

Konzeptstudie zur Vorbereitung der kommunalen Wärmeplanung in Frankfurt am Main

Anhang

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



Bei dem hier vorliegenden Dokument handelt es sich um den Anhang zum Hauptdokument der Studie. Im Hauptdokument sind die zentralen Ergebnisse und Handlungsempfehlungen dargestellt. Im hier vorliegenden Anhang finden sich die dabei eingesetzten Daten und Quellen, eine erweiterte Darstellung der Methodik sowie zusätzliche Ergebnisse, die im Hauptdokument nicht gezeigt wurden.

Inhaltsverzeichnis

1. Handlungsempfehlungen	13
2. Einleitung	15
2.1. Hintergrund und Aufgabenstellung	15
2.2. Vorgehensweise und Berichtsstruktur	16
3. Rahmendaten für die Untersuchung	19
3.1. Kosten für Sanierungsmaßnahmen	20
3.2. Energieträgerpreise, Zinssatz und Abschreibedauer	23
3.3. Bevölkerungsentwicklung	27
4. Bestandsanalyse	29
4.1. Gebäudebestand und Wärmebedarf in den Gebäuden	29
4.2. Derzeitige Struktur zur Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt am Main	32
4.3. Treibhausgasemissionen aus der Wärmeversorgung der Gebäude	34
5. Potenzialanalyse	36
5.1. Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden	37
5.2. Potenziale zur Deckung des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien und Abwärme	47
5.2.1 Solarthermie	48
5.2.2 Geothermie	51
5.2.3 Kläranlagen	57
5.2.4 Flusswasser	60
5.2.5 Rechenzentren	63
5.2.6 Abwärme aus Industrieanlagen	66
5.2.7 Müllverbrennung	67
5.2.8 Biomasseverbrennung	67
5.2.9 Potenzial saisonaler Wärmespeicher	68
6. Wärmewende-Szenarien für die Gebäude in Frankfurt a. M.	69
6.1. Szenarien zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden bis 2035 und 2045	69
6.2. Identifikation von Eignungsgebieten für Wärmenetze	73
6.3. Szenarien zur Deckung der Fernwärme aus klimaneutralen Quellen	84
6.4. Kosten von Wärmebereitstellungssystemen und Szenarien zur dezentralen Einzelversorgung	100

6.5. Szenarien zur Dekarbonisierung des Wärmebedarfs in den Gebäuden bis 2035 und darüber hinaus und mögliche CO₂-Reduktion..... 104

Literatur und Datenquellen..... 109

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die empfohlenen Maßnahmen zur Wärmewende der Gebäude in Frankfurt a. M. in den kommenden Jahren mit Angabe des voraussichtlichen Etatbedarfs (“Öffentlicher-Dienst.Info,” 2023)	13
Tabelle 2: Treffen zwischen e-think, der Stadt Frankfurt a. M. und der Mainova AG	18
Tabelle 3: Kostenannahmen zu Fenstertausch	21
Tabelle 4: Weitere Kostenkomponenten im Rahmen von thermischen Sanierungen und Instandsetzungsmaßnahmen	21
Tabelle 5: Kostenannahmen zu opaken Bauteilflächen	22
Tabelle 6: Mögliche Dämmstärken opaker Bauteilflächen in den durchgeführten Modellrechnungen	22
Tabelle 7: Rahmenannahmen zur Dekarbonisierung des gasförmigen Energieträgers (derzeit fossiles Erdgas).....	25
Tabelle 8: In der Untersuchung verwendete Energieträgerpreise	26
Tabelle 9: Endenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme im Gewerbe im Jahr 2019 in Frankfurt am Main (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (ifeu, 2020; ISI, 2021; RWI, 2021))	30
Tabelle 10: Nutzenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme im Gewerbe im Jahr 2019 in Frankfurt am Main (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (ifeu, 2020; ISI, 2021; RWI, 2021))	31
Tabelle 11: Berechnete Treibhausgasbilanz der Wärmeversorgung (in Tsd. Tonnen CO ₂ -Äquivalenten) von Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. für das Jahr 2019 (Quelle: (ifeu, 2020) und eigene Analysen)	35
Tabelle 12: Überblick über technische Leistungspotenziale nach Energiequelle sowie Kapitel mit näherer Beschreibung der Analyse (Quelle: eigene Analyse)	47
Tabelle 13: Parameter in der Berechnung des technischen Potenzials an Tiefengeothermie (Quelle: eigene Annahmen auf Basis von (Schulz et al., 2013) und (GeoT, 2022)	56
Tabelle 14: Überblick des technischen Potenzials zur Abwärmenutzung in den Kläranlagen in der Stadt Frankfurt a M. (Quelle: (ECO.S, 2018) und eigene Annahmen)	58

Tabelle 15: Überblick technisches Potenzial Flusswärmepumpen (Quelle: (ECO.S, 2018) und eigene Annahmen)	61
Tabelle 16: Technisches Wärmeleistungspotenzial aus Rechenzentrums-Abwärme in der Stadt Frankfurt a. M. (Quelle: Eigene Analyse)	64
Tabelle 17: Sanierungsraten für das BAU-Szenario	70
Tabelle 18: Sanierungsraten für das AMB-Szenario	70
Tabelle 19: Annahmen zum Anteil bereits sanierter Gebäude nach Bauperiode und Gebiet	71
Tabelle 20: Durchschnittliche jährliche Sanierungsraten in den berechneten Szenarien	71
Tabelle 21: Analysierte Varianten der Eingangsparameter in das Modell zur Analyse von Eignungsgebieten für Fernwärme in der Stadt Frankfurt a. M.	76
Tabelle 22: Modellparameter für die Identifikation von Fernwärme-Potenzialgebieten	76
Tabelle 23: Wärmebedarfe in GWh/a in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung nach Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme (excl. Verteilverluste)	86
Tabelle 24: Bezeichnung und Logik der drei Portfolio-Varianten in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung	89
Tabelle 25: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2035 – Dampfnetz	90
Tabelle 26: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2035 – Heiz-/Warmwassernetz	91
Tabelle 27: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2045 – Dampfnetz	92
Tabelle 28: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2045 – Heiz-/Warmwassernetz	93
Tabelle 29: In den Modellrechnungen verwendete Effizienzen, Investitionskosten, O&M Kosten und Lebensdauern von Anlagen zur Bereitstellung von Fernwärme	95
Tabelle 30: In den Modellrechnungen verwendete Parameter zur Temperatur-Sensitivität von Wärmepumpen	96

Tabelle 31: In den Modellrechnungen verwendete Effizienzen, Investitionskosten, O&M Kosten und Lebensdauern von Speichern im Fernwärmesystem.....	96
Tabelle 32: Techno-ökonomische Parameter zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von dezentralen Wärme-erzeugungsanlagen	102
Tabelle 33: Anteile der verfügbaren Heizungssysteme getrennt für kleine Wohngebäude sowie große Wohngebäude und Nichtwohngebäude, so wie sie in den beiden Szenarien „Stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“ in den Jahren 2035 und 2045 verwendet wurden	102
Tabelle 34: Kombination von gerechneten Szenarien und Annahmen zur Berechnung und Darstellung der CO ₂ -Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude der Stadt Frankfurt a. M.....	105
Tabelle 35: Emissionsfaktoren zur Berechnung der CO ₂ -Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude der Stadt Frankfurt a. M.	106
Tabelle 36: Berechnete CO ₂ -Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in unterschiedlichen Szenarien in den Jahren 2035 und 2045 unter den beschriebenen Rahmenbedingungen (Quelle: eigene Berechnungen)	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die Methodik zur Erarbeitung von Szenarien zur Wärmewende für die Gebäude in Frankfurt a. M. (Quelle: eigene Darstellung).....	17
Abbildung 2: Bevölkerungsentwicklung in der Stadt Frankfurt a. M. nach Stadtteilen (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (Stadt Frankfurt a. M., 2015))	28
Abbildung 3: Vorhandene Netzgebiete der Mainova AG – Status 2017 (Quelle: (Mainova, 2020a))	33
Abbildung 4: Berechnete Treibhausgasbilanz der Wärmeversorgung (in Tsd. Tonnen CO ₂ -Äquivalenten) von Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. für das Jahr 2019 (Quelle: (ifeu, 2020) und eigene Analysen)	35
Abbildung 5: Schema des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“	39
Abbildung 6: Sensitivität der annuisierten Sanierungskosten pro Einsparung auf die gewählten Parameter – Nutzenergiebedarf (NEB), Raumwärme vs. Raumwärme und Warmwasser, volkswirtschaftlich vs. Privatwirtschaftlich (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)	41
Abbildung 7: Veränderung der U-Werte verschiedener Komponenten der Aussenhülle sowie des Nutzenergiebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in den verschiedenen stadtweiten langfristigen Einsparungsszenarien für unterschiedliche Bauperioden (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)	42
Abbildung 8: Erzielte Einsparungen im Heizwärmebedarf (HWB – inkl. Nutzerverhalten) bei den unterschiedlichen Sanierungspaketen in unterschiedlichen Gebäudearchetypen – Zwischenergebnis des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“ (Quelle: eigene Berechnungen)	44
Abbildung 9: Investitionskosten in Instandsetzung und in die unterschiedlichen Sanierungspakete in unterschiedlichen Gebäudearchetypen – Zwischenergebnis des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“ (Quelle: eigene Berechnungen)	45
Abbildung 10: Veränderung des HWB (inkl. Nutzerverhalten) gegenüber dem Ausgangszustand über den gesamten Gebäudebestand im ausgewählten langfristigen Zielszenario (stadtweit 50% Einsparung im HWB) (Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung).....	46
Abbildung 11: Freiflächen Solarthermie Potenzial der Stadt Frankfurt a. M.	49

Abbildung 12: Verortung möglicher Potenziale zur Nutzung oberflächennaher Geothermie (Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung)	53
Abbildung 13: Tiefengeothermie Potentialflächen (Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung).....	55
Abbildung 14: Standorte der Kläranlagen in Frankfurt a. M. in Relation zu bestehenden Netzgebieten und Netzpotenzialgebieten	57
Abbildung 15: Stündlicher Temperaturverlauf des Main und Darstellung des nutzbaren, teilweise nutzbaren und nicht nutzbaren Temperaturbereichs (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (GDB, 2020)).....	61
Abbildung 16: Verortung möglicher Anlagen zur Nutzung der Wärme des Flusswassers aus Main und Nidda (Quelle: eigene Darstellung)	62
Abbildung 17: Verortung bestehender und geplanter Rechenzentren-Cluster im Stadtgebiet von Frankfurt a. M. zusammen mit vorhandenen Netzgebieten und Netz-Potenzialgebieten (Quelle: eigene Darstellung)	65
Abbildung 18: Verteilung des Wärmebedarfs und der Investitionskosten in Sanierungsmaßnahmen (Gesamtkosten bzw. energetische Zusatzkosten) auf die Gebiete der Stadt für die drei berechneten Szenarien (2035 BAU, 2035 AMB und 2045 AMB).....	72
Abbildung 19: Investitionskosten in den Bau von Fernwärmeleitungen in Frankfurt (Quelle: (Mainova, 2023), (GITA, 2023), (Fay et al., 2020))	75
Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse mit dem Fernwärme-Ausbau-Modell – Netzausbaukosten niedrig (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)	79
Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse mit dem Fernwärme-Ausbaumodell – Netzausbaukosten Mainova (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)	80
Abbildung 22: Berechnete Fernwärmegebiete bei maximal 36 EUR/MWh \emptyset Wärmeverteilungskosten in der Stadt Frankfurt a. M. für unterschiedliche Anschlussraten in 2045 (70% vs. 90%) und unterschiedliche Kostenfunktionen zu den Netzausbaukosten (Niedrig vs. Mainova)	81
Abbildung 23: Zusammensetzung der Wärmeverteilungskosten in den identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten in 4 ausgewählten Varianten der Obergrenze der \emptyset WVK (34, 36, 38, 40 EUR/MWh) (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)	82

Abbildung 24: Historisch beobachteter durchschnittlicher jährlicher Fernwärme-Trassenausbau in unterschiedlichen Städten in Österreich und Deutschland (Quelle: eigene Darstellung mit Daten aus (Böhmer and Gössl, 2009), (enercity, 2013)).....	83
Abbildung 25: Berechnetes Lastprofil für das Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2035 für das Bedarfsszenario „Sehr hoch“	88
Abbildung 26: Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolien im Heiz-/Warmwassernetz bei mittlerem bzw. hohem Ausbau der Fernwärme im Jahr 2045 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen).....	97
Abbildung 27: 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)	98
Abbildung 28: Last- und Aufbringungsprofil im Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2045, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, hoher Ausbau der Fernwärme (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)	98
Abbildung 29: Last- und Aufbringungsprofil im Dampfnetz im Jahr 2045, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, Bedarfsreduktion im Dampfnetz 24% gegenüber 2019 (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)	99
Abbildung 30: Jahresdauerlinie und Auslegung einer dezentralen Hybridheizanlagen mit Wärmepumpe und Gaskessel zur Spitzenlastdeckung.	101

Abkürzungsverzeichnis

AGFW	Arbeitsgemeinschaft Fernwärme: Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ATKIS	Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem
AMB	Ambitioniert – Szenario im Rahmen der Potenzialuntersuchung zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden
BAU	Business as usual – – Szenario im Rahmen der Potenzialuntersuchung zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
BEW	Bundesförderung effiziente Wärmenetze
BGF	Bruttogeschossfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BKI	Baukostenindex
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Coefficient of Performance = JAZ ... Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe
DLM	Digitale Landschaftsmodelle
EBA	Ersatzbrennstoffanlage
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFH	Einfamilienhaus
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EZK	Energetische Zusatzkosten
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GIS	Geoinformationssystem
GWh	Gigawattstunden
HQS	Heilquellenschutzzone
HKW	Heizkraftwerk
HW	Heizwerk
HWB	Heizwärmebedarf
ISK	Instandsetzungskosten
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraftwärmekopplung
LNG	Liquified Natural Gas

MFH	Mehrfamilienhaus
MHKW	Müllheizkraftwerk
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
NEB	Nutzenergiebedarf
NWG	Nichtwohngebäude
PrWi	Privatwirtschaftliche Perspektive
PTES	Pit Thermal Energy Storage
PtG	Power-to-Gas: synthetisches erneuerbares Gas
PtH	Power-to-Heat
RL	Rücklauf
RW	Raumwärme
THG	Treibhausgasemissionen
VL	Vorlauf
VLH	Volllaststunden
VoWi	Volkswirtschaftliche Perspektive
VZÄ	Vollzeitäquivalent
WG	Wohngebäude
WP	Wärmepumpe
WVK	Wärmeverteilungskosten
WW	Warmwasser

1. Handlungsempfehlungen

Zentrales Ergebnis der Analysen sind Schlussfolgerungen sowie konkrete Handlungsempfehlungen, um die Wärmewende für die Gebäude in Frankfurt am Main voranzutreiben. Im Hauptdokument der Studie findet sich eine Beschreibung der Schlussfolgerungen und der Handlungsempfehlungen in zwei eigenständigen Kapiteln. Im hier vorliegenden Anhang werden die identifizierten Handlungsempfehlungen in Form einer Tabelle zusammengefasst, in der auch der voraussichtliche Personalbedarf in den kommenden Jahren und die daraus abgeleiteten voraussichtlichen Personalkosten auf Seiten der Stadt ausgewiesen ist, sowie auch die Instanzen, die für die Umsetzung der Maßnahmen jeweils zuständig sind. Die angegebenen Kosten können dabei teilweise über verschiedene Bundes- oder Landesförderungen gedeckt werden, wie beispielsweise die Erstellung von energetischen Quartierskonzepten über die KfW432 Förderschiene.

Tabelle 1: Übersicht über die empfohlenen Maßnahmen zur Wärmewende der Gebäude in Frankfurt a. M. in den kommenden Jahren mit Angabe des voraussichtlichen Etatbedarfs ("Öffentlicher-Dienst.Info," 2023)

Nr.	Name der Maßnahme	Zentrale Umsetzungsinstanz	Voraussichtlicher Etatbedarf auf Seiten der Stadt	
			Personal (VZÄ)	Personalkosten (EUR / Jahr)
Forcierung von Sanierungsmaßnahmen				
S1	Besitzer von Gebäuden mit hohen Einsparpotenzialen und geringen Barrieren gezielt ansprechen	Stadt	0,5	39 500
S2	Systematische Erstellung von energetischen Quartierskonzepten für alle Quartiere in der Stadt	Stadt	8	664 000
S3	Angebot zur Energieberatung ausbauen	Stadt	3	237 000
Forcierung des Fernwärme-Ausbaus				
FW1	Eine oder mehrere Arbeitsgruppe(n) Fernwärme gründen	Stadt	0,25	23 750
FW2	Städtische Liegenschaften an die (dekarbonisierte) Fernwärme anschließen	Stadt gemeinsam mit EVU	2	47 500
FW3	Planungsrechtliche Grundlagen zum Ausbau und der Verdichtung der Fernwärme prüfen und umsetzen	Stadt	1	174 000
Forcierung der Nutzung von Abwärme und Erneuerbaren Energien				

Nr.	Name der Maßnahme	Zentrale Umsetzungsinstanz	Voraussichtlicher Etatbedarf auf Seiten der Stadt	
			Personal (VZÄ)	Personalkosten (EUR / Jahr)
AE1	Machbarkeitsstudien zur Nutzung von Abwärme (Rechenzentren, Flusswasser, Abwasser) sowie erneuerbarer Energie (Geothermie) für alle aussichtsreichen Standorte in der Stadt zusammen mit einem Konzept für einen Zusammenschluss aller Gebiete mittels einer Ringleitung erstellen	Stadt gemeinsam mit EVU	1	47 500
AE2	Ein Konzept zur saisonalen Speicherung von Erneuerbaren Energien und Abwärme erstellen	Stadt gemeinsam mit EVU	0,5	23 750
AE3	Eine Strategie zur Transformation der Gasnetz-Infrastruktur erstellen	Stadt gemeinsam mit EVU	1	23 750
AE4	Aufbau eines Erdwärmepotenzial-Katasters	Stadt	1	95 000
Aufbau von Kapazitäten				
KA1	Einen Steuerungskreis Wärmewende mit Entscheidungsträgern in der Stadt gründen	Stadt	0,25	23 750
KA2	Ein automatisiertes Datensystem für Planung und Monitoring der Dekarbonisierung aufsetzen	Stadt gemeinsam mit EVU	1	95 000
KA3	Weiterbildungsangebote in für die Wärmewende benötigten Gewerken verstärken	Stadt gemeinsam mit Wirtschaftskammer und Bundesland	1,5	47 500

2. Einleitung

2.1. Hintergrund und Aufgabenstellung

In vielen Ländern und Städten Europas wurden und werden die Ziele zur Erreichung eines klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystems immer ambitionierter definiert, CO₂-Neutralität soll nicht nur grundsätzlich und langfristig erreicht werden, sondern möglichst rasch. Die Stadt Frankfurt am Main hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2035 auf ihrem Gebiet klimaneutral zu werden (Beschluss der Stadtverordnetenversammlung §1650 vom 12.05.2022, „Klimaneutrales Frankfurt 2035“: Grundsatzbeschlüsse).

Zentral für die Erreichung eines CO₂-Neutralitätsziels ist die Transformation des Gebäudesektors: der Energiebedarf in Gebäuden, vorwiegend für Raumwärme und Warmwasser, muss reduziert werden und der verbleibende Energiebedarf muss aus CO₂-neutralen Quellen gedeckt werden.

Im EU Horizon 2020 Forschungsprojekt Hotmaps¹ wurden bereits Szenarien des Wärmebedarfs in den Frankfurter Gebäuden sowie deren CO₂-neutraler Versorgung erarbeitet². Diese bestehenden Analysen werden im gegenständlichen Vorhaben vertieft und zu einer kommunalen Wärmeplanung im Sinne des Hessischen Energiegesetzes ausgebaut. Im November 2022 wurde die Novelle des Hessischen Energiegesetzes im Landtag beschlossen. Kommunen über 20 000 Einwohner sind ab dem 29.11.2023 damit verpflichtet, eine regelmäßige Wärmeplanung durchzuführen (§13). Diese beinhaltet eine systematische Bestandsanalyse, eine Potenzialanalyse innerhalb und außerhalb der Gebäude sowie ein klimaneutrales Szenario für das Jahr 2045 mit Zwischenzielen 2030. (Land Hessen, 2022)

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

¹ <https://www.hotmaps-project.eu>

² <https://www.hotmaps-project.eu/hotmaps-pilot-cities-hc-strategies-are-available/>

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.

