Konzeptstudie zur Vorbereitung der kommunalen Wärmeplanung in Frankfurt am Main

November 2023

Autoren:
Marcus Hummel, Andreas Müller, Mostafa Fallahnejad, Jul Habiger, Ali Kök, Bernhard Mayr, Lukas Kranzl

Auftraggeber:
Stadt Frankfurt am Main, Klimareferat
Solmsstraße 18, 60486 Frankfurt am Main

e-think energy research GmbH, Argentinierstraße 18/10, 1040 Wien www.e-think.ac.at

Einleitung

Die Stadt Frankfurt am Main ist eine der größten Städte in Deutschland. So wie viele andere Städte in Europa auch, wird der Wärmebedarf der Stadt größtenteils über fossile Energieträger gedeckt. Um die massive Umstellung hin zu einer nachhaltigen Wärmeversorgung voranzutreiben, wurde das Instrument der kommunalen Wärmeplanung entwickelt und in den letzten Jahren weiter systematisiert. Mit der jüngsten Novelle des Hessischen Energiegesetzes sind Städte und Gemeinden über 20 000 Einwohner ab November 2023 zu einer kommunalen Wärmeplanung verpflichtet.

Die Stadt Frankfurt am Main arbeitet bereits seit vielen Jahren an der Reduktion der CO_2-Emissionen in der Stadt, u.a. auch im Bereich der Wärmeversorgung der Gebäude. Beispiele sind hier der Masterplan 2050, die Hotmaps Wärme-Strategie 2050 oder die detaillierte Analyse der Potenziale von Abwärme in der Stadt.

Die vorliegende Studie stellt einen weiteren Baustein in der kommunalen Wärmeplanung der Stadt Frankfurt am Main dar. Entsprechend den gesetzlichen Vorgaben für die kommunale Wärmeplanung in Hessen wurden die aktuelle Wärmebedarfs- und Versorgungsstruktur, die Potenziale zur Bedarfssenkung und zur Bereitstellung aus erneuerbarer Energie und Abwärme sowie aussichtsreiche Szenarien für die Wärmewende der Stadt erarbeitet. Damit soll ein weiterer Schritt in Richtung CO_2-neutrale Wärmebereitstellung in der Stadt Frankfurt am Main gesetzt werden.

In dem hier vorliegenden Dokument werden die zentralen Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Studie dargestellt. Ein Fokus liegt auf den daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen. Detaillierte Daten und Annahmen, die in der Untersuchung verwendet bzw. getätigt wurden, sind in einem separat vorliegenden Anhang dokumentiert.

Inhalt

1. Schlussfolgerungen aus der Analyse 9

2. Handlungsempfehlungen 12

3. Rahmen und Methodik 18

4. Derzeitiger Wärmebedarf in den Gebäuden und vorhandene Strukturen zur Bereitstellung 20

5. Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden bis 2035 und darüber hinaus 23

6. Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete und deren Erschließung bis 2035 und darüber hinaus 27

7. Potenziale erneuerbarer Energie und Abwärme zur Nutzung über Fernwärme 31

8. Dekarbonisierte dezentrale Wärmeversorgung 33

9. Potenziale und Kosten zur Erzeugung von Fernwärme aus erneuerbaren Quellen und Abwärme 35

10. Kosten zur Wärmebereitstellung aus Fernwärme und dezentralen Technologien 2035 und darüber hinaus 39

11. Szenarien zur Dekarbonisierung des Wärmebedarfs in den Gebäuden bis 2035 und darüber hinaus und mögliche CO2-Reduktion 43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: In der Untersuchung verwendete Energieträgerpreise (Quelle: e-think, eigene Annahmen) 19

Tabelle 2: Übersicht über den Gebäudebestand der Stadt Frankfurt a. M. und den hochgerechneten (mit Invert modellierten) Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung inklusive der Wärmeverteilverluste in den Gebäuden (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung) 21

Tabelle 3: Überblick über technische Leistungspotenziale (unter Abschätzung der Realisierbarkeit) zur Integration in die Fernwärme nach Energiequelle (Quelle: eigene Analyse) 31

Tabelle 4: Zusätzliche Kosten bei Versorgung vorwiegend über Gas und nicht-Dekarbonisierung der Gasversorgung. Vergleich gegenüber einer Teildekarbonisierung der Gasversorgung bis 2035 und vollständiger Dekarbonisierung bis 2045 (Quelle: eigene Berechnungen) 52

Tabelle 5: Notwendige langfristige Investitionen zur Umstellung des Wärmeversorgungssystems der Gebäude in Frankfurt a. M. (Quelle: eigene Berechnungen) 53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme, Warmwasser- und Prozesswärme in den Sektoren Private Haushalte und Gewerbe in Frankfurt a. M. auf die dabei eingesetzten Energieträger (Quelle: eigene Auswertung und Darstellung der Energiebilanz Frankfurt am Main) 22

Abbildung 2: Kosten (energetische Zusatzkosten, ohne Instandsetzungskosten) pro eingespartem Wärmebedarf für die sechs verschiedenen stadtweiten langfristigen Einsparungsszenarien (Quelle: e-think, eigene Berechnungen und Darstellung)..... 24

Abbildung 3: Szenarien zur Senkung des modellierten Nutzwärmebedarfes in Gebäuden in Frankfurt a. M. bis 2035 und 2045 (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung)..... 25

Abbildung 4: Durchschnittliche jährliche Investitionskosten für Gebäudesanierung (links – nicht diskontiert) und Investitionskosten pro sanierter Bruttogeschossfläche (rechts) in den beiden Intensitäts-Szenarien BAU und AMB für Wohngebäude (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) sowie unterschieden nach energetischen Zusatzkosten (EZK) und Instandsetzungskosten (ISK) (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung) 26

Abbildung 5: Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete in Abhängigkeit durchschnittlicher Wärmeverteilkosten (ØWVK) im Bereich von 34 – 44 EUR/MWh zur weiteren Prüfung..... 28

Abbildung 6: Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete in Abhängigkeit durchschnittlicher Wärmeverteilkosten, bereits vorhandene Netzgebiete und bestehende und geplante Rechenzentrum-Cluster 29

Abbildung 7: Ausbaugeschwindigkeiten [km/a] und jährliche Investitionen für den Fernwärme-Leitungsbau [Mio. EUR/a] in verschiedenen gerechneten Szenarien mit einer unterstellten Anschlussrate von 90% 30

Abbildung 8: Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolien im Heiz-/Warmwassernetz bei mittlerem bzw. hohem Ausbau der Fernwärme im Jahr 2035 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)..... 36

Abbildung 9: Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolien im Dampfnetz bei höherer bzw. niedrigerer Reduktion des Wärmebedarfs im Dampfnetz im Jahr 2035 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 36

Abbildung 10: Last- und Aufbringungsprofil im Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2035, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, hoher Ausbau der Fernwärme (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 37

Abbildung 11: Last- und Aufbringungsprofil im Dampfnetz im Jahr 2035, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, Bedarfsreduktion im Dampfnetz 24% gegenüber 2019 (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 38

Abbildung 12: Vergleich der Wärmebereitstellungskosten im Jahr 2035 für Fernwärme und verschiedene dezentrale Versorgungsoptionen für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (5, 15 und 25 km/a) und Portfolien in der Fernwärme-Aufbringung („Gas-KWK“ entspricht „hoher Anteil Gas an der Spitzenlast“ und „RZ-Divers“ entspricht „niedriger Anteil Gas an der Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung) 40

Abbildung 13: Vergleich der Wärmebereitstellungskosten im Jahr 2045 für Fernwärme und verschiedene dezentrale Versorgungsoptionen für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (5, 15 und 25 km/a) und Portfolien in der Fernwärme-Aufbringung („Gas-KWK“ entspricht „hoher Anteil Gas an der Spitzenlast“ und „RZ-Divers“ entspricht „niedriger Anteil Gas an der Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung) 41

Abbildung 14: Energieträgereinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. im Jahr 2035 für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 44

Abbildung 15: Energieträgereinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. im Jahr 2045 für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 45

Abbildung 16: Jährliche Systemkosten zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. (ohne Sanierungskosten) im Jahr 2035 für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 48

Abbildung 17: Jährliche Systemkosten zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. (ohne Sanierungskosten) im Jahr 2045 für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnungen) 49

Abbildung 18: Berechnete CO2-Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in unterschiedlichen Szenarien („stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“) und Sensitivitäten (Nicht, Teil- und Komplett-„Dekarbonisierung Gasversorgung“ und „Versorgung komplett über Gas“) in den Jahren 2035 und 2045 unter den beschriebenen Rahmenbedingungen (Quelle: eigene Berechnungen) 51

Abbildung 19: Verteilung der notwendigen langfristigen Investitionen zur Umstellung der Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt a. M. (Quelle: eigene Berechnungen) 54

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abwasserreinigungsanlage
BISKO	Bilanzierungs-Systematik Kommunal
CO_2	Kohlendioxid
EBA	Ersatzbrennstoffanlage
EE	Erneuerbare Energien
EZK	Energetische Zusatzkosten
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWh	Gigawattstunden
ISK	Instandsetzungskosten
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraftwärmekopplung
MFH	Mehrfamilienhaus
MW	Megawatt
NWG	Nichtwohngebäude
WG	Wohngebäude
WVK	Wärmeverteilkosten

1. Schlussfolgerungen aus der Analyse

Um die Gebäude der Stadt Frankfurt am Main klimaneutral mit Wärme versorgen zu können, müssen sowohl der Wärmebedarf der Gebäude deutlich reduziert als auch die Versorgungssysteme weitreichend umgestellt werden. Dabei ist zu bedenken, dass erneuerbare Ressourcen sowie auch Abwärme vor allem lokal und nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. Gleichzeitig können zahlreiche der vorhandenen lokalen Abwärmepotenziale, wie etwa die Abwärme aus Rechenzentren, nur über Fernwärmesysteme sinnvoll nutzbar gemacht werden. Somit gilt: **Je höher der mittelfristig verbleibende Wärmebedarf der Gebäude und je geringer der Anteil** der **an Fernwärme** angeschlossenen Gebäude **in potenziellen Fernwärme-Gebieten**, **desto wahrscheinlicher** ist, **dass die Wärmeversorgung** in Frankfurt am Main **stark von Importen abhängig sein wird**. Dies wiederum erhöht zum einen die Wahrscheinlichkeit, **dass eine klimaneutrale Versorgung teurer wird**, weil beispielsweise größere Mengen CO_2-neutrales Gas benötigt werden, zum anderen auch, **dass eine klimaneutrale Versorgung nicht erreicht werden** kann, wenn beispielsweise die benötigten Mengen CO_2-neutrales Gas nicht zugekauft werden können.

Die derzeitige Wärmeversorgung der Frankfurter Gebäude erfolgt in erster Linie über fossiles Erdgas sowie primär Kohle- und Gas-basierten Ferndampf und Fernwärme. Gleichzeitig ist der derzeitige Anteil an Fernwärme in der Stadt gegenüber einem potenziell zukünftig sinnvollen Anteil gering. Da bis 2035 nur 12 Jahre verbleiben, ist **eine vollständige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Stadt Frankfurt am Main bis 2035 äußerst ambitioniert** und voraussichtlich nur schwer zu realisieren. Mittelfristig, z.B. bis 2045, erscheint eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Stadt realisierbar. Unter Anbetracht der Risiken hoher Energieträgerpreise und CO_2-Preise sollte eine rasche Umstellung der Versorgungsstrukturen angestrebt werden.

Zentral für die kosteneffiziente Realisierung einer dekarbonisierten Wärmeversorgung der Stadt Frankfurt am Main ist eine **Erhöhung der Sanierungsgeschwindigkeit** der bestehenden Gebäude. Eine deutliche Steigerung der jährlichen Sanierungsrate könnte realisiert werden, indem der **Fokus auf ausgewählte Gebäude und Gebiete** mit hohen Einsparungspotenzialen und geringen Barrieren gelegt wird, wie etwa auf Gebiete mit Mehrgeschoss- Wohnbau aus der Nachkriegszeit, während denkmalgeschützte Gebäude in zentraler Lage gezielt an die Fernwärme angeschlossen werden. Eine Sanierung der Gebäude trägt neben einer generellen Reduktion des Wärmebedarfs auch zu einer Reduktion der Spitzenlast an den kältesten Tagen bei. Die Dekarbonisierung der Spitzenlast an diesen Tagen stellt gleichzeitig technologisch die größte Herausforderung dar, da zu diesen Zeiten CO_2-neutraler Strom oft nur bedingt vorhanden ist. Somit ist neben der Sanierung eine Zwischenspeicherung der Energie eine essenzielle CO_2-Vermeidungsoption.

In der Untersuchung zeigt sich, dass ein **deutlicher Ausbau der Fernwärme volkswirtschaftlich sinnvoll** zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Stadt ist. Zum einen sind in den berechneten Szenarien höhere Anteile an Fernwärme generell kostengünstiger. Zum anderen erlauben höhere Anteile an Fernwärme die Nutzung zahlreicher vorhandener Abwärmequellen, die ohne Fernwärme kaum nutzbar wären. Dadurch verringert sich das Risiko hoher Versorgungskosten bei hohen Preisen für CO_2-freies Gas markant. Das Autorenteam geht davon aus, dass CO_2-neutrales Gas mittelfristig ein knappes Gut darstellen wird. Daher kann grundsätzlich nicht davon ausgegangen werden, dass ausreichende Mengen CO_2-neutrales Gas für die Wärmeversorgung der Stadt Frankfurt am Main zur Verfügung stehen werden.

Aus den Gesprächen mit dem Gasnetzbetreiber ging hervor, dass dieser eine Umstellung des bestehenden Verteilnetzes von Erdgas auf Wasserstoff als mögliche Zukunftsoption erachtet. **Derzeit liegt** jedoch **kein** konkreter Umsetzungs- bzw. **Transformationsplan für die Umstellung des bestehenden Erdgas-Verteilnetzes zu einem CO_2-neutralen Verteilnetz vor** und müsste gegebenenfalls entwickelt werden. Aus heutiger Sicht kann daher nicht mit ausreichender Sicherheit davon ausgegangen werden, dass eine Umstellung zu einem klimaneutralen Gasnetz fristgerecht zur Erreichung der Klimaneutralität von Frankfurt am Main bis 2035 bzw. 2045 erfolgen wird. Des Weiteren ist unklar, ob genügend CO_2-neutrales Gas zu wettbewerbsfähigen Preisen vorhanden sein wird. Von einem klimaneutralen Gasnetz kann erst dann ausgegangen werden, wenn ein umsetzbarer, konkreter Transformationsplan vorgelegt und von Experten als umsetzbar eingestuft wird. Darin müssen auch klare Regelungen hinsichtlich der Haftungspflichten bei Nicht-Erfüllung der Ziele im Transformationsprozess enthalten sein.

In der dezentralen Versorgung erscheint dem Autorenteam ein **weitestgehender Umstieg auf** die Versorgung durch verschiedene **Wärmepumpen**-Technologien sinnvoll und kostengünstig. Dabei könnte auch das Konzept der **Hybrid-Wärmepumpen** forciert werden, **um die Geschwindigkeit der Transformation zu erhöhen**. Bestehende Gas-Heizungen sollten um eine Wärmepumpe erweitert werden, die die Grundlast des Wärmebedarfs abdeckt, während in Spitzenlastzeiten zusätzlich das Gasgerät zum Einsatz kommt. Dadurch können zum einen Lastspitzen im Stromsystem reduziert werden, und zum anderen können kleinere Wärmepumpen installiert werden, die nach einer späteren Sanierung der Gebäude nicht überdimensioniert sind. In diesem Zusammenhang sollten die Gebäude sowie die Strominfrastruktur der Stadt auf eine hohe Marktdurchdringung von Wärmepumpen vorbereitet werden. Ein Fokus sollte dabei auf die Gebiete gelegt werden, in denen die technische Machbarkeit der Installation von Wärmepumpen gewährleistet werden kann, weil einerseits die derzeit bestehenden Heizungs- und Wärmeverteilsysteme und andererseits die Potenziale an Wärmequellen in Untergrund oder Luft gegeben und nutzbar sind.

Durch die weitreichende Umstellung auf Fernwärme und Wärmepumpen sowie die gesenkten Wärmebedarfe in der Stadt wird die Gas-Abnahme aus dem städtischen Gasverteilnetz markant abnehmen. Bei gleichzeitiger Erhaltung der gesamten Gasnetz-Infrastruktur führt dies zu stark erhöhten Verteilnetzkosten pro verteilter Energieeinheit an Gas. Um dies zu vermeiden, sollte parallel die **Transformation der Gasnetz-Infrastruktur** in der Stadt geplant werden. Insbesondere in Gebieten, in denen Fernwärme angeboten bzw. ausgebaut werden wird, sollte eine Stilllegung von Teilsträngen konkret geprüft, geplant und in Raumordnungskonzepten verankert werden.

Der ambitionierten und weitreichenden Transformation der Wärmeversorgungsstrukturen in der Stadt Frankfurt am Main stehen **erhebliche Barrieren** gegenüber. Dies umfasst u.a. **langsame Planungs- und Genehmigungsprozesse** relevant für Sanierungen und Fernwärme-Netzausbau, sowie einen **Mangel an Facharbeitskräften** in der Sanierung, Heizungstausch sowie Fernwärme-Netzausbau. Um die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Stadt voranzutreiben und möglichst rasch umzusetzen, müssen Maßnahmen getroffen werden, damit entsprechende Barrieren reduziert werden.

Damit die **Dekarbonisierung der Wärmeversorgung** der Stadt Frankfurt am Main stattfindet, müssen eine Vielzahl an Entscheidungen, große Investitionen und eine Vielzahl an Projekten umgesetzt werden. Durch die Massivität der Systemumstellung und entsprechend langen Vorlaufzeiten bei derartigen Infrastruktur-Umstellungen müssen die Entscheidungen, Investitionen und Projekte **möglichst parallel**

und stetig vorangetrieben werden. Nur dann kann die Wärmewende in einem absehbaren Zeithorizont umgesetzt werden.

2. Handlungsempfehlungen

Forcierung von Sanierungsmaßnahmen mit hohen Potenzialen und geringen Barrieren

Konkrete Handlungsempfehlungen:

- **Besitzer von Gebäuden** mit hohen Einsparpotenzialen und geringen Barrieren gezielt **ansprechen**. Priorisierung der Gebäude entsprechend den Berechnungen im Rahmen der vorliegenden Studie (S1)
- Systematische **Erstellung von energetischen Quartierskonzepten** für alle Quartiere in der Stadt (S2)
- Angebot zur **Energieberatung ausbauen** (S3)

Um die Versorgungssicherheit mit klimaneutraler Wärme für die Gebäude in der Stadt zu erhöhen, muss die durchschnittliche Sanierungsrate in der Stadt von derzeit rund 1% pro Jahr auf ca. 1,7% pro Jahr deutlich erhöht werden. Gleichzeitig muss auch die Tiefe der Sanierungen erhöht werden, also der Anteil an Sanierungen, bei denen nicht nur Fenster getauscht, sondern auch weitere Teile der Außenhülle entsprechend dick gedämmt werden. Gleichzeitig sind unterschiedlich starke Barrieren gegenüber thermischer Sanierung in verschiedenen Gebieten (z.B. Wohnblock-Siedlungen gegenüber Innenstadt-Gebieten) und Gebäudetypen (z.B. Mehrgeschoss-Wohnbau aus den 1950er bis 1980er Jahren gegenüber denkmalgeschütztem Altbau) zu erwarten. Um eine deutliche Erhöhung der Sanierungsaktivitäten zu erreichen, sollte der Fokus auf Gebäude mit hohem Reduktionspotenzial und geringen technischen Barrieren gelegt werden. Hier sind beispielsweise Nachkriegsbauten, Reihenhäuser oder Mehrfamiliengebäude in Zeilenbebauung zu nennen. Generell sollten einfache und kopierbare Sanierungslösungen erarbeitet werden, die dann breit über die Stadt ausgerollt werden können. Auch könnte es sinnvoll sein die Sanierung von mehreren gleichartigen Gebäuden in räumlicher Nähe zu größeren Projekten zusammenzufassen und damit Skaleneffekte zu erzielen (z.B. Quartierslösungen). Ein Fokus auf die Umsetzung von Sanierungsprojekten in Gebäuden mit wenigen Eigentümern bzw. zentraler Verwaltung könnte die Sanierungsraten ebenfalls erhöhen.

Zur Forcierung der Sanierungsaktivitäten in der Stadt wird die Gründung einer eigenen Abteilung in der Stadtverwaltung empfohlen. Diese könnte z.B. beim Klimareferat oder beim Stadtplanungsamt angesiedelt sein, und sollte mit entsprechenden personellen Ressourcen ausgestattet sein. Die Aktivitäten könnten dabei teilweise über das KfW432 Programm finanziert werden und die Quartiere der Stadt könnten sukzessive abgearbeitet werden.

