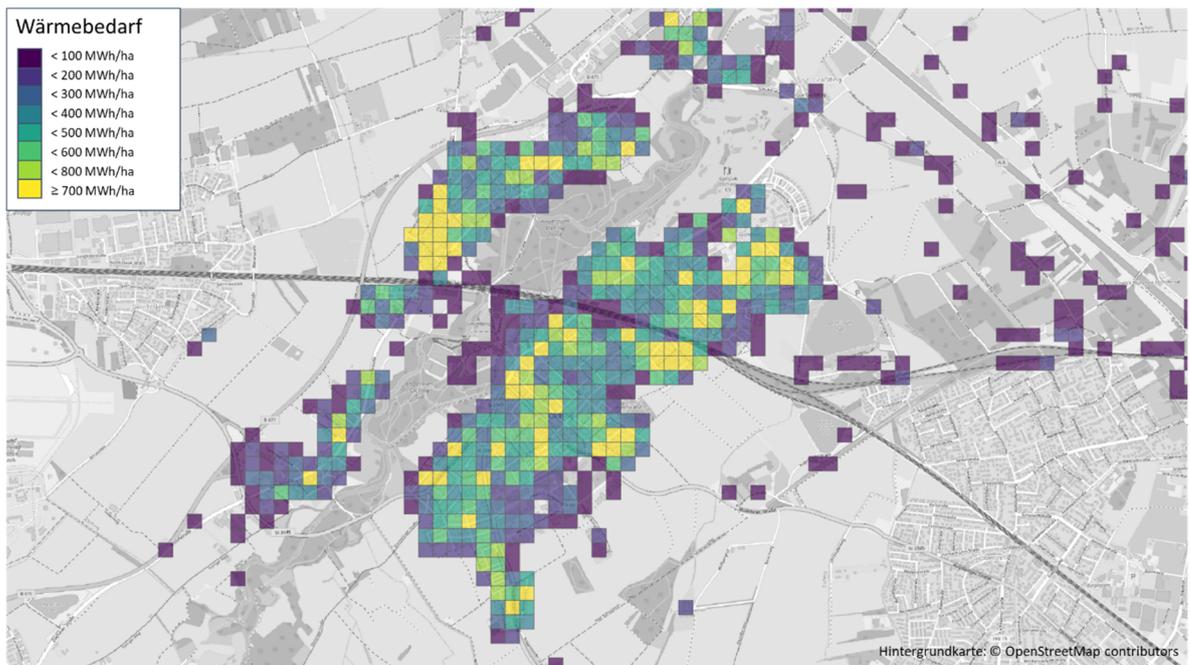


Abbildung 7-2: Wärmebedarf (Raumwärme und Warmwasser); Stadt Olching

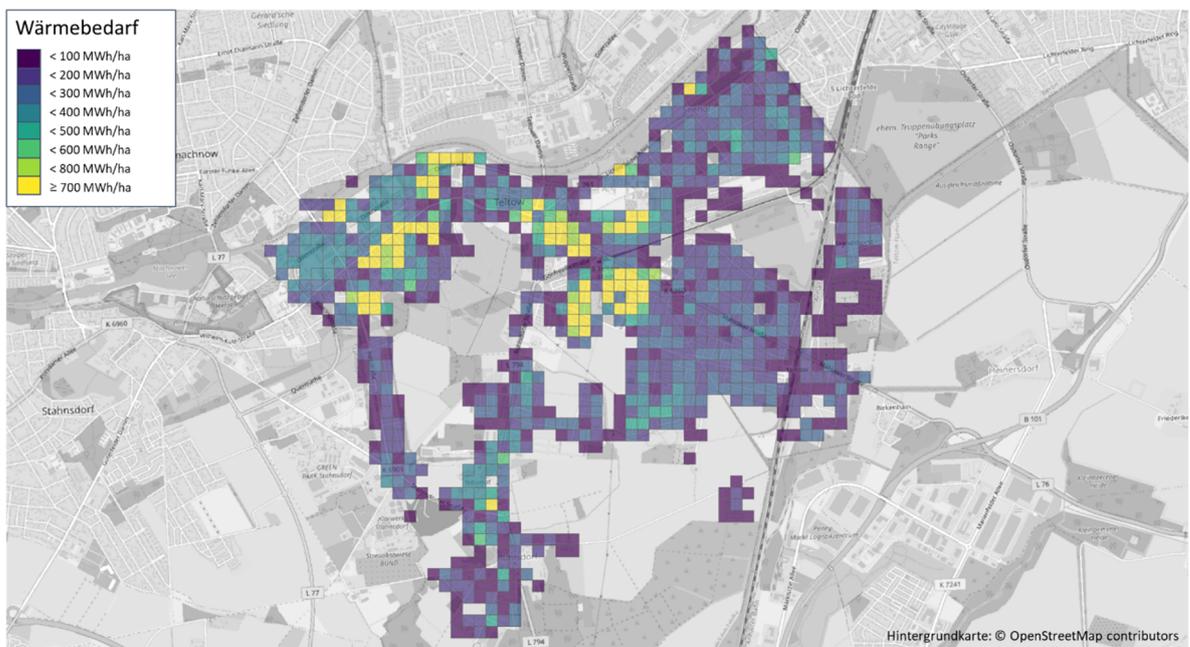


Abbildung 7-3: Wärmebedarf (Raumwärme und Warmwasser); Stadt Teltow

Das Potenzial für Wärmenetze wird über einen Schwellwert für den Wärmebedarf bestimmt. Eine konkrete Betrachtung der benötigten Leitungslängen oder eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt nicht. Der Schwellwert wurde unter Berücksichtigung von /SWEN-01 10/ und /EUT-01 17/ auf 400 MWh/ha festgelegt. Die resultierenden Bereiche für Wärmenetze sind in Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 dargestellt.