Die Ergebnisse der Studie sollen als ein Element in der kommunalen Wärmeplanung eingesetzt werden, um Handlungsstrategien und konkrete Maßnahmen für die kommenden Jahre in Diskussion mit zentralen Stakeholdern zu identifizieren. Zum anderen sollen die Ergebnisse die Erfüllung der Verpflichtung zur kommunalen Wärmeplanung in Hessen ab November 2023 ermöglichen.

2.2.Vorgehensweise und Berichtsstruktur

Im gegenständlichen Vorhaben werden die unterschiedlichen Teile des Wärmesystems zunächst einzeln analysiert und eine Reihe an Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse der Analyse der Teilbereiche werden dann zu gesamtstädtischen Szenarien zusammengeführt. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Analysebereiche sowie deren Vernetzung in der Untersuchung. Ein Überblick über die Methodik erfolgt im nächsten Absatz, die jeweils angewandte Methodik wird in den einzelnen Kapiteln dann genauer dargestellt.

In Abbildung 1 ist ersichtlich, dass zunächst der existierende Gebäudebestand analysiert (siehe Kapitel 4) sowie Kosten und Potenziale zur langfristigen Senkung des Wärmebedarfs mit dem Modell „Invert – Effizienzpotenziale“ berechnet werden (siehe Kapitel 6). Diese werden dann in geografisch aufgelöste Szenarien zur Senkung des Wärmebedarfs bis 2035 und 2045 überführt (siehe Kapitel 6.1). Darauf aufbauend erfolgt die Analyse von Kosten und Potenzialen zum Ausbau von Fernwärme in unterschiedlichen Regionen der Stadt (siehe Kapitel 6.2). Als nächsten Schritt werden die Potenziale zur Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien und Abwärme analysiert. Hierbei werden die einzelnen Optionen nach der Reihe analysiert und daraus mögliche Portfolien für die Fernwärme abgeleitet (siehe Kapitel 5.2 und 6.3). Die Angebotspotenziale zusammen mit den Bedarfsszenarien sind daran anschließend zentrale Inputs für die Analyse verschiedener Fernwärme-Aufbringungs-Varianten für 2035 und 2045, in welchem auch veränderte Lastprofile durch die Einsparungen im Wärmebedarf für Raumwärme berücksichtigt werden (siehe Kapitel 6.3). Parallel erfolgt die Analyse von Kosten und Potenzialen dezentraler Bereitstellungsoptionen (siehe Kapitel 6.4). In einem letzten Schritt werden ausgewählte Szenarien aus allen Teilbereichen zu gesamtstädtischen Szenarien zusammengeführt (siehe Kapitel 6.5).

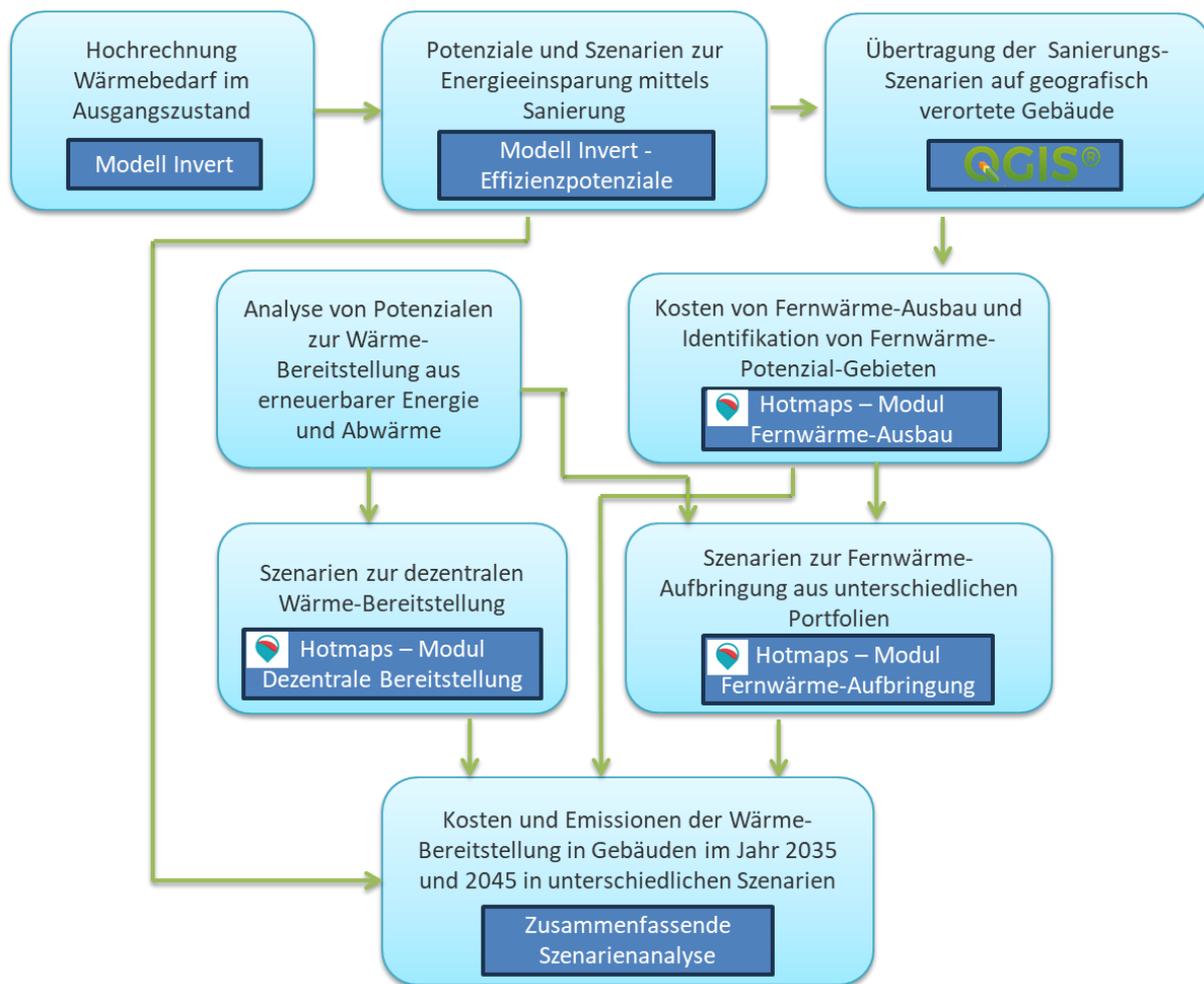


Abbildung 1: Überblick über die Methodik zur Erarbeitung von Szenarien zur Wärmewende für die Gebäude in Frankfurt a. M. (Quelle: eigene Darstellung)

Die angewandte Methodik basiert grundsätzlich auf der Methodik zur kommunalen Wärmeplanung, welche im Rahmen des EU Horizon 2020 Projektes Hotmaps³ entwickelt wurde und für Frankfurt am Main im damaligen Projekt in einer ersten Analyse angewandt wurde. Alle eingesetzten Teilmodelle wurden seit dem Abschluss des Hotmaps Projekts weiterentwickelt und werden in der aktuellen Variante eingesetzt. Darüber hinaus erfolgt in dem gegenständlichen Vorhaben eine Erweiterung und Vertiefung der Datenbasis, des Detaillierungsgrades der Analysen in allen Bereichen, eine vertiefte Analyse und Interpretation der Ergebnisse, sowie ein intensiver Austausch mit der Mainova AG als einem der zentralen Stakeholder in der Wärmetransformation der Stadt Frankfurt am Main. Ein Überblick über die regelmäßigen virtuellen Treffen zwischen e-think, der Stadt Frankfurt am Main und der Mainova AG zur Diskussion der Annahmen, Modelle und Berechnungen ist in Tabelle 2 dargestellt.

³ <https://www.hotmaps-project.eu/>

Tabelle 2: Treffen zwischen e-think, der Stadt Frankfurt a. M. und der Mainova AG

Datum des Treffens	Kerninhalte der Präsentationen und Diskussionen
24.03.2022	Kick-Off, Vorstellung des Projekts (e-think) Vorstellung aktueller Aktivitäten zur Wärmeplanung (Mainova AG)
10.05.2022	Vorstellung und Diskussion der Berechnungen zu Potenzialen der Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt (e-think) Vorstellung Wärmeplanungsstrategie (Mainova AG)
30.06.2022	Vorstellung des Energie-Entwicklungs-Plans und des dahinterliegenden Modells durch die Mainova AG Diskussion des weiteren Austauschs
07.09.2022	Darstellung und Diskussion der Struktur des Projekt-Berichts, der berechneten Szenarien der Energiebedarfsentwicklung bis 2035 und 2045 und der Annahmen und Methodik zur Berechnung des potenziellen Fernwärme-Netz-Ausbaus (e-think) Status Trafo-Plan (Mainova AG)
26.09.2022	Definition des Inhalts einer gemeinsamen Präsentation zwischen Stadt Frankfurt a. M. und Mainova AG am 13.10.2022 im Rahmen der Veranstaltung „Zukunftsstrategie Fernwärme“ in Frankfurt a. M..
10.10.2022	Vorstellung und Diskussion der Annahmen, Methodik und Ergebnisse zu Fernwärme-Potenzial-Gebieten (e-think)
16.12.2022	Vorstellung der Überarbeitung der Berechnungen zu Fernwärme-Potenzial-Gebieten, möglicher Leistungsbedarf in der Fernwärme, und Methodik, Daten und Ergebnisse der Potenziale erneuerbare Energie und Abwärme (e-think)
20.01.2023	Vorstellung und Diskussion der aktuellen Fernwärme-Netzausbau-Kosten und derzeitiger sowie potenzielle als möglich eingestufte Netzausbaugeschwindigkeit (Mainova AG)
27.01.2023	Rückmeldungen zu den Folien e-think vom 16.12.2022 (Mainova AG) Definition der Interaktion für die finale Phase des Projekts
07.02.2023	Diskussion der Annahmen und Methodik zur Berechnung des zukünftigen Kraftwerksparks in der Fernwärme inkl. Potenziale aus Rechenzentren und saisonalen Speichern
24.02.2023	Abstimmung zum Netzausbau; Vorstellung der Gebiete, die auf Basis von Netz, Erzeugung und Gebäudebestand aus Sicht der Mainova AG sinnvoll auszubauen und zu erschließen wären
27.09.2023	Diskussion der (Stakeholder-)Rückmeldungen auf die Entwurfsskizzen von Ergebnisdokument und Anhang

Die Struktur des vorliegenden Anhangs sowie des dazugehörigen Hauptdokuments der Studie orientiert sich dabei einerseits am 2022 geltenden gesetzlichen Rahmen zur kommunalen Wärmeplanung im Bundesland Baden-Württemberg. Dieser ist im Klimaschutzgesetz des Landes in § 7c und § 7d implementiert (KSG BW, 2022). Zum anderen am 2022 adaptierten Hessischen Energiegesetz, in welchem unter § 13 die künftig verpflichtende Wärmeplanung geregelt ist. In beiden Gesetzen soll eine systematische Bestandsanalyse durchgeführt werden (Kapitel 4), eine Potenzialanalyse von Wärmeeinsparungen sowie Optionen von erneuerbaren Energien und Abwärme (Kapitel 5), und eine Darstellung von klimaneutralen Zielszenarien (Kapitel 6). Daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen werden dann in Kapitel 1 dargestellt.

3. Rahmendaten für die Untersuchung

In diesem Kapitel werden zentrale Rahmendaten für die Analysen dargestellt. Dabei handelt es sich um die Kosten für Sanierungsmaßnahmen, das Kostenniveau für Wärmebereitstellungssysteme und Annahmen zu Energieträgerpreisen sowie zur Bevölkerungsentwicklung. Zentrale Charakteristika hinsichtlich der Rahmenbedingungen sind dabei die folgenden:

- **Alle Kosten und Preise beziehen sich auf den Zeitpunkt Ende 2022**
- Es werden zwei Preis-Entwicklungsszenarien unterschieden
- Es wird ein Bevölkerungs-Entwicklungsszenario hinterlegt

Die finalen Modellrechnungen und damit auch sämtliche Annahmen zu ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen erfolgten Ende 2022 und Anfang 2023. Jüngere Entwicklungen werden daher hier nicht abgebildet.

3.1.Kosten für Sanierungsmaßnahmen

Überblick Methodik:

- Kostendaten für einzelne Sanierungsmaßnahmen (Dämmung Außenwand, Kellerdecke, Dach oder oberste Geschossdecke, Fenstertausch, Einbau einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung) in unterschiedlichen Intensitäten (z.B. Dämmstärken oder Fensterqualität) werden aus Analysen des Instituts f. Bauen und Wohnen entnommen (Jahr 2020)
- Die Kostendaten für Sanierungsmaßnahmen werden dann mit der Entwicklung des Baukostenindex (BKI) der letzten Jahre auf 2022 umgerechnet
- Für jeden Gebäude-Archetyp wurden 10 kostenoptimale Maßnahmenbündel mit unterschiedlichen Energieeinsparanforderungen berechnet. Darin ist auch eine Modernisierungsvariante ohne eine thermische Verbesserung enthalten (siehe Beschreibung des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“ in Kapitel 5.1.
- Die errechneten Sanierungspakete müssen nicht den aktuellen Anforderungen an den erforderlichen Energiestandard, der im Rahmen von umfassenden Sanierungen zu erzielen ist, genügen. Darüber hinaus wird unterstellt, dass ein Teil der Bauteilflächen (je Einzelgebäude) keine thermische Verbesserung erfährt.
- Diese Annahmen dienen dazu, um die in der heutigen Praxis auftretenden Sanierungsbarrieren adäquat abzubilden. Damit wird berücksichtigt, dass ein bestimmter Teil an Gebäuden nicht unter den hier gewählten Kosten sanierbar ist, bzw. nicht einer umfänglichen Sanierung unterzogen wird.

Zentrale Datenquellen:

- Daten zu Sanierungsmaßnahmen aus (Koch et al., 2021)
- Entwicklung des Baukostenindex in den letzten Jahren aus (BKI, 2022)
- Entwicklung des Baupreisindex in den letzten Jahren aus (Statistische Bundesamt, 2023) und 2022 (DESTATIS, 2022)

Tabelle 3 bis Tabelle 6 zeigen die verwendeten Kostendaten zu Fenstertausch, opaken Bauteilflächen und weiteren Komponenten sowie die möglichen Dämmstärken, so wie sie in der Modellierung verwendet werden.

Tabelle 3: Kostenannahmen zu Fenstertausch

	Instandsetzungs-kosten ^{*,1}	Investitionskosten Fenstertausch mit thermischer Verbesserung (U-Werte) ¹				Anteil Bauteilfläche die thermisch verbessert wird ^{**}	Anteil der Instandsetzungs-kosten, die der thermischen Sanierung zugerechnet werden ^{***}
		1,7	1,3	0,95	0,65		
Wohngebäude (Kein Altbau)	251	359	379	427	475	90%	20%
Nicht-Wohngebäude (Kein Altbau)	200	285	308	367	424	80%	20%
Altbau (vor 1945)	327	467	492	555	1 190	80%	34%
* Ohne thermische Verbesserung							
** Wenn eine thermische Sanierung erfolgt							
*** z.B. durch vorzeitigen Ersatz der Komponenten							
¹ Vollkosten in EUR ₂₀₂₂							

Tabelle 4: Weitere Kostenkomponenten im Rahmen von thermischen Sanierungen und Instandsetzungsmaßnahmen

	Zusätzliche Kostenkomponenten ¹	
	Spezifische Kosten (f) pro m ² Wohnfläche [EUR/m ²]	Exponent (e)
Gerüst	12	0
Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (keine bestehende Anlage)	120	-0,1
Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (bestehende Anlage)	40	-0,1
Reduktion von Wärmebrücken	50	-0,1
¹ Vollkosten in EUR ₂₀₂₂ , die spezifischen Investitionskosten ergeben sich aus $f \cdot \text{Wohnfläche} \cdot e$ [EUR/m ²], die Kosten pro Gebäude durch $f \cdot \text{Wohnfläche} \cdot (1+e)$ [EUR/m ²],		

Tabelle 5: Kostenannahmen zu opaken Bauteilflächen

	Instandsetzungs-kosten ^{*,1}	Investitionskosten opake Bauteile mit thermischer Verbesserung (U-Werte) ¹		Anteil Bauteilfläche die thermisch verbessert wird ^{**}	Anteil der Instandsetzungs-kosten, die der thermischen Sanierung zugerechnet werden ^{***}
	Basiskosten pro m ² [EUR/m ²]	Basis-kosten pro m ² [EUR/m ²]	Kosten pro cm Dämmstärke und m ² [100 EUR/m ³]		
Steildach außen	181	190	3	75%	25%
Flachdach	158	174	0,7	75%	25%
Obere Geschossdecke (tw. begehbar)	181	181	1,3	75%	25%
Fassade	49	210	1,8	75%	25%
Kellerdecke	0	195	1,5	60%	100%
Dach, Altbau	217	228	3,6	65%	25%
Fassade, Altbau	64	125	3,5	65%	25%
Kellerdecke, Altbau	0	38	1,5	50%	100%

* Ohne thermische Verbesserung
 ** Wenn eine thermische Sanierung erfolgt
 *** z.B. durch vorzeitigen Ersatz der Komponenten
¹ Vollkosten in EUR₂₀₂₂

Tabelle 6: Mögliche Dämmstärken opaker Bauteilflächen in den durchgeführten Modellrechnungen

	Möglicher Bereich der Dämmstärken
Steildach außen	6-25 cm
Flachdach	6-20 cm
Obere Geschossdecke (tw. begehbar)	6-15 cm
Fassade	6-25 cm
Kellerdecke	6-10 cm
Dach, Altbau	6-15 cm
Fassade, Altbau	6-12 cm
Kellerdecke, Altbau	5-8 cm

3.2. Energieträgerpreise, Zinssatz und Abschreibdauer

Überblick Methodik:

- Großhandelspreise für Gas und Strom aus Studien entnommen
- Zwei Energiepreisszenarien: Hoch- und Niedrigpreisszenario
- Die meisten Kostenkomponenten des Strom- und Gaspreises (abgesehen vom Großhandelspreis) werden als konstant angenommen.
- Anstieg der Verteilnetzkosten im Hochpreisszenario für den gasförmigen Energieträger
- Dekarbonisierung des Gasnetzes durch Biomethan, Wasserstoff und Power-to-Methane

Zentrale Datenquellen:

- Daten zur möglichen Entwicklung des Großhandelsstrompreises aus dem Projekt EU-Horizon 2020 Projekt SET-Nav (Resch et al., 2019) und (Fraunhofer ISI, 2020)
- Strompreis auf Netzebene 7 (Haushaltsstrompreis) und Strombezugspreis von Großwärmepumpen aus (AGFW, 2020), (Strom-Report, 2022) und (Bundesnetzagentur, 2022)
- Gasgroßhandelspreise aus (Hummel et al., 2023)
- Sonstige Kostenkomponenten des Haushaltsgaspreises aus (Bundesnetzagentur, 2022)

Seit dem Angriffskrieg in der Ukraine erlebte Europa eine rapide Zunahme der Energieträgerpreise. Neben den massiven Anstiegen der Preise für Gas und Strom haben auch die Preise der anderen gehandelten Energieträger erheblich zugenommen. Dies führte in weiterer Folge zu einer allgemeinen Preissteigerung. Die Ursachen dieser Preissteigerungen liegen in den Entwicklungen einerseits auf einer Disruption der Versorgungsketten, welche durch die Covid-19 Pandemie verursacht wurde, sowie den Auswirkungen des Preisanstieges im Energiesektor auf nachgelagerte Sektoren wie die Produktion und den Handel. Über die letzten beiden Jahre wurde der Verbraucherpreisindex insgesamt um 11,20% gesteigert (DESTATIS, 2023). Im Bausektor waren die Preissteigerungsraten noch deutlicher spürbar (DESTATIS, 2022; Statistische Bundesamt, 2023).

Im Rahmen dieser Studie wird unterstellt, dass die Inflationsrate wieder auf ein historisch übliches Niveau sinkt. Die Kosten für Investitionen verbleiben aber langfristig auf dem Realpreisniveau von 2022. Damit verstehen wir die Kosten, wie sie vor der Covid-19 Pandemie vorgeherrscht haben, erhöht um die Inflationsrate der Jahre 2020 – 2022. Im Gegensatz dazu wird unterstellt, dass die Großhandels-Energiepreise für Strom und (fossiles) Gas mittelfristig wieder unter das Niveau von 2022 sinken werden.