Wie aus den Modellergebnissen ersichtlich liegen große wirtschaftliche Einsparungspotenziale bei unsanierten Mehrfamilienhäusern aus der Nachkriegszeit und unsanierten Bürogebäuden. In beiden Gebäudetypen ist es lt. Modellergebnissen sinnvoll, Außenwände und oberste Geschossdecke zu dämmen sowie die Fenster zu tauschen. Die Maßnahmen sollten dabei jeweils mindestens zu einer Halbierung des Wärmedurchgangs in den entsprechenden Bauteilen führen. Ein Fenstertausch sollte generell in allen Gebäuden forciert werden, in den meisten Fällen auch die Dämmung der obersten Geschossdecke oder auch des Daches im Zuge einer Neueindeckung oder bei der Aufstockung der

Gebäude. Bei der Dämmung von Fassaden sollte der Fokus auf einfache, konventionelle Fassaden gelegt werden. In Fällen, in denen die Vorderseite durch z.B. strukturierte Fassaden oder Denkmalschutz nur aufwändig zu dämmen ist, könnte es sinnvoll sein, eine Dämmung nur an der Hinterseite der Gebäude und am Dach bzw. oberster Geschoßdecke anzubringen. Aufgrund unterschiedlicher Lebenserwartungen von Gebäudekomponenten kann es sinnvoll sein, nicht alle Maßnahmen auf einmal durchzuführen. Im Fall einer solchen schrittweisen Sanierung, ist darauf zu achten, dass die durchgeführten Sanierungsschritte mit weiteren, für einen späteren Zeitpunkt geplanten Verbesserungen abgestimmt durchgeführt werden. Dazu ist der Gebäudepass bzw. individuelle Sanierungsfahrplan ein geeignetes Instrument, insbesondere im Bereich der Einfamilienhäuser, aber auch bei anderen Gebäudetypen. Der weitere Ausbau von Beratungs- und Unterstützungsdienstleistungen, wie One-Stop-Shops und das öffentliche und unabhängige Angebot an Energieberatung, stellt auch eine wichtige Maßnahme dar, um Barrieren der Gebäudesanierung zu reduzieren. Zusätzlich zur Reduktion des Raumwärmebedarfs sollte auch die Reduktion des Bedarfs an Warmwasser in den Gebäuden mit Beratungsmaßnahmen forciert werden.

In der gegenständlichen Untersuchung wurden die Energiebedarfe und Reduktionspotenziale gebäudescharf errechnet. Die Ergebnisse der Studie können als Basis für die Priorisierung der Gebäude, die Vorschläge hinsichtlich Sanierungsmaßnahmen in der Energieberatung, und auch als Basis für die Entwicklung eines Sanierungsfahrplanes herangezogen werden.

Deutliche Forcierung des Fernwärme-Ausbaus sowie der Verdichtung der bestehenden Netze

Konkrete Handlungsempfehlungen:

- Eine oder mehrere **Arbeitsgruppe(n) Fernwärme gründen** (FW1)
- **Städtische Liegenschaften an die** (dekarbonisierte) **Fernwärme anschließen** (FW2)
- **Planungsrechtliche Grundlagen** zum Ausbau und der Verdichtung **der Fernwärme prüfen und umsetzen** (FW3)

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass ein deutlich erhöhter Anteil an Fernwärme in der Stadt die Dekarbonisierung erleichtert, wenn nicht sogar erst ermöglicht, und gleichzeitig ein Risiko hoher Energieversorgungskosten deutlich reduziert. Gebiete, die sinnvollerweise mit Fernwärme versorgt werden könnten, sind dabei nicht nur Gebiete mit hohen Wärmedichten und hohem Anteil an denkmalgeschützten Gebäuden, sondern auch Gebiete mit großen lokal verfügbaren Potenzialen an Abwärme. Dabei führen hohe Anschlussraten in Gebieten, in denen Fernwärme angeboten wird, zu geringeren Wärmeverteilkosten. Dies liegt zum einen an niedrigen Wärmeverlusten im Verhältnis zur abgesetzten Wärme, zum anderen an niedrigeren Investitionen durch weniger Trassenmeter pro angeschlossenem Kunden. Aus diesem Grund sollte eine **Ausweisung von Fernwärmegebieten** erfolgen, in denen ein hoher Wärmebedarf pro Hektar besteht, Sanierung der Gebäude schwer umzusetzen ist (z.B. Denkmalschutz), und wo günstige Abwärmequellen in unmittelbarer Nähe vorhanden sind. Da es sich um langjährige Infrastrukturprojekte handelt und eine Umstellung der bestehenden Versorgungsstrukturen nicht innerhalb eines kurzen Zeitraumes umsetzbar ist, ist sowohl für die Bewohner dieser Gebiete als auch für potenzielle Fernwärmenetzbetreiber Planungssicherheit

wichtig. Daher sollten zum Aufbau neuer und auch zur Verdichtung bestehender Fernwärme-Netzinfrastruktur **planungsrechtliche Grundlagen und Möglichkeiten** geprüft und umgesetzt werden. Beispielsweise könnte ein Fernwärme-Anschluss- und Benutzungszwang in bestimmten Gebieten formuliert werden. Ausnahmen vom Anschluss and die Fernwärme könnten etwa nur dann zulässig sein, wenn ein Gebäude nachweislich auf einem anderen Weg klimaneutral mit Wärme versorgt wird. Verbrennungstechnologien sollten in diesen Gebieten grundsätzlich als Versorgungstechnologien ausgeschlossen werden. Ein Einsatz von Biomasse in Gebieten mit hohen Wärmedichten erscheint sowohl aus Sicht lokaler Emissionen, aus Sicht der Versorgungssicherheit und auch aus Sicht begrenzter lokaler Ressourcen nicht als sinnvolle Alternativlösung. Als Basis für die Entwicklung von Gebieten mit Fernwärme-Anschluss- und Benutzungszwang sollten die Ergebnisse dieser Studie herangezogen werden. Die hierbei identifizierten Fernwärme-Potenzialgebiete müssen in weiterer Folge über Machbarkeitsstudien mit höherem Detailgrad in Teilgebieten verifiziert werden. Parallel könnten in sehr vielversprechenden Gebieten (mit niedrigen identifizierten Verteilkosten) Ausschreibungen für die Versorgung mit Fernwärme bei gleichzeitiger Anschluss- und Benutzungsverpflichtung gestartet werden.

Als wichtigen Schritt zum Ausbau der Fernwärme sollten **städtische Liegenschaften an die Fernwärme** angeschlossen werden. Wie zuvor beschrieben gibt es in Frankfurt am Main hohe Potenziale der CO_2-freien Bereitstellung von Fernwärme bei gleichzeitig dichter Bebauung. Die Dekarbonisierung des derzeitigen Fernwärmesystems bei gleichzeitigem Ausbau stellt damit eine zentrale Säule der Dekarbonisierung der Stadt dar. Bei städtischen Liegenschaften handelt es sich in vielen Fällen um größere Gebäude mit entsprechend hohen Wärmebedarfen. Für den wirtschaftlichen Ausbau der Fernwärme stellen diese Gebäude eine wichtige Bedarfssäule dar, die städtischen Liegenschaften sollten als Ankerkunden einen Ausbau der Fernwärme vorantreiben. Darüber hinaus wird es für größere Gebäude in dicht besiedelten Gebieten technisch schwierig bzw. entsprechend teuer eine Dekarbonisierung mittels dezentraler Lösungen umzusetzen, da lokal vorhandene Umgebungswärme oder Solarflächen im Verhältnis zum Wärmebedarf niedrig sind.

Der weitreichende Ausbau der Fernwärme bedeutet eine markante Umstellung der städtischen Infrastruktur. In einer Vielzahl an Straßen müssen parallel sowie sequenziell Bauarbeiten durchgeführt werden. Um den weitreichenden Ausbau schnell und effizient zu gestalten, muss dieser koordiniert durchgeführt werden. Es sollten eine oder mehrere **Arbeitsgruppen** gegründet werden, welche sich zentral mit der **Umstellung und** dem **Ausbau der Fernwärmesysteme der Stadt** beschäftigt und alle wesentlichen Akteure umfasst. Hierbei könnte entweder eine größere Arbeitsgruppe Fernwärme, oder auch mehrere Arbeitsgruppen strukturiert z.B. nach den verschiedenen involvierten Gewerken sinnvoll sein. Diese Arbeitsgruppe(n) sollte(n) eine Strategie und einen Fahrplan für den schrittweisen Ausbau der Fernwärmenetze erarbeiten, welcher auch die Umstellung des innerstädtischen Dampf- zu einem Heizwassernetz integriert. Die Arbeitsgruppe(n) sollte(n) auch Genehmigungsprozesse beschleunigen und die transparente Kommunikation der Ausbaustrategie sowie auch des Fernwärme-Anschluss- und Benutzungszwangs bei Gebäudeeigentümer:innen sicherstellen. Das Verständnis der Sinnhaftigkeit des Fernwärmeausbaus für die Dekarbonisierung der Stadt bei der Bevölkerung und den Gebäudebesitzer:innen ist hierbei ein wichtiger Faktor für die erreichbare Ausbaugeschwindigkeit. Die Arbeitsgruppe(n) sollte(n) einem Steuerungskreis Wärmewende zuarbeiten, welcher sich themenübergreifend mit der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Stadt befasst (eine genauere Beschreibung siehe Punkt „Aufbau von Kapazitäten“, Handlungsempfehlung KA1).

Forcierung der Nutzung von lokal vorhandener Abwärme sowie erneuerbarer Ressourcen

Konkrete Handlungsempfehlungen:

- **Machbarkeitsstudien zur Nutzung von Abwärme** (Rechenzentren, Flusswasser, Abwasser) **sowie erneuerbare Energien** (Geothermie) für alle aussichtsreichen Standorte in der Stadt **zusammen mit einem Konzept** für einen Zusammenschluss aller Gebiete mittels **einer Ringleitung erstellen** (AE1)
- Ein **Konzept zur saisonalen Speicherung** von Erneuerbaren Energien und Abwärme **erstellen** (AE2)
- Eine **Strategie zur Transformation der Gasnetz-Infrastruktur erstellen** (AE3)
- **Aufbau** eines **Erdwärmepotenzial-Katasters** (AE4)

Die Stadt Frankfurt am Main ist als Knotenpunkt nationaler und internationaler Datenübertragung sehr interessant für die Ansiedelung von Datenzentren. Die Kühlung von Datenzentren wiederum ermöglicht bei entsprechender Umsetzung eine sowohl technisch als auch wirtschaftlich äußerst interessante Option der dekarbonisierten Wärmeversorgung der Stadt. Um die Nutzung der Abwärme aus der Kühlung von Datenzentren in Frankfurt am Main zu forcieren, sollten **Machbarkeitsstudien** zur Nutzung der Abwärme zur Wärmebereitstellung in Gebäuden für alle Rechenzentrums-Cluster in der Stadt erstellt werden. Da das Wärmeabnahmepotenzial in mittelbarer Umgebung zahlreicher Rechenzentrums-Cluster deutlich kleiner ist als das voraussichtlich vorhandene Abwärmepotenzial, könnte es sinnvoll sein die Rechenzentrums-Cluster mit Fernwärmenetzen in anderen Teilen der Stadt zu verbinden. Darüber hinaus steht die Abwärme aus den Rechenzentren nahezu konstant über das Jahr zur Verfügung. Da der Wärmebedarf in der Stadt im Sommer deutlich niedriger ist als im Winter und in den Übergangszeiten, sollte ein **Konzept zur saisonalen Speicherung** der Abwärme entwickelt werden. Dabei könnte es sinnvoll sein, alle Rechenzentrums-Cluster über eine **Ringleitung** miteinander und mit möglichen Speicherstandorten zu verbinden. Derartige Konzepte sollten entwickelt und auf deren Machbarkeit geprüft werden. Zur weiteren Diversifizierung der CO_2-neutralen Wärmeaufbringung in der Fernwärme und damit einhergehender Minderung des Risikos von einzelnen Technologien, Standorten bzw. Rechenzentrums-Clustern abhängig zu sein, sollte ebenfalls das Potenzial an Wärmenutzung aus Flusswasser sowie Tiefen-Geothermie teilweise genutzt werden. Auch hier sollten Machbarkeitsstudien für einzelne Standorte und Projekte sowie eine schrittweise Umsetzung vorangetrieben werden. Die Abwärme aus der Müllverbrennung wird derzeit in eines der Warmwassernetze in der Stadt eingespeist. Da die Bereitstellung von Dampf aus der Müllverbrennung eine der wenigen Optionen zur Substitution (CO_2-neutraler) gasförmiger Energieträger im innerstädtischen Dampfnetz darstellt, sollten Optionen zur Umstellung des bestehenden Systems hinsichtlich technischer Möglichkeiten, Wirtschaftlichkeit, und auch hinsichtlich Genehmigungsfähigkeit geprüft werden.

Derzeit werden in Frankfurt am Main viele Gebäude über Gasbasierte Technologien beheizt. Das Gas wird aus dem Gasnetz in der Stadt bezogen. Durch eine massive Reduktion des Einsatzes von Gas für die Wärmeversorgung in der Stadt werden die Transportkosten für Gas über das vorhandene Gasnetz

pro transportierte Energieeinheit deutlich ansteigen. Um hier die Kosten für die Endkunden bzw. auch für die Allgemeinheit gering zu halten, sollte eine **Strategie zur Transformation der Gasnetz-infrastruktur** erstellt werden. In Gebieten, in denen Fernwärme angeboten bzw. ausgebaut werden wird, sollte eine stufenweise Stilllegung von Teilsträngen des bestehenden Gasnetzes konkret geprüft, geplant und in Raumordnungskonzepten verankert werden. Hier sollten rechtliche Möglichkeiten auf städtischer, Landes- und Bundesebene geprüft und ein möglicher Anpassungsbedarf gemeinsam mit anderen Städten vorgebracht und diskutiert werden. Als Übergangslösung hin zu einer vollständigen Dekarbonisierung derzeit mit Gas versorgter Gebäude könnten Hybrid-Wärmepumpen eine sinnvolle Option sein, auch um den Dekarbonisierungsprozess zu beschleunigen. In Gebieten mit einem Fernwärme-Anschluss- und Benutzungszwang sollten Hybrid-Systeme allerdings nicht als Alternative erlaubt sein. In Gebieten, in denen Fernwärme voraussichtlich nicht volkswirtschaftlich umsetzbar ist und derzeit ein Gasnetz vorhanden ist, sollte abschnittsweise geprüft werden, ob und wann eine Stilllegung von Teilsträngen des Gasnetzes sinnvoll ist. Grundsätzlich sollten Eigentümer:innen von Gebäuden, welche sich in Gebieten befinden, die voraussichtlich nicht an die Fernwärme angebunden sein werden, darüber informiert werden, dass möglicherweise mittelfristig das Gasnetz stillgelegt werden könnte, um bei der Planung möglicher Gas-Hybrid-Heizungen bereits zu berücksichtigen, dass zu einem späteren Zeitpunkt der Leistungsbedarf im Gebäude gesenkt werden sollte.

Darüber hinaus können die Eigentümer:innen durch eine Informationsstelle bzw. ein Online-Kataster über alternative erneuerbare Energiequellen informiert werden. In diesem Zusammenhang ist der **Aufbau eines Erdwärmepotenzialkatasters**, das sowohl Informationen über Erdwärmesonden als auch zur thermischen Grundwassernutzung bietet, sehr relevant. Die Stadt Wien beispielsweise bietet durch ihr Erdwärmepotenzialkataster Informationen zur Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds, die bei der Planung und Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen verwendet werden können (Stadt Wien and GeoSphere Austria, 2023). Diese Informationen werden für verschiedene Tiefenintervalle (0-50 m, 0-100 m und 0-200 m) anhand des geologischen Untergrundaufbaus angegeben.

Aufbau von Kapazitäten bei Personal und Datenverarbeitung

Konkrete Handlungsempfehlungen:

- Einen **Steuerungskreis Wärmewende** mit Entscheidungsträgern in der Stadt **gründen** (KA1)
- Ein **automatisiertes Datensystem für Planung und Monitoring** der Dekarbonisierung **aufsetzen** (KA2)
- **Weiterbildungsangebote** in für die Wärmewende benötigten Gewerken **verstärken** (KA3)

Zur Umsetzung der Wärmewende in Frankfurt am Main ist es notwendig eine Vielzahl an strategischen, rechtlichen und infrastrukturellen Entscheidungen in der Stadt zu treffen. Um diese Entscheidungen möglichst effizient, schnell und unter möglichst hohem Rückhalt in der Bevölkerung und den betroffenen Personen zu treffen, sollte ein zentrales Gremium gegründet werden, welches sich primär mit dem

Thema der Wärmewende befasst. Konkret sollte ein **Steuerungskreis Wärmewende** gegründet werden, in welchem alle für die Wärmewende relevanten Entscheidungsträger permanent vertreten sein sollten. Eine zentrale Stelle sollte die Steuerungsgruppe koordinieren und zu regelmäßigen Treffen mit konkreten Agenden und Beschlüssen einladen. **Zusätzlich** sollten **inhaltliche Arbeitsgruppen** gegründet werden, die im Steuerungskreis die jeweils aktuellen Themen und Entscheidungen vorbereiten und vorbringen. Thematisch könnten etwa unterschiedliche Arbeitsgruppen beispielsweise zu folgenden Themenfeldern angedacht werden: Gebäudesanierung, Ausbau und Dekarbonisierung der Fernwärme, dekarbonisierte dezentrale Bereitstellung. Die Arbeitsgruppen sollten dann permanent mit Personen aus allen relevanten Abteilungen und Ämtern der Stadt besetzt werden, wie etwa das Stadtvermessungsamt, das Planungsamt, das Umweltamt, das Klimareferat und das Amt für Straßenbau und Erschließung. Zusätzliche Inputs auch von externen Fachleuten zu definierten Themen könnten ebenfalls vorgesehen werden.

Zur Beobachtung des Fortschritts der Wärmewende ist ein **kontinuierliches Monitoring** wichtig. Gleichzeitig sollten die strategischen, rechtlichen und infrastrukturellen Entscheidungen auf Basis möglichst hochwertiger und aktueller Daten erfolgen. Daher wird empfohlen, ein **automatisiertes Datensystem** aufzusetzen, das die wesentlichen Informationen und Datensätze aus verschiedenen Teilen der Stadtverwaltung und der Energieversorgung zusammenführt, und kontinuierlich aktualisiert wird. Dies sollte beispielsweise Daten zum Gebäudebestand (z.B. Baualter(sklasse), Energiebedarf und Stand der Sanierungen an einzelnen Gebäuden), zum Fernwärmenetz, zum Stromnetz oder zum Gasnetz beinhalten. Diese Daten sollten dann automatisiert für ein geografisch aufgelöstes Monitoring eingesetzt werden können, sowie auch (z.B. über eine Schnittstelle) in einer Planungssoftware zur Analyse konkreter Wärmewendeprojekte. Es ist damit zu rechnen, dass die Möglichkeiten der Digitalisierung und künstlichen Intelligenz hier langfristig auch zu wesentlichen Kostensenkungen in der Datenanalyse und Aufbereitung führen können.

Fehlende Fachkräfte in zahlreichen Gewerken führen zu einer massiven Barriere in der Umsetzung der Wärmewende. Zu nennen sind hier u.a. Personen mit Fachwissen zur Installation von Wärmepumpen oder der Verlegung von Fernwärmeleitungen, oder auch im Bereich der öffentlichen Ausschreibungs- und Genehmigungsprozesse. Eine Ausweitung von Ausbildungsmöglichkeiten sollte einerseits landes- und bundesweit erfolgen, aber auch in der Stadt selbst könnten Anreize zur Umschulung verstärkt werden. Das **Weiterbildungsangebot** in der Stadt in den für die Wärmewende relevanten Handwerken sollte ausgebaut werden, wie etwa die Schulung vorhandener Handwerker in der Installation von Wärmepumpen und Fernwärmeanschlüssen. Des Weiteren sollte das Angebot an berufsbegleitenden Qualifizierungsoptionen für Berufsumsteiger verstärkt werden, damit Personen, die bereit sind für einen Berufsumstieg, auch ohne bestehende facheinschlägige Ausbildung zu arbeiten beginnen können, und im Laufe der Tätigkeit fertig ausgebildet werden.

3. Rahmen und Methodik

Ziel des gegenständlichen Vorhabens war die **quantitative und qualitative Analyse von Kosten und Potenzialen zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Frankfurter Gebäude** bzw. Fernwärme. Dies beinhaltet folgende Elemente: (1) die regionalisierte Darstellung des derzeitigen Gebäudebestandes sowie seiner thermischen Eigenschaften und des Wärmebedarfs, (2) die Kosten und Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden mittels Sanierungsmaßnahmen, (3) die Kosten und Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien und Abwärme zur Wärmeversorgung der Gebäude, (4) die Kosten und Potenziale zum Ausbau und der Aufbringung der Fernwärme, (5) Kosten und Potenziale zur dezentralen Wärmeversorgung der Gebäude, sowie (6) gesamtstädtische Szenarien zur Wärmeversorgung bis 2035 und 2045. Die einzelnen genannten Teilbereiche wurden mit unterschiedlichen Modell- bzw. Berechnungswerkzeugen untersucht und im letzten Schritt zu gesamtstädtischen Szenarien zusammengeführt. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wurden **Handlungsempfehlungen abgeleitet**, mit welchen die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt am Main vorangetrieben werden kann.

Aufgabe dieses Vorhabens war dabei **nicht die detaillierte Planung der Transformation** des Systems zur Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt am Main, sondern die Erarbeitung von quantitativen Grundlagen zum besseren Verständnis von Handlungsstrategien in der kommunalen Wärmeplanung der Stadt Frankfurt am Main. Zentrales Ziel war daher die Schaffung eines verbesserten und fundierten Verständnisses von Größenordnungen hinsichtlich potenzieller Fernwärme-Netzgebiete, Wärme-Bereitstellungskosten aus dezentralen bzw. netzgebundenen Lösungen für verschiedene Gebäude, notwendige Investitionen in Sanierungen, Netzausbau und Bereitstellungsanlagen, sowie die Identifikation von zentral sensitiven Parametern in der Untersuchung.

In den letzten Jahren haben sich die Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft und -versorgung stark verändert. Zunächst aufgrund deutlich veränderter Bedarfe und Nutzerverhalten in der Corona-Krise, und dann aufgrund der starken Verwerfungen auf den Energiemärkten seit dem Ukrainekonflikt. Dies führte zu gravierenden Veränderungen von Kosten- und Preisniveaus in der Energiewirtschaft. Die Kosten von Investitionen in nahezu allen für die Wärmewende relevanten Bereiche sind deutlich gestiegen. Dies umfasst Maßnahmen zur Gebäudesanierung, die Installation dezentraler Bereitstellungssysteme, den Fernwärme-Leitungsbau sowie Anlagen zur Fernwärme-Aufbringung. Gleichzeitig wurde im vergangenen Jahr auch ein überproportional hoher Anstieg der Energiepreise beobachtet, welcher mittlerweile wieder rückläufig ist.