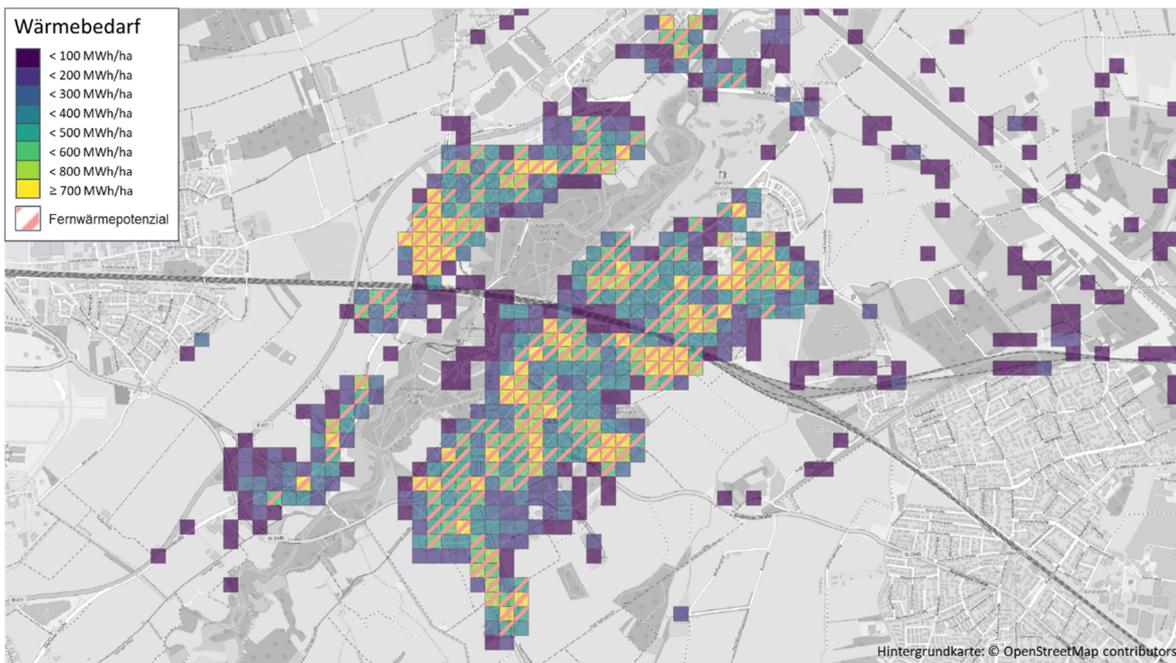


Abbildung 7-4: Potenzial für Wärmenetze; Stadt Olching

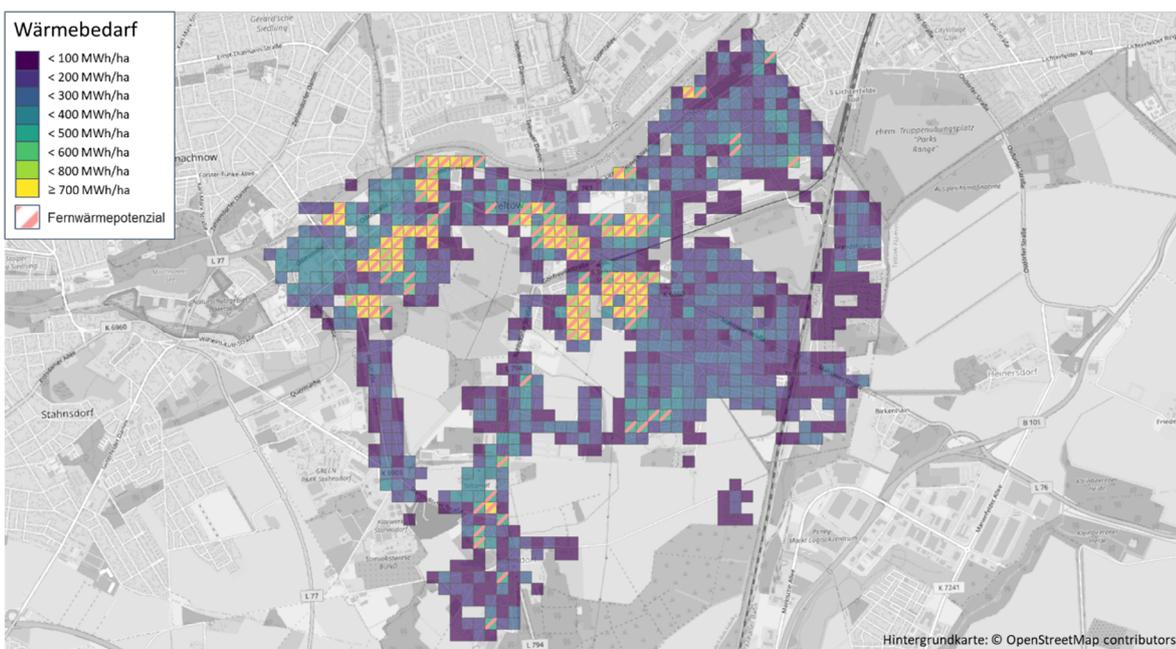


Abbildung 7-5: Potenzial für Wärmenetze; Stadt Teltow

Mit der Sanierung des Gebäudebestands sinkt der Wärmebedarf. Im nachfolgenden Beispiel wird eine Reduktion um 30 % gewählt. In Abbildung 7-6 und Abbildung 7-7 ist das resultierende Fernwärmepotenzial bei unverändertem Schwellwert von 400 MWh/ha dargestellt. Das Fernwärmepotenzial sinkt schneller als der Wärmebedarf der Gebäude.