Bei den Großhandelspreisen für Strom orientieren wir uns an den Szenarien "Directed Vision" für das Niedrigpreisszenario und "Diversification" für das Hochpreisszenario aus dem EU Horizon 2020 Projekt SET-Nav (Fraunhofer ISI, 2020; Resch et al., 2019). Weiter unterstellen wir, dass sich der Preis, den

Betreiber für in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) generierten Strom erzielen, wenn dieser in das Netz eingespeist wird, dem Großhandelspreis entspricht.

Für die Ermittlung des Strombezugspreises für Großwärmepumpen, die in der Bereitstellung von Fernwärme eingesetzt werden, werden zusätzliche Abgaben angesetzt. Diese wurden aus dem Praxisleitfaden Großwärmepumpe der AGFW (AGFW, 2020) entnommen. Die derzeit zu bezahlende EEG-Umlage wird nicht berücksichtigt, alle anderen Komponenten werden als konstant bis 2045 fortgeschrieben: Stromsteuer, KWK-Umlage, §17, §18 und §19 Umlagen sowie die Konzessionsabgabe. Die genannten Komponenten ergeben in Summe 31,7 EUR/MWh. Auch durchschnittliche Netznutzungsentgelte von 25 EUR/MWh als Mischpreis aus Leistungs- und Arbeitspreis werden aus dem AGFW-Leitfaden entnommen.

Für Haushalte und den Dienstleistungssektor (Netzebene 7) setzen sich die Strompreise aus mehreren Elementen zusammen: Großhandelspreis, Netzgebühren, Stromsteuer und zusätzliche Kosten für Vertrieb und Aufschlag (Bundesnetzagentur, 2022; Strom-Report, 2022). In unseren Annahmen unterstellen wir, dass die Umlagen und Steuern, die im Haushaltsstrombedarf enthalten sind, bis 2045 konstant bleiben. In den Szenarien unterstellen wir Netzkosten von 80 EUR/MWh, eine Stromsteuer in der Höhe von 20 EUR/MWh sowie einen Vertriebs- und Gewinnaufschlag von 45 EUR/MWh.

Unsere Annahmen zur Entwicklung des Großhandelspreises von Erdgas basieren auf den Energiepreisprognosen des ARIADNE-Forschungsprojekts (ARIADNE, 2022). Auch hier berücksichtigen wir zwei unterschiedliche Energiepreisentwicklungen. Dabei werden in der gegenständlichen Untersuchung zwei verschiedene Szenarien verwendet: zum einen das Szenario „Entspannung auf Vorkriegsniveau“, in dem sich die Preise wieder auf das Niveau vor dem Krieg in der Ukraine entspannen. Zum anderen wird das Szenario „Knappheit“ verwendet, in welchem der Energieträger Erdgas weiterhin knapp bleibt und damit die Preise weiterhin hoch. Erdgas im Großhandel kostet hierbei 26,4 bzw. 93,3 EUR/MWh im Jahr 2035 und 27,4 bzw. 99,7 EUR/MWh im Jahr 2045.

Um eine Dekarbonisierung des verwendeten gasförmigen Energieträgers zu erreichen, muss das derzeit verwendete Erdgas sukzessive durch einen anderen gasförmigen Energieträger ersetzt werden. Dazu sind aus heutiger Sicht die folgenden Optionen realistisch: Methan aus biogenen, erneuerbaren Quellen (Biomethan), Methansynthese aus Wasser und einer CO₂-Quelle über Strom (Power-to-Methane) oder die Verwendung von Wasserstoff (Hydrolyse), hergestellt aus Strom und eine damit einhergehende Umstellung der derzeitigen Erdgasnetze auf Wasserstoffnetze.

Im Rahmen dieser Studie unterstellen wir, basierend auf (Hummel et al., 2023), langfristig durchschnittliche Großhandelspreise für CO₂-neutrales Gas (im Nachfolgenden „grünes Gas“ genannt: H₂, Power-to-Methane, Biomethan) im Bereich von 78 und 94 EUR/MWh. Im Niedrigpreisszenario gehen wir von vorwiegend Wasserstoff, welcher in Europa⁴ unter günstigen Annahmen produziert werden kann, aus. Im Hochpreisszenario wird vorwiegend CO₂-neutrales Methan verwendet.

⁴ Hinsichtlich der Importmöglichkeiten für erneuerbaren Wasserstoff siehe (Kathan et al., 2022)

Für Haushalte und Dienstleistungen wird angenommen, dass bereits 2035 etwa 50% (energetisch) des eingesetzten Gases aus grünem Gas bereitgestellt werden. Dies repräsentiert eine (konservative) Umsetzung der 65% Erneuerbaren Energien Vorgabe bei Installation neuer Heizungssysteme, welche unter Umständen in den kommenden Jahren in Kraft treten wird (BMWK and BMWSB, 2022).

Wie auch für den Haushaltsstrompreis kommen auch beim Gaspreis für Endkunden zusätzliche Kostenkomponenten hinzu. Die Transportnetzkosten in der Höhe von 5 EUR/MWh, sowie die Energiesteuer von 5,5 EUR/MWh sind sowohl von Fernwärme-Erzeugern als auch von Endkunden zu bezahlen und werden als konstant angenommen. Für die sonstigen Kostenkomponenten des Endkundenpreises, wie Verteilnetzkosten, Entgelt für Messung, Konzessionsabgabe und Vertriebs- und Gewinnaufschlag werden die Werte lt. (Bundesnetzagentur, 2022) verwendet. Im Hochpreisszenario wird davon ausgegangen, dass die Verteilnetzkosten für Gas steigen werden, da zum einen weniger Gas nachgefragt wird und damit die Verteilnetzkosten auf weniger Absatz umgelegt werden muss, zum anderen durch den Umbau des Erdgasnetzes hin zu einem Wasserstoffnetz zusätzliche Investitionskosten für den Netzbetrieb anfallen werden. Abgesehen davon wird auch bei diesen Kostenkomponenten angenommen, dass diese bis 2045 konstant bleiben werden.

Tabelle 7 stellt die Annahmen zur Entwicklung des gasförmigen Energieträgers in qualitativer Weise dar, Tabelle 8 die konkret verwendeten Energiepreise.

Tabelle 7: Rahmenannahmen zur Dekarbonisierung des gasförmigen Energieträgers (derzeit fossiles Erdgas)

		Niedrige Preise	Hohe Preise
2035	Generell	Der Großhandelspreis von Erdgas pendelt sich auf dem Vorkriegsniveau ein	Der Großhandelspreis von Erdgas wird auf hohem Niveau bleiben, da Erdgas weiterhin knapp sein wird
	In Haushalten und Dienstleistungen	50% Erdgas, 50% grünes Gas (vorwiegend Biomethan und synthetisches Gas)	
	In der Fernwärme	85% Erdgas; 15% grünes Gas; Grünes Gas vorwiegend Wasserstoff	
2045	Generell	Wasserstoff wird günstig und in ausreichenden Mengen vorhanden sein (aus heimischer Produktion und via Pipeline aus Spanien und Nordafrika)	Günstiger Wasserstoff wird knapp sein und daher teurer, höhere Anteile an synthetischem Gas werden eingesetzt
	In Haushalten und Dienstleistungen	Vorwiegend Biomethan; kleinere Anteile an synthetischem Gas und Wasserstoff	
	In der Fernwärme	Vorwiegend Wasserstoff, auch teilweise synthetisches Gas	

Tabelle 8: In der Untersuchung verwendete Energieträgerpreise

Energieträgerpreise [EUR₂₀₂₂/MWh_{HU}]				
Zeitpunkt	2035		2045	
Preisszenario	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Einsatz in der Fernwärme				
Strom im Verkauf	75,7	103,5	75,6	112,6
Strom in Einkauf (Wärmepumpen)	139,7	177,2	139,6	186,3
Gas	49,4	141,0	78,4	143,7
Biomasse	30,9	41,0	32,0	39,3
Müll	-	-	-	-
Industrielle Abwärme	34,8	45,6	34,7	47,6
Einsatz in Haushalten und Dienstleistung				
Strom	237,0	292,0	236,8	301,1
Gas	122,4	228,3	111,2	195,0
Holzpellets	75,6	100,1	78,3	95,8

Des Weiteren werden für die Wirtschaftlichkeitsberechnung die folgenden Annahmen zur verwendet. Bei der Umlegung von Investitionen in jährliche Kosten (Annuitäten/Barwertmethode) wird ein Real-Zinssatz⁵ von 2 %/p.a. angesetzt. Als Abschreibungsdauer werden für Investitionen in Heizanlagen und Wärmeerzeuger (Fernwärme als auch Gebäudezentralheizungen) 20 Jahre angesetzt. Die Investitionen in Wärmenetzen werden auf 40 Jahre abgeschrieben.

⁵ Nominal-Zinssatz abzüglich Inflation

3.3. Bevölkerungsentwicklung

Überblick Methodik:

- Bevölkerungsentwicklung wird auf Ebene der Stadtteile berücksichtigt
- Durchschnittliche Wohnfläche je Einwohner bleibt konstant
- Zunahme der Bevölkerung führt zu einer Zunahme der Bruttogeschossflächen (BGF) in den jeweiligen Stadtbezirken auf Ebene 100 x 100m (Hektarelemente); Abnahme der Bevölkerung führt nicht zu einer Abnahme der BGF
- Anzahl der Nichtwohngebäude entwickelt sich mit der gleichen Wachstumsrate wie jene der Wohngebäude
- Maximaler Zubau in einzelnen Hektarelementen mit 25% definiert; es wird angenommen, dass bei einem höheren Zubau neue Flächen erschlossen werden müssen; dies ist in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt

Zentrale Datenquellen:

- Stand der Bevölkerung nach Stadtteilen aus dem Melderegister (Stadt Frankfurt a. M., 2022a)
- Bevölkerungsprognose auf Ebene der Stadtteile aus (Stadt Frankfurt a. M., 2015)

Die Gesamtbevölkerung der Stadt Frankfurt am Main im Jahr 2020 betrug 758 847 Personen, welche in 412 046 Haushalten lebten. Die Entwicklung der Bevölkerung in den einzelnen Stadtteilen zwischen 2020 und 2045, so wie sie in der Modellierung verwendet wurde, ist in der folgenden Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass der Bevölkerungszuwachs in den verschiedenen Stadtteilen durchaus unterschiedlich prognostiziert wird.

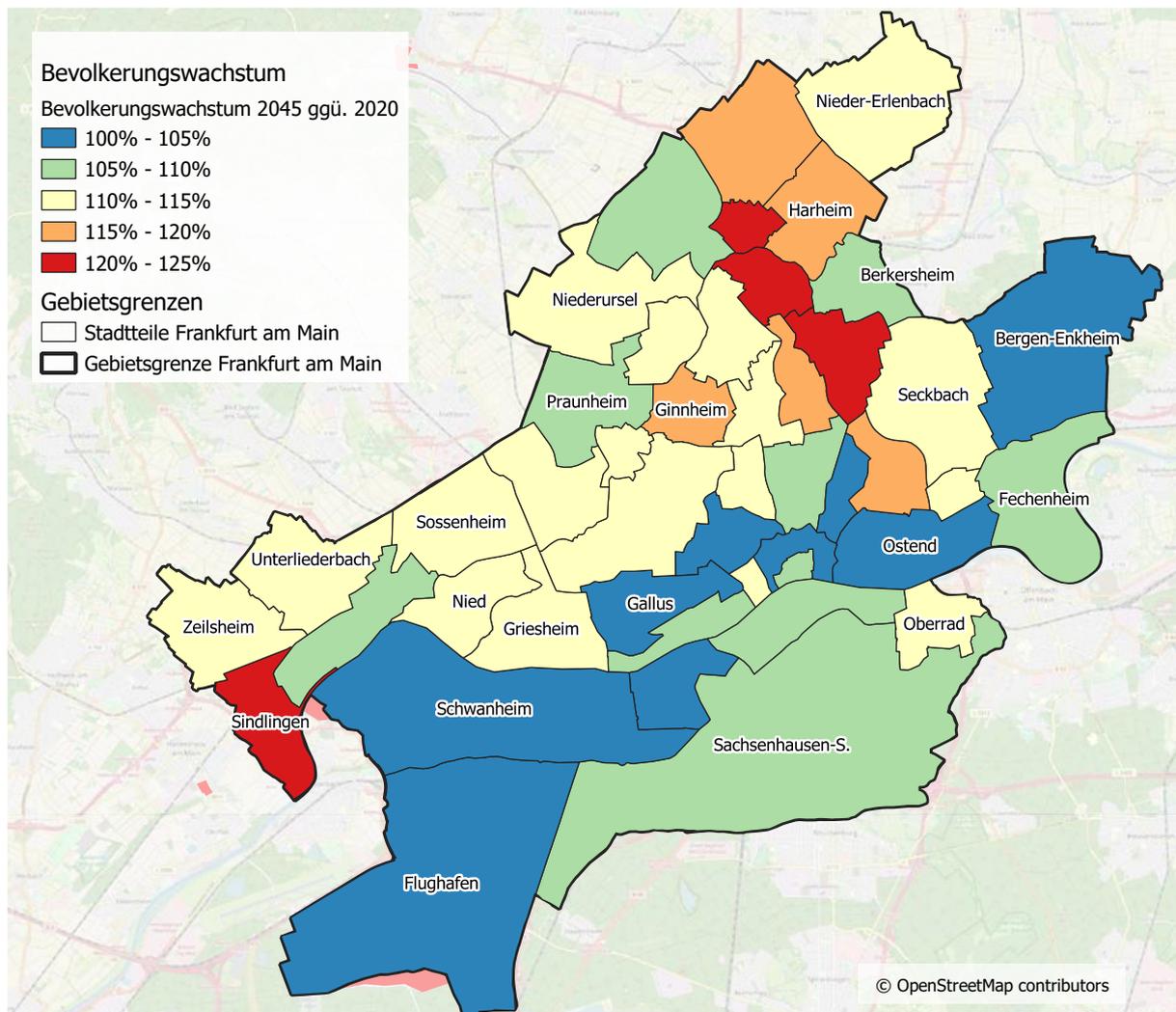


Abbildung 2: Bevölkerungsentwicklung in der Stadt Frankfurt a. M. nach Stadtteilen (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (Stadt Frankfurt a. M., 2015))

4. Bestandsanalyse

4.1. Gebäudebestand und Wärmebedarf in den Gebäuden

Überblick Methodik:

- Für die Berechnungen wird das Modell „Invert – Effizienzpotentiale“ eingesetzt (siehe Beschreibung in Kapitel 5.1).
- Verschiedene Versionen der städtischen Gebäudedatenbank (aus den Jahren 2015 und 2022) werden zusammengeführt (in der Version von 2015 sind detailliertere Daten zu Wohngebäuden enthalten).
- Da in der städtischen Gebäudedatenbank keine Informationen zum Gebäudealter vorliegen, wird ein Datensatz zu Bauperioden nach Adressen vom Anbieter Infas360 zugekauft und mit dem städtischen Gebäudedatensatz zusammengeführt.
- Die Gebäude der Stadt werden auf Basis der Nutzungsart und der Bauperiode in 63 archetypische Gebäude eingeteilt.
- Daten zum Sanierungszustand der Gebäude sind nicht vorhanden. Daher wird ein gewichteter Durchschnitt der in Deutschland typischen Sanierungszustände je Gebäudearchetyp verwendet.
- Die für die weiteren Berechnungen notwendigen bauphysikalischen Daten sowie Daten zum Nutzerverhalten werden aus der Invert – Datenbank zum deutschen Gebäudebestand entsprechend den gewählten Gebäudearchetypen zugeordnet.
- Mit dem Modell „Invert – Effizienzpotentiale“ wird dann der Nutzenergiebedarf / Heizwärmebedarf in unterschiedlichen Varianten berechnet (a) nach Norm, b) inkl. Nutzerverhalten.) Im Bericht wird Variante b dargestellt.
- Ein Vergleich der berechneten Energiebedarfe mit statistischen Daten zum Energiebedarf nach WG und NWG aus der Energiebilanz zeigt die Abweichungen / Güte der Übereinstimmung zwischen Bottom-up Berechnung und Top-down Werten

Zentrale Datenquellen:

- Städtische Gebäudedatenbank aus dem Jahr 2015 sowie Stadtgrundkarte digitale Gebäudedaten, Adressdaten zum Stadtgebiet Frankfurt a. M. (SVA Ffm, 2022)
- Daten zum Baualter der Gebäude nach Adressen von Infas 360
- Klimadaten der Stadt Frankfurt a. M. (DWD, 2022)
- Thermische Eigenschaften der Gebäude sowie Daten zu Nutzerverhalten ((Invert, 2022; Cischinsky and Diefenbach, 2018))
- Daten zur Energie- und Treibhausgasbilanz der Stadt (ifeu, 2020) und (ifeu, 2021)
- Daten zur Ableitung der Nutzungskategorien in der Energiebilanz aus (ISI, 2021), (Schloman et al., 2015) und (RWI, 2021)

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Tabelle:** Übersicht über den Gebäudebestand der Stadt Frankfurt a. M. und den hochgerechneten Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Tabelle:** Endenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme im Gewerbe im Jahr 2019 in Frankfurt am Main (Tabelle 9)
- **Tabelle:** Nutzenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme im Gewerbe im Jahr 2019 in Frankfurt am Main (Tabelle 10)

Tabelle 9: Endenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme im Gewerbe im Jahr 2019 in Frankfurt am Main (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (ifeu, 2020; ISI, 2021; RWI, 2021))

Sektor	Nutzungs-kategorie	Endenergiebedarf [GWh/a]							Σ
		Erdgas	Fern-wärme	Fern-dampf	Heizöl EL	Kohle	Sons-tiges	Strom	
Private Haus-halte	Raum-wärme	2 210	303	0	394	29	30	55	3 022
	Warm-wasser	598	32	0	72	0	30	106	839
Gewerbe	Raum-wärme	1353	168	633	56	0	118	154	2 481
	Warm-wasser	95	35	133	7	0	18	151	440
	Prozess-wärme	202	80	300	8	0	23	182	794
Summe		4 459	618	1 066	537	29	219	648	7 576

Tabelle 10: Nutzenergiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme im Gewerbe im Jahr 2019 in Frankfurt am Main (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (ifeu, 2020; ISI, 2021; RWI, 2021))

Sektor	Nutzungs-kategorie	Nutzenergiebedarf [GWh/a]							Σ
		Erdgas	Fern-wärme	Fern-dampf	Heizöl EL	Kohle	Sonstiges	Strom	
Private Haus-halte	Raum-wärme	1 879	275	0	315	18	30	55	2 572
	Warm-wasser	509	29	0	58	0	30	106	732
Gewerbe	Raum-wärme	1 150	153	575	45	0	118	154	2 194
	Warm-wasser	81	32	121	6	0	18	151	409
	Prozess-wärme	172	72	272	6	0	23	182	727
Summe		3 790	562	969	430	18	219	648	6 635

4.2. Derzeitige Struktur zur Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt am Main

Überblick Methodik:

- Basis ist die Energiebilanz der Stadt Frankfurt a. M. aus dem Jahr 2019; Abschätzung Energieträgereinsatz für die Wärmeversorgung der Gebäude siehe vorhergehendes Kapitel
- Für die wichtigen Versorgungsstrukturen Fernwärme und Gas werden zentrale Daten aus den Geschäftsberichten und Kraftwerksbroschüren der Mainova AG dargestellt

Zentrale Datenquellen:

- Energiebilanz der Stadt aus dem Jahr 2019 (ifeu, 2020)
- Geschäftsberichten und Kraftwerksbroschüren der Mainova AG ((Mainova, 2018, 2022a))

Fernwärme und Stromerzeugung haben in Frankfurt am Main eine lange Tradition. Nicht nur für die Industrie, die schon immer ein eigenes Fernwärmenetz betrieben hat, sondern auch für die Stadt. Bereits 1894 begannen die Stadtwerke mit der Erzeugung von Wärme und Strom. Der erste Kunde war ein Krankenhaus in Sachsenhausen. Heute betreibt die Mainova AG ein Fernwärmenetz mit ca. 308 km Rohrleitungen (Stand 2020, Gesamtlänge inkl. Hausanschlussleitungen) und einer Produktionskapazität von 430 MW elektrisch und 1 055 MW thermisch. Die Gesamtmenge der gelieferten Fernwärme (Dampf und Heißwasser) beträgt ca. 2 TWh/a.

Infraserv produziert Dampf und Strom für das Industriegebiet im Westen Frankfurts, den Industriepark Höchst. Die gesamte Produktionskapazität beträgt ca. 270 MW elektrisch und 1 400 MW thermisch (Wilhelm, 2014). Im Jahr 2022 sollte die elektrische Leistung auf 478 MW erhöht werden. Dann wird das Unternehmen die Energieerzeugung aus Kohle einstellen und die Anlage durch eine Gasturbine ersetzen. Die auf drei Stufen gelieferte Dampfmenge beträgt rund 3 750 GWh (Infraserv, 2017).