Die **Zahlen in der gegenständlichen Studie** beziehen sich auf das **Kostenniveau mit Ende 2022**, berücksichtigen also die in den letzten Jahren stark gestiegenen Kosten und Preisniveaus. Die möglichen Entwicklungen der Energieträgerpreise wurden in zwei verschiedenen Szenarien abgebildet („Niedrig“ und „Hoch“). Zum einen unterscheiden sich die Szenarien über die Annahme, ob die Preise langfristig wieder auf das Niveau vor der Ukraine Krise absinken („Niedrig“) oder auch langfristig auf einem höheren Niveau verbleiben („Hoch“). Darüber hinaus wurden für Strom und Gas unterschiedliche Studien zu Preisen und Potenzialen für CO_2-neutrale Energieträger analysiert und jeweils eine höhere und eine niedrigere Preisentwicklung bis 2035 und 2045 abgeleitet. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Daten der **zwei Energieträgerpreis-Szenarien**.

Bei der gegenständlichen Studie handelt sich um eine **volkswirtschafte Analyse**, es wurden grundsätzlich ein Real-Zinssatz von 2% sowie Lebensdauern als Abschreibdauern angenommen. Darüber hinaus wurde die Mehrwertsteuer nicht berücksichtigt. Derzeit vorhandene Energiesteuern und Abgaben auf Energieträger wie z.B. Netzgebühren oder KWK-Umlage auf Strom zum Einsatz in Wärmepumpen wurden inkludiert und konstant in die Zukunft fortgeschrieben, einzig die EEG-Umlage wurde nicht weiter berücksichtigt. Vorhandene und mögliche zukünftige Förderungen für den Einsatz und die Investitionen in erneuerbare Energie und Abwärmenutzung sowie für Energieeffizienzmaßnahmen sind in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

*Tabelle 1: In der Untersuchung verwendete **Energieträgerpreise** (Quelle: e-think, eigene Annahmen)*

Energieträgerpreise [EUR$_{2022}$/MWh$_{Hu}$]				
Zeitpunkt	**2035**		**2045**	
Preisszenario	**Niedrig**	**Hoch**	**Niedrig**	**Hoch**
Einsatz in der Fernwärme				
Strom im Verkauf	76	104	76	113
Strom in Einkauf (Wärmepumpen)	139	177	139	186
Gas	49	141	78	144
Biomasse	31	41	32	39
Müll	-	-	-	-
Industrielle Abwärme	35	46	35	48
Einsatz in Haushalten und Dienstleistung				
Strom	237	292	237	301
Gas	122	228	111	195
Holzpellets	76	100	78	96

4. Derzeitiger Wärmebedarf in den Gebäuden und vorhandene Strukturen zur Bereitstellung

In der Stadt Frankfurt am Main leben rund 750 Tausend Menschen (Stand 2022). Vor allem die Sektoren Handel und Dienstleistungen sind wichtige Arbeitgeber. Das Zentrum der Stadt weist eine hohe Bebauungsdichte auf, die sich neben geringen Abständen zwischen den Gebäuden auch durch die zahlreichen Hochhäuser ergibt. Ein relevanter Teil der Stadt zeigt aber auch eine geringe Bebauungsdichte durch gegenteilige Bebauungsstruktur.

Die Analyse des derzeitigen Wärmebedarfs in den Gebäuden im Rahmen dieser Untersuchung erfolgte geografisch aufgelöst auf Ebene einzelner sowie archetypischer Gebäude. Verschiedene Versionen des städtischen Datensatzes zu einzelnen Gebäudeobjekten wurden zusammengeführt und mit zugekauften Daten zum Alter der jeweiligen Gebäude vereinigt. In weiterer Folge wurde das Modell „Invert – Effizienzpotenziale“[1] dazu verwendet den Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in für Frankfurt am Main archetypischen Gebäuden zu berechnen. Dabei wird der Bedarf einerseits nach DIN EN 13790 berechnet, andererseits wird, sofern der Endenergieverbrauch berechnet werden sollte, der errechnete Norm-Nutzenergiebedarf um die Differenz zwischen der Norm-Berechnung und tatsächlich beobachteten Nutzenergiebedarfen korrigiert. Dies betriff in erster Linie den Effekt, dass Gebäude mit einem höheren Norm-Energiebedarf in der Realität weniger stark geheizt werden als Gebäude mit niedrigen Norm-Energiebedarfen. Dadurch kann bei Bestandsgebäuden der Norm-Nutzwärmebedarf höher als der tatsächlich beobachtete Endenergiebedarf sein. Im Falle einer Renovierung führt dies auch zu sogenannten Rebound-Effekten in den Gebäuden. Die Berechnungen mit dem Modell „Invert – Effizienzpotenziale“ wurden in weiterer Folge auf den städtischen Datensatz übertragen. Die Ergebnisse dieser geografisch aufgelösten Bottom-up Hochrechnung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser der Gebäude in Frankfurt am Main ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

[1] www.invert.at

*Tabelle 2: **Übersicht über den Gebäudebestand** der Stadt Frankfurt a. M. und den hochgerechneten (mit Invert modellierten) Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung inklusive der Wärmeverteilverluste in den Gebäuden (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung)*

	Brutto-Geschoss-Fläche [m²]	Nutzenergiebedarf [GWh/a]		Nutzenergiebedarf [kWh/m²a]	
		Raum-wärme	Warm-wasser	Raum-wärme	Warm-wasser
Wohngebäude	35 116 191	2 747	836	78	24
Einfamiliengebäude	10 596 785	942	252	89	24
Mehrfamiliengebäude	24 519 406	1 805	584	74	24
Nicht-Wohngebäude	30 638 784	2 484	271	81	9
Bürogebäude - öffentlich	1 230 320	73	4	59	3
Bürogebäude - privat	13 421 415	1 023	51	76	4
Handel	4 344 035	303	70	70	16
Hotels / Restaurants	1 500 554	109	19	73	12
Krankenhäuser, Heime, etc.	773 331	95	25	123	32
Schulen, Universitäten, etc.	2 693 194	282	11	105	4
Sonstige	6 675 934	598	91	90	14
Gesamt modelliert mit Invert	65 754 975	5 230	1 107	80	17
Errechnet aus der witterungs-korrigierten Energiebilanz 2019		4 766 *+ 291 5 057	1 141		

*Prozesswärme Haushalte (296 GWh/a – Kochen) wird nicht berücksichtigt, da diese in der Berechnungsmethode bei den inneren Gewinnen bereits berücksichtigt wird. Prozesswärme Gewerbe (727 GWh/a) wird zu 40% (291 GWh/a) als innere Gewinne der Raumwärmebereitstellung zugeschlagen.

Bei einer gesamten Bruttogeschossfläche (BGF) von gut 65 Mio. m² werden jährlich gemäß der Berechnung mit dem Invert-Modell ca. 5,2 TWh Nutzenergie für Raumwärme benötigt und 1,1 TWh jährlich für die Bereitstellung von Warmwasser. Letzteres inkludiert auch die nicht unrelevanten Verteilverluste innerhalb der Gebäude. Etwa die Hälfte des Bedarfs wie auch der BGF entfällt dabei auf Wohn- bzw. Nicht-Wohngebäude. Laut Energiebilanz der Stadt Frankfurt am Main wurde im Jahr 2019 ca. 11 TWh an Energieträgern in den Sektoren private Haushalte und Gewerbe nachgefragt (witterungskorrigiert). Mit Blick auf die durchschnittlichen Anwendungsbilanzen für private Haushalte sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) für Deutschland wurden für Raumwärme und Warmwasser davon rund 60% eingesetzt, also ca. 6,8 TWh. Zusätzlich wurden im Gewerbe knapp 800 GWh an Energieträgern zur Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt. In den privaten Haushalten wurden knapp 300 GWh für Prozesswärme eingesetzt. Typischerweise handelt es sich beim Prozesswärmeeinsatz in Haushalten um Energiebedarf für Kochen. Auf Ebene der Endenergie wurden zur Wärmeversorgung der Gebäude in der Stadt Frankfurt a. M., inklusive dem Einsatz für Prozesswärmebereitstellung im Gewerbe, im Jahr 2019 vorwiegend Erdgas (59%) eingesetzt, gefolgt von Ferndampf (14%), Strom (9%), Fernwärme (8%), Heizöl (7%) und Sonstigen (3%). Gesamt wurden dabei rund 2,02 Mio. Tonnen CO_2 Äquivalent emittiert.

Berücksichtigt man noch die Verluste in der Umwandlung zwischen End- und Nutzenergie lässt sich die Hochrechnung mit Invert-Modell mit der Energiebilanz vergleichen. Im Dienstleistungssektor

überschätzt das Modell den Energiebedarf zur Raumwärmebereitstellung. Gleichzeitig weist die Energiebilanz in diesem Sektor einen erheblichen Energieverbrauch für Prozesswärme aus (727 GWh). Diese Wärmeeinträge stellen teilweise innere Gewinne dar, die im Invert Modell nicht direkt berücksichtigt werden. Es wird deshalb unterstellt, dass 40% der Prozesswärme als innere Gewinne den Endenergiebedarf zur Raumwärmebereitstellung reduziert. Bei den restlichen 60% (436 GWh/a) gilt die Annahme, dass diese keine inneren Gewinne darstellen. Im Vergleich mit der Energiebilanz wird damit der Energiebedarf um 139 GWh überschätzt (2%). Um mit der Energiebilanz konsistent zu bleiben, werden in weiterer Folge die 436 GWh abzüglich der 139 GWh Differenz (= 298 GWh) als Residuum betrachtet.

Abbildung 1: ***Verteilung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme, Warmwasser- und Prozesswärme*** *in den Sektoren Private Haushalte und Gewerbe in Frankfurt a. M. auf die dabei eingesetzten Energieträger (Quelle: eigene Auswertung und Darstellung der Energiebilanz Frankfurt am Main)*

5. Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden bis 2035 und darüber hinaus

Zur Analyse des Potenzials für die Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden wurde ebenfalls das Modell „Invert – Effizienzpotenziale" eingesetzt. Zunächst wurden für die verschiedenen Gebäudearchetypen jeweils zahlreiche Sanierungspakete erstellt, die zu unterschiedlichen Einsparungen je Gebäude führen. Die Zusammensetzung der Pakete aus einzelnen Maßnahmen (Fenstertausch, Dämmung Außenwand, oberste Geschossdecke oder Keller sowie Einbau einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung) erfolgte derart, dass diejenige Kombination ermittelt wurde, mit der die vorgegebenen Einsparungsziele mit den geringsten Investitionskosten erreicht wurden. Als Datenbasis für die Kosten der unterschiedlichen Maßnahmen waren dabei die 2022 veröffentlichten Kostendaten des IWU. Wie bereits erwähnt berücksichtigen die Berechnungen auch verändertes Nutzerverhalten mit sinkendem Energiebedarf und damit den beobachtbaren Rebound-Effekt nach Renovierungen. Im nächsten Schritt wurden die kostengünstigsten Sanierungspakete identifiziert, um vorgegebene langfristige Einsparziele im gesamten Stadtgebiet zu erreichen. Je nach Zielvorgabe sind die resultierenden Sanierungspakete mehr oder weniger ambitioniert bzw. werden geringere oder höhere Anteile des Gebäudebestandes saniert. Als langfristiges Ziel zur Reduktion des Wärmebedarfs für Raumwärme und Warmwasser im gesamten Stadtgebiet wurde, als Ergebnis eines Diskussionsprozesses mit dem Auftraggeber und dem städtischen Energieversorger, ein Szenario mit 41% Einsparungen am Wärmebedarf (Raumwärme + Warmwasser) identifiziert. Die durchschnittlichen Kosten pro eingesparte Energie liegen hier mit knapp unter 100 EUR/MWh sehr wahrscheinlich nicht über voraussichtlichen Bereitstellungskosten. Bei höheren Einsparungszielen ist dies eventuell nicht mehr der Fall (siehe Abbildung 2). Niedrigere Einsparungsziele würden zu Maßnahmen mit geringer Ambition führen und damit längerfristige Lock-in Effekte verursachen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die durchgeführten Berechnungen derzeit bestehenden bzw. mögliche zukünftige Mindeststandards hinsichtlich Sanierungen nicht berücksichtigen.

In dem gewählten Szenario müssen langfristig knapp über 90% des Gebäudebestandes thermisch saniert werden. Die wichtigsten Maßnahmen betreffen Mehrfamilienhäuser (MFH) aus der Nachkriegszeit, welche noch nicht saniert sind, sowie ältere noch unsanierte Bürogebäude. In beiden Gebäudetypen ist es lt. Modellergebnissen sinnvoll, Außenwände und oberste Geschossdecke zu dämmen sowie die Fenster zu tauschen. Die Maßnahmen sollten dabei jeweils mindestens zu einer Halbierung des Wärmedurchgangs in den entsprechenden Bauteilen führen.

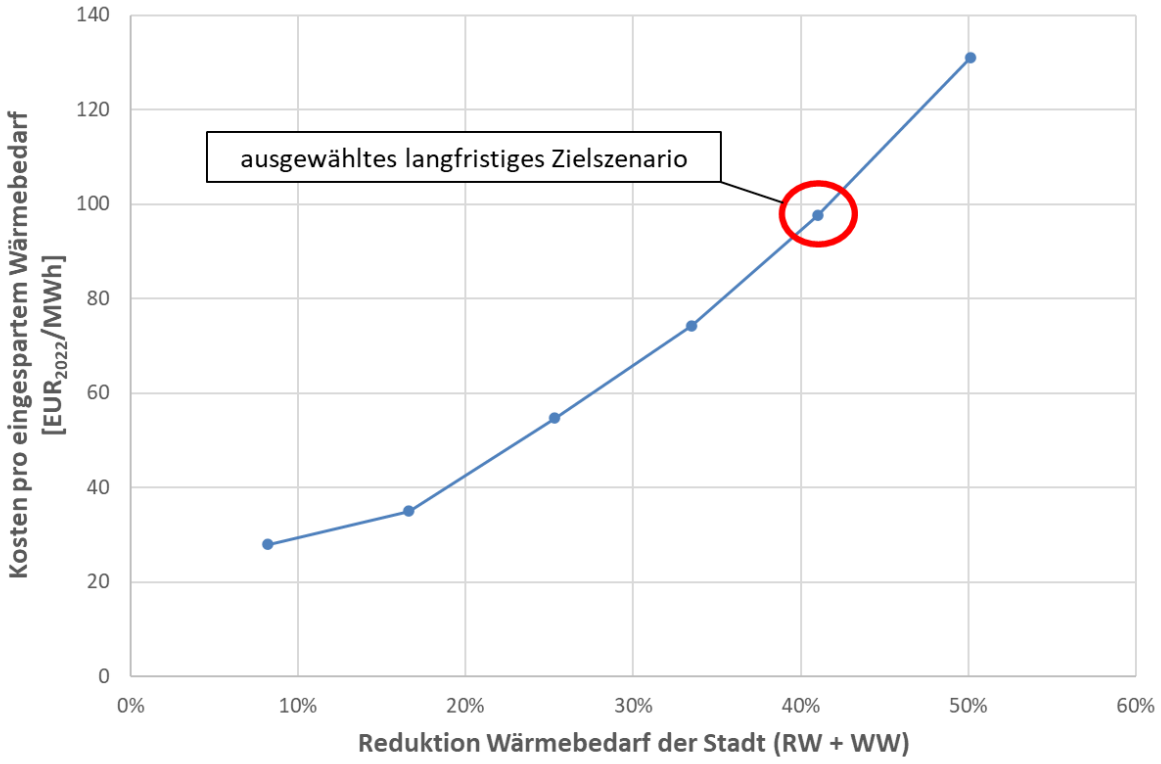


*Abbildung 2: **Kosten** (energetische Zusatzkosten, ohne Instandsetzungskosten) **pro eingespartem Wärmebedarf** für die sechs verschiedenen stadtweiten langfristigen Einsparungsszenarien (Quelle: e-think, eigene Berechnungen und Darstellung)*

Aus den identifizierten Sanierungsmaßnahmen je Gebäudearchetyp wurden in weiterer Folge mögliche Szenarien bis 2035 und 2045 unter Berücksichtigung einer möglichen Bevölkerungsentwicklung in unterschiedlichen Stadtteilen abgeleitet. Hierbei wurden zwei Szenarien berechnet, welche sich durch die Annahmen zu erreichbaren Sanierungsraten für unterschiedliche Gebäudearchetypen unterscheiden. Die folgende Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt für ein BAU und ein ambitioniertes (AMB) Szenario bis 2035 sowie für ein ambitioniertes (AMB) Szenario bis 2045.

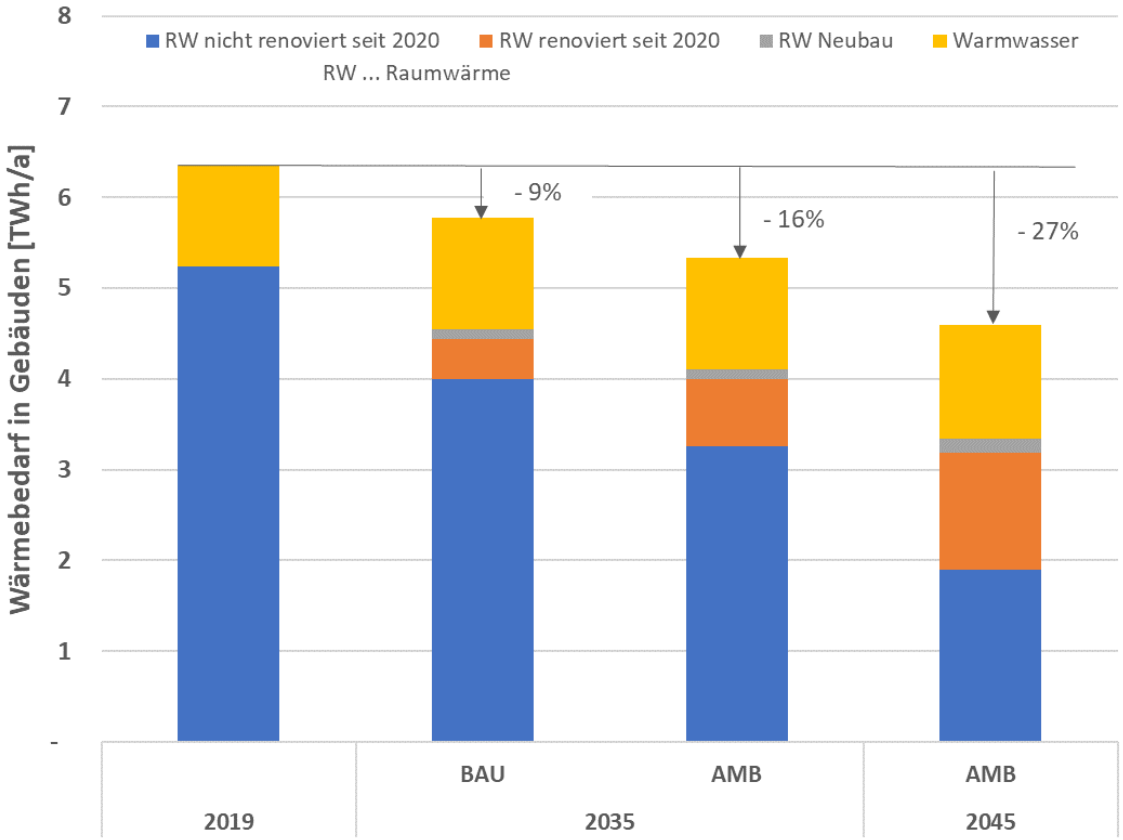


*Abbildung 3: **Szenarien zur Senkung des modellierten Nutzwärmebedarfes in Gebäuden** in Frankfurt a. M. bis 2035 und 2045 (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung)*

Bei Weiterführung der Sanierungsintensität, so wie sie in Hessen in den Jahren 2010 bis 2016 beobachtet wurde, könnte man bis 2035 etwa 9% des Wärmebedarfs reduzieren (BAU-Szenario). Dabei ist zu berücksichtigen, dass einerseits ein Zuwachs der Gebäudeflächen durch den voraussichtlichen Anstieg der Bevölkerungszahlen angenommen wurde, zum anderen wurde berücksichtigt, dass alte Gebäude teilweise abgerissen und durch neue Gebäude ersetzt werden. Bei Intensivierung der Sanierungs-aktivitäten von derzeit im Schnitt rund 1,0% auf 1,7% (AMB-Szenario) könnten bis 2035 rund 16% und bis 2045 rund 27% des Wärmebedarfs in Gebäuden gegenüber 2020 eingespart werden. Dennoch könnten auch mit einer ambitionierten Sanierungsrate von 1,7% nicht alle Bestandsgebäude bis 2045 saniert werden, wie in der Abbildung durch den blauen Anteil am Balken ersichtlich.

Die folgende Abbildung 4 zeigt die für die Umsetzung der Sanierungen errechneten jährlichen Investitionskosten (links – nicht diskontiert) sowie die Investitionskosten pro sanierter BGF (rechts).