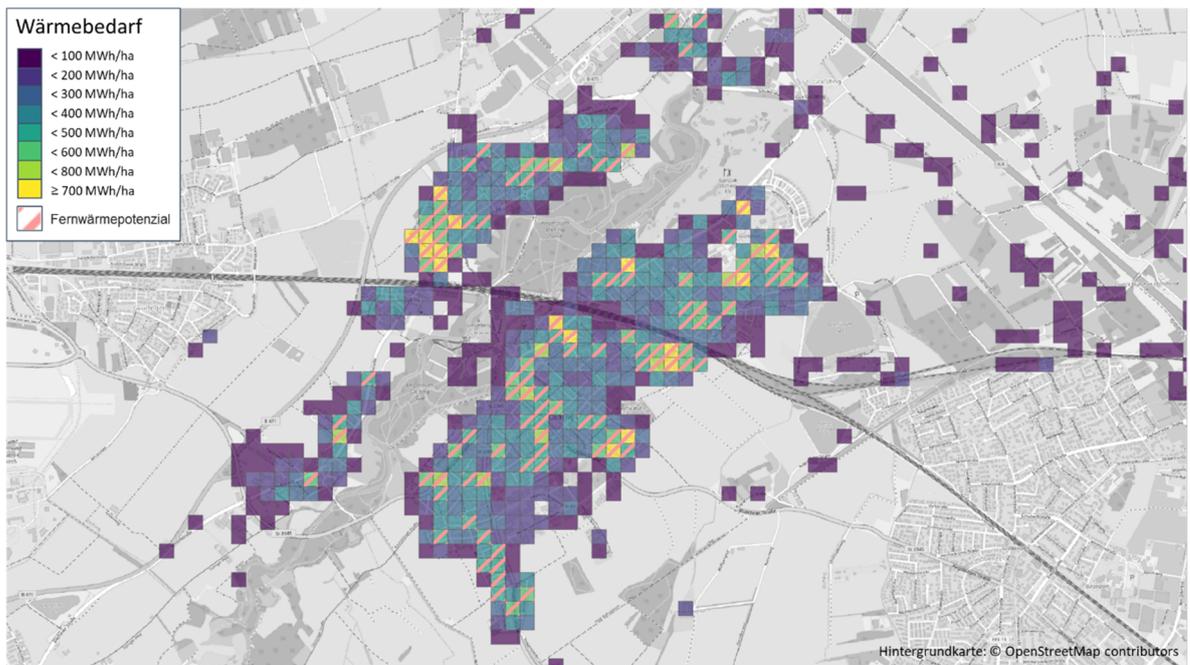


Abbildung 7-6: Potenzial für Wärmenetze; Stadt Olching; Reduktion des Wärmebedarfs -30 %