Neben großen KWK-Anlagen für die Fernwärmeversorgung sind in der Stadt mehr als 500 Kleinmotoren in Betrieb. Sie liefern Wärme für einzelne Gebäude oder kleinere Gebiete. Die installierte Gesamtleistung beträgt 45 MW elektrisch, die durchschnittliche Größe einer Anlage liegt bei 88 kW elektrisch. Die Spanne reicht von 1 bis 4 800 kW elektrisch. Die meisten dieser Anlagen werden mit Erdgas betrieben, 16 Anlagen mit zusammen 9,5 MW elektrisch werden mit Biogas oder Biomethan betrieben. Eine interaktive Karte der Klimaschutzprojekte in Frankfurt am Main zeigt, wo sich diese Anlagen befinden. Jeder Standort einer KWK-Anlage kann ausgewählt werden und ein individuelles Datenblatt mit detaillierten Informationen kann angezeigt werden (Energierreferat, 2020).

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Diagramm:** Verteilung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in den Sektoren Private Haushalte und Gewerbe in Frankfurt a. M. auf die dabei eingesetzten Energieträger

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Karte:** Gebiete in denen Fernwärmenetze in Frankfurt a. M. derzeit vorhanden sind (Abbildung 3)

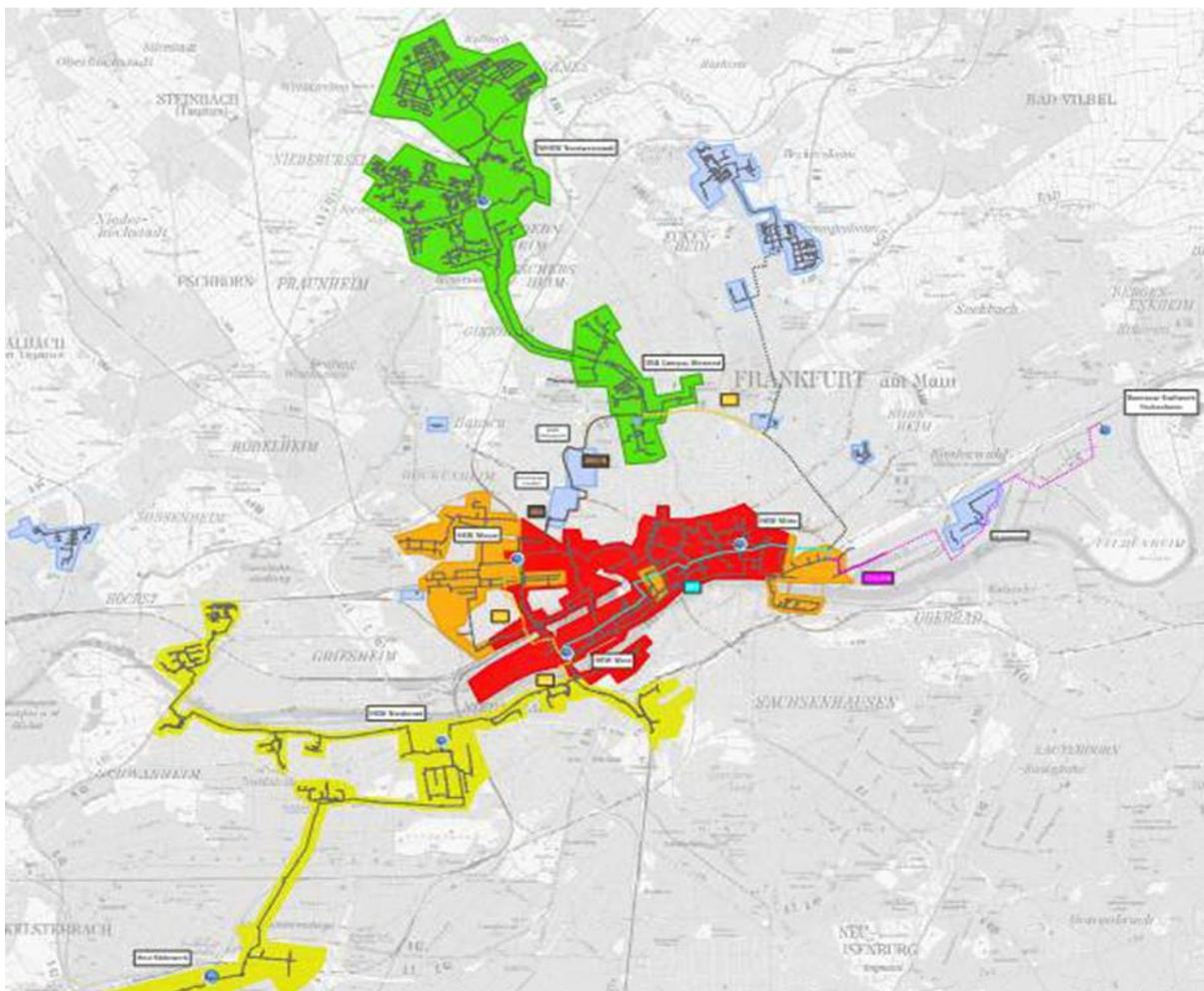


Abbildung 3: Vorhandene Netzgebiete der Mainova AG – Status 2017 (Quelle: (Mainova, 2020a))

4.3. Treibhausgasemissionen aus der Wärmeversorgung der Gebäude

Überblick Methodik:

- Basis ist die Analyse des Energieträgereinsatzes für Raumwärme und Warmwasser-Bereitstellung (inkl. Prozesswärme im Gewerbe) in den Gebäuden in Frankfurt a. M. (siehe Kapitel 4.1)
- Daten zu Emissionsfaktoren der einzelnen Energieträger werden aus der Treibhausgasbilanz der Stadt verwendet
- Aufgrund des hohen Aufwands, fehlender Daten sowie der nicht-nachhaltigen Verzerrung des Energiebedarfes in den vergangenen Jahren, verursacht durch die Covid-19 Pandemie sowie den hohen Energiepreisen in den vergangenen zwei Jahren wurde keine aktuellere Bewertung im Rahmen dieser Studie vorgenommen.

Zentrale Datenquellen:

- Treibhausgasbilanz der Stadt Frankfurt a. M. (ifeu, 2020)

Ein Überblick der derzeitigen (2019) Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in den Gebäuden der Stadt Frankfurt am Main ist in Abbildung 4 dargestellt. Die gegenständliche Studie baut auf den Daten für das Jahr 2019 auf, da dieses das letzte Jahr ist, in welchem keine kurzfristigen Verhaltenseffekte, wie sie durch die Pandemie sowie den hohen Energiepreisen der vergangenen Jahre (insbesondere seit dem Beginn des umfassenden Angriffskrieges auf die Ukraine im Februar 2022) verursacht wurden, enthalten sind.

Demnach, werden etwa 48% der Treibhausgasemissionen für die Wärmebereitstellung in privaten Gebäuden verursacht, 52% in Gebäuden aus dem Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen⁶. Dies inkludiert die Emissionen zur Bereitstellung von Prozesswärme im Gewerbesektor, nicht jedoch in den privaten Haushalten, da hier davon ausgegangen wird, dass es sich rein um Energieträgereinsatz für Kochen handelt. Insgesamt liegen die Emissionen im Jahr 2019 bei 2,02 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten. 55% dieser Emissionen werden durch die direkte Verbrennung von Erdgas innerhalb (bzw. in unmittelbarer Nähe) der Gebäude in dezentralen Wärmeerzeugern verursacht. Weitere 20% der Emissionen werden in zentralen Fernwärme-Wärmeerzeugungsanlagen emittiert. Hier kommt der überwiegende Anteil aus der Wärmebereitstellung für das bestehende Dampfnetz in Frankfurt am Main. Die bestehenden Heiz-/Warmwassernetze gehen mit einem deutlich niedrigeren Emissionswert einher. Dies ist sowohl der effizienteren Bereitstellung der Wärme, aber vor allem auch dem niedrigeren

⁶ Die Emissionen, die durch den Betrieb von Gebäuden entstehen, welche dem Industriesektor zugewiesen sind, werden hier explizit nicht betrachtet.

Wärmeabsatz in den Heiz-/Warmwassernetzen geschuldet. Weitere 15% der Emissionen sind auf die strombasierte Wärmeerzeugung, entweder über den Weg von Wärmepumpen oder Direkt-Strom-Wärmeerzeuger (Elektroden), zurückzuführen. Der verbleibende Anteil von etwa 10% wird durch Heizölprodukte, Kohle sowie sonstige Energieträger verursacht.

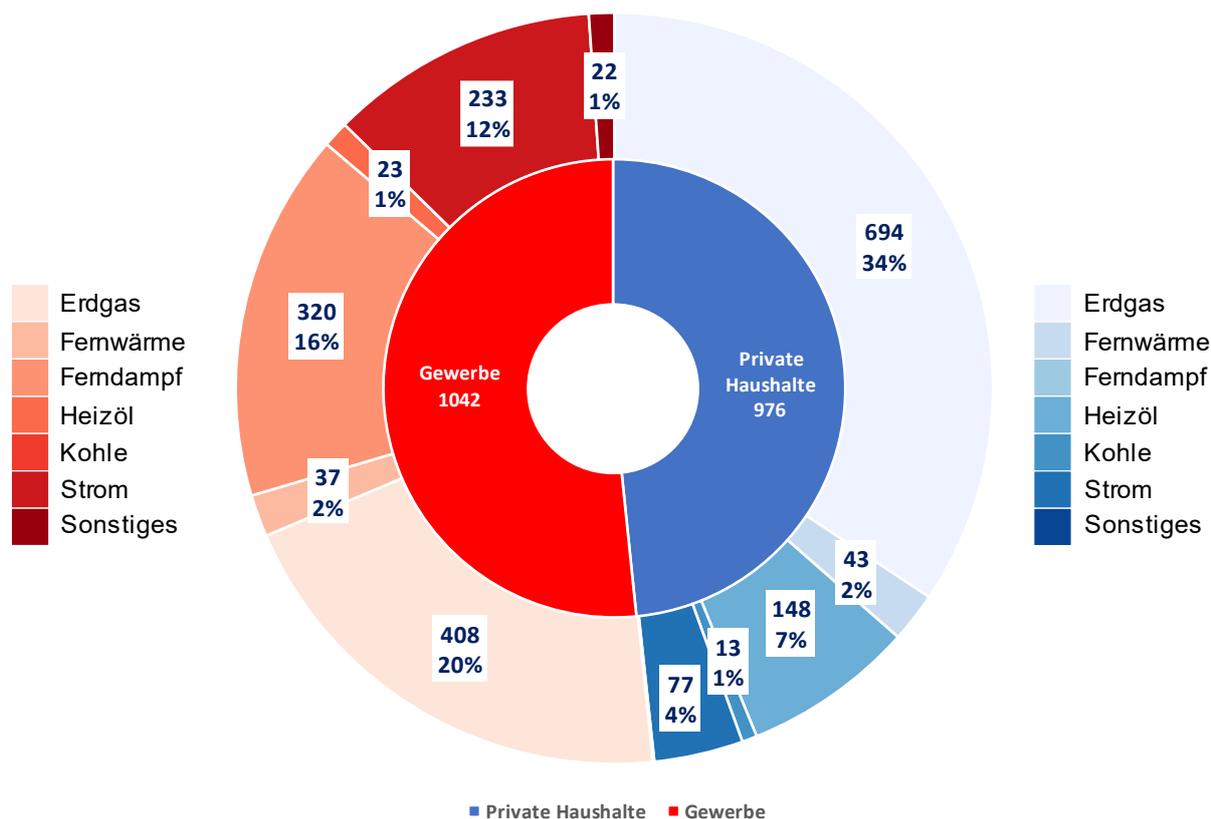


Abbildung 4: Berechnete Treibhausgasbilanz der Wärmeversorgung (in Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalenten) von Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. für das Jahr 2019 (Quelle: ifeu, 2020) und eigene Analysen)

Tabelle 11: Berechnete Treibhausgasbilanz der Wärmeversorgung (in Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalenten) von Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. für das Jahr 2019 (Quelle: ifeu, 2020) und eigene Analysen)

	Treibhausgas-Emissionen [Tsd. Tonnen CO ₂ -Äquivalenten]							Summe
	Erdgas	Fernwärme	Ferndampf	Heizöl EL	Kohle	Sonstiges	Strom	
Private Haushalte	694	43	0	148	13	1	77	976
Gewerbe	408	37	320	23	0	22	233	1 042
Summe	1 101	80	320	171	13	23	310	2 018

5. Potenzialanalyse

In diesem Kapitel werden die Methoden, Annahmen und Datenquellen zur Analyse der technischen Potenziale dargestellt. Dabei werden zwei Bereiche unterschieden:

- Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt
- Potenziale zur Deckung des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien und Abwärme

In beiden Bereichen liegt der Fokus in diesem Kapitel auf der Analyse des technischen Potenzials. Im Fall der Senkung des Wärmebedarfs werden gleichzeitig die Kosten für die entsprechenden Sanierungen betrachtet und ausgewiesen. Eine Auswahl des langfristigen Zielszenarios für die Senkung des Wärmebedarfs erfolgt dann unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit gegenüber der Aufbringung aus erneuerbaren Energien und Abwärme.

Im Fall der Deckung des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien und Abwärme werden in diesem Kapitel nur die technischen Potenziale dargestellt. Dabei werden die folgenden Einschränkungen berücksichtigt:

- Rechtliche Einschränkungen
- Technische Eigenschaften / Einschränkungen
- Die räumliche Nähe zu identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten (siehe Kapitel 6.2)

Das wirtschaftliche Potenzial der Bereitstellung von Wärme aus den unterschiedlichen erneuerbaren und Abwärmequellen ergibt sich dann zum einen aus den Fernwärme-Aufbringungs-Rechnungen (siehe Kapitel 6.3), zum anderen aus Überlegungen zum möglichen Einsatz verschiedener Technologien in unterschiedlichen Gebäudearchetypen über die Zeit (siehe Kapitel 6.4).

5.1. Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden

Überblick Methodik:

- Für die Berechnungen wird das Modell „Invert – Effizienzpotentiale“ eingesetzt.
- In einem ersten Schritt werden für alle Gebäudearchetypen (= Gebäude mit gleichen thermischen und Nutzereigenschaften) 10 verschiedene 10 Sanierungspakete zusammengestellt. 9 dieser Maßnahmen führen zu unterschiedlichen Einsparungen des Heizenergiebedarfs, bei einer Maßnahme handelt es sich um eine Instandsetzungs-Maßnahme. Die Maßnahmenpakete werden dabei derart aus einzelnen Maßnahmen (z.B. Fenstertausch, Dämmung Außenwände, ...) zusammengestellt, dass die zu erreichende Einsparung zu den niedrigsten Investitionskosten erreicht wird.
- In dem darauffolgenden Schritt wird für alle Gebäudearchetypen dasjenige der 10 Maßnahmenpakete identifiziert, wodurch es zu vordefinierten Einsparungen in der gesamten Stadt bei möglichst geringen Kosten kommt. Indikator sind hierbei die durchschnittlichen annuisierten Kosten pro eingesparte Wärmemenge aller umgesetzten Maßnahmen. Als Kosten werden hierbei die energetischen Zusatzkosten einer thermisch relevanten Maßnahme gegenüber einer Instandsetzungsmaßnahme herangezogen.
- Im Zuge der Analysen werden 6 langfristige Einsparungsziele für die bestehenden Gebäude definiert. Für diese 6 langfristigen Einsparungsziele werden die erforderlichen Maßnahmenpakete identifiziert und die durchschnittlichen Kosten dargestellt.

Zentrale Datenquellen:

- Gebäudebestand der Stadt Frankfurt a. M. (siehe Kapitel 4.1)
- Klimadaten der Stadt Frankfurt a. M. (DWD, 2022)
- Thermische Eigenschaften der Gebäude sowie Daten zu Nutzerverhalten ((Invert, 2022; Cischinsky and Diefenbach, 2018))
- Daten zu Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden (siehe Kapitel 3.1)

Das Modell „Invert – Effizienzpotenziale“

Die Modellfamilie Invert⁷ wird seit mehr als 10 Jahren gemeinschaftlich zwischen der Technischen Universität Wien / Energy Economics Group und e-think energy research entwickelt. Verschiedene Invert-Modellteile werden dabei zur Analyse unterschiedlicher technisch-wirtschaftlicher Fragestellungen rund um den Energiebedarf und dessen Versorgung in Gebäudebeständen eingesetzt. Die Gebäude werden in Invert, basierend auf bauphysikalischen Eigenschaften, Nutzereigenschaften, klimatischen Bedingungen sowie technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften von Bautechnik und Energieversorgungsinfrastruktur abgebildet. Entwicklungen des Gebäudebestandes sowie deren technische Infrastruktur werden in Abhängigkeit von Kosten und technischen Eigenschaften entweder optimiert, simuliert, oder unter vorgegebenen Entwicklungen ausgewertet. Unterschiedliche Teile der Invert-Modellfamilie wurden bereits in weit mehr als 50 Projekten eingesetzt.

Im Rahmen dieses Projektes wird das Modell Invert in der Variante „Effizienzpotenziale“ eingesetzt. Mit dieser Variante können die Potenziale zur Senkung des Wärmebedarfs eines definierten Gebäudebestandes durch die Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz ermittelt werden. In dem Modell werden bei Anwendung auf lokaler Ebene Daten zum lokalen Gebäudebestand und Klima mit Daten aus der nationalen Gebäudetypologie verknüpft, um zunächst den derzeitigen Energiebedarf für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung zu ermitteln. In Kombination mit Daten zu möglichen Maßnahmen zur Energiebedarfssenkung werden dann für archetypische Gebäude Sanierungspakete zusammengestellt, um vorgegebene Einsparungen auf Gebäudeebene zu minimalen Investitionskosten zu erreichen. Dabei werden bis zu 10 verschiedene Maßnahmen je Archetyp ermittelt, inklusive einer Ohnehin-Maßnahme (Instandsetzungs-Maßnahme), die zu keinen Energieeinsparungen führt. In diesem Optimierungs-Ansatz werden sowohl die Transmissions- als auch die Ventilationsverluste berücksichtigt, wodurch es auch möglich ist, Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung in die Optimierung mit einzubeziehen. Abbildung 5 zeigt diesen Schritt in der obersten blauen Box.

⁷ www.invert.at

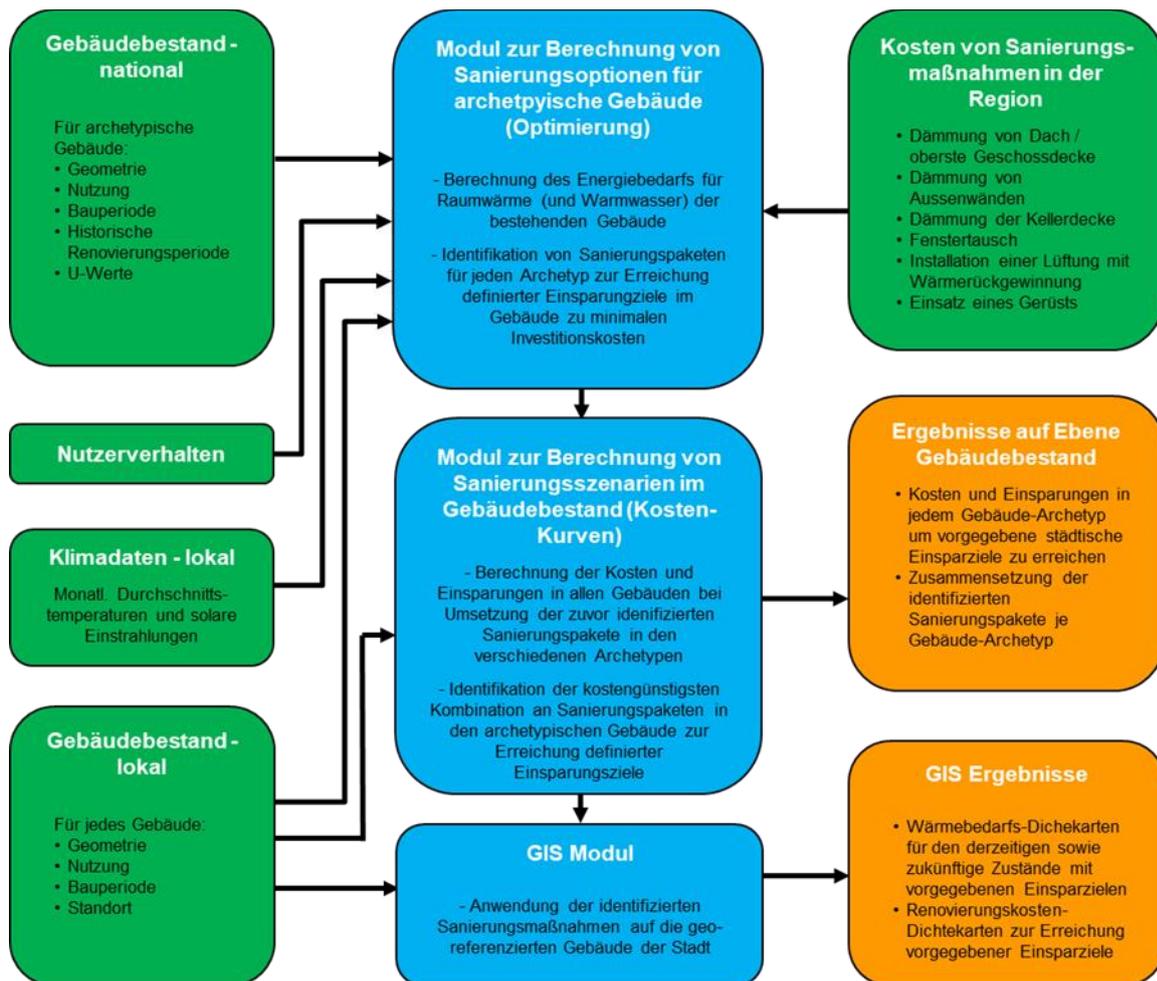


Abbildung 5: Schema des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“

Im nächsten Schritt werden die Potenziale und Kosten zur Energieeinsparung in den verschiedenen archetypischen Gebäuden der Stadt bei Umsetzung der zuvor identifizierten Sanierungspakete ermittelt. Darauf aufbauend erfolgt mittels Kosten-Kurven-Ansatz die Identifikation der kostengünstigsten Kombination an Sanierungspaketen in den verschiedenen archetypischen Gebäuden der Stadt, um vorgegebene Einsparziele auf Ebene der Stadt zu erreichen.