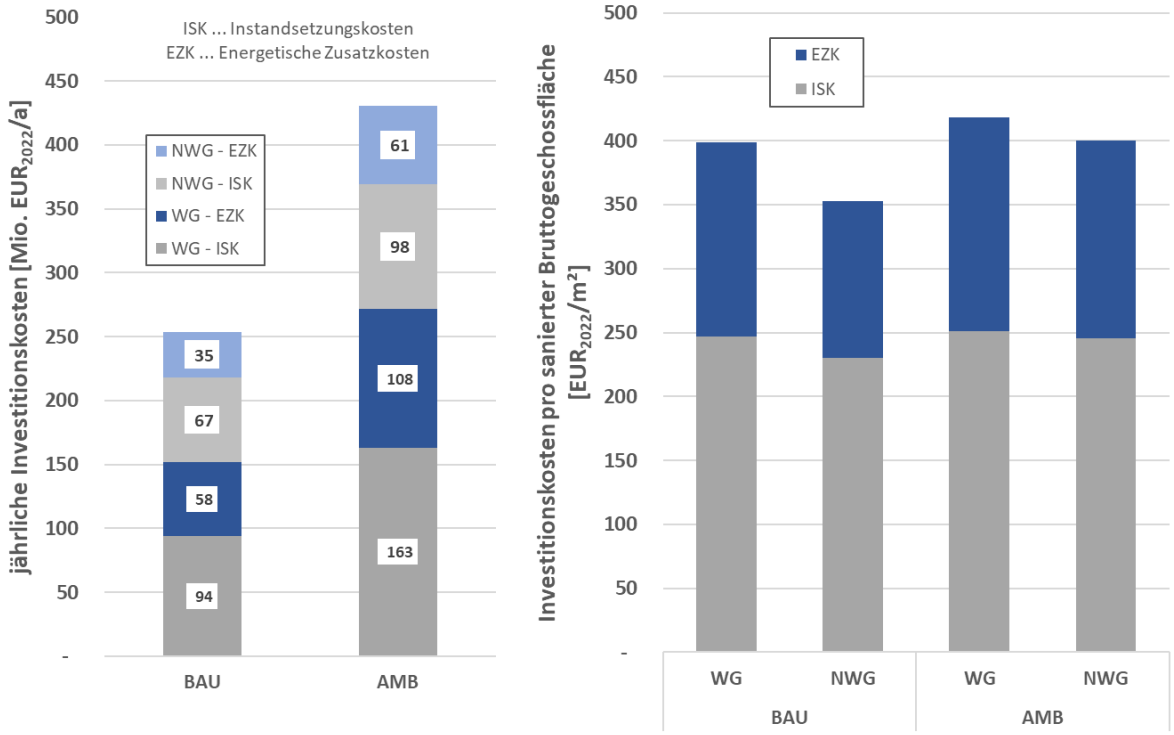


Abbildung 4: ***Durchschnittliche jährliche Investitionskosten für Gebäudesanierung*** *(links – nicht diskontiert) und Investitionskosten pro sanierter Bruttogeschossfläche (rechts) in den beiden Intensitäts-Szenarien BAU und AMB für Wohngebäude (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) sowie unterschieden nach energetischen Zusatzkosten (EZK) und Instandsetzungskosten (ISK) (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung)*

Zur Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt müssen in den beiden berechneten Szenarien jährlich zwischen 93 (BAU) und 170 (AMB) Mio. EUR investiert werden. Dabei handelt es sich um **energetischen Zusatzkosten (EZK)** zusätzlich zu den **ohnehin anfallenden Instandsetzungskosten (ISK)**. Die Abbildung zeigt, dass die EZK bei der Sanierung sowohl bei den Wohngebäuden als auch bei den Nichtwohngebäuden geringer sind als die ISK. Im ambitionierten Szenario (AMB) müssen damit bis 2035 (bzw. 2045) 2,1 (bzw. 3,7) Mrd. EUR an energetischen Zusatzkosten investiert werden. Dazu kommen noch 3,0 (bzw. 5,3) Mrd. EUR an Instandsetzungskosten, die ohnehin in die Erhaltung der Gebäude investiert werden müssen. insgesamt gut 5 Mrd. EUR (bzw. 9,5 Mrd. EUR) in die Gebäudesanierung investiert werden, wobei über 60% davon auf Instandsetzungskosten entfallen, die ohnehin in die Erhaltung der Gebäude investiert werden müssen.

6. Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete und deren Erschließung bis 2035 und darüber hinaus

Die berechneten Sanierungsszenarien wurden im nächsten Schritt als Basis für die Identifikation von Fernwärme-Potenzialgebieten in der Stadt herangezogen. Ob Gebiete potenziell für Fernwärme geeignet sein könnten, wird in dieser Studie über die durchschnittlichen Kosten der Wärmeverteilung ermittelt. Für jeden Hektar des gesamten Stadtgebietes wurden die Wärmeverteilkosten für verschiedene Szenarien zu Netzausbaukosten pro Trassenmeter, Anschlussrate, Wärmebedarfs-entwicklung sowie Lebensdauer berechnet. Über die Definition maximal zulässiger durchschnittlicher Wärmeverteilkosten (ØWVK) im gesamten Stadtgebiet ergeben sich zusammenhängende Gebiete, die auf Basis der zu erwartenden Wärmeverteilkosten potenziell für Fernwärme geeignet sind. Im Rahmen der Studie wurde eine Vielzahl an Kombinationen der genannten Parameter gerechnet und analysiert. Es zeigt sich, dass die Ausdehnung von Fernwärme-Potenzialgebieten stark vom zugrunde gelegten Anschlussgrad in den Gebieten und von den definierten maximalen ØWVK abhängt, und weniger von den dahinterliegenden Sanierungsszenarien.

Zur Verortung von Fernwärme-Potenzialgebieten im Rahmen dieser Studie wurden die folgenden Parameter definiert: eine Anschlussrate von 90%, durchschnittliche Netzausbaukosten pro Trassenmeter, so wie sie bei der Mainova AG derzeit beobachtet werden, ambitionierte Sanierungsaktivitäten in den Gebäuden in den kommenden 22 Jahren (siehe Beschreibung in Kapitel 5) sowie 40 Jahre Lebensdauer der Netzinfrastruktur. Aus den nachgelagerten Berechnungen zu den Wärmebereitstellungskosten aus Fernwärme, in denen sowohl die Verteilkosten als auch die Erzeugungskosten berücksichtigt wurden, gegenüber den Bereitstellungskosten von dezentralen Lösungen, wurde iterativ ein potenziell wirtschaftlicher Bereich der ØWVK zwischen 34 und 44 EUR/MWh abgeschätzt. Die Abbildung 5 zeigt die regionale Verteilung der derart identifizierten Fernwärme-Potenzialgebiete in Abhängigkeit der durchschnittlichen Wärmeverteilkosten (ØWVK). Die darauffolgende Abbildung 6 zeigt dann die derart identifizierten Fernwärme-Potenzialgebiete zusammen mit bereits vorhandenen Netzgebieten sowie bestehenden und geplanten Rechenzentren-Clustern und den derzeit bestehenden großen Kraftwerksstandorten.

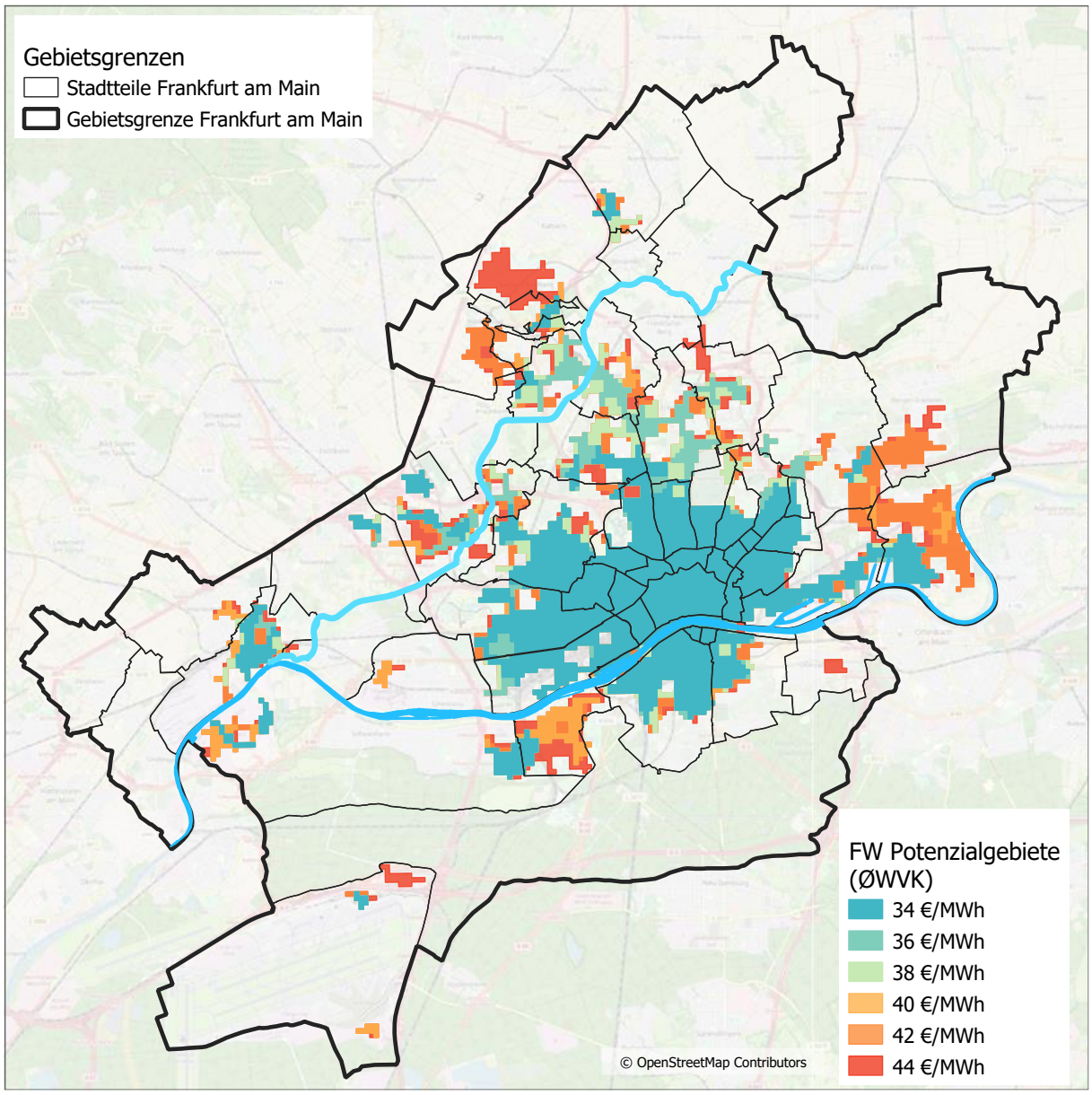


*Abbildung 5: **Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete** in Abhängigkeit durchschnittlicher Wärmeverteilkosten (ØWVK) im Bereich von 34 – 44 EUR/MWh zur weiteren Prüfung*

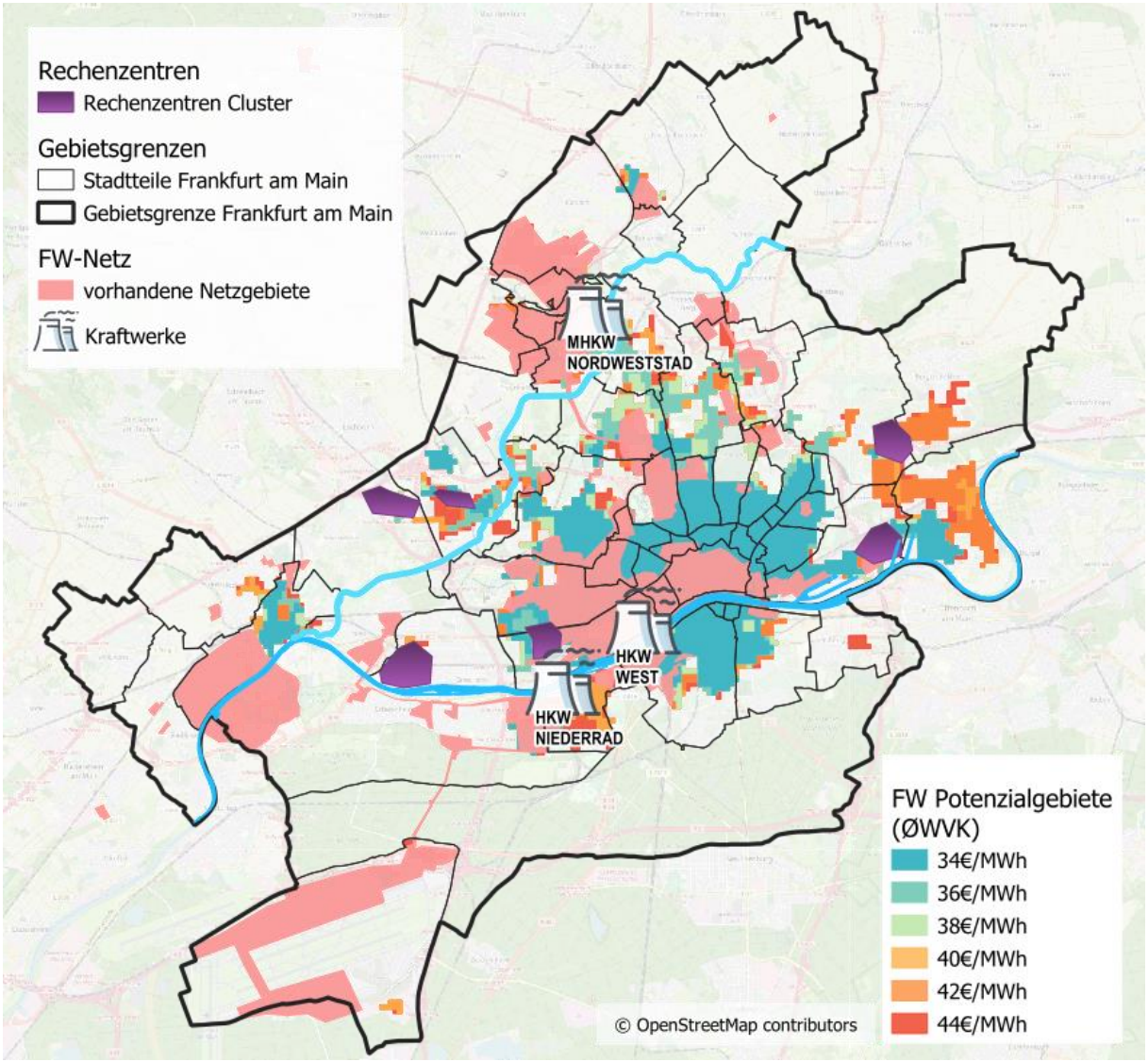


*Abbildung 6: **Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete** in Abhängigkeit durchschnittlicher Wärmeverteilkosten, bereits vorhandene Netzgebiete und bestehende und geplante Rechenzentrum-Cluster*

Die Karte zeigt, dass die Gebiete sowohl nördlich als auch südlich der Frankfurter Altstadt, in denen derzeit noch kein Wärmenetz vorhanden ist, durch dichte Bebauung und entsprechenden Wärmebedarf sehr wahrscheinlich hohe Potenziale zur Entwicklung von Wärmenetzen aufweisen. Diese Gebiete könnten bei stadtweiten ØWVK von 34 EUR/MWh erschlossen werden (dunkelblaue Gebiete). Gebiete mit entsprechend günstigen Verteilkosten finden sich vereinzelt auch noch in anderen Teilen der Stadt (z.B. in Höchst). Gebiete in denen höhere WVK erwartet werden sind bis zu stadtweit ØWVK von 44 EUR/MWh in der Karte ausgewiesen. Vor allem in der Nähe von günstigen Abwärmepotenzialen wie Rechenzentren-Cluster könnte es sinnvoll sein auch Gebiete mit höheren WVK zu erschließen. In der Karte zeigen sich hier die Gebiete in Rödelheim, Sossenheim, Griesheim und Fechenheim.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die im Rahmen dieser Studie identifizierten Fernwärme-Potenzialgebiete in einem weiteren Schritt auf die Umsetzbarkeit in jedem Teilgebiet geprüft werden müssen. Dabei sollten v.a. Barrieren und mögliche zusätzliche Kosten in der Trassenführung sowie lokal vorhandene Abwärme- und sonstige erneuerbare Angebotspotenziale berücksichtigt werden.

Eine Analyse des notwendigen Trassenzubaus sowie der damit verbundenen jährlichen Investitionen zur Erschließung der identifizierten Gebiete bis 2045 ist in Abbildung 7 dargestellt.

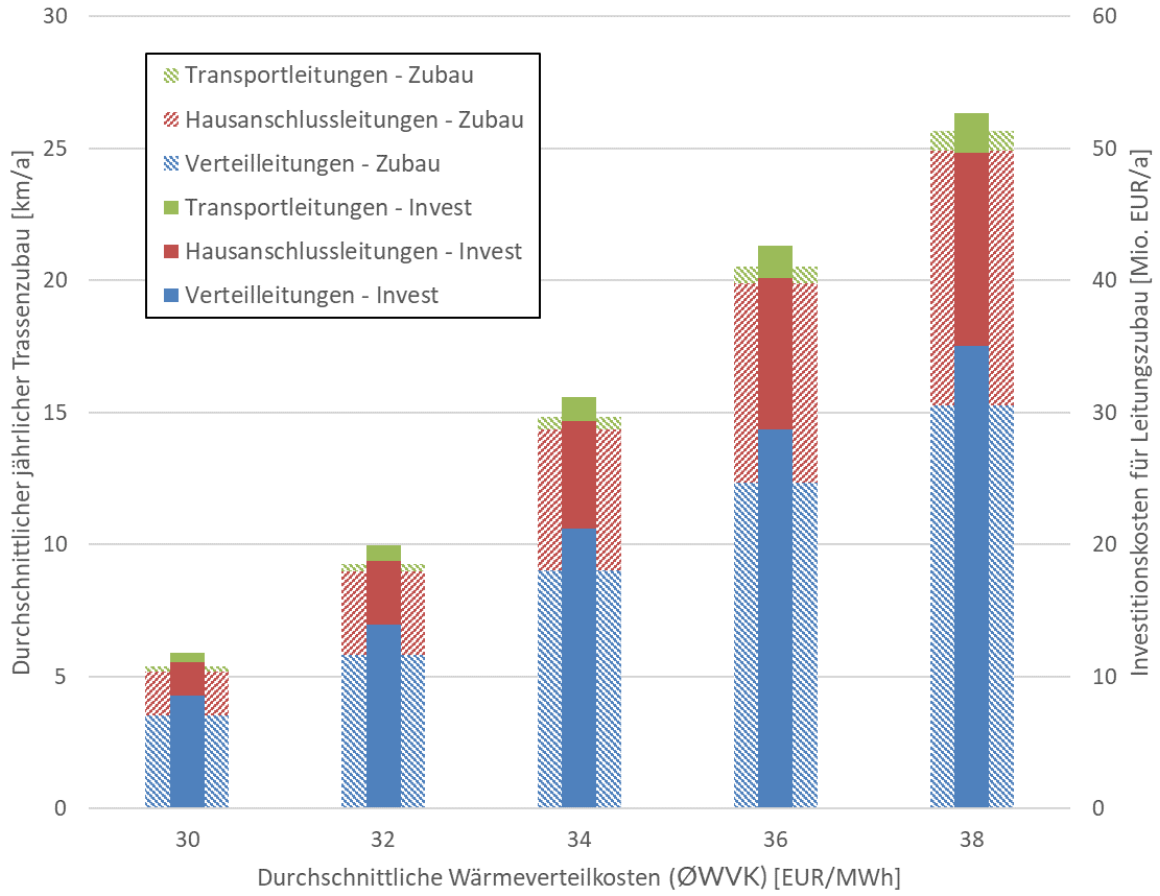


Abbildung 7: ***Ausbaugeschwindigkeiten [km/a]*** *und jährliche Investitionen für den Fernwärme-Leitungsbau [Mio. EUR/a] in verschiedenen gerechneten Szenarien mit einer unterstellten Anschlussrate von 90%*

Um die in Abbildung 6 dargestellten dunkelblauen Gebiete (ØWVK von 34 EUR/MWh) bis 2045 mit einem Anschlussgrad von 90% zu erschließen, müssen durchschnittlich rund 15 km neue Trasse pro Jahr verlegt werden. Für den Bau von Verteil-, Hausanschluss- und Transportleitungen müssten jährlich ca. 30 Mio. EUR investiert werden. Bei einem derzeit beobachtbaren durchschnittlichen Trassenzubau der Mainova AG von etwa 5 km pro Jahr bedeutet dies, dass der Fernwärme-Trassenzubau in der Stadt Frankfurt am Main deutlich ansteigen muss, um den Anteil der Fernwärme bis 2045 entsprechend zu erhöhen. Gleichzeitig zeigt dies, dass eine weitere Priorisierung von Ausbaugebieten im Zusammenspiel zwischen vorhandener Bausubstanz, erschließbaren Abwärmepotenzialen sowie zu erwartenden Netzkosten durchgeführt werden sollte (siehe auch unter Schlussfolgerungen).