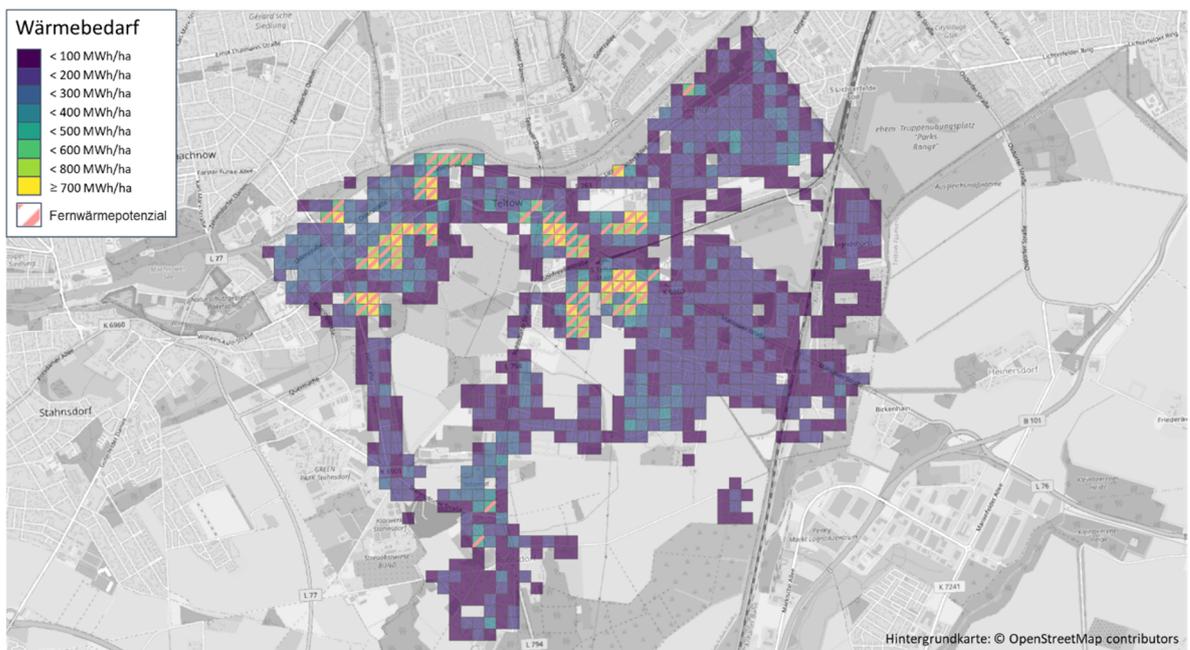


Abbildung 7-7: Potenzial für Wärmenetze; Stadt Teltow; Reduktion des Wärmebedarfs -30 %

Das gesamte Potenzial für Wärmenetze in Deutschland beträgt 340 TWh. Vergleichbare Untersuchungen weisen 387 TWh /DLR-03 12/, 330 TWh /FFE-02 12/, 340 TWh /IER-06 07/ aus. Der hier vorgestellte und genutzte Datensatz ist somit in guter Übereinstimmung mit vergleichbaren Arbeiten.

Einerseits führt die Gebäudesanierung zu einem starken Rückgang des Potenzials für Wärmenetze, andererseits steigt die Relevanz der Wärmenetze für die Wärmeversorgung (siehe auch Kapitel 4.2). Dies erfordert in Zukunft eine höhere Anschlussquote an die Wärmenetze, was durch eine Anpassung des Schwellwerts abgebildet wird. Zum Beispiel sinkt unter Annahme eines konstanten Schwellwerts von 400 MWh/ha und einer Reduktion des Wärmeverbrauchs der Gebäude auf 60 % das Fernwärmepotenzial auf 117 TWh. Dieser Wert wäre kleiner als die angestrebten Mantelzahlen nach Kapitel 4.2.

Im Rahmen des Gutachtens wurde der Schwellwert in Abhängigkeit der vorgegebenen Wärmebedarfsreduktion der Gebäude und des gesamten Fernwärmeabsatzes je Szenario gewählt. Ausgehend von 400 MWh/ha ohne energetischer Sanierung der Gebäude sinkt der Schwellwert auf 150 MWh/ha bei einem Rückgang des Wärmebedarfs der Gebäude um 40 % auf 60 % des Wertes von 2019. Der Zusammenhang ist in Abbildung 7-8 dargestellt. Die ausgewählten Kombinationen von Wärmebedarfsreduktion und Schwellwert (hellgrün markiert) gewährleisteten ein konstantes Fernwärmepotenzial in Deutschland.

217	Fernwärmepotenzial in TWh
293	Ausgewählte Kombination aus Schwellwert und Wärmebedarfsreduktion

Wärmeabsatz in Einheiten des Wärmeabsatzes ₂₀₁₉	Wärmebedarfsdichte in MWh/ha							
	50	100	150	200	250	300	350	400
0 %	0	0	0	0	0	0	0	0
10 %	27	11	5	2	1	1	0	0
20 %	98	55	34	22	15	10	7	5
30 %	177	120	82	59	43	33	25	19
40 %	256	195	145	109	85	67	54	44
50 %	333	274	217	171	137	111	92	77
60 %	410	354	293	240	197	164	138	117
70 %	486	433	372	314	264	224	191	165
80 %	562	511	451	390	336	289	251	218
90 %	638	589	531	469	411	359	315	278
100 %	713	666	610	549	488	433	383	341

Abbildung 7-8: Wärmereduktion und Schwellwerte für das Potenzial der Wärmenetze in TWh