Das Modell „Invert – Effizienzpotenziale“ berücksichtigt zum einen den Rebound-Effekt, der nach Sanierungen zu beobachten ist, also, dass weniger Energie eingespart wird, als nach Norm berechnet. Dies erfolgt durch die Anpassung der Parameter des Nutzerverhaltens nach Sanierung. Zum anderen werden verschiedene Barrieren gegenüber Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt, die dazu führen, dass nicht alle Gebäude oder Gebäudeteile eines Archetyps saniert werden (können). Dies gilt verstärkt in älteren Gebäuden, in denen ein Denkmalschutz oder Besonderheiten in der Gebäudehülle zu geringeren Sanierungspotenzialen führt.

Darüber hinaus ist festzuhalten, dass in „Invert – Effizienzpotenziale“ auch Sanierungspakete modelliert werden, die nicht den vorgegebenen gesetzlichen Standards entsprechen. Dies ist v.a. damit begründet, dass erfahrungsgemäß nicht alle Gebäude auch tatsächlich Maßnahmen umsetzen, mit denen die vorgegebenen Standards erfüllt werden. Dies gilt in besonderem Maße für Gebäude, die im

Ausgangszustand rechnerisch besonders hohe Energiebedarfe aufweisen. In diesen Gebäuden zeigt der Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten Energiebedarfswerten meist größere Differenzen, und gleichzeitig finden sich in diesen Gebäuden meist hohe Barrieren gegenüber Sanierungen.

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Diagramm:** Kosten (energetische Zusatzkosten, ohne Instandsetzungskosten) pro eingespartem Wärmebedarf für die sechs verschiedenen stadtweiten langfristigen Einsparungsszenarien

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Diagramm:** Sensitivität der annuisierten Sanierungskosten pro Einsparung auf ausgewählte Parameter (Abbildung 6)
- **Diagramm:** Veränderung der U-Werte verschiedener Komponenten der Aussenhülle sowie des Nutzenergiebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in den verschiedenen stadtweiten langfristigen Einsparungsszenarien für Gebäude aus unterschiedlichen Bauperioden (Abbildung 7)
- **Diagramme:** Erzielte Einsparungen im Heizwärmebedarf sowie Investitionskosten für Instandsetzung und thermische Sanierung für unterschiedlichen Sanierungspakete in unterschiedlichen Gebäudearchetypen (Abbildungen Abbildung 8 und Abbildung 9)
- **Diagramm:** Veränderung des HWB (inkl. Nutzerverhalten) gegenüber dem Ausgangszustand über den gesamten Gebäudebestand im ausgewählten langfristigen Zielszenario (Abbildung 10)

Die folgende Abbildung 6 zeigt die Sensitivität der annuisierten Sanierungskosten pro Einsparung auf verschiedene Parameter in der Berechnung: verschiedene Varianten des Nutzenergiebedarfs (HWB/NEB), zum einen nach Norm berechnet, so wie auch im Energieausweis (NEB_norm), zum anderen unter Berücksichtigung des Heizungssystem-unabhängigen Nutzerverhaltens in den Gebäuden (NEB_bc_sf) und weiters unter Berücksichtigung aller Service-Faktoren (NEB_all_sf). Da der Nutzenergiebedarf nach Normberechnung höher ist als unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, zeigt sich, dass entsprechend die annuisierten Kosten bei Berechnung nach Norm niedriger sind, als

unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens sowie zusätzlich aller weiterer Service-Faktoren. Naheliegender ist ebenfalls, so wie in der Abbildung ersichtlich, dass die relative Reduktion, die erreicht wird, davon abhängt, ob in der Berechnung der Nutzenergiebedarf für die Warmwasserbereitstellung inkludiert wird, oder nicht. Ebenfalls logisch nachvollziehbar ist, dass eine volkswirtschaftliche Betrachtung (VoWi) mit entsprechend niedrigerem Zinssatz und einer längeren Lebensdauer der Maßnahmen, so wie hier in der kommunalen Wärmeplanung verwendet zu niedrigeren annuisierten Sanierungskosten führt, als wenn man betriebswirtschaftliche Parameter (PrWi) heranzieht.

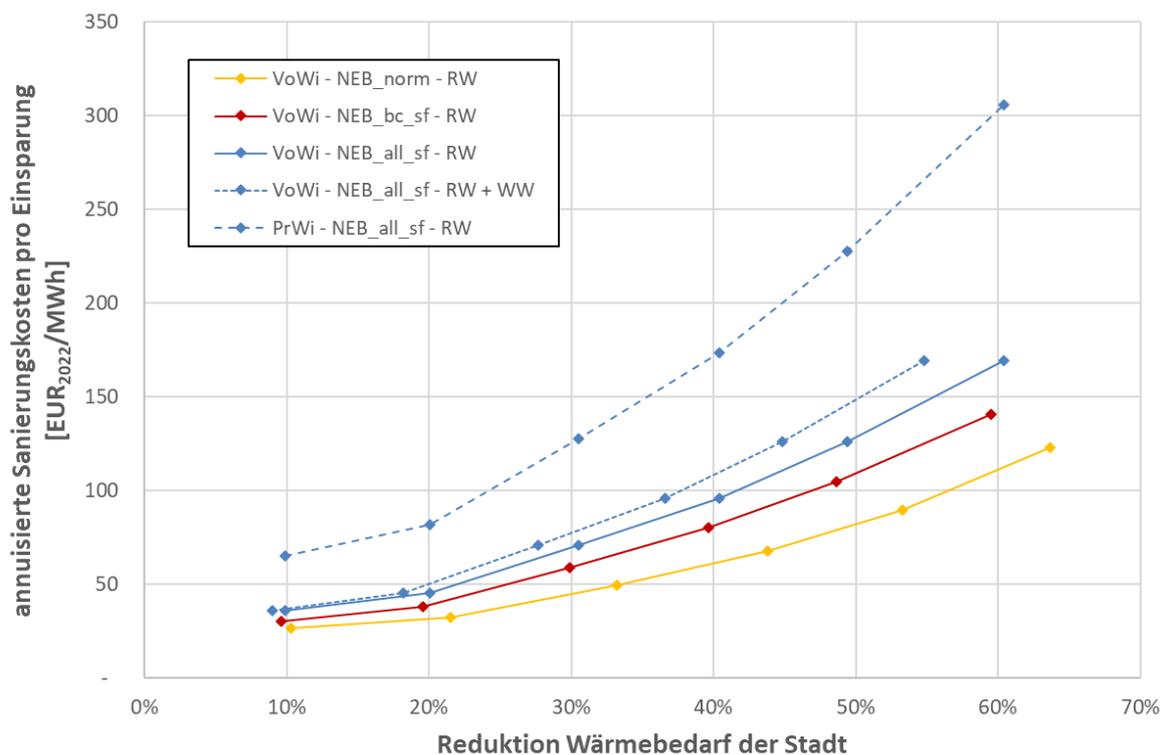


Abbildung 6: Sensitivität der annuisierten Sanierungskosten pro Einsparung auf die gewählten Parameter – Nutzenergiebedarf (NEB), Raumwärme vs. Raumwärme und Warmwasser, volkswirtschaftlich vs. Privatwirtschaftlich (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)

Die folgende Abbildung 7 zeigt die Veränderungen bei U-Werten sowie beim HWB (inkl. Nutzerverhalten) im Rahmen der in der Modellierung identifizierten Maßnahmen zur Erreichung der definierten Einsparziele in der gesamten Stadt. Die Veränderungen werden als Boxplot und nach unterschiedlichen Bauperioden dargestellt. Ersichtlich ist zum einen, dass die Änderungen mit höheren Stadtweiten Einsparungszielen zunehmen. Des Weiteren sieht man, dass zunächst die Dämmung der Außenwand und der Fenstertausch bei Gebäuden aus den Jahren 1946 bis 1979 wirtschaftlich ist, bei höheren Einsparzielen dann aber nahezu alle Gebäude vor 2010 entweder umfassend sanieren oder zumindest die Fenster tauschen.

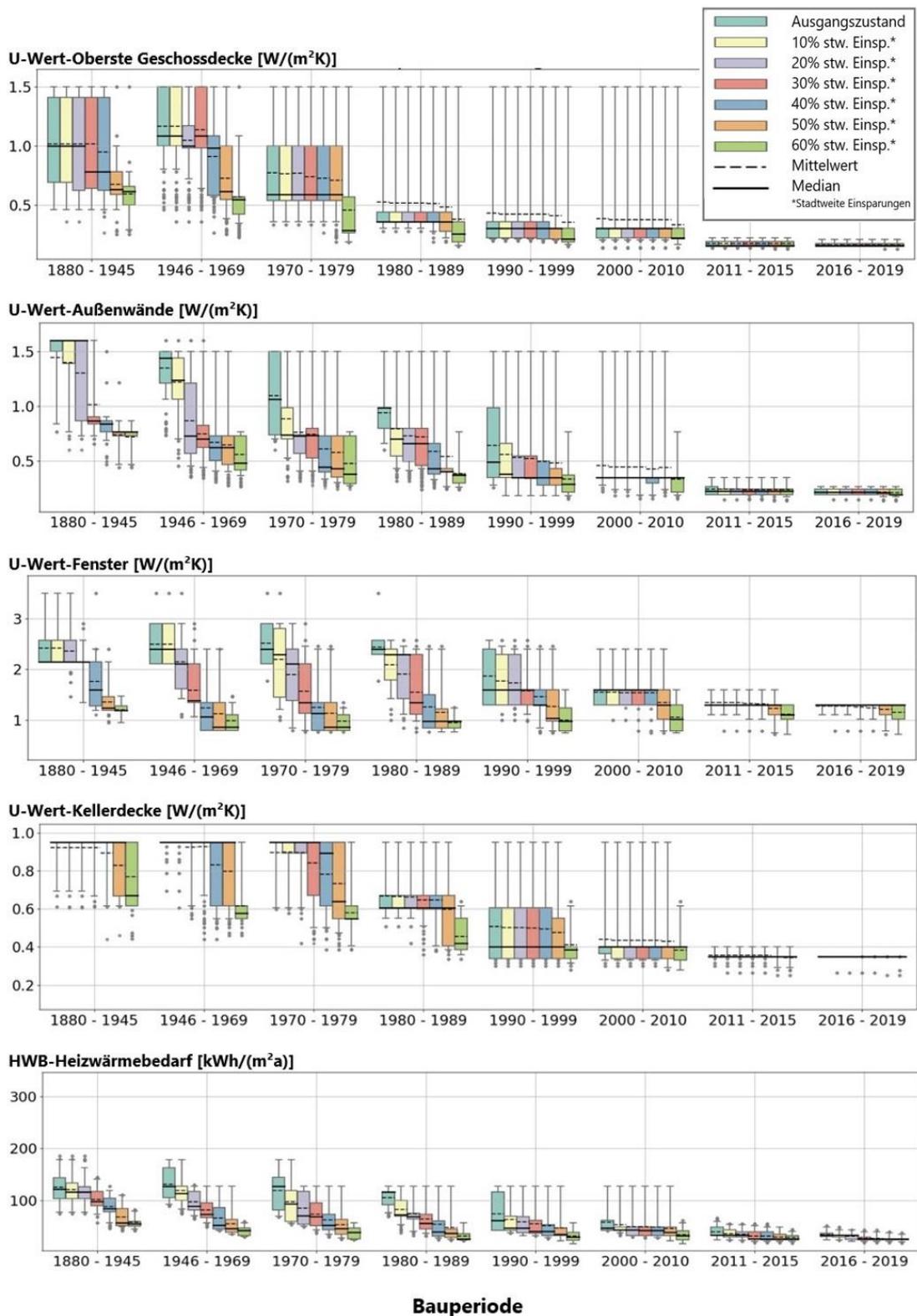


Abbildung 7: Veränderung der U-Werte verschiedener Komponenten der Aussenhülle sowie des Nutzenergiebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in den verschiedenen stadtweiten langfristigen Einsparungsszenarien für unterschiedliche Bauperioden (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen einerseits die erzielten Einsparungen (Abbildung 8) und andererseits die dabei anfallenden Investitionskosten (Abbildung 9) für die in der Modellierung berechneten 10 Maßnahmenpakete (9 Maßnahmenpakete zu thermischen Sanierungen und ein Maßnahmenpaket zur Instandsetzung der Gebäude). Die Daten werden dabei für teil-aggregierte Gebäudearchetypen in den Abbildungen dargestellt.

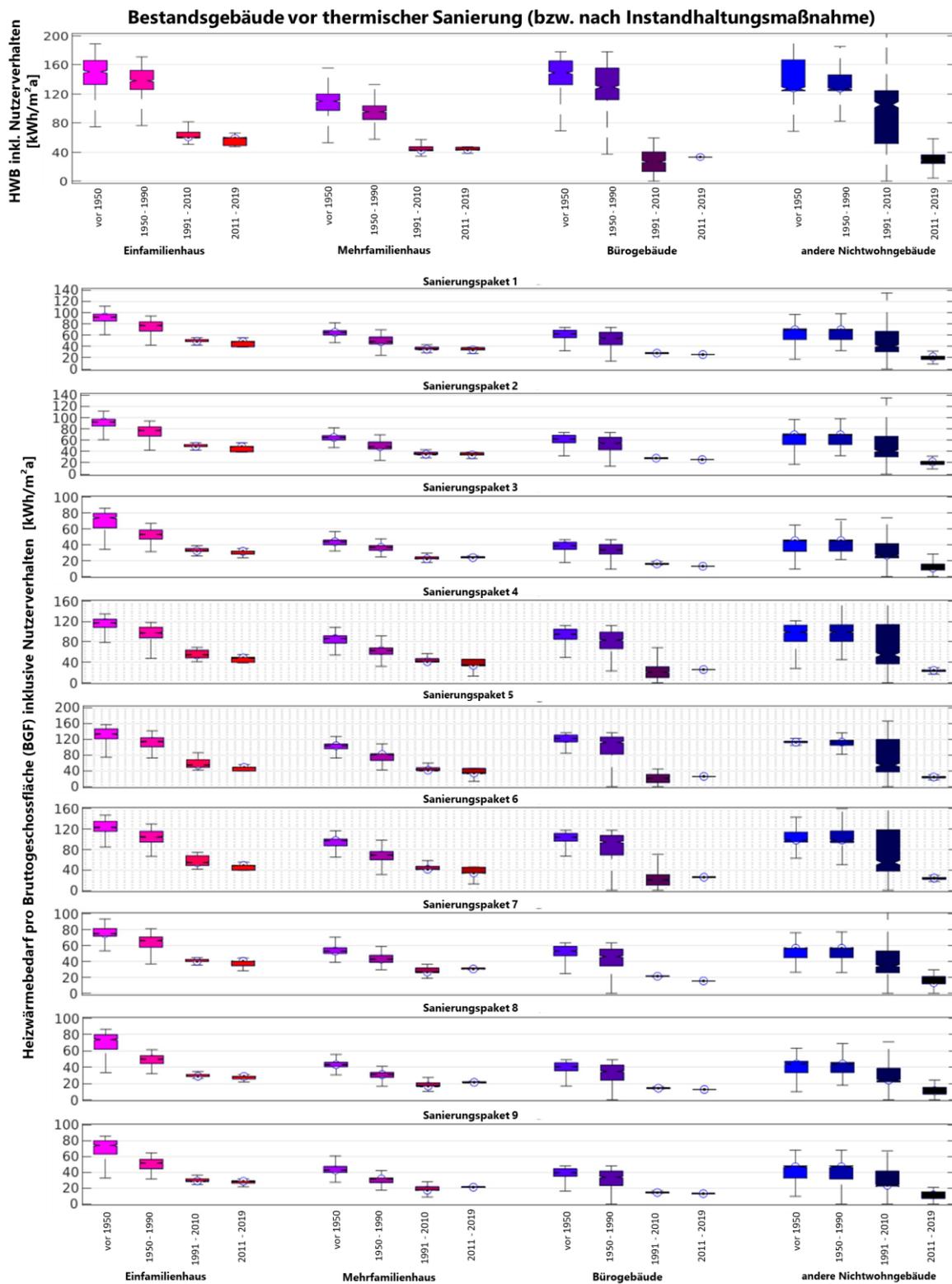


Abbildung 8: Erzielte Einsparungen im Heizwärmebedarf (HWB – inkl. Nutzerverhalten) bei den unterschiedlichen Sanierungspaketen in unterschiedlichen Gebäudearchetypen – Zwischenergebnis des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“ (Quelle: eigene Berechnungen)

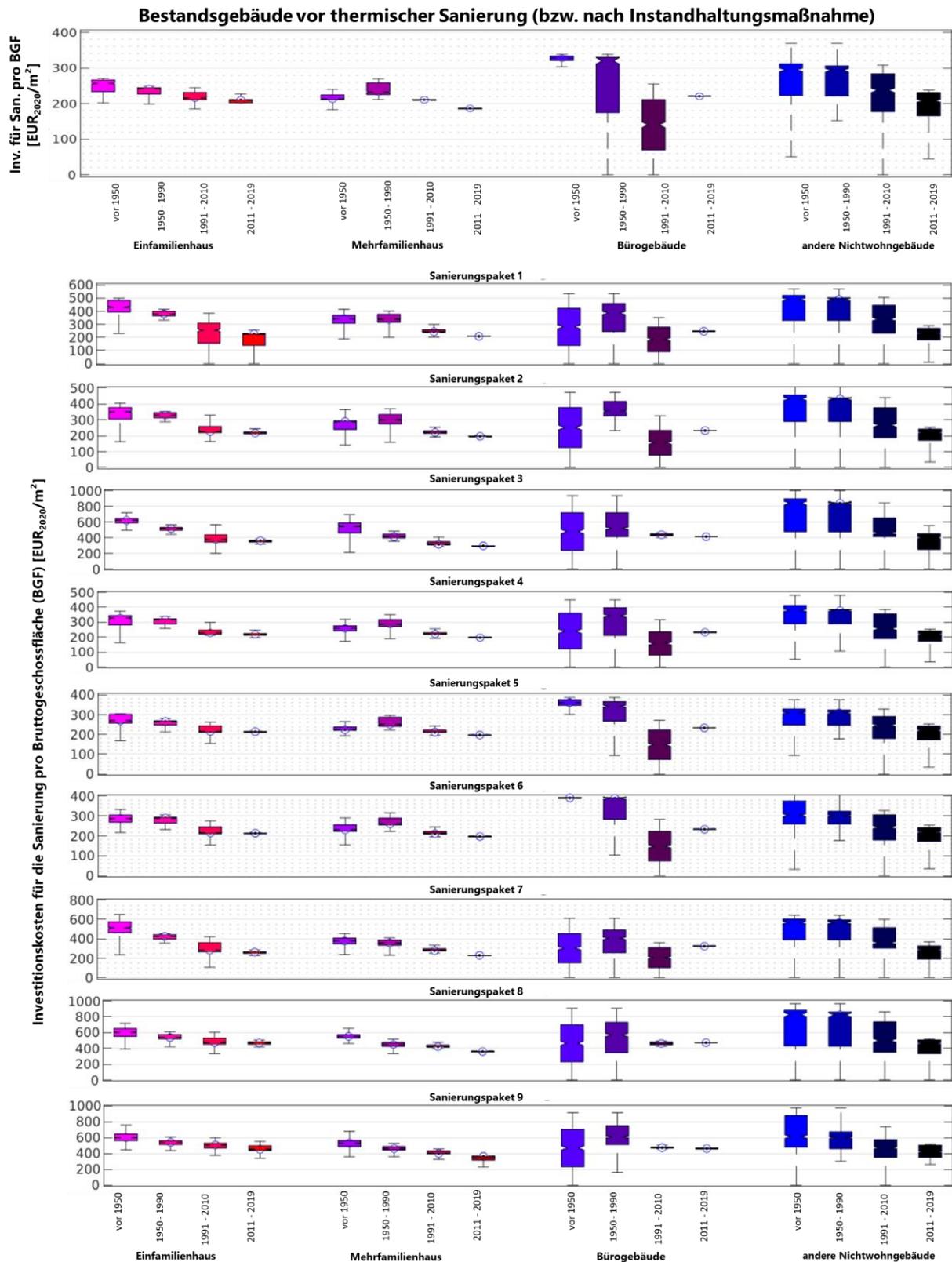


Abbildung 9: Investitionskosten in Instandsetzung und in die unterschiedlichen Sanierungspakete in unterschiedlichen Gebäudearchetypen – Zwischenergebnis des Modells „Invert – Effizienzpotenziale“ (Quelle: eigene Berechnungen)