7. Potenziale erneuerbarer Energie und Abwärme zur Nutzung über Fernwärme

Zur Analyse der Potenziale erneuerbarer Energie und Abwärme für die mögliche Integration in Fernwärmenetze wurden verschiedene vorhandene Studien analysiert sowie eigene Berechnungen durchgeführt. Eine zentrale Datenquelle war hier die 2018 abgeschlossene Abwärmestudie für das Stadtgebiet in Frankfurt am Main. Die darin enthaltenen Informationen wurden für die Abschätzung des nutzbaren (Ab-)Wärmepotenzials aus der Abwasserreinigung, den Industrieanlagen, dem Flusswasser, sowie den Datenzentren verwendet. Die Informationen zum Abwärmepotenzial aus den Datenzentren wurden ergänzt um in Bau bzw. in Planung befindliche Anlagenstandorte und deren möglicherweise zukünftig vorhandenes Potenzial abgeschätzt. Für Potenziale aus der Tiefengeothermie, der oberflächennahen Geothermie sowie der Solarthermie wurden eigene geografisch aufgelöste Berechnungen durchgeführt. Dabei wurden mögliche Standorte für größere Anlagen in noch nutzbarer Entfernung zu den identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten sowie ohne Nutzungseinschränkung wie beispielsweise durch Wasser- und Landschaftsschutz identifiziert, sowie möglicherweise nutzbare Entzugs- bzw. Einstrahlungsleistungen errechnet. Das thermische Leistungspotenzial aus der Müllverbrennung basiert auf derzeit vorhandenen Anlagen, die zurzeit nur in geringem Maße für die Wärmebereitstellung genutzt werden, das Potenzial aus der Biomasseverbrennung beruht auf bestehenden Anlagen sowie dem bereits geplanten Zubau. Mögliche Potenziale aus der Nutzung von Umgebungsluft in Wärmepumpen wurden nicht genauer analysiert, in der Peripherie der Stadt sind theoretisch eine Vielzahl an Standorten denkbar. Die folgende Tabelle 3 zeigt den Überblick der technischen Leistungspotenziale zur Integration in die Fernwärme für die unterschiedlichen Energiequellen. Die Potenziale werden hierbei nur in Form von Leistungen angegeben. Welche Energiemengen dann daraus in der Fernwärme nutzbar sind, ergibt sich aus den Berechnungen mit dem Fernwärme-Einsatzmodell (siehe Kapitel 9).

*Tabelle 3: **Überblick über technische Leistungspotenziale** (unter Abschätzung der Realisierbarkeit) zur Integration in die Fernwärme nach Energiequelle (Quelle: eigene Analyse)*

Energiequelle	Thermisches Leistungs-potenzial [MW]
Solarthermie	> 2 000*
Tiefengeothermie	41
Oberflächennahe Geothermie	320 – 1 800
Abwärme aus der Abwasserreinigung	65
Wärme aus Flusswasser	250
Abwärme aus Rechenzentren	188 – 490
Abwärme aus Industrieanlagen	40
Müllverbrennung	120
Biomasseverbrennung	40

*Bewertung auf Basis der geeigneten Freiflächen, ohne Dachflächen und Fassaden

Die Tabelle zeigt sehr große technische Potenziale im Bereich der Freiflächen-Solarthermie, der oberflächennahen Geothermie sowie aus Rechenzentren. Vor allem bei der Nutzung von Freiflächen-Solarthermie und oberflächennaher Geothermie in der Fernwärme sind aber deutliche Hemmnisse in der

Nutzbarmachung der entsprechenden Landflächen zu erwarten. Demgegenüber ist es eine zentrale Strategie der Stadt die Abwärme aus Rechenzentren in der Fernwärme nutzbar zu machen. Eine Nutzung der Abwärmepotenziale der Rechenzentren wird voraussichtlich in der kommenden Fassung des Energieeffizienzgesetztes für die Betreiber von Rechenzentren verpflichtend. Dadurch werden sich hier vorhandene Hemmnisse weiter reduzieren.

8. Dekarbonisierte dezentrale Wärmeversorgung

Im Kontext der gegenständlichen Untersuchung verstehen wir unter dem Begriff der „dezentralen Wärmeversorgung" von Gebäuden Wärmeerzeugungssysteme, die die Wärme für einzelne Gebäude bereitstellen und im Gegensatz zu Fern-/Nahwärmesystemen nicht die Wärme von der Wärmequelle über eine längere Distanz zu den Verbrauchern transportieren. Zwischen diesen beiden Systemen sind Blockheizungen angesiedelt, welche zwar gebäudeübergreifend arbeiten, jedoch zumeist lediglich mehrere Gebäude eines einzelnen Baublockes mit Wärme versorgen. Blockheizungen wurden in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet. Unserem Verständnis nach zählen wir diese im Falle, dass Wärme von einem weiteren Akteur bezogen wird (wie z.B. bei der Nutzung von Abwärme), zu den Fern-/Nahwärmesystemen. Dasselbe gilt, wenn die Verlegung der notwendigen Wärmetrasse in erheblichem Ausmaß auf öffentlichen Grundstücken oder Grundstücken weiterer Akteure verläuft. Wenn mehrere wenige Gebäude eines einzelnen Baublockes ihre Wärme über eine Wärmezentrale mit einem Kessel (oder Wärmpumpe, etc.) versorgt werden, dann ordnen wir diese Lösung der dezentralen Wärmeversorgung zu.

Gemäß dieser Definition kann ein dezentrales Wärmeversorgungssystem dann erneuerbare Wärme bereitstellen, wenn erneuerbare Energie entweder über die Energieversorgungsinfrastruktur (Gasnetz, Stromnetz, Biomasse- oder Brennstofflieferant) bereitgestellt wird, oder wenn die erneuerbare Wärme auf der Ebene des Grundstückes nutzbar gemacht werden kann. Dies ist dann der Fall, wenn mittels solarthermischer oder PV-Anlagen solare Einstrahlung direkt in nutzbare Energie umgewandelt wird oder wenn mittels Wärmepumpen der Umgebung (Außenluft wie auch dem Boden) Wärmeenergie auf niedrigem Temperaturniveau entzogen wird.

Für unsere Betrachtung wurden die folgenden Systeme untersucht:

- Gaskessel, welche über das Gasnetz einen (teil-)dekarbonisierten Energieträger beziehen und in Wärme umwandeln. Beim Energieträger könnte es sich um ein Wasserstoff-Methan-Gemisch handeln. Der Anteil des ggf. CO_2-neutralen Methans könnte dabei durch biogene Primärenergieträger oder durch Power-to-Gas Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Der Frage, ob in ausreichendem Ausmaß erneuerbare Gase bereitgestellt werden können, insbesondere wenn auch viele andere Kommunen auf eine Versorgung der Gebäude mit CO_2-neutralen gasförmigen Energieträgern setzen und welche Effekte eine solche Entwicklung auf den Energieträgerpreis haben würde, wurde im Rahmen dieser Studie nicht nachgegangen.
- Stromwiderstands-Heizungen, welche Strom direkt in Wärme umwandeln. Dies kann in konventionellen Radiatoren, Infrarotheizungen oder (Strom-Überschuss-)Speicherheizungen erfolgen. Letztere könnten dabei Überschussstrom direkt in der Wärmeversorgung nutzen, und damit eine kostengünstige Alternative zur indirekten Wärmenutzung von Überschussstrom in Form von synthetischen Gasen sein.
- Automatisierte Biomassekessel, welche Hackgut oder Holzpellets verfeuern.
- Wärmepumpen, welche nach dem Prinzip der Kompressionswärmepumpen unter Zuhilfenahme von Strom der Außenluft oder dem Erdreich Energie auf niedrigem Temperaturniveau entziehen. Die erreichbare Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen wurde in Abhängigkeit der typischerweise erforderlichen Temperaturniveaus in den Gebäuden (abhängig von Baualter und Renovierungszustand) berücksichtigt.
- Hybridwärmepumpen (siehe nachfolgender Absatz)

Von den verschiedenen, möglichen Technologiekombination für dezentrale Heizsysteme wurde im Rahmen des Projektes nur das Konzept der Hybridwärmepumpe, einer Kombination von Luft-Wärmepumpe zur Bereitstellung der Grund- und Mittellastwärme und einem Gaskessel zur Spitzenlastabdeckung betrachtet. Wir gehen für unsere Analysen davon aus, dass die Systeme so ausgelegt werden, dass etwa 65% der erforderlichen Jahreswärme über die Wärmepumpe bereitgestellt wird, die verbleibenden 35% über den Gaskessel. Der dafür erforderliche Leistungsanteil der Wärmepumpe an der Heizlast hängt vom Verhältnis Warmwasser- zu Heizenergiebedarf sowie von der Jahresdauerlinie der Heizlast ab. Bei heutigen unrenovierten Gebäuden muss die Wärmepumpe etwa 40% der Gebäudeheizlast abdecken, der Gaskessel etwa 60%. Technologiekombinationen mit solarthermischer Wärmeerzeugung oder der PV-Eigenstromnutzung zur Wärmeerzeugung wurden nicht explizit untersucht. Grund dafür ist der typischerweise geringe solare Jahresdeckungsgrad, der mit diesen Systemen insbesondere im Bereich der Mehrfamilien und Geschoßwohnbauten erreicht wird. Daher kann mit einer solchen Technologiekombination weiterhin nicht ohne zusätzliche erneuerbare Energieträger eine hohe Dekarbonisierung erzielt werden. Ebenso wurde die Möglichkeit der dezentralen (Teil-) Wärmeversorgung von Gebäuden durch die Nutzung der Abwärmepotenziale aus den Abwasserkanälen der Stadt nicht berücksichtigt, da eine genaue gebäudescharfe Zuweisung der Abwärmepotenziale den Rahmen der Untersuchungen überstiegen hätte. Diese sind implizit in den Anteilen der Erdreichwärmepumpen enthalten. Eine weitere Möglichkeit den Anteil der erneuerbaren Wärme im Gebäudebestand zu erhöhen, besteht in der Nachrüstung von Luft-Luft Wärmepumpen mit den jeweiligen Umlufterhitzern in den zu beheizenden Räumen.

9. Potenziale und Kosten zur Erzeugung von Fernwärme aus erneuerbaren Quellen und Abwärme

Die Berechnung der wirtschaftlichen Potenziale und der Kosten zur Erzeugung von Fernwärme in der Stadt Frankfurt am Main wurden mit dem Hotmaps-Dispatch Modell berechnet. Das Modell optimiert die Investition und den Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien für die Fernwärme auf stündlicher Ebene und berücksichtigt u.a. die Temperatur-Sensitivität der Effizienzen von Wärmepumpen. Dies ist v.a. relevant für die Nutzung von Wärmequellen mit schwankenden Temperaturen wie Abwasser, Flusswasser oder Luft. Die stündlichen Profile zur Wärmelast im potenziellen zukünftigen Fernwärmesystem in der Stadt wurden aus gemessenen Daten der bestehenden Anlagen entwickelt. Dabei wurde der Rückgang des Wärmebedarfs für Raumwärme und damit die relative Zunahme des Anteils der Warmwasserbereitstellung entsprechend der im Vorfeld erarbeiteten Einsparungsszenarien berücksichtigt. Die bereitzustellenden jährlichen Wärmemengen wurden aus den Szenarien im Rahmen der Analyse der Fernwärme-Potenzialgebiete entnommen. Drei verschiedene Ausbauszenarien bis 2035 und 2045 wurden mit dem Dispatch-Modell durchgerechnet, entsprechend der Bandbreite der in Abbildung 7 dargestellten Ausbaugeschwindigkeiten. Zusätzlich wurde die aus der Energiebilanz errechnete Prozesswärme, die 2019 aus Fernwärme und Ferndampf gedeckt wurde, als konstant in allen Berechnungen berücksichtigt. Dies ergibt **gesamte Einspeisebedarfe in der Fernwärme** im Jahr **2035 zwischen 2,1 und 2,5 TWh jährlich** und **2045 zwischen 2,3 und 3,0 TWh** jährlich inklusive der Netzverluste. Die Bereitstellung von Dampf und Warmwasser wurde separat modelliert, wobei ein Rückgang des Dampfnetzgebietes bis 2045 zwischen 33 und 50% angenommen wurde. Die Modellierung möglicher Heiz-/Warmwassernetze für die Stadt Frankfurt am Main erfolgte als ein gesamtes Netz, auch wenn verschiedene voneinander unabhängige Netze in der Realität sinnvoller umsetzbar sein werden. Die verwendeten Kostenparameter zu den verschiedenen Bereitstellungstechnologien orientieren sich an Daten aus den Leitfäden der AGFW sowie an Erfahrungswerten aus anderen Projekten.

Sowohl im Dampf- als auch im Heiz-/Warmwassernetz wurden drei verschiedene Portfolien analysiert:

- **Portfolio 1 (Gas-KWK):** Es erfolgt eine langfristige Re-Investition in die derzeit bestehende bzw. geplante Gas-KWK bis 2045, diverse erneuerbare und Abwärmequellen stehen zur Verfügung, ein moderater Anteil der Potenziale von Abwärme aus den Rechenzentren kann erschlossen werden und es werden keine saisonalen Wärmespeicher gebaut.
- **Portfolio 2 (RZ-Amb):** Es erfolgt keine Reinvestition in die derzeit bestehende bzw. geplante Gas-KWK, diverse erneuerbare Quellen und Abwärme stehen zur Verfügung, ein ambitionierter Ausbau der Abwärmenutzung aus Rechenzentren ist möglich und zwei saisonale Speicher werden gebaut.
- **Portfolio 3 (RZ-Divers):** Es erfolgt keine Reinvestition in die derzeit bestehende bzw. geplante Gas-KWK, diverse erneuerbare Quellen und Abwärme stehen zur Verfügung, ein moderater Ausbau der Abwärmenutzung aus Rechenzentren ist möglich und ein saisonaler Speicher wird gebaut.

In den beschriebenen Portfolien werden jeweils maximale Potenziale zur Verfügung stehender thermischer Leistungen zugelassen, das Modell optimiert dann die tatsächlich installierten Kapazitäten. Eine Ausnahme bildet hier die Gas-KWK in Portfolio 1. Hier wurde angenommen, dass in Summe 400

MW thermisch installiert sind und bleiben. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Müllverbrennungsanlage in allen Portfolien mit der derzeit bestehenden thermischen Leistung von 120 MW im Bestand bleibt. Im Gegensatz zur derzeitigen Situation wird angenommen, dass die Müllverbrennung nicht mehr in das Warmwassernetz einspeist, sondern in das Dampfnetz.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie die resultierenden Wärmebereitstellungskosten für die drei analysierten Portfolien im Jahr 2035 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen.

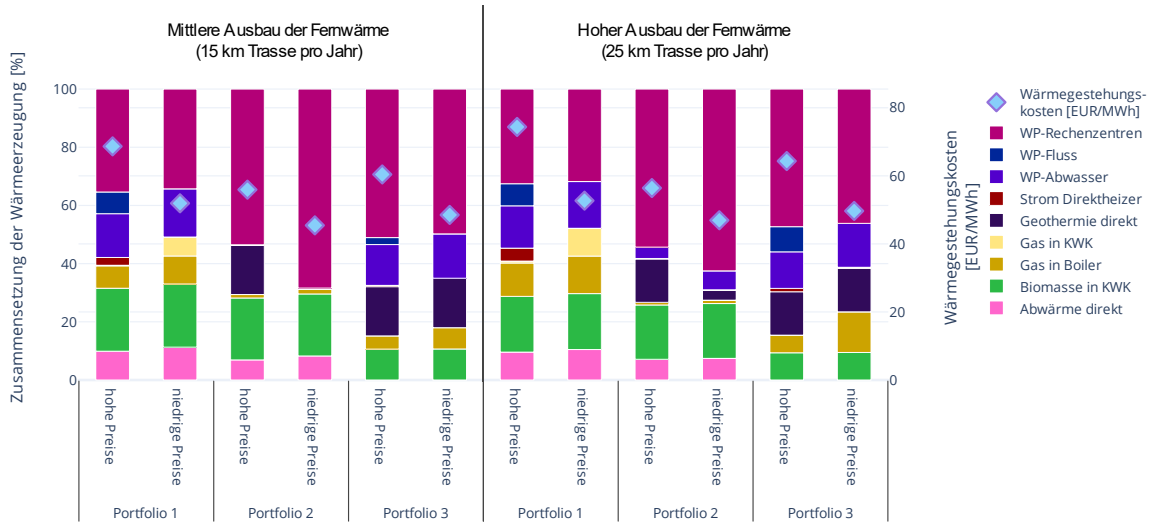


*Abbildung 8: **Zusammensetzung der Wärmeerzeugung** sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolien im Heiz-/**Warmwassernetz** bei mittlerem bzw. hohem Ausbau der Fernwärme im Jahr 2035 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

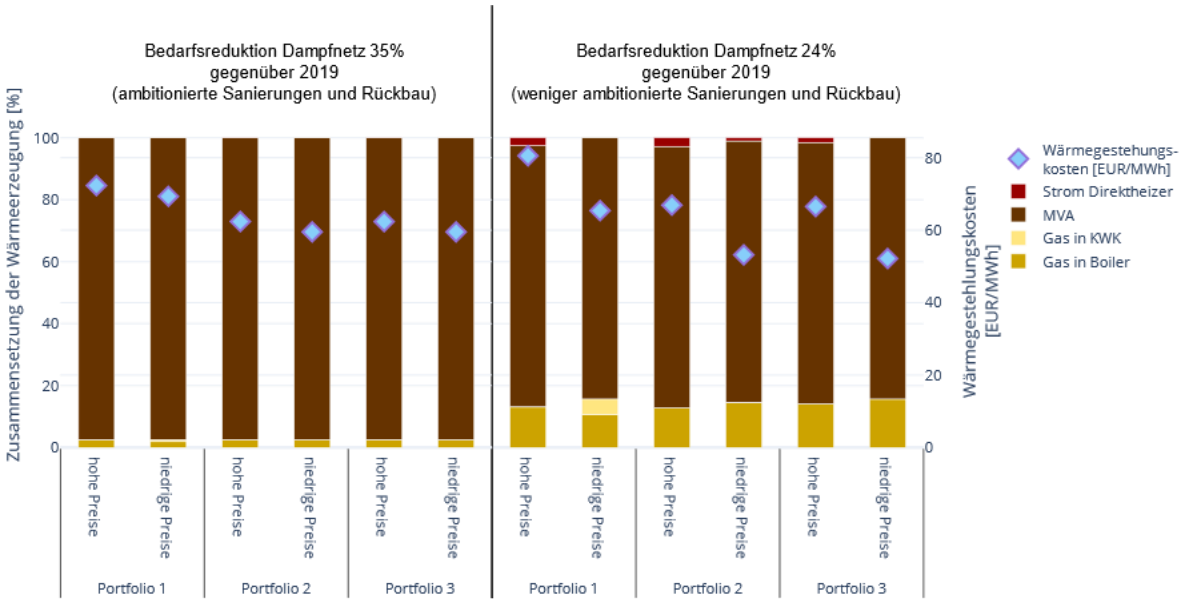


*Abbildung 9: **Zusammensetzung der Wärmeerzeugung** sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolien im **Dampfnetz** bei höherer bzw. niedrigerer Reduktion des Wärmebedarfs im Dampfnetz im Jahr 2035 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

Es zeigt sich zum einen der Unterschied in den resultierenden Bereitstellungskosten zwischen hohen und niedrigen zukünftigen Preisen für Gas, Strom oder Biomasse. Im Heiz-/Warmwassernetz liegt dieser im Bereich von ca. 10 EUR/MWh für die Portfolien 2 (RZ-Amb) und 3 (RZ-Divers) sowie im Bereich von 20 EUR/MWh für Portfolio 1 (Gas-KWK). Im Dampfnetz ist der Unterschied bei geringer Bedarfsreduktion deutlich höher als bei hoher Bedarfsreduktion. Der Grund ist in beiden Fällen die stärkere Abhängigkeit von den angesetzten Gaspreisen für die Gas-KWK. Dieser Effekt verstärkt sich im Heiz-/Warmwassernetz durch einen weiteren Ausbau der Nutzung von Abwärme bis 2045 noch weiter. In allen Portfolien erfolgt eine relevante Wärmebereitstellung aus Rechenzentren. In den Portfolien 2 (RZ-Amb) und 3 (RZ-Divers) kann zudem der Anteil an Gas an der Wärmebereitstellung deutlich reduziert werden, da zum einen höhere Potenziale an Abwärme erschließbar sind und zum anderen Teile der Abwärme über saisonale Speicher aus dem Sommer in die Spitzenlastzeiten überführt werden können. Die folgende Abbildung 10 zeigt das stündliche Last- und Aufbringungsprofil im Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2035 für Portfolio 3 (RZ-Divers) im mittleren Ausbauszenario des Fernwärmenetzes und bei hohen Energieträgerpreisen. Dabei ist ersichtlich wie die Abwärme aus Rechenzentren zu Zeiten niedriger Strompreise im Sommer in den saisonalen Speicher eingespeist wird und zu Zeiten höherer Lasten in den Wintermonaten und der Übergangszeit abgerufen wird. Dadurch können die benötigten Back-Up Kapazitäten und v.a. auch Energieträgermengen relevant reduziert werden.

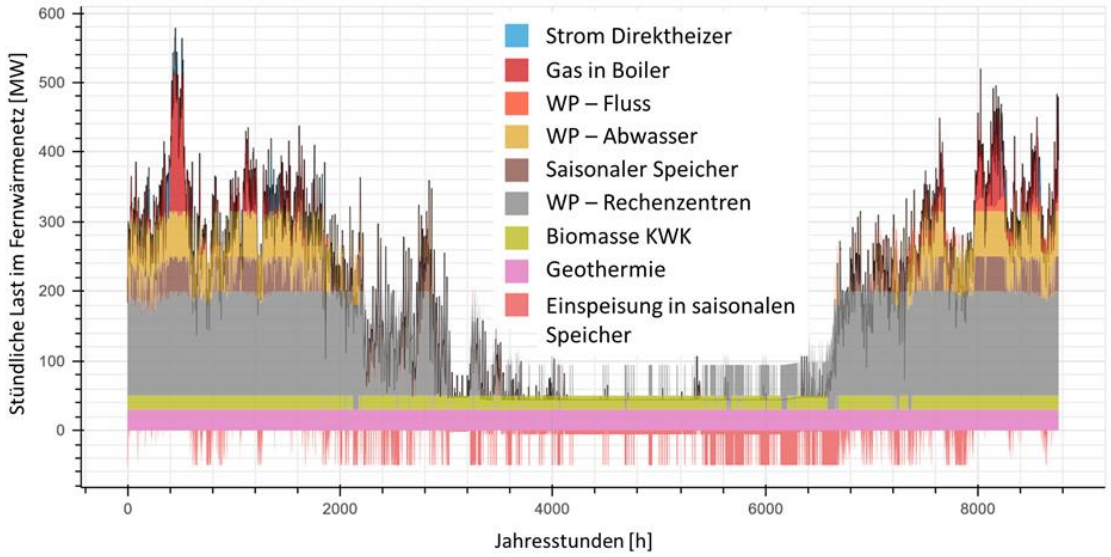


*Abbildung 10: **Last- und Aufbringungsprofil im** Heiz-/**Warmwassernetz** im Jahr 2035, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, hoher Ausbau der Fernwärme (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

In der Modellierung werden Flusswasser-WPs vorwiegend in Szenarien mit hohen Energieträgerpreisen und gleichzeitig niedrigeren Potenzialen an Abwärme aus Rechenzentren ausgebaut. Dies liegt v.a. daran, dass Flusswasser-WPs an Tagen mit niedrigen Flusstemperaturen nur begrenzt oder gar nicht

eingesetzt werden können[2], gleichzeitig an diesen Tagen aber hohe Lasten im Fernwärmenetz auftreten. Dies reduziert die Wirtschaftlichkeit gegenüber anderen Optionen. Eine Investition in eine Biomasse-KWK ist in allen berechneten Szenarien wirtschaftlich. Da die Ressource Biomasse voraussichtlich knapp sein wird, und da regional nur sehr eingeschränkte Biomassepotenziale zur Verfügung stehen, sollte die Nutzung hier aber vorwiegend zur Deckung der Prozesswärme vorgesehen werden. Gleichzeitig ist auch unklar, ob die angenommenen Biomassepreise tatsächlich derart niedrig sein werden, wenn deutschland- bzw. auch europa- und weltweit dekarbonisiert wird. Eine langfristige Reinvestition in die Gas-KWK wird gemäß dieser Modellergebnisse unter den angenommenen Preis- und Kostenentwicklungen nicht wirtschaftlich sein v.a. aufgrund der günstig zu erschließenden Abwärmequellen.

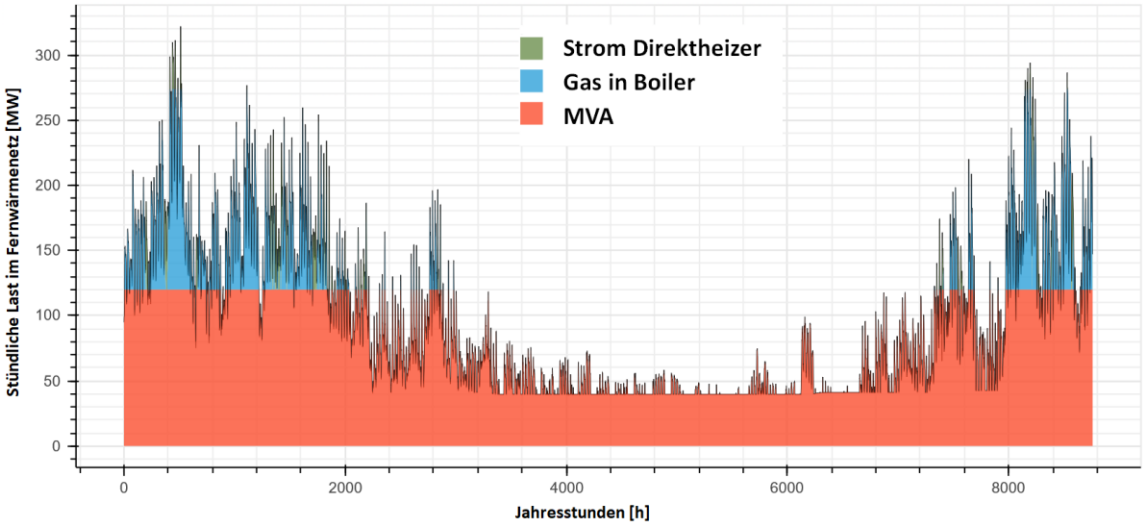


Abbildung 11: ***Last- und Aufbringungsprofil im Dampfnetz*** *im Jahr 2035, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, Bedarfsreduktion im Dampfnetz 24% gegenüber 2019 (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

Für die Kosten der Wärmeeinspeisung aus der Abwärme von Datenzentren ergeben sich in allen Szenarien zwischen 40 und 50 EUR/MWh, je nach Energieträgerpreis-Annahmen, und für die Einspeisung aus Abwärme von Kläranlagen und aus Flusswasser zwischen 60 und knapp 80 EUR/MWh. Die Deckung der Spitzenlast aus Gas kostet zwischen 80 und 140 EUR/MWh, die Deckung aus Strom zwischen 180 und 300 EUR/MWh, je nach Szenario Die Einspeisung aus den Spitzenlasttechnologien ist durch deren kurze jährlich Einsatzzeiten sowie höheren Energiekosten entsprechend deutlich höher, aber notwendig, um auch in den sehr kalten Perioden des Jahres die Wärmenachfrage vollständig zu decken.

[2] Gründe dafür sind die Gefahr der Vereisung der Wärmetauscher, behördliche Regelungen, potenzielle Kaskadeneffekte sofern mehrere Flusswärmepumpen entlang des Wasserverlaufes installiert werden, bzw. reduzierte COPs bei niedriger Quelltemperatur. In der vorliegenden Untersuchung wird davon ausgegangen, dass eine potenzielle Flusswärmepumpe bis zu einer Wassertemperatur von 6°C betrieben werden kann. Dies ist eventuell eine konservative Annahme. Wird die Auskühlung des Flusswassers reduziert, so könnte eine solche Anlage auch bei geringeren Wassertemperaturen betrieben werden.

10. Kosten zur Wärmebereitstellung aus Fernwärme und dezentralen Technologien 2035 und darüber hinaus

Zur Einschätzung der volkswirtschaftlichen Sinnhaftigkeit von Fernwärme gegenüber dezentralen Lösungen werden die Wärmebereitstellungskosten aus Fernwärme für verschiedene Ausbau- und Aufbringungs-Szenarien den verschiedenen dezentralen Lösungen für ausgewählte Gebäudetypen gegenübergestellt. Grundsätzlich werden in der Betrachtung die einmaligen **Investitionskosten**, die jährlichen verbrauchsunabhängigen **Betriebskosten** (Grundgebühren, Wartungen, etc.) sowie die verbrauchsabhängigen jährlichen **Energiekosten** berücksichtigt. Die Investitionskosten umfassen dabei sowohl den Wärmeerzeuger (z.B. Gaskessel), die notwendige hydraulische, elektrische und regelungstechnische Integration, allfällige Kosten für die Integration der Wärmequelle (z.B. im Falle von Wärmepumpen), sowie Planungskosten und sonstige Nebenkosten. Im Fall der dezentralen Lösungen reflektieren die Investitionskosten die Gesamtkosten für den Einbau einer neuen Heizungsanlage in einem bestehenden Gebäude. **Für die Fernwärme** werden zusätzlich zu den zuvor genannten Komponenten noch folgende Kosten und Kosten-Komponenten berücksichtigt:

- **Kapitalkosten**: diese inkludieren neben den Investitionen in die Bereitstellungsanlagen (z.B. eine Wärmepumpe inkl. aller zuvor genannten Komponenten) auch die notwendigen Investitionen in zusätzliche Hausanschlüsse
- **Energiekosten**: hier werden sowohl die Energieträger zum Betreiben der Anlagen berücksichtigt (z.B. der Einsatz von Gas in den Gaskesseln oder von Strom in den Wärmepumpen), als auch der notwendige Pumpstrom zur Verteilung der Wärme über die Fernwärmenetze
- **Wärmeverteilkosten**: diese reflektieren die Investitionen in die Wärmeverteil-, Hausanschluss- und Transportleitungen und wurden bereits zur Identifikation von Fernwärme-Potenzialgebieten herangezogen (siehe Kapitel 6)
- **Wärmeverlustkosten**: sie repräsentieren die Bereitstellungskosten für die zusätzlich einzuspeisende Energiemenge, die im Netz während der Verteilung an die Umgebung verloren geht

Vorhandene und mögliche zukünftige **Förderungen** für Investitionen in oder den Betrieb von Technologien zur Nutzung von erneuerbarer Energie oder Abwärme sind in diesen Berechnungen **nicht berücksichtigt**. Ebenso ist durch die volkswirtschaftliche Betrachtungsweise im Rahmen der Studie in den Abbildungen nicht berücksichtigt, dass im Endkundenpreis der Fernwärme neben den tatsächlichen Wärmebereitstellungskosten auch ein Aufschlag zur Tilgung der Gewinnerwartungen inkludiert ist.

Die folgende Abbildung 13 zeigt die Gegenüberstellung der Wärmebereitstellungskosten für dezentrale Lösungen und Fernwärme für zwei verschiedene Szenarien zur Entwicklung von Energieträgerpreisen („hohe Preise" vs. „niedrige Preise"). Die Kosten verschiedener dezentraler Lösungen in kleinen Mehrfamilienhäusern und Bürogebäuden werden für den Bestand, zukünftig renovierte als auch neue Gebäude gezeigt. Für die Fernwärme werden zum einen drei verschiedene Ausbauszenarien dargestellt („niedriger", „mittlerer" und „hoher Ausbau"). Diese reflektieren jährliche Ausbaugeschwindigkeiten von 5, 15 und 25 km Leitungslänge (siehe Abbildung 7). Zum anderen werden zwei Technologie-Kombinationen zur Aufbringung der Fernwärme unterschieden. Diese reflektieren zwei der drei untersuchten Portfolien in der Fernwärmeerzeugung: „hoher Anteil Gas" entspricht Portfolio 1 (Gas-KWK) und „niedriger Anteil Gas" entspricht Portfolio 3 (RZ-Divers).

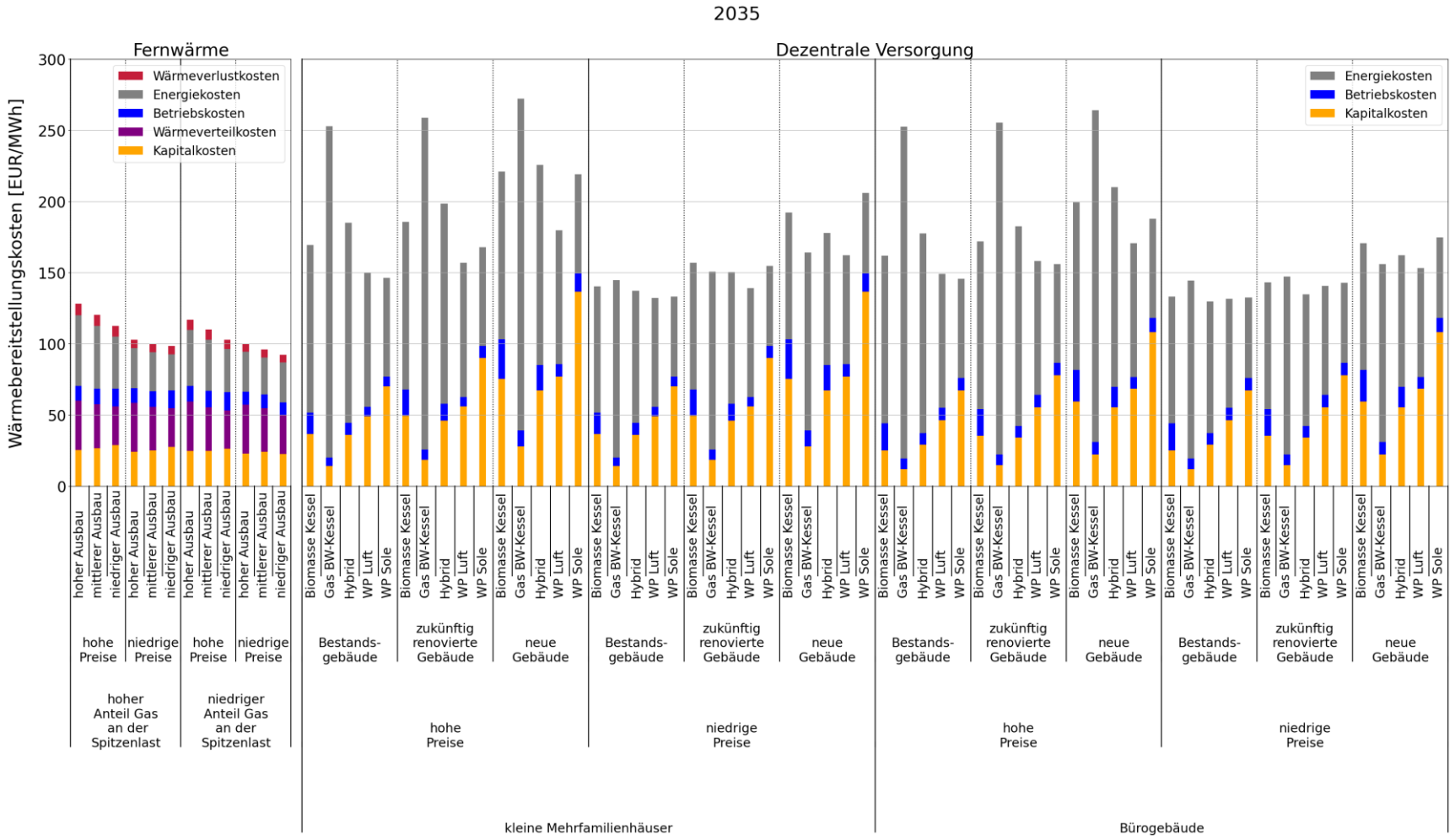


Abbildung 12: ***Vergleich der Wärmebereitstellungskosten im Jahr 2035*** *für Fernwärme und verschiedene dezentrale Versorgungsoptionen für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (5, 15 und 25 km/a) und Portfolien in der Fernwärme-Aufbringung („Gas-KWK" entspricht „hoher Anteil Gas an der Spitzenlast" und „RZ-Divers" entspricht „niedriger Anteil Gas an der Spitzenlast") (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung)*

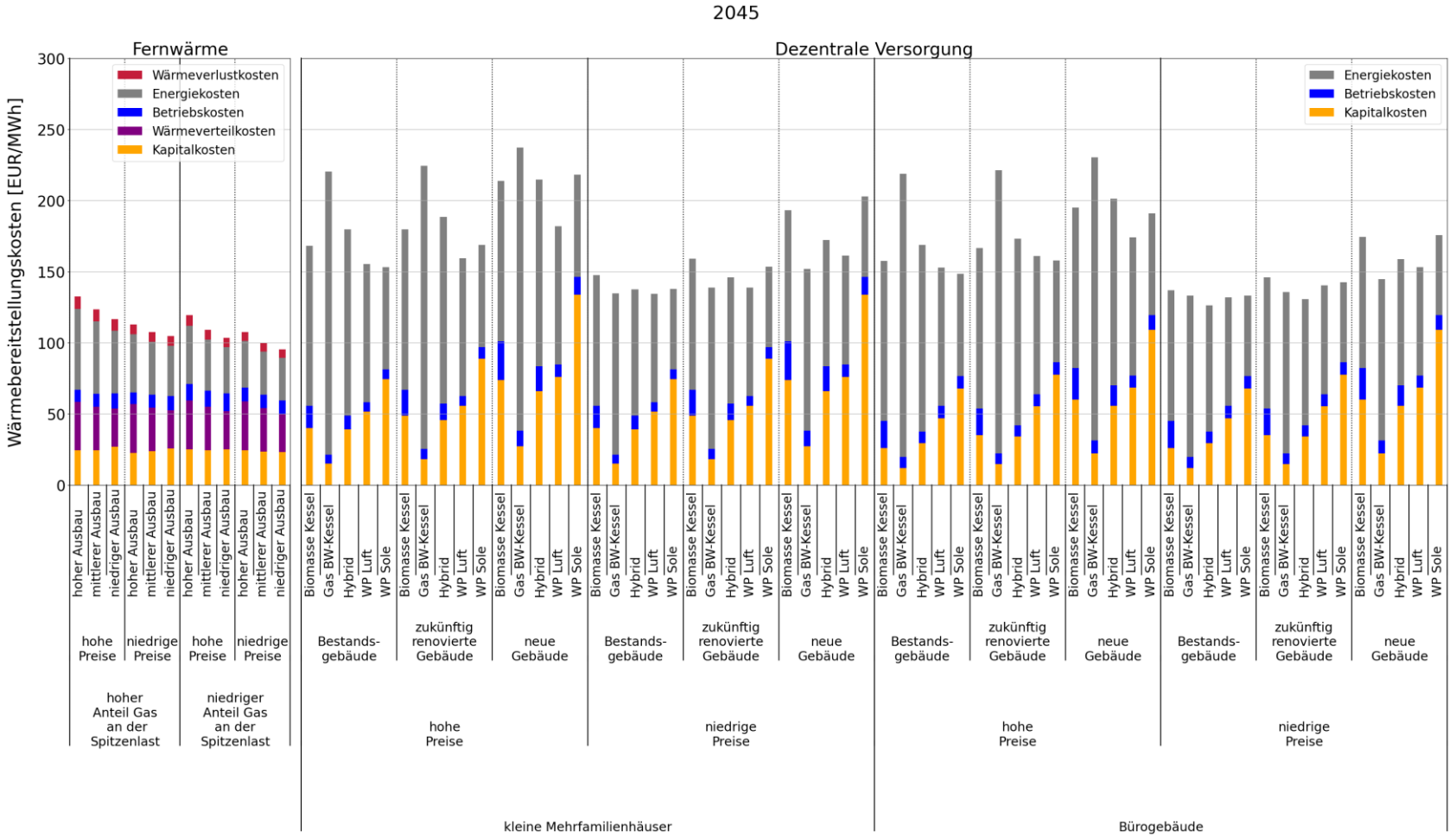


Abbildung 13: ***Vergleich der Wärmebereitstellungskosten im Jahr 2045*** *für Fernwärme und verschiedene dezentrale Versorgungsoptionen für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (5, 15 und 25 km/a) und Portfolien in der Fernwärme-Aufbringung („Gas-KWK" entspricht „hoher Anteil Gas an der Spitzenlast" und „RZ-Divers" entspricht „niedriger Anteil Gas an der Spitzenlast") (Quelle: e-think, eigene Berechnung und Darstellung)*

Die Gegenüberstellung der Kosten einer Wärmebereitstellung aus Fernwärme und aus unterschiedlichen dezentralen Versorgungssystemen zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen, Fernwärmesysteme in Frankfurt am Main geeignet sind, Gebäude kosteneffizient mit Wärme zu versorgen. In der Abbildung ist ersichtlich, dass in allen analysierten Ausbau- und Aufbringungsszenarien die Fernwärmebereitstellung günstiger ist als jede alternative dezentrale Versorgungsoption. Der wichtigste Grund dafür ist, dass ein geeignet entwickeltes Fernwärmesystem in der Lage ist, kostengünstige Wärmequellen nutzbar zu machen. Im Gegensatz dazu sind diese Möglichkeiten bei dezentralen Systemen stark eingeschränkt. In der Vergangenheit stand mit fossilem russischem Erdgas ein billiger Energieträger zur Verfügung, der relativ einfach über das Gasleitungsnetz zu den einzelnen Gebäuden transportiert werden konnte. Aus heutiger Sicht kann nicht davon ausgegangen werden, dass in einem CO_2-neutralen Energiesystem zukünftig ein solcher billiger gasförmiger Energieträger in ausreichendem Ausmaß zur Verfügung stehen wird. Daher muss auch in Szenarien mit niedrigen zukünftigen Energiepreisen davon ausgegangen werden, dass der Preis für einen solchen gasförmigen Energieträger deutlich über dem heutigen Endkundenpreis liegen wird (entspricht der Annahme im Szenario „niedrige Preise"). Des Weiteren ist damit zu rechnen, dass der Preis eines gasförmigen Energieträgers mit steigender Nutzung eines solchen in den unterschiedlichen Bereichen des Energiesystems steigen wird (entspricht der Annahme im Szenario „hohe Preise").