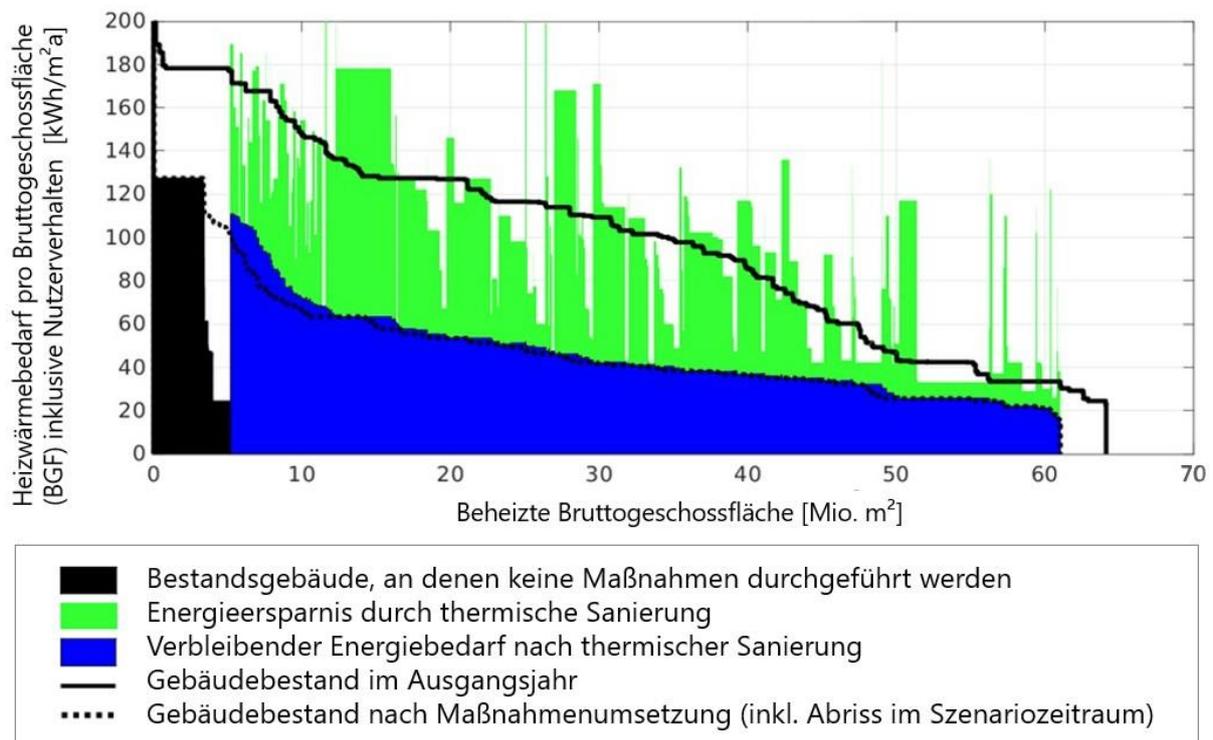


Abbildung 10: Veränderung des HWB (inkl. Nutzerverhalten) gegenüber dem Ausgangszustand über den gesamten Gebäudebestand im ausgewählten langfristigen Zielszenario (stadtweit 50% Einsparung im HWB) (Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung)

Abbildung 10 zeigt für ein ausgewähltes Einsparungsszenario (langfristig 50% stadtweite Einsparungen im HWB) die Veränderung des HWB (inkl. Nutzerverhalten) gegenüber dem Ausgangszustand über den gesamten Gebäudebestand. Das dargestellte Szenario entspricht dabei dem im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung gewählten langfristigen Zielszenario, mit dem die weiteren Berechnungen durchgeführt wurden. In der Abbildung sieht man einerseits, dass ein im Verhältnis geringer Anteil der Gebäudeflächen keine thermisch relevante Maßnahme durchführen sollten (schwarzer Block), zum anderen sieht man, dass die relativen Einsparungen teilweise sehr unterschiedlich sind für verschiedene Gebäude (Verhältnis der grünen Balken zu den blauen Balken).

5.2. Potenziale zur Deckung des Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien und Abwärme

Zur Analyse der Potenziale erneuerbarer Energie und Abwärme zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden wurden verschiedene vorhandene Studien analysiert sowie eigene Berechnungen durchgeführt. 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 6.3).

Die folgende Tabelle 12 zeigt den Überblick der technischen Leistungspotenziale zur Integration in die Fernwärme für die unterschiedlichen Energiequellen. Zusätzlich ist das Kapitel angegeben, in welchem weitere Informationen zur Potenzialanalyse in diesem Dokument beschrieben sind.

Tabelle 12: Überblick über technische Leistungspotenziale nach Energiequelle sowie Kapitel mit näherer Beschreibung der Analyse (Quelle: eigene Analyse)

Energiequelle	Maximale thermische Leistung [MW]	Beschreibung in Kapitel
Solarthermie	> 2 000*	5.2.1
Tiefengeothermie	41	5.2.2
Oberflächennahe Geothermie	320 – 1 800	5.2.2
Abwärme aus der Abwasserreinigung	65	5.2.3
Wärme aus Flusswasser	250	5.2.4
Abwärme aus Rechenzentren	188 – 490	5.2.5
Abwärme aus Industrieanlagen	40	5.2.6
Müllverbrennung	120	5.2.7
Biomasseverbrennung	40	5.2.8
Saisonalen Wärmespeicher		5.2.9

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

5.2.1 Solarthermie

Überblick Methodik:

- Als Grundlage für die potenziellen Flächen wurde zunächst alle Grünlandflächen (Ackerflächen, Wiesen, etc.) herangezogen.
- Davon wurden Landschaftsschutzgebiete sowie Gebiete der Naherholung (Parkanlagen, etc.) abgezogen
- Ein Gebiet ist dann als geeignet eingestuft, wenn dieses in der Nähe von identifizierten Fernwärme-Potenzial-Gebieten liegt
- Das Potenzial zur verteilten Wärmeerzeugung (mit Fernwärmeeinspeisung) auf Dachflächen wurde nicht berücksichtigt

Zentrale Datenquellen:

- ATKIS-Objektkartenkatalog Basis-DLM, Version 6.0.1 (HVBG, 2009)
- Schutzzonen aus dem Geoportal des Landes Hessen (HLBG, 2023)

Prinzipiell wurden landwirtschaftliche Nutzflächen als mögliche Standorte für Solarthermie-Freiflächen-Anlagen definiert. Dazu wurden die Flächen mit dem Vegetationsmerkmal „Ackerland“ und „Grünland“ aus dem „ATKIS-Objektkartenkatalog Basis-DLM, Version 6.0.1“ (HVBG, 2009) mit der Kennung 43001 extrahiert. Als weitere Einschränkung wurde die Einschränkung des Bundeslandes Baden-Württemberg⁸, welches keine Solarthermie Anlagen in Landschaftsschutzgebieten oder Wasserschutzgebieten I und II erlaubt, übernommen. Die Daten zu den beiden Schutzzonen stammen vom hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HLBG, 2023).

Als kritische minimale Bodenfläche einer Freiflächenanlage zur wirtschaftlichen Nutzung wurde eine Fläche von 2 000 Quadratmeter festgelegt (Peters et al., 2020) was einer minimalen Wärmeerzeugung⁹ von ca. 280 MWh/a entspricht. Das Verhältnis von Bodenfläche zu installierter Bruttokollektorfläche wurde mit einem Faktor von 3 angenommen.

Die solarthermische Wärmeerzeugung mittels Aufdachanlagen (z.B. Parkplatzüberdachung bei P+R Plätzen) und einer (dezentralen) Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz wurde im Rahmen dieser Studie nicht weiter berücksichtigt. Dies begründet sich einerseits aus dem erforderlichen technischen Aufwand (Temperaturniveaus, bei einer Rücklauf-Vorlauf-Einbindung ist eine Pumpe zur Druckanhebung erforderlich, hohes Gewicht bei großen Anlagen auf großen Hallendächern, etc.), verbunden mit typischer Weise recht kleinen Anlagen, sowie der Tatsache, dass aus der Potenzialanalyse hervor ging, dass der Fernwärmeaufbringung im Sommer ausreichend andere Wärmequellen zur

⁸ Für Hessen sind den Autoren keine rechtlichen Rahmenbedingungen für das Aufstellen von Freiflächen-Solarthermieanlagen bekannt.

⁹ Bei einer Globalstrahlung von 1040 kWh/a und einem Gesamtanlagenwirkungsgrad von 40%

Verfügung stehen. Altlastenflächen (Griesheim, Mertren-Viertel) wurden ebenfalls nicht als potenzielle Standorte für solarthermische Großanlagen herangezogen. Des Weiteren wurde unterstellt, dass im Dampfnetz aufgrund der hohen Temperaturniveaus keine solarthermische Wärmeeinspeisung erfolgen kann.

Die dabei identifizierten Solarthermie Freiflächen besitzen mit den oben genannten Annahmen ein Potenzial von 1 800 GWh/a und eine Nennleistung von etwa 3 000 MW. Abbildung 11 zeigt die Flächen, welche als potenzielle Standorte für Solarthermieanlagen identifiziert wurden.

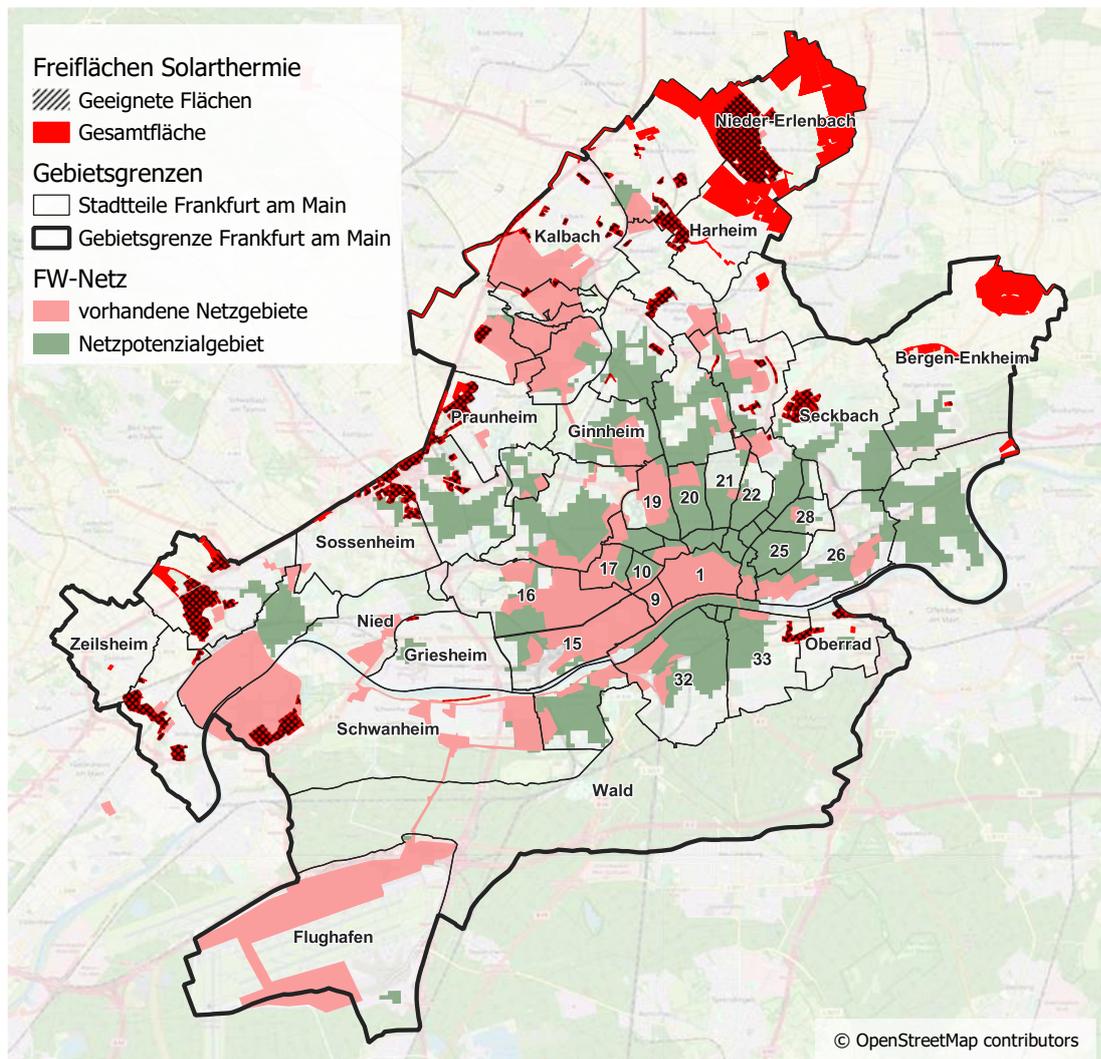


Abbildung 11: Freiflächen Solarthermie Potenzial der Stadt Frankfurt a. M.

Wie in der Abbildung 11 gezeigt, befinden sich die größten verfügbaren Freiflächen im Norden und Nordosten der Stadt. Diese Gebiete sind jedoch in (zu) großer Entfernung zu den vorhandenen Netzgebieten bzw. den identifizierten Fernwärme-Potenzial-Gebieten, wodurch die Nutzung des solarthermischen Potenzials in diesen Gebieten eingeschränkt ist. Die restlichen für Solarthermie

geeigneten Freiflächen befinden sich in der Nähe von Wärmbedarfszentren mit bereits bestehenden Wärmenetzen oder mit Potenzial für den Ausbau des Wärmenetzes.

5.2.2 Geothermie

Die energetischen Potenziale im Bereich Geothermie werden in dieser Analyse nach deren Bohrungstiefe unterschieden und ausgewiesen: oberflächennahe Geothermie, mitteltiefe Geothermie und Tiefengeothermie.

Oberflächennahe Geothermie – Erdwärmesonden

Überblick Methodik:

- Es wird angenommen, dass Spielfelder und landwirtschaftliche Flächen (Grünland und Ackerland) im Stadtgebiet grundsätzlich geeignet wären
- Das theoretische Potenzial ergibt sich aus
 - Temperatur im Erdreich in 200 - 800 m Tiefe
 - Theoretisch abkühlbar um 5(-7) K
 - Stetige Abkühlung des Bodens über 35 Jahre
- Rechtliche Rahmenbedingungen:
 - Es können nur Gebiete genutzt werden, in denen kein Wasserschutz und kein Landschaftsschutz vorliegt.
 - Heilquellenschutz zonen (HQS) I-III/1 bzw. quantitative Schutzzone A werden ausgeschlossen
 - Wasserschutzgebietszone (WSG) I-IIIa werden ausgeschlossen
- Technische Einschränkungen / Möglichkeiten:
 - Distanz zwischen den Sonden und Sondenfeldern lt. (VDI, 2022) mit 6 bzw. 10 m angenommen
 - Nur begrenzte Entnahmemengen und nutzbare ΔT (5 K)
 - Deutliche Reduktion des Potenzials über die Zeit; daher deutlich geringere durchschnittliche Leistungen abgreifbar, wenn keine Regeneration über die Sommermonate erfolgt

Zentrale Datenquellen:

- ATKIS-Objektkartenkatalog Basis-DLM, Version 6.0.1 (HVBG, 2009)
- Schutz zonen aus (HLNUG, 2023)
- Informationen zu Bodenbeschaffenheit und Untergrundtemperaturen aus (Thews, J.-D., 1996) und (Agemar et al., 2011)
- VDI 4640 zur Dimensionierung von Erdwärmesonden (VDI, 2022)

Um die Leistung pro Fläche eines Erdwärmesondenfeldes zu bestimmen, werden folgende Parameter angesetzt: die Bohrtiefe pro Sonde ist 800 Meter, die Wärmespeicherkapazität des Bodens ist $1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, die Dichte des Bodens beträgt $2\,200 \text{ kg}/\text{m}^3$ und die maximale Abkühlung beträgt 5 K. Daraus ergibt sich

eine Wärmespeicherkapazität von $3,06 \text{ kWh/m}^3$ bzw. etwa $24\,450 \text{ MWh/ha}$. Bei einer Betriebszeit von 35 Jahren ergibt sich eine maximale Entzugsmenge von $0,7 \text{ GWh/(ha*a)}$, wenn der Boden in dieser Zeit nicht regeneriert wird. Für die Berechnungen wird angenommen, dass die Felder jährlich mit $1,8 \text{ GWh/ha}$ regeneriert werden. Somit ergibt sich eine jährlich mögliche Entzugsmenge von $2,5 \text{ GWh/ha}$. Bei der Nutzung mittels Wärmepumpe mit einem COP von 4 ergibt sich eine nutzbare Wärmemenge von $3,33 \text{ GWh/(ha*a)}$.

Die Wärmeentzugsleistung wurde anhand VDI 4046 (VDI, 2022) bestimmt, welche bei vorgegebener Bodenart, Betriebsdauer und Bodensättigung die Wärmeentzugsleistung vorgibt. Die Bodenart wurde mittels der Hessischen Geologiedatenbank (Thews, J.-D., 1996) bestimmt. Als großteils vorherrschende Bodenart wurde Sand, Ton, Lehm und Kies identifiziert und entsprechende Werte verwendet. Die jährliche Betriebsdauer der Erdwärmesondenfelder wurde mit $2\,400 \text{ h/a}$ und der Boden als gesättigt angenommen. Die Wärmeentzugsleistung liegt laut somit laut VDI 4046 (VDI, 2022) zwischen 35 und 65 W/m . Ebenso muss der Umstand berücksichtigt werden, dass Erdwärmesondenfelder über die Heizperiode an Entzugsleistung verlieren, da der Untergrund kontinuierlich auskühlt. Um diesen Umstand gerecht zu werden, wurde somit die durchschnittliche Entzugsleistung der Erdwärmesondenfelder auf 30 W/m festgelegt. Mit der Annahme von 100 Sonden pro Hektar ergibt sich eine Wärmeentzugsleistung für ein Erdwärmesondenfeld von $2,4 \text{ MW/ha}$. Für die Berechnung der Wärmeleistung der Wärmepumpe eines Erdwärmesondenfeldes wird die Netzvorlauftemperatur mit 90°C und Rücklauftemperatur mit 60°C angenommen. Die Temperaturen des Untergrundes wurden anhand (Agemar et al., 2011) bestimmt und belaufen sich für das Gebiet Frankfurt am Main auf durchschnittlich 25°C in 200 Metern Tiefe. Jahresarbeitszahlen von 4 dürften daher realistisch sein. Dies ergibt eine mögliche nutzbare Wärmeleistung ab Wärmepumpe von $3,2 \text{ MW/ha}$.