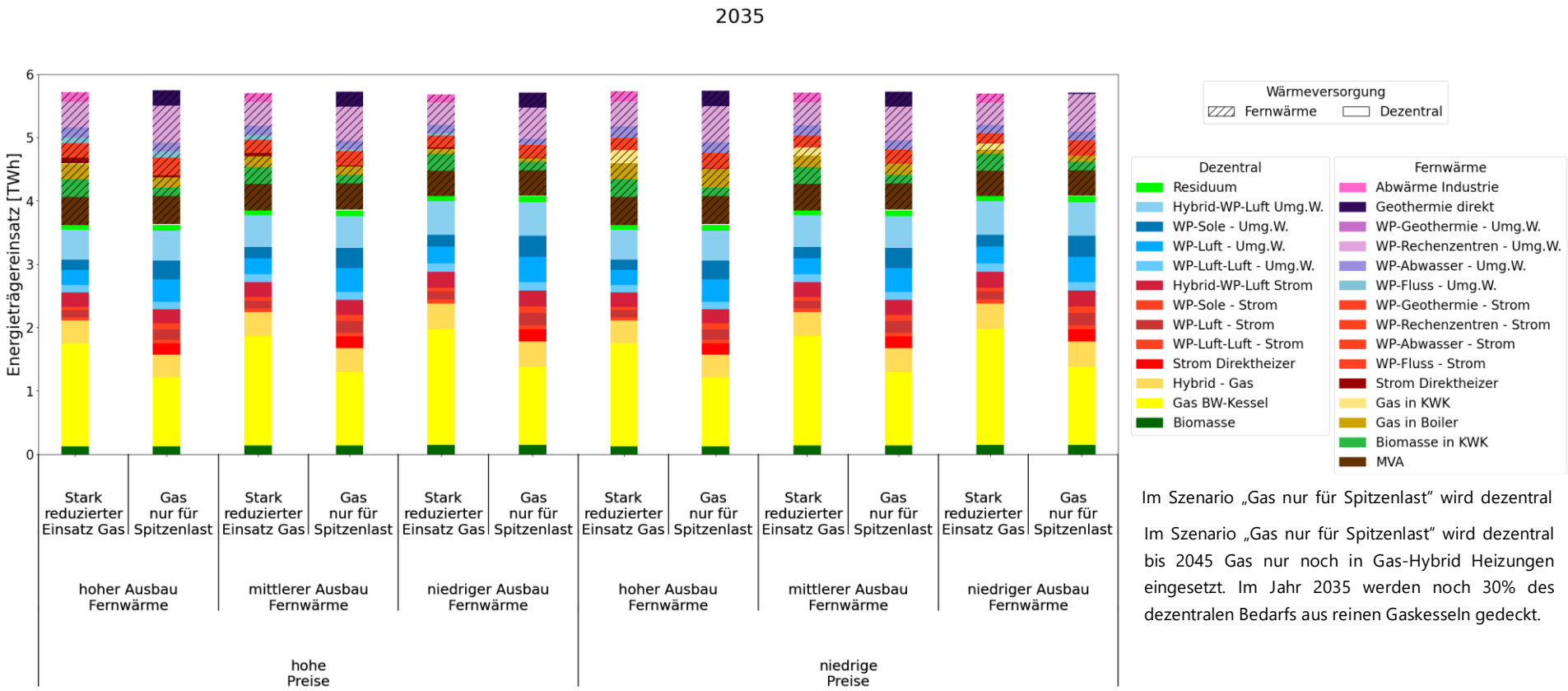
Auf städtischer Ebene ist mit einem solchen Effekt auch für die Kosten der Wärmeaufbringung bei Fernwärmesystemen zu rechnen. In den beiden dargestellten Varianten der Wärmeaufbringung zeigt sich eine stärkere Abhängigkeit der Bereitstellungskosten von den angenommenen Preisentwicklungen für die Variante mit einem „hohen Anteil Gas" gegenüber der Variante „niedriger Anteil Gas". Gleichzeitig zeigt sich, dass die Kosten der Wärmebereitstellung aus Fernwärme generell deutlich weniger sensitiv auf die Preisentwicklung reagieren, als dies bei den Kosten der dezentralen Versorgungsoption der Fall ist.

Des Weiteren ist in der Abbildung ersichtlich, dass die Kosten der Wärmebereitstellung aus Fernwärme mit höherem Ausbau steigen. Dies hat zwei Gründe. Zum einen steigen die durchschnittlichen Wärmeverteilkosten durch den Ausbau in weniger dicht bebauten Gebieten (siehe auch Abbildung 6 sowie die Erläuterungen im entsprechenden Kapitel), zum anderen müssen mit steigendem Ausbau zunehmend teurere Energiequellen (z.B. Fluss-Wasser-WP oder Gas-Kessel) mit ins System integriert werden. Dennoch, wie in der Abbildung ersichtlich, ist auch bei einem hohen Ausbau der Fernwärme (25 km Trasse pro Jahr, 37% Fernwärme im Jahr 2035 und 55% Fernwärme im Jahr 2045) die Bereitstellung über Fernwärme günstiger ist als die dezentralen Optionen.

11. Szenarien zur Dekarbonisierung des Wärmebedarfs in den Gebäuden bis 2035 und darüber hinaus und mögliche CO2-Reduktion

Zur weiteren Einschätzung volkswirtschaftlich sinnvoller Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Gebäude in Frankfurt am Main wurden verschiedene Varianten einer (teil-) dekarbonisierten Wärmeversorgung aller Gebäude der Stadt im Jahr 2035 und darüber hinaus (im Jahr 2045) gegenübergestellt. Dabei wurden **drei Szenarien** der **Fernwärme-Ausbau-Geschwindigkeit** (niedrig, mittel, hoch), **zwei** unterschiedliche **Technologie-Kombinationen** in der **Fernwärme-Aufbringung und zwei** Technologie-Kombinationen **in der dezentralen Bereitstellung** miteinander **kombiniert**. Die Geschwindigkeiten im Ausbau sowie die Technologie-Kombinationen zur Aufbringung der Fernwärme entsprechen den Varianten, wie sie auch in der Gegenüberstellung der Wärmebereitstellungskosten unterschieden wurden (siehe Kapitel 10). In der dezentralen Wärmebereitstellung werden folgende zwei Varianten aussichtsreicher Technologie-Kombinationen unterschieden: einerseits ein **stark reduzierter Einsatz von Gas**-Technologien und andererseits eine noch stärkere Reduktion des Einsatzes von **Gas**-Technologien langfristig **nur** noch **für die Bereitstellung von Spitzenlast**, also über Gas-Hybrid Systeme. In dieser zweiten Variante wird angenommen, dass bis 2035 etwa 30% der Gebäude eine Hybrid-Wärmepumpe installieren werden, weitere 30% werden komplett auf Wärmepumpen umgestellt werden. Etwa 30% der Gebäude verbleiben noch mit einer reinen Gas-Heizung und der Rest wird über Biomasse-Kessel und Stromdirektheizungen gedeckt. Bis 2045 wurde für diese Variante dann angenommen, dass es keine reinen Gas-Heizungen mehr geben wird. Der Anteil der Gebäude mit reiner Wärmepumpen-Versorgung wird auf knapp 70% steigen, etwa 20% verbleiben mit einer Hybrid-Wärmepumpe. In der Variante mit starker Reduktion aber nicht komplettem Ausstieg aus rein Gas-versorgten Gebäuden wurde angenommen, dass diese Entwicklung deutlich langsamer abläuft: bis 2035 würden ca. 20% der Gebäude rein über Wärmepumpen versorgt, ebenfalls 30% über Hybrid-Wärmepumpen, etwa 45% der Gebäude verbleiben bei einer reinen Gas-Heizung. Bis 2045 würde der Anteil der Gas-Heizung weiter sinken auf etwa 25% und der Anteil der Wärmepumpen auf 50% steigen. In dieser Variante ist eine Dekarbonisierung der Wärmeversorgung der Gebäude in der Stadt entsprechend deutlich stärker abhängig von der Verfügbarkeit dekarbonisierter gasförmiger Energieträger (siehe auch Abbildung 18).

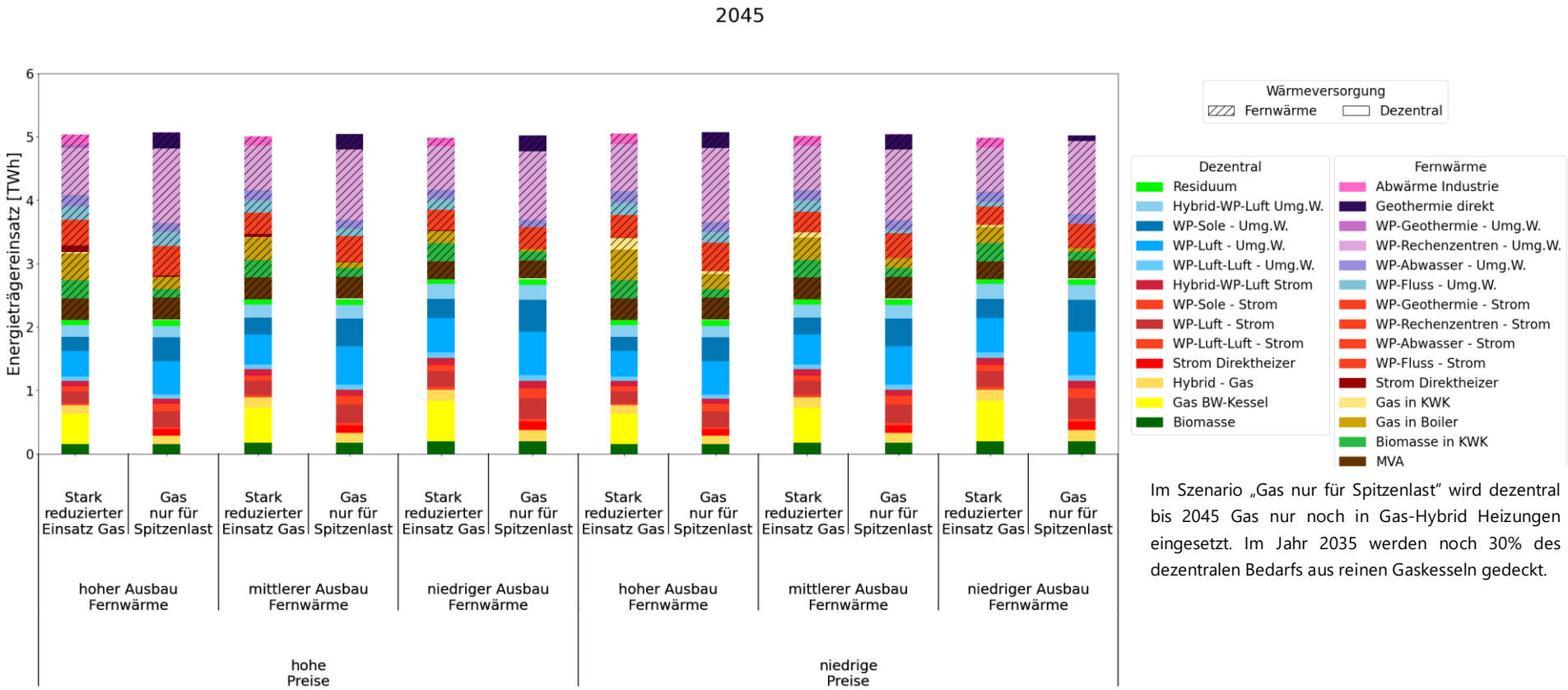
Die Abbildungen Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den **Energieträgereinsatz** in den Jahren 2035 und 2045 für die 6 verschiedenen Szenarien jeweils für die beiden Preisentwicklungs-Annahmen. Der Energieträgereinsatz in der Abbildung reflektiert zum einen die Energieträger, die **direkt in den Gebäuden** eingesetzt werden, **und** andererseits die Energieträger, die **in den Bereitstellungsanlagen im Fernwärmesystem** eingesetzt werden. Hierbei werden einerseits Energieträger berücksichtigt, die zugeführt werden müssen, wie Strom für die Wärmepumpen oder Gas für die Gas-Kessel, andererseits wird auch die Umgebungs- bzw. Abwärme ausgewiesen, die in den Wärmepumpen nutzbar gemacht wird.



Im Szenario „Gas nur für Spitzenlast" wird dezentral

Im Szenario „Gas nur für Spitzenlast" wird dezentral bis 2045 Gas nur noch in Gas-Hybrid Heizungen eingesetzt. Im Jahr 2035 werden noch 30% des dezentralen Bedarfs aus reinen Gaskesseln gedeckt.

*Abbildung 14: **Energieträgereinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden** der Stadt Frankfurt a. M. **im Jahr 2035** für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas" und „Gas nur für Spitzenlast") (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*



Im Szenario „Gas nur für Spitzenlast" wird dezentral bis 2045 Gas nur noch in Gas-Hybrid Heizungen eingesetzt. Im Jahr 2035 werden noch 30% des dezentralen Bedarfs aus reinen Gaskesseln gedeckt.

*Abbildung 15: **Energieträgereinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden** der Stadt Frankfurt a. M. **im Jahr 2045** für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas" und „Gas nur für Spitzenlast") (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

Die in Abbildungen Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellten Ergebnissen zeigen, dass unter den zuvor beschriebenen Annahmen für Technologie-Einsatz und Ausbau der Fernwärme, gasförmige Energieträger im Jahr 2035 etwa 30% bis 45% aller eingesetzten Energieträger ausmachen werden. Bis 2045 würde deren Anteil auf 5% bis 20% sinken (siehe Abbildung 15). Durch den derzeit sehr hohen Anteil an Gas in der Wärmeversorgung der Gebäude wird also auch bei ambitionierten Szenarien zum Wechsel von Versorgungstechnologien zukünftig noch relevanter Gasbedarf auftreten. Grundsätzlich ist wichtig zu berücksichtigen, dass kostengünstige Gas- bzw. Wasserstoff-Kessel auch in den Szenarien im Jahr 2045 eine wichtige Rolle in der Bereitstellung der erforderlichen Spitzenlasten des Fernwärmesystems spielen. In der hier gezeigten energetischen Betrachtung spiegelt sich dies nicht im selben Maße wider, da die Einsatzstunden dieser Spitzenlastkessel sehr niedrig sind.

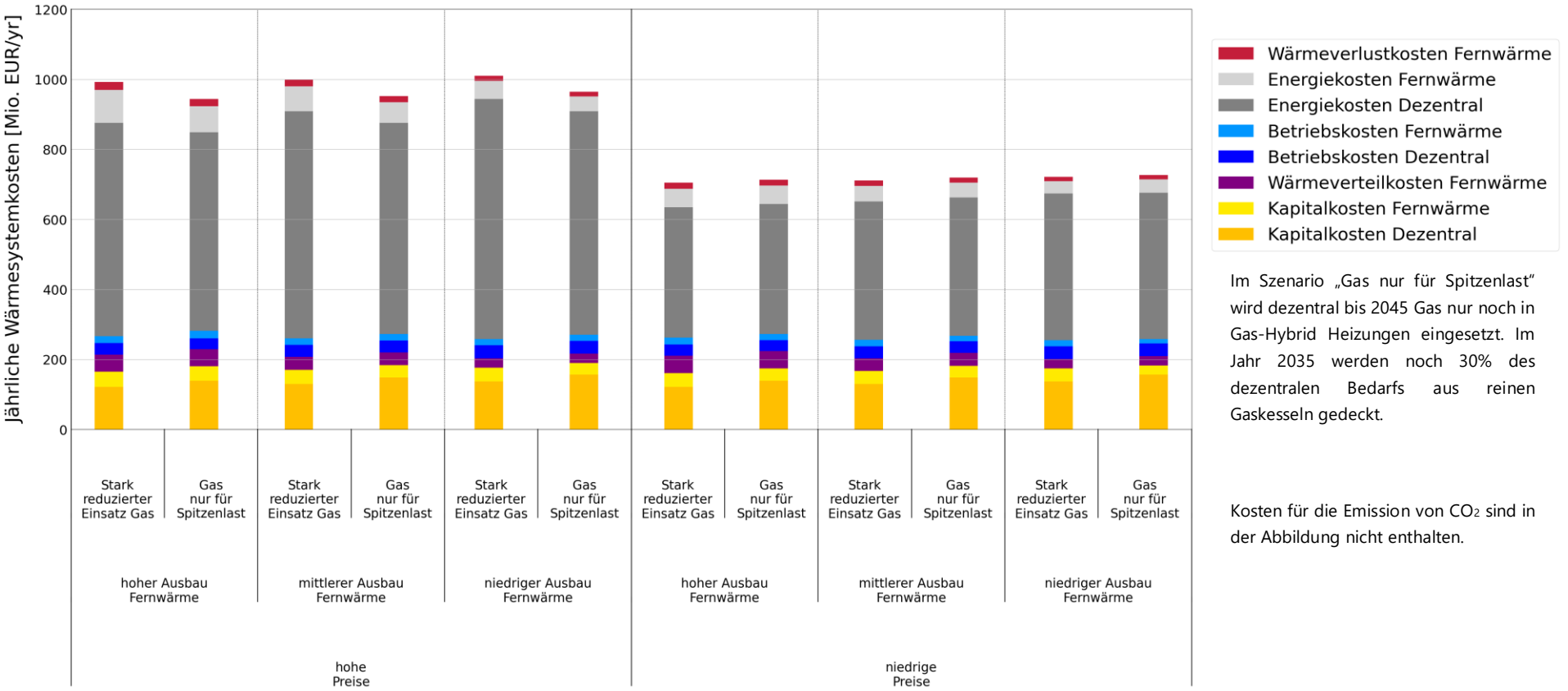
Generell zeigen die beiden Abbildungen eine relevante Reduktion des Einsatzes sekundärer, marktgebundener Energieträger (also Gas, Strom oder Biomasse) gegenüber der derzeitigen Situation in allen Szenarien. Dies ergibt sich zum einen aus dem reduzierten Wärmebedarf in den Gebäuden durch Sanierung, Abriss und Neubau, zum anderen aus der stark steigenden Nutzung von Wärmepumpen sowohl in der Fernwärme als auch in der dezentralen Bereitstellung. Bis 2035 könnten dadurch marktgebundene Energieträger um 40% bis 50% gegenüber 2019 reduziert werden, bis 2045 sogar um 60% bis 70%. Je nach Szenario liegt der Beitrag des reduzierten Wärmebedarfs durch Sanierung, Abriss und Neubau an der Reduktion der marktgebundenen Energieträger zwischen 36% und 47%.

Neben gasförmigen Energieträgern und Strom zum Betrieb von Wärmepumpen werden in den Szenarien auch kleinere Mengen an Biomasse in dezentralen Anlagen am Stadtrand sowie in der Fernwärme in den derzeit bereits existierenden und geplanten Anlagen in Fechenheim eingesetzt. Darüber hinaus wird in den Szenarien Müllverbrennung zur Bereitstellung von Dampf für das Ferndampfsystem eingesetzt. Dabei wird aber nicht das volle energetische Potenzial zur Wärmeversorgung der Gebäude ausgeschöpft. Einerseits wird ein Teil des Mülls zur Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt. Diese Bereitstellung wird in der Modellierung der Müllverbrennungsanlage berücksichtigt (siehe Kapitel 9), ist aber in den Abbildungen Abbildung 14 und Abbildung 15 nicht integriert. Da die Müllverbrennung ausschließlich in der Modellierung von Ferndampf berücksichtigt ist, ergeben sich mit 4500 bis 6000 Stunden niedrigere Volllaststunden als in der Realität erreicht werden können, sofern die ausgekoppelte Wärme auch im Heiz-/Warmwassernetz eingespeist werden würde. Darüber hinaus könnte durch eine vorwiegend thermische Nutzung des Mülls der Jahresnutzungsgrad gegenüber dem derzeitigen Wirkungsgrad von etwa 50% weiter gesteigert werden.

In Kapitel 4 wurde dargestellt, dass der Modellierungsansatz um knapp 300 GWh/a nicht mit der Energiebilanz zusammenstimmt. Dies ergibt sich aus einem Anteil an Prozesswärme, der nicht innere Gewinne in den Gebäuden zur Raumwärmebereitstellung darstellt, sowie einer statistischen Differenz. Gut 200 GWh/a von diesem Residuum fallen dabei lt. Energiebilanz auf die Fernwärme und werden als konstant in den Szenarien für 2035 und 2045 fortgeschrieben. Die verbleibenden knapp 100 GWh/a werden durch andere Energieträger bereitgestellt. In Abbildung 14 und Abbildung 15 ist dies als Residuum dezentral ausgewiesen. In den nachfolgenden Analysen der jährlichen Systemkosten sowie der CO_2 Emissionen für 2035 und 2045 wird angenommen, dass dieses Residuum über Strom bereitgestellt wird.

Die Abbildungen Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen **jährliche Systemkosten** zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt am Main für die gewählten Szenarien zu Preisentwicklung, Fernwärme-Ausbaugeschwindigkeit und Einsatz verschiedener

Bereitstellungstechnologien in den Jahren 2035 und 2045. Die Grafiken beinhalten dabei alle anfallenden Kosten zur Bereitstellung der Wärme über die in den jeweiligen Gebäuden eingesetzte Technologie, so wie sie bereits in Kapitel 10 erläutert wurden. Die jährlichen **Kapitalkosten zur Einsparung von Wärmebedarf** über Sanierungen sind in dieser Betrachtung **nicht enthalten**. Die jährlichen Systemkosten entsprechen dabei der Summe der absoluten Wärmebereitstellungskosten in allen Gebäuden der Stadt. **Mögliche Kosten für CO_2-Emissionen** sind in den Abbildungen **nicht enthalten**. Diese werden separat analysiert und diskutiert (siehe Tabelle 4).



Im Szenario „Gas nur für Spitzenlast" wird dezentral bis 2045 Gas nur noch in Gas-Hybrid Heizungen eingesetzt. Im Jahr 2035 werden noch 30% des dezentralen Bedarfs aus reinen Gaskesseln gedeckt.

Kosten für die Emission von CO_2 sind in der Abbildung nicht enthalten.

Abbildung 16: ***Jährliche Systemkosten zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden*** *der Stadt Frankfurt a. M. (ohne Sanierungskosten)* ***im Jahr 2035*** *für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas" und „Gas nur für Spitzenlast") (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

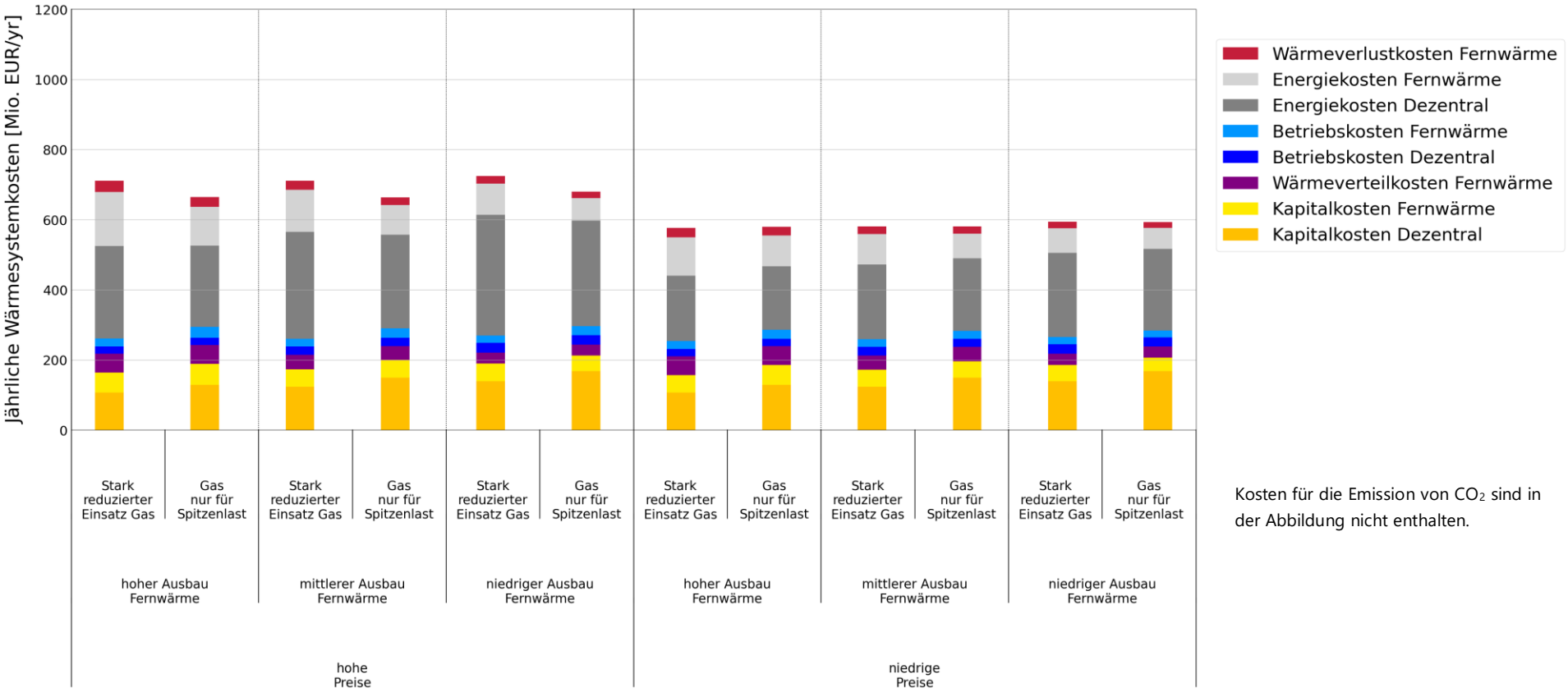


Abbildung 17: ***Jährliche Systemkosten zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden*** *der Stadt Frankfurt a. M. (ohne Sanierungskosten)* ***im Jahr 2045*** *für unterschiedliche Preisszenarien (hoch, niedrig), Fernwärme-Netzausbaugeschwindigkeiten (25, 15 und 5 km/a) sowie zum Einsatz verschiedener Bereitstellungstechnologien in der Fernwärme und dezentral („stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“) (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)*

Die Abbildungen zeigen eine langfristige Reduktion der Kosten zur Wärmeversorgung der Gebäude. Diese ergibt sich durch mehrere Effekte: die Reduktion des Wärmebedarfs in den Gebäuden durch Sanierung, Abriss und Neubau, die Erhöhung des Anteils an Fernwärme im System (siehe auch Abbildungen Abbildung 12 und Abbildung 13), sowie die Reduktion des Einsatzes an gasförmigen Energieträgern. Naturgemäß sind die jährlichen Systemkosten dabei stark abhängig von den hinterlegten Energieträgerpreisen. Diese Abhängigkeit von Schwankungen am Energieträgermarkt kann aber durch die Reduktion des Einsatzes an gasförmigen Energieträgern und den Ausbau der Fernwärme deutlich reduziert werden. In den Abbildungen ist dabei auch ersichtlich, dass die Abhängigkeit von den Energieträgerpreisen in der dezentralen Bereitstellung deutlich größere Auswirkungen hat als in der Bereitstellung der Fernwärme (siehe „Energiekosten dezentral" vs. „Energiekosten Fernwärme"). Dies erklärt sich einerseits durch den optimierten Einsatz der Anlagen in der Fernwärme und andererseits durch den entsprechend hohen Anteil an Wärmepumpen in der Nutzung der bestehenden Abwärmemengen.

Die Abbildungen zu den Systemkosten machen auch deutlich, dass die Systemumstellung hin zu einem deutlich höheren Anteil der Fernwärme und des Einsatzes von Wärmepumpen keinen massiven Anstieg der Kapitalkosten bedeuten. Trotz deutlich erhöhter Kapitalkosten je Anlage in der dezentralen Bereitstellung zwischen 2035 und 2045 steigen die gesamten Kapitalkosten in der dezentralen Bereitstellung durch den Ausbau der Fernwärme nur geringfügig. Auch der Anteil der Wärmeverteilkosten, also der Kapitalkosten für den Bau der Fernwärme-Netzinfrastruktur erscheint in Relation zu den eingesparten laufenden Energiekosten aus volkswirtschaftlicher Sicht sehr gering.

Welche Auswirkungen die dargestellten Szenarien auf die **CO_2-Emissionen** aus der Wärmeversorgung der Gebäude hat, ist in der folgenden Abbildung 18 dargestellt. Die Berechnung der Emissionen folgt dabei dem Konzept der Bilanzierungs-Systematik Kommunal (BISKO) und berücksichtigt somit auch die Vorketten in der Bereitstellung der Energieträger. Für Strom wird angenommen, dass die Ziele des EEG bis 2035 eingehalten werden und dass bis 2045 keine CO_2-Emissionen mehr anfallen. Für Müll wird angenommen, dass der Anteil an fossilem Plastik bis 2045 halbiert werden kann. Aus den Gesprächen mit dem Gasnetzbetreiber ging hervor, dass dieser eine Umstellung des bestehenden Verteilnetzes von Erdgas auf Wasserstoff als mögliche Zukunftsoption erachtet. Derzeit liegen dazu jedoch keine konkreten Umsetzungspläne vor. Als Diskussionsgrundlage werden daher für den Einsatz von Gas zwei Extremfälle unterschieden. In der Nicht-Dekarbonisierung der Gasversorgung wird davon ausgegangen, dass weiterhin Erdgas mit den heutigen CO_2 Emissionen eingesetzt wird, sowohl dezentral als auch in der Fernwärme. Im zweiten Fall wird eine optimistische Entwicklung mit einer erfolgreichen langfristigen Dekarbonisierung der Gasversorgung unterstellt. In diesem Fall könnte bis 2045 der gesamte Gasbedarf emissionsfrei bereitgestellt werden, bis zum Jahr 2035 würden 50% des Gases im öffentlichen Gasnetz emissionsfrei bereitgestellt und zusätzlich 15% des Gasbedarfs der Fernwärme aus Wasserstoff gedeckt werden.

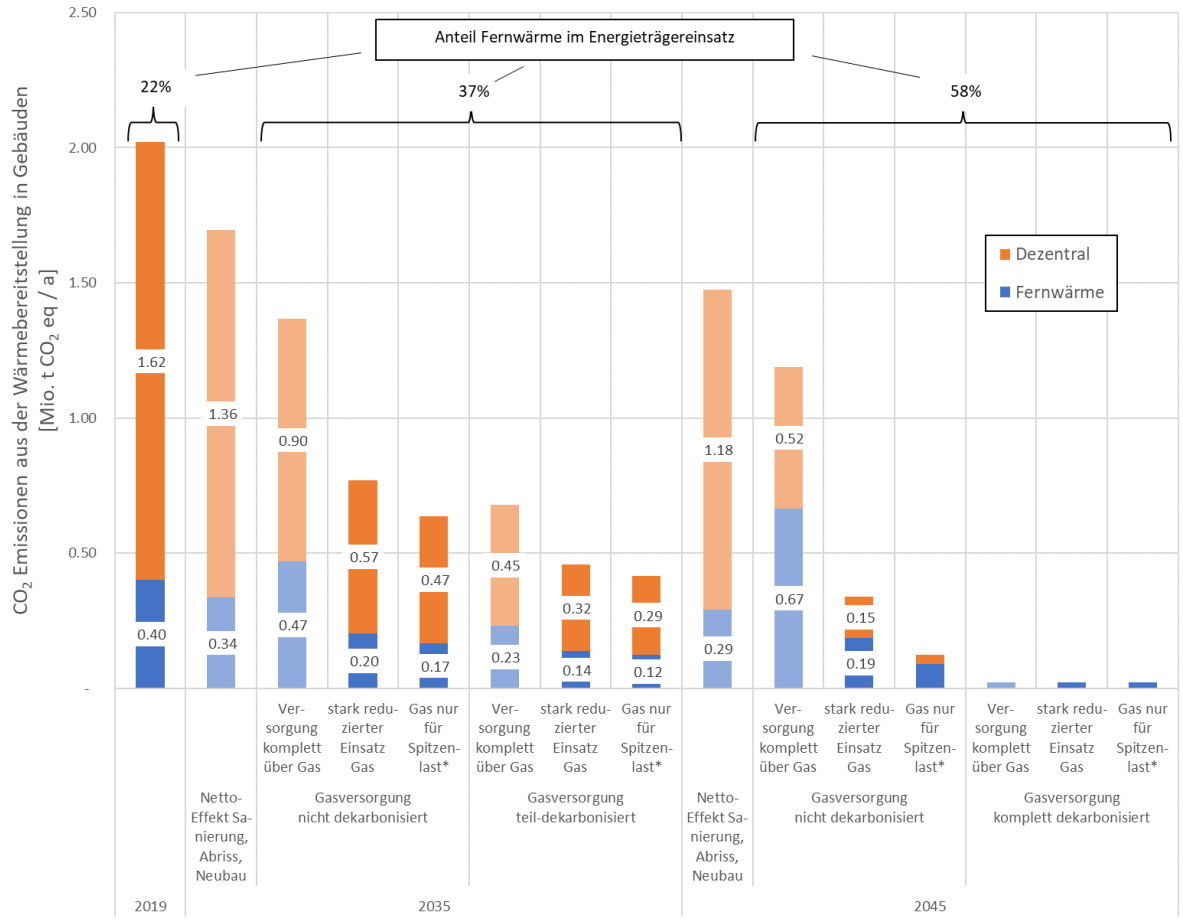


Abbildung 18: ***Berechnete CO_2-Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude*** *in Frankfurt a. M. in unterschiedlichen Szenarien („stark reduzierter Einsatz Gas" und „Gas nur für Spitzenlast") und Sensitivitäten (Nicht, Teil- und Komplett- „Dekarbonisierung Gasversorgung" und „Versorgung komplett über Gas") in den Jahren 2035 und 2045 unter den beschriebenen Rahmenbedingungen (Quelle: eigene Berechnungen)*

Die Abbildung zeigt, ausgehend von den Emissionen für die Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude im Jahr 2019, die unter den verschiedenen Annahmen erreichbaren Einsparungen. Bereits über den Netto-Effekt von Sanierung, Abriss und Neubau kann eine nennenswerte Reduktion erreicht werden. Es zeigt sich, dass auch unter optimistischen Annahmen, also einer Teil-Dekarbonisierung der Gasversorgung und einer drastischen Umstellung der Versorgungsstrukturen im Jahr 2035 mit Rest-Emissionen von voraussichtlich mindestens 0,4 Mio. t CO_2-eq jährlich zu rechnen ist. Gegenüber 2019 würde dies aber bereits eine Reduktion von bis zu 79% bedeuten, die unter optimistischen Annahmen erreicht werden kann. Schafft man es nicht die Gasversorgung teilweise zu dekarbonisieren, bleibt aber bei einem ambitionierten Technologie-Wechsel, so könnten immerhin noch 69% eingespart werden. Wird allerdings kein nennenswerter Umstieg von gasbasierten Versorgungstechnologien im dezentralen Bereich erzielt und erzeugt die Fernwärme primär aus Gas, so könnten die Emissionen im Jahr 2035 nur etwa 33% gegenüber 2019 reduziert werden.

Unter optimistischen Annahmen hinsichtlich der Änderungen in der Versorgungsstruktur und der Annahme einer kompletten Dekarbonisierung der Gasversorgung verbleiben im Jahr 2045 nur jährliche Restemissionen von etwa 20 kt CO_2-eq aus der Müllverbrennung. Dies entspricht einer Reduktion

gegenüber 2019 von 99%. Wenn die Gasversorgung bis dahin nicht dekarbonisiert werden kann, so können mit den drastischen Änderungen im Versorgungssystem noch 83% bis 94% Emissionen gegenüber 2019 eingespart werden, je nachdem, wie stark die Reduktion des Gaseinsatzes vorangetrieben werden kann. Schafft man es allerdings nicht von einer primären Gasversorgung abzukommen und erfolgt keine Dekarbonisierung der Gasversorgung, so ist mit jährlichen Emissionen von 1,2 Mio. t CO_2-eq zu rechnen.

Welche **zusätzliche**n **Kosten** entstehen könnten, **wenn** der **Wärmebedarf** der Gebäude **vorwiegend aus Gas bereitgestellt und gleichzeitig** die **Gasversorgung nicht dekarbonisiert** werden kann, ist in Tabelle 4 dargestellt. In der Abbildung werden die zusätzlichen Kosten gegenüber einer Teil-Dekarbonisierung der Gasversorgung bis 2035 bzw. einer vollständigen Dekarbonisierung der Gasversorgung bis 2045 für den Durchschnitt der Szenarien „stark reduzierter Einsatz Gas" und „Gas nur für Spitzenlast" dargestellt. Die zusätzlichen Kosten werden einerseits für CO_2 Emissionen und andererseits für das Versorgungssystem (System) dargestellt. Die Systemkosten beinhalten dabei, wie in den Abbildungen Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt, Kapitalkosten, Wärmeverteilkosten, Betriebskosten, Energiekosten und Wärmeverlustkosten, nicht aber die Kapitalkosten für die Reduktion des Wärmebedarfs über Sanierungen.

*Tabelle 4: **Zusätzliche Kosten bei Versorgung** vorwiegend über Gas und nicht-Dekarbonisierung der Gasversorgung. Vergleich gegenüber einer Teildekarbonisierung der Gasversorgung bis 2035 und vollständiger Dekarbonisierung bis 2045 (Quelle: eigene Berechnungen)*

2035	**absolut [Mio. EUR/a]**			**relativ [%]**
	CO_2	System	Gesamt	
niedrige Preise, CO_2-Preis bei 100 EUR/t	93	28	**121**	**16%**
hohe Preise, CO_2-Preis bei 200 EUR/t	186	207	**393**	**37%**
2045	**absolut [Mio. EUR/a]**			**relativ [%]**
	CO_2	System	Gesamt	
niedrige Preise, CO_2-Preis bei 100 EUR/t	117	-11	**106**	**18%**
hohe Preise, CO_2-Preis bei 200 EUR/t	234	127	**360**	**52%**

In der Tabelle ist ersichtlich, dass eine drastische Umstellung der Versorgungsstruktur hin zu einem deutlich erhöhten Anteil an Fernwärme sowie einer weitreichenden Nutzung von Wärmepumpen sowohl in der Fernwärme als auch in der dezentralen Versorgung nicht nur die Erreichung einer langfristigen Dekarbonisierung erlaubt, sondern auch mit deutlichen Kostenreduktionen einhergeht. Für den nicht unrealistischen Fall, dass die Energieträgerpreise eher hoch sind und gleichzeitig 200 EUR/tCO_2 gezahlt werden müssen, würde ein auf Gas basiertes Wärmeversorgungssystem in Frankfurt am Main zu 37% höheren jährlichen Kosten im Jahr 2035 führen, und sogar zu 52% höheren Kosten im Jahr 2045.

Die **zur Umstellung der Wärmeversorgungsstruktur** der Gebäude in Frankfurt am Main **notwendigen Investitionen** sind in Tabelle 5 sowie in Abbildung 19 dargestellt. Dabei wird unterschieden in die Investitionen zur Sanierung der Gebäude, aufgeteilt nach energetischen Zusatzkosten (EZK) und Instandsetzungskosten (SHK) (siehe auch Kapitel 5), die Investitionen zum Ausbau der Fernwärme (Verteilleitungen, Hausanschlussleitungen, Transportleitungen und Hausanschlüsse) und zur Instandhaltung des bestehenden Netzes, die Investitionen in den Erzeugungspark in der Fernwärme sowie die Investitionen in die dezentrale Erzeugungsstruktur.

*Tabelle 5: **Notwendige langfristige Investitionen zur Umstellung des Wärmeversorgungssystems** der Gebäude in Frankfurt a. M. (Quelle: eigene Berechnungen)*

	Mrd. EUR		EUR/m²BGF		EUR/Einwohner	
	mittlerer Ausbau FW	hoher Ausbau FW	mittlerer Ausbau FW	hoher Ausbau FW	mittlerer Ausbau FW	hoher Ausbau FW
Dezentrale Erzeuger	2,2	1,9	34	30	2 976	2 567
FW-Erzeuger	0,8	0,9	12	14	1 064	1 216
FW-Ausbau*	0,9	1,4	15	22	1 265	1 933
FW-Instandhaltung/ Instandsetzung Bestandsnetz**	0,7	0,7	11	11	933	933
Sanierungen EZK	3,7	3,7	57	57	4 977	4 977
Sanierungen ISK	5,3	5,3	81	81	7 013	7 013
Gesamt	**13,7**	**14,0**	**210**	**215**	**18 229**	**18 640**

* Inkl. Transportleitungen, Verteilleitungen, Hausanschlussleitungen, Wärmeübergabestationen und Hausanschlüsse

** Ersatz von Bestandsleitungen / Reinvestitionen

Gesamt ist mit Investitionen von knapp 14 Mrd. EUR für die vollständige Systemumstellung bis 2045 zu rechnen. Den größten Anteil daran haben die Sanierungen an bestehenden Gebäuden mit etwa 9 Mrd. EUR, wobei die energetischen Zusatzkosten dabei nur etwa 40% der gesamten Sanierungskosten darstellen. Je nach Ausbaugeschwindigkeit ist mit Kosten zwischen 0,9 und 1,4 Mrd. EUR für den Ausbau der Fernwärmenetze zu rechnen. Investitionen in die Instandhaltung der Bestandsnetze von rund 0,7 Mrd. EUR sind dabei noch zusätzlich zu veranschlagen. Diese werden allerdings nur zu einem geringeren Anteil bis 2045 investiert werden müssen, da ein relevanter Anteil der Bestandsnetze voraussichtlich ohne Instandhaltung bis 2045 weiter betrieben werden kann. Die Investitionen in die Erzeugungsanlagen belaufen sich auf weitere etwa 800 bis 900 Mio. EUR, wobei rund 270 Mio. EUR für die Nutzbarmachung der Abwärme aus Rechenzentren anfällt, umgerechnet rund 12 Mio. EUR pro Jahr. Der Umbau der dezentralen Anlagen zur Wärmeversorgung in den Gebäuden wird mit etwa 2 Mrd. EUR geschätzt, wobei davon etwa 80% für die Investition und Installation von Wärmepumpen aufzubringen ist. Investitionen in den notwendigen Umbau der Stromnetze bei hohem Anteil von Wärmepumpen sind in den Kosten nicht enthalten. Wie die identifizierten Investitionen finanziert werden könnten, wird in der Studie ebenfalls nicht betrachtet.

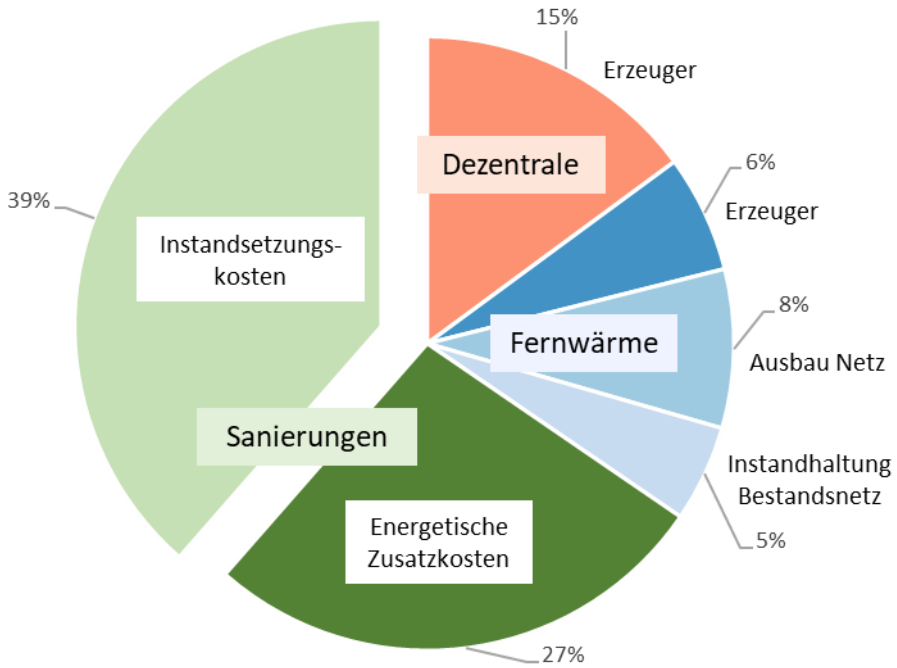


Abbildung 19: ***Verteilung der notwendigen langfristigen Investitionen*** *zur Umstellung der Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt a. M. (Quelle: eigene Berechnungen)*

Setzt man die notwendigen Investitionen ins Verhältnis zur Bruttogeschossfläche der Gebäude in Frankfurt am Main, so ergeben sich gesamt etwa 210 EUR/m² Investitionen. Im Vergleich mit aktuellen Kaufpreisen in der Stadt je nach Lage zwischen 3 500 und 6 000 EUR/m² BGF ist dieser Betrag der Investitionen für die Wärmewende mit 4-6% als relativ klein einzuschätzen. Im Durchschnitt sind pro Einwohner etwa 18 000 EUR an Investitionen für die Wärmewende zu tätigen.

e-think energy research GmbH, Argentinierstraße 18/10, 1040 Wien www.e-think.ac.at