Die über ATKIS identifizierten Spielfelder und landwirtschaftlichen Flächen im Frankfurter Stadtgebiet, reduziert um Wasserschutz und Landschaftsschutzgebiete belaufen sich auf gesamt 562 ha . Berücksichtigt man zusätzlich eine maximale Distanz zu identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten (siehe Kapitel 6.2) von 1 km so reduzieren sich die potenziell geeigneten Flächen auf 387 ha .

Unter diesen Annahmen ergibt sich für die oberflächennahe Geothermie ein Gesamtpotential von gut $1\,870 \text{ GWh/a}$ mit einer Wärmeleistung von knapp $1\,800 \text{ MW}$ bei Nutzung der 562 ha potenziell geeigneter Flächen ohne Berücksichtigung des Abstandes zu Fernwärme-Potenzialgebieten. Unter Berücksichtigung des 1 km Abstandes zu diesen Gebieten ergibt sich ein Potenzial von $1\,290 \text{ GWh/a}$ mit einer Wärmeleistung von $1\,240 \text{ MW}$.

Die folgende Abbildung 12 zeigt die Verortung möglicher Potenzialgebiete für die Nutzung oberflächennaher Geothermie im Stadtgebiet von Frankfurt am Main zusammen mit identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten sowie derzeit vorhandenen Netzgebieten.

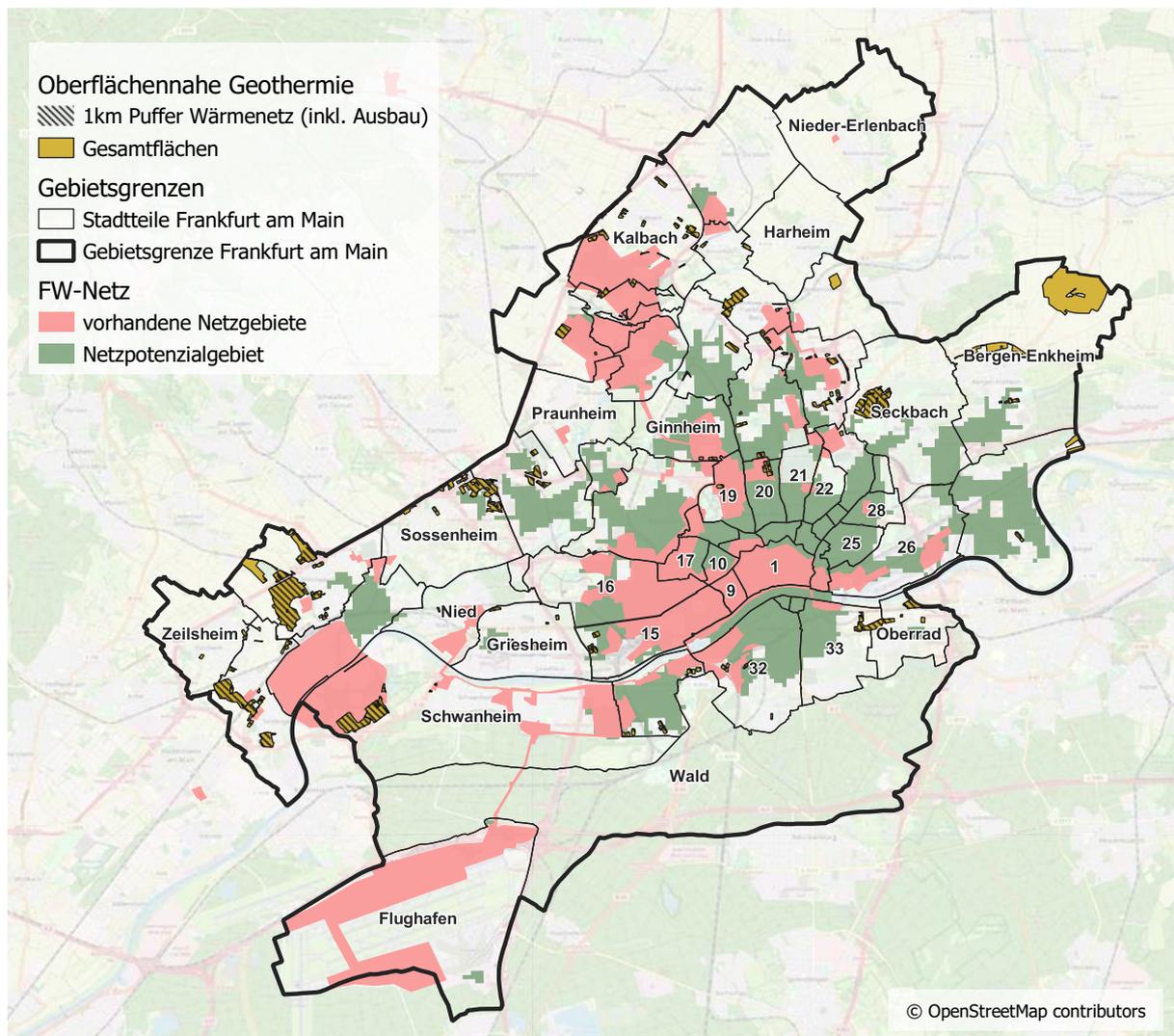


Abbildung 12: Verortung möglicher Potenziale zur Nutzung oberflächennaher Geothermie (Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung)

Mitteltiefe Geothermie

Auch die Nutzung mitteltiefer Geothermie, also ab einer Tiefe von rund 800 m könnte eine Option zur Wärmeversorgung der Stadt Frankfurt am Main sein. Unterhalb des Stadtgebietes befindet sich eine geothermische Anomalie, es treten also deutlich höhere Temperaturen auf als in anderen Gebieten der Bundesrepublik. Darüber hinaus wird vermutet, dass sich unter der Stadt eine wasserführende Schicht befindet, also Thermalwasser als Entzugsquelle genutzt werden kann. Ob dieses theoretische Potenzial tatsächlich nutzbar ist, wie hoch also die vorliegenden Temperaturen und mögliche (langfristige) Entzugsleistungen tatsächlich sind, wird derzeit im Rahmen einer Forschungsbohrung neben dem früheren Rebstockbad analysiert. Ergebnisse sollen im Laufe des Jahres 2023 vorliegen. (HLNUG, 2022)

Da zum Zeitpunkt der Analysen im Rahmen des gegenständlichen Vorhabens noch keine Ergebnisse zur Forschungsbohrung vorliegen, wird dieses Potenzial in der Analyse nicht inkludiert.

Tiefengeothermie

Überblick Methodik:

- Basis sind Gebiete mit relevanten hydrothermalen Potenzialen in der Nähe von Frankfurt a. M.
- Das theoretische Potenzial ergibt sich aus
 - Temperatur im Erdreich in 2-3 km Tiefe: 115-145 °C
 - Theoretisch abkühlbar auf 65 °C
- Rechtliche Rahmenbedingungen:
 - Wasserschutz- und Landschaftsschutzgebiete werden ausgeschlossen
- Technische Einschränkungen / Möglichkeiten:
 - Nur begrenzte Entnahmemengen und nutzbare ΔT
 - Anlage zur Gewinnung von Lithium geplant
 - Reduktion des Potenzials über die Zeit (keine Regeneration)
 - Maximal mögliche Distanz zum Frankfurter Stadtgebiet mit 12 km angenommen

Zentrale Datenquellen:

- Verortung und Temperaturen in Gebieten mit nachgewiesenen hydrothermalen Potenzialen für tiefe und mitteltiefe Geothermie aus (Schulz et al., 2013)
- Schutzzonen aus (HLNUG, 2023)

Aus der Karte der hydrothermalen Potenzialgebiete, reduziert um Wasserschutz- und Landschaftsschutzgebiete mit einer maximalen Distanz von 12 km zur Stadtgrenze (Flughafen) werden zwei Gebiete zur Entwicklung von Tiefengeothermie identifiziert. Eine Fläche A mit 12 km² und eine Fläche B mit 18 km² (siehe Abbildung 13).

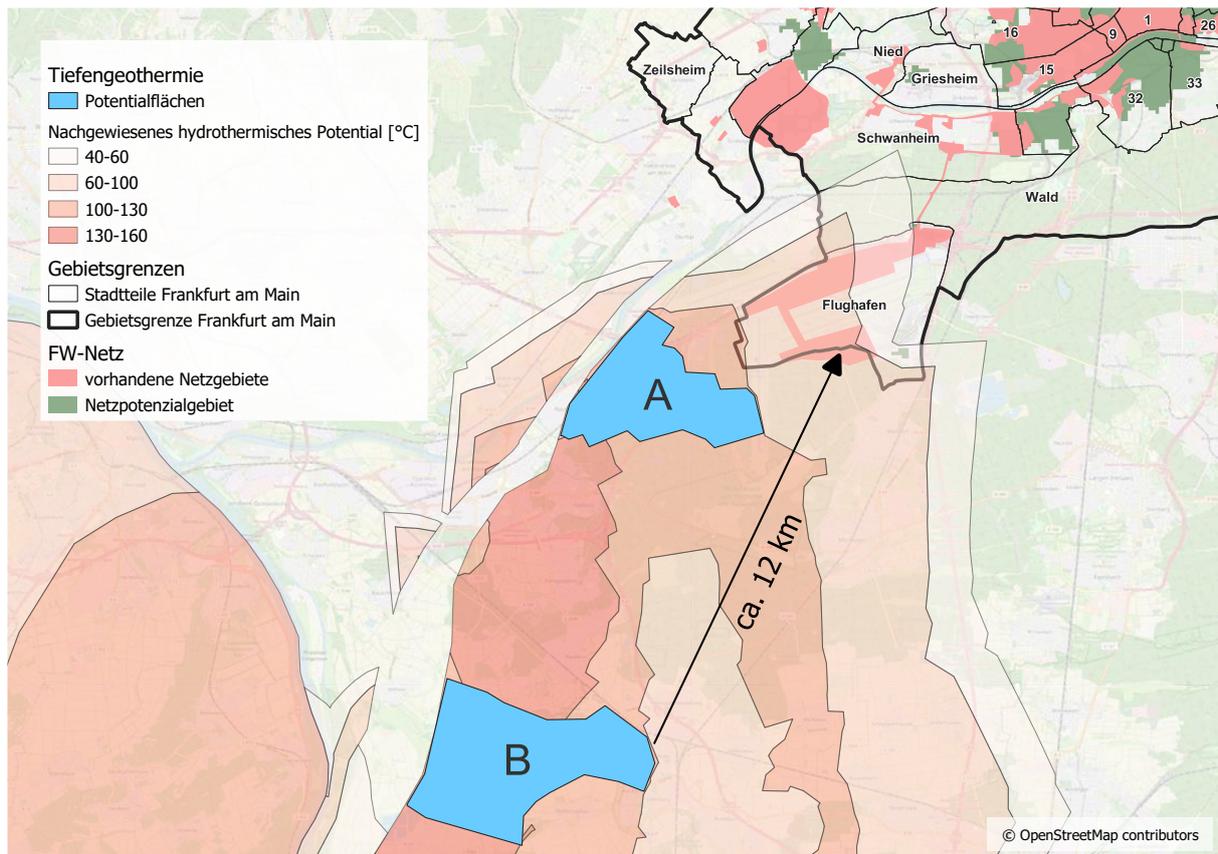


Abbildung 13: Tiefengeothermie Potentialflächen (Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung)

In Summe könnten auf beiden identifizierten Flächen potenziell 41 MW Wärmeleistung zur Einspeisung in die Fernwärme gewonnen werden. Die folgende Tabelle 13 zeigt die in der Berechnung verwendeten Parameter.

Tabelle 13: Parameter in der Berechnung des technischen Potenzials an Tiefengeothermie (Quelle: eigene Annahmen auf Basis von (Schulz et al., 2013) und (GeoT, 2022))

Parameter in der Berechnung	Fläche A	Fläche B	Einheit
Teufe Produktions- und Injektionsbohrung	2 500	2 500	m
Fördertemperatur	115	145	°C
Injektionstemperatur	65	65	°C
Massenstrom	53	52	kg/s
Spezifische Wärmekapazität	3 774	3 741	J/kgK
Thermische Leistung pro Dublette	10	16	MW
Identifizierte Flächen	12	18	km ²
Erdoberfläche pro Förderbohrung	7	7	km ²
Anzahl der Dubletten	1	2	
Thermische Leistung	10	31	MW

5.2.3 Kläranlagen

In Kläranlagen, auch Abwasser-Reinigungs-Anlagen (ARA) genannt, kann zum einen der anfallende Klärschlamm energetisch genutzt werden. Dies ist eine etablierte Form der energetischen Nutzung und in vielen ARAs umgesetzt. Zum anderen kann Abwärme aus dem Abwasser an verschiedenen Stellen mittels Wärmepumpen genutzt werden. Diese beiden Nutzungsoptionen werden im Folgenden getrennt voneinander betrachtet.

Die folgende Abbildung 14 zeigt die drei Standorte von Kläranlagen im Frankfurter Stadtgebiet. Da die beiden Anlagen in Griesheim und Niederrad einen gemeinsamen Ausfluss in den Main besitzen, werden diese Anlagen im Folgenden gemeinsam analysiert.

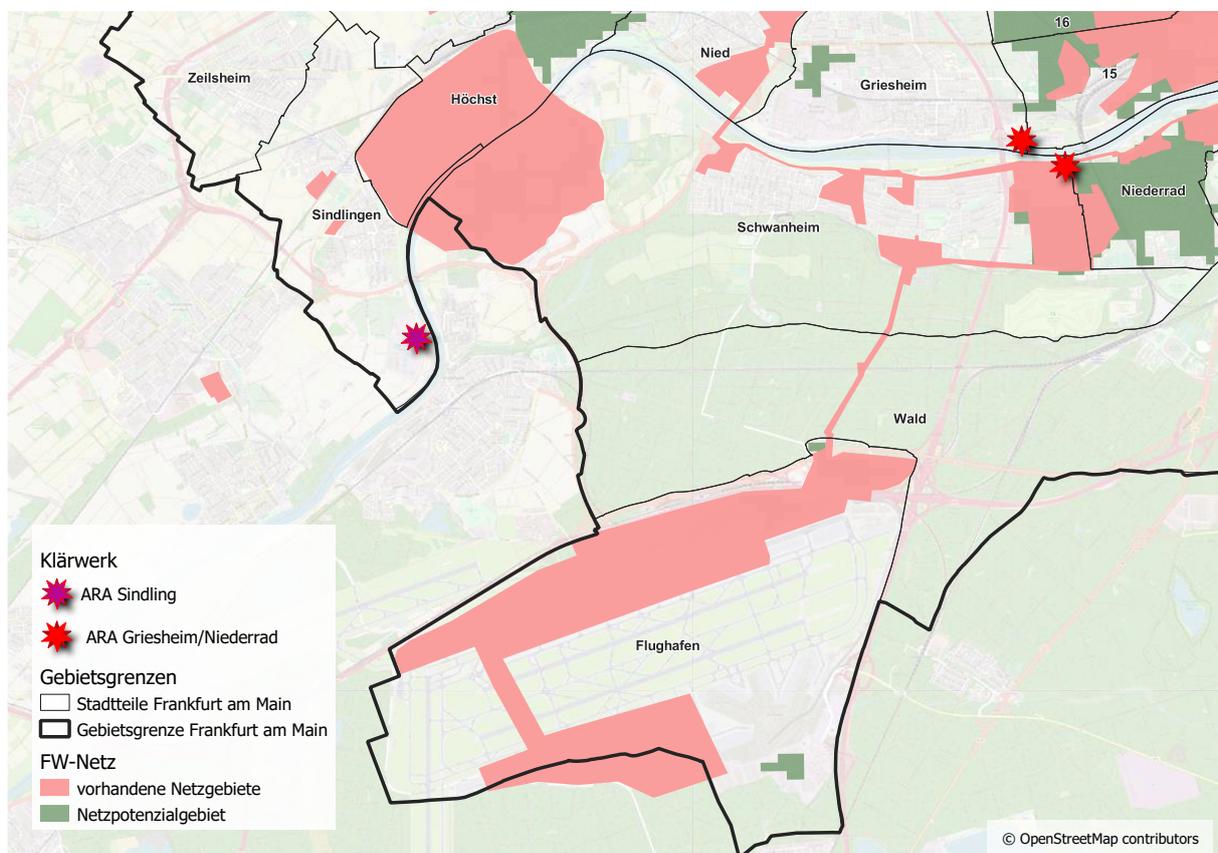


Abbildung 14: Standorte der Kläranlagen in Frankfurt a. M. in Relation zu bestehenden Netzgebieten und Netzpotenzialgebieten

Nutzung der Abwärme aus dem Abwasser

Überblick Methodik:

- Ausgangspunkt sind die beiden Kläranlagen-Standorte Griesheim/Niederrad und Sindlingen. Berechnet wird das Wärmepotenzial im Auslass der Anlage, da dies die Prozesse in der ARA nicht beeinflusst.
- Das theoretische Potenzial ergibt sich aus:
 - Minimale Trockenwetterabflussmenge und Abkühlung um ΔT
- Rechtliche Rahmenbedingungen:
 - Standort am Betriebsgelände der Abwasser-Reinigungs-Anlage (ARA)
- Technische Einschränkungen / Möglichkeiten:
 - Stündliches Temperaturprofil des Abwassers im Auslass
 - Trockenwetter-Abflussmenge
 - Temperaturabsenkung ΔT
 - Größe der Anlage
 - Durchschnittliche COPs der Wärmepumpen für die Ausweisung des Potenzials mit 3,4 angenommen
 - Die Temperaturabhängigkeit des COP der Wärmepumpen wird in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung berücksichtigt (siehe Kapitel 6.3)

Zentrale Datenquellen:

- Trockenwetter-Abflussmengen und Temperaturschwankungen des Abwassers aus (ECO.S, 2018)

Die folgende Tabelle 14 fasst die zentralen Daten sowie das berechnete Potenzial aus der Nutzung der Abwärme im Auslass der Frankfurter ARAs zusammen.

Tabelle 14: Überblick des technischen Potenzials zur Abwärmennutzung in den Kläranlagen in der Stadt Frankfurt a M. (Quelle: (ECO.S, 2018) und eigene Annahmen)

Abwasserreinigungsanlage	Griesheim / Niederrad	Sindlingen
Trockenwetter-Mindest-Durchflussmenge [l/s]	1 800	400
Abkühlung [K]	5	5
Entzugsleistung [MW]	37,6	8,4
Wärmeleistung Wärmepumpen [MW]	53,2	11,8

Energetische Nutzung von Klärschlamm

Der in den drei Kläranlagen anfallende Klärschlamm wird zentral in der ARA Sindlingen thermisch verwertet. Über eine 11,5 km lange Druckschlammleitung wird der Klärschlamm der Anlagen in Niederrad und Griesheim in die Anlage Sindlingen gepumpt. In den bestehenden Verbrennungslinien wird sowohl Strom als auch Wärme für die Anlage Sindlingen erzeugt. Die in den 1980er Jahren errichtete Anlage wird im Zeitraum 2022 bis 2026 erneuert. Es entstehen Faultürme zur Vergasung des Klärschlammes. Das produzierte Methan wird anschließend in einem BHKW genutzt. Die erzeugte Wärme wird den Faultürmen zur Trocknung des Klärschlammes sowie den Betriebsgebäuden am Gelände zur Bereitstellung von Raumwärme zugeführt. Der erzeugte Strom soll ebenfalls direkt in der Anlage Sindlingen genutzt werden. (SEFm, 2023)

Da in der geplanten Modernisierung der Klärschlamm-Nutzung in der ARA Sindlingen die gesamte Abwärme im Betrieb genutzt werden soll, steht dieses Potenzial nicht für die Wärmeversorgung der Gebäude in Frankfurt am Main zur Verfügung. Somit werden diese Energiemengen bzw. Leistungen in der Analyse nicht weiter betrachtet.

5.2.4 Flusswasser

Überblick Methodik:

- Das theoretische Potenzial ergibt sich aus:
 - Mindestdurchflussmenge und Abkühlung um ΔT
- Rechtliche Rahmenbedingungen:
 - Lt. Oberflächengewässerverordnung (OGewV) darf der Main / die Nidda nach einzelnen Wärmepumpenanlagen um maximal 3 K (im Sommer) bzw. 2 K (Winter) abgekühlt werden.
- Technische Einschränkungen / Möglichkeiten:
 - Stündliches Temperaturprofil des Flusswassers
 - Temperaturabsenkung ΔT
 - Reduktion der Entnahmelistung bei 8°C und Abschaltung der Anlage bei 6°C Quelltemperatur (entsprechend (BAfJ, 2016) und (Peters et al., 2020))
 - Größe und mögliche Standorte Einzelanlagen ▪ nicht komplettes Flusswasser nutzbar
 - Durchschnittliche COPs der Wärmepumpen für die Ausweisung des Potenzials mit 3,4 angenommen
 - Die Temperaturabhängigkeit des COP der Wärmepumpen wird in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung berücksichtigt (siehe Kapitel 6.3)

Zentrale Datenquellen:

- Nutzungseinschränkungen aus der Oberflächengewässerverordnung – OGewV (BAfJ, 2016)
- Stündliches Temperaturprofil von Main und Nidda in Frankfurt a. M. aus (GDB, 2020)

Die folgende Abbildung 15 zeigt das stündliche Temperaturprofil des Main über ein Jahr. Zusätzlich sind die in der Modellierung verwendeten Grenztemperaturen von 8°C zur Leistungsreduktion bzw. 6°C zur Abschaltung der Wärmepumpen eingezeichnet. Die Abbildung verdeutlicht somit, dass die Leistung von Flusswärmepumpen in Frankfurt am Main in den kalten Perioden des Jahres nur reduziert bzw. gar nicht zur Verfügung steht. Dies ist in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung (siehe Kapitel 6.3) berücksichtigt. In der Darstellung des Leistungspotenzials ist dies nicht berücksichtigt.

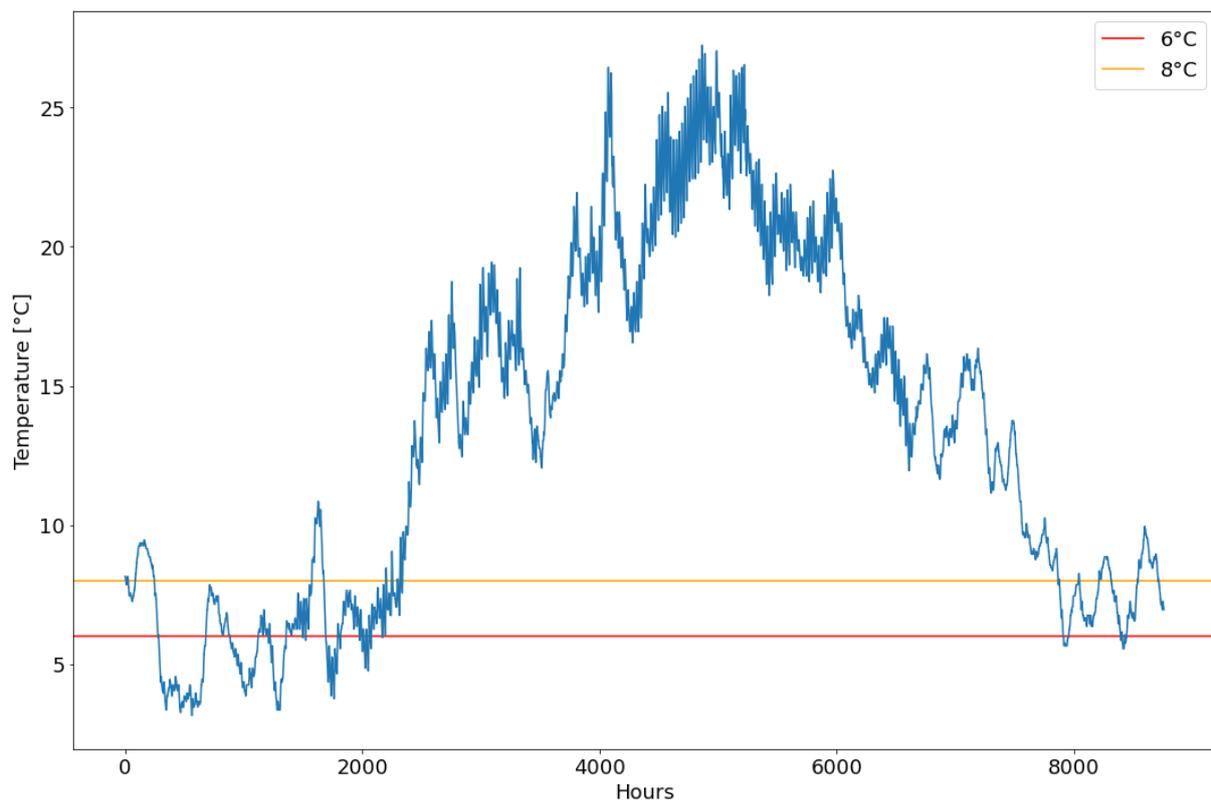


Abbildung 15: Stündlicher Temperaturverlauf des Main und Darstellung des nutzbaren, teilweise nutzbaren und nicht nutzbaren Temperaturbereichs (Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (GDB, 2020))

Die folgende Tabelle 15 zeigt die berechneten Leistungspotenziale für Flusswärmepumpen entsprechend der dargestellten Methodik. Dabei werden 12 Wärmepumpen-Standorte im Main und 2 Standorte in der Nidda angesetzt. Gesamt ergibt sich eine Leistung ab Wärmepumpe von 250 MW. Abbildung 16 zeigt mögliche Standorte für die Wärmepumpen in der Nähe vorhandener bzw. potenzieller Fernwärmenetze.

Tabelle 15: Überblick technisches Potenzial Flusswärmepumpen (Quelle: (ECO.S, 2018) und eigene Annahmen)

Fluss	Main	Nidda
Jahresmindestdurchflussmenge [l/s]	62 100	2 800
Anzahl Wärmepumpen	12	2
Entzugsleistung je Standort [MW]	14,1	3,5
Wärmeleistung je Wärmepumpe [MW]	20	5
Gesamtleistung Wärmepumpen [MW]	240	10

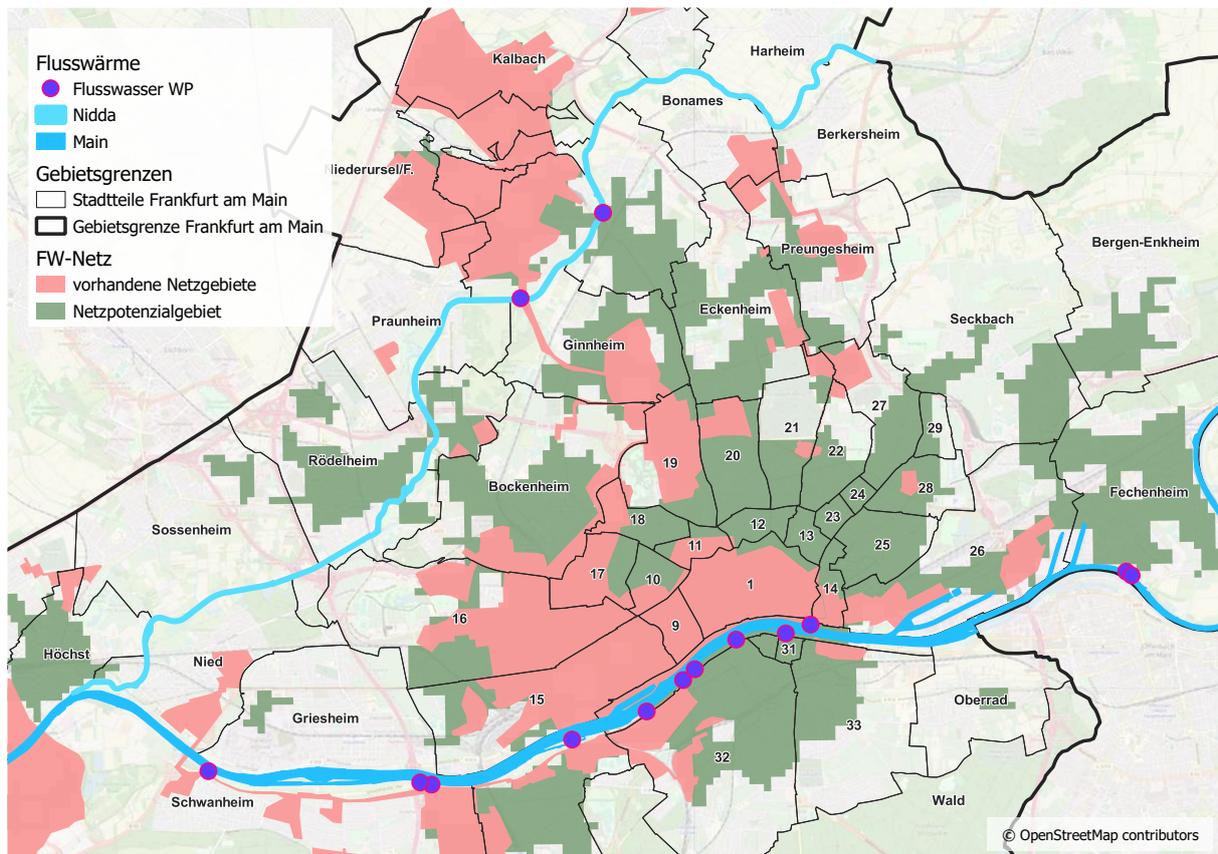


Abbildung 16: Verortung möglicher Anlagen zur Nutzung der Wärme des Flusswassers aus Main und Nidda (Quelle: eigene Darstellung)

5.2.5 Rechenzentren

Überblick Methodik:

- Das theoretische Potenzial ergibt sich aus:
 - IT-Anschlussleistung bzw. vorhandener Serverfläche
 - Für bestehende bzw. geplante Rechenzentren (RZ) wird die bestehende bzw. geplante IT-Anschlussleistung als Basis verwendet
- Rechtliche Rahmenbedingungen:
 - Derzeit werden sowohl auf EU als auch nationaler Ebene Vorschriften im Bereich Energieeffizienz diskutiert und verhandelt, welche die Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren erleichtern bzw. verpflichten soll
- Technische Einschränkungen / Möglichkeiten:
 - Abschätzung der verfügbaren Leistungen je Rechenzentrumscluster auf Basis Abschlagsfaktoren gegenüber IT-Anschlussleistung
 - Lastprofil der Abwärme: Das Strombedarfsprofil der Rechenzentren wird als konstant angenommen, auch die zur Verfügung stehende Abwärmeleistung wird als konstant angenommen
 - Die Temperatur der Abwärme wird mit 30°C sowohl für bestehende als auch für geplante Rechenzentren angenommen. Die Annahme ist hier, dass jedenfalls ein Wärmetauscher in das vorhandene Ventilationssystem eingebaut werden kann. Diese Temperatur wird als ganzjährig konstant angenommen.
 - Die im Durchschnitt erreichbaren wärmebezogenen COPs der Wärmepumpen werden mit 3 angenommen¹⁰

Zentrale Datenquellen:

- Daten zu bestehenden Anlagen inklusive Abschätzung der nutzbaren Abwärmeleistung aus (ECO.S, 2018)
- Geplante Standorte und voraussichtliche IT-Anschlussleistungen It. (Stadt Frankfurt a. M., 2022b)

¹⁰ Der COP von Wärmepumpen errechnet sich über das Verhältnis aus nutzbarer thermischer Leistung und eingesetzter Antriebsleistung. Da beim Einsatz von Wärmepumpen zur Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren nicht nur die Wärmeleistung (z.B. in der Fernwärme) genutzt wird, sondern auch die Kälteleistung im Rechenzentrum, werden normalerweise beide thermischen Leistungen in der Berechnung des COP berücksichtigt. In der vorliegenden Analyse wird aufgrund der betrachteten Systemgrenze der COP rein auf Basis der nutzbaren Wärmeleistung im Fernwärmenetz herangezogen.

Im gesamten Frankfurter Stadtgebiet werden in der vorliegenden Arbeit 9 Rechenzentren-Cluster identifiziert. Gesamt wird in diesen Clustern mittelfristig eine IT-Anschlussleistung von ca. 1 360 MW vorhanden sein. Erfahrungsgemäß wird aber nicht die gesamte IT-Anschlussleistung ständig eingesetzt. Auch kann in Ventilationssystemen nicht die komplette Wärmemenge rückgewonnen bzw. die komplette Kühlleistung über die Abwärmenutzung bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist auch nicht damit zu rechnen, dass alle Rechenzentren eines Clusters an die Fernwärme angeschlossen werden können, z.B. aufgrund baulicher oder organisatorischer Einschränkungen. Vereinfacht wird daher angenommen, dass etwa 10 bis 25% der IT-Anschlussleistung in einem Cluster mittelfristig als Wärmeleistung in die Fernwärme eingebunden werden kann. Damit ergibt sich ein technisches Potenzial von insgesamt 188 – 490 MW ab Wärmepumpe (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Technisches Wärmeleistungspotenzial aus Rechenzentrums-Abwärme in der Stadt Frankfurt a. M. (Quelle: Eigene Analyse)

Rechenzentren-Cluster	Geschätzte zu erwartende IT-Leistung [MW]	Daraus abgeleitete Wärmeleistung Wärmepumpe min – max [MW]
1	120	17 – 43
2	200	28 – 72
3	50	7 – 18
4	150	21 – 54
5	90	13 – 32
6	150	21 – 54
7	150	21 – 54
8	300	42 – 108
9	150	21 – 54
Gesamt	1 360	188 – 490

Die folgende Abbildung 17 zeigt bestehende Rechenzentren-Cluster in der Stadt Frankfurt am Main zusammen mit vorhandenen Netzgebieten und Netz-Potenzialgebieten, so wie sie in der vorliegenden Analyse identifiziert wurden.

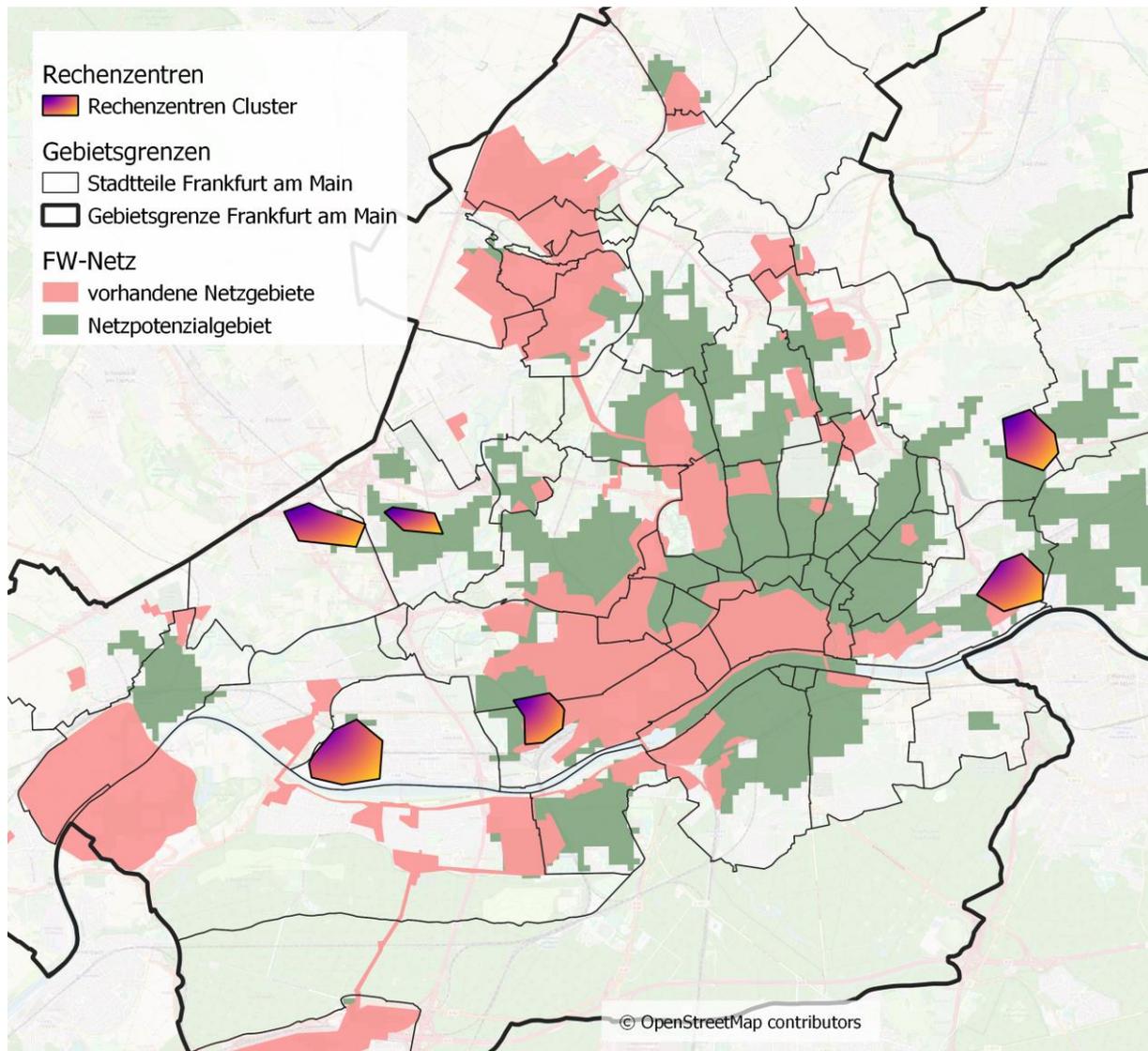


Abbildung 17: Verortung bestehender Rechenzentren-Cluster im Stadtgebiet von Frankfurt a. M. zusammen mit vorhandenen Netzgebieten und Netz-Potenzialgebieten (Quelle: eigene Darstellung)

5.2.6 Abwärme aus Industrieanlagen

Überblick Methodik:

- Betrachtet werden die im Abwärmekataster der Stadt Frankfurt a. M. identifizierten Anlagen
- Für Abwärme auf einem Temperaturniveau, welches eine direkte Einspeisung in die Fernwärme nicht ermöglicht, wird eine Temperaturerhöhung mittels Wärmepumpe angesetzt

Zentrale Datenquellen:

- Abwärmekataster der Stadt Frankfurt a. M. (ECO.S, 2018)

Die Potenziale von Abwärme aus Industrieanlagen in Frankfurt am Main wurden im Rahmen der Studie von (ECO.S, 2018) zum Abwärmekataster erhoben. Dabei wurden mögliche Abwärmequellen in den drei Industrieparks Höchst, Griesheim und Cassella analysiert.

Nutzbare Abwärmepotenziale im Industriepark Höchst im Westen von Frankfurt am Main wurden in den folgenden Anlagen identifiziert: Rauchgas im Heizkraftwerk (HKW), Rauchgas in der Ersatzbrennstoffanlage (EBA) und in der Klärschlammverbrennungsanlage, sowie der Ablauf aus der Abwasserreinigungsanlage (ARA). Die Temperaturen der Abwärme des Rauchgases liegen dabei über 100°C, der Ablauf aus der ARA zwischen 25 und 35°C. Alle Abwärmeströme liegen ganzjährig konstant vor. Für eine mögliche Nutzung in der Fernwärme werden die Abwärmeströme aus den Rauchgasen als direkte Nutzung ohne Temperaturerhöhung angenommen, der Ablauf aus der ARA könnte mittels einer Wärmepumpe auf Netztemperatur angehoben und eingespeist werden. Gesamt ergibt sich ein Wärmepotenzial zur möglichen Einspeisung in die Fernwärme von 26 MW aus dem Industriepark Höchst.

Die identifizierten Abwärmepotenziale aus dem Industriepark Griesheim von knapp 7 MW aus dem Heizwerk und der Kläranlage sind mittlerweile nicht mehr einsetzbar. Der Industriepark Griesheim wurde in der Zwischenzeit zu einem Gewerbegebiet umgestaltet, und das Heizwerk sowie die Kläranlage wurden eingestellt. Stattdessen befindet sich auf dem Gelände mittlerweile ein Rechenzentrum, welches als potenzielle Abwärmequelle in Kapitel 5.2.5 berücksichtigt wurde.

Im Industriepark Cassella im Osten von Frankfurt am Main wurden nutzbare Abwärmepotenziale im Kühlwasser des Heizwerks (HW) sowie aus dem Ablauf der Kläranlage identifiziert. Beide Abwärmeströme liegen ganzjährig konstant vor, wobei die Temperaturen im Winter niedriger sind als im Sommer. Es wird angenommen, dass eine Nutzung mittels Wärmepumpe ganzjährig möglich ist mit einem durchschnittlichen COP von 3,4. Daraus ergibt sich eine potenzielle Wärmeleistung von 14 MW zur Einspeisung in die Fernwärme.

5.2.7 Müllverbrennung

Der Hausmüll der Stadt Frankfurt am Main wird derzeit im Müllheizkraftwerk Nordweststadt energetisch genutzt. Neben Dampf- und Heizwasserkesseln sind in der Anlage auch Dampfturbinen zur Stromerzeugung installiert. Die bestehende Anlage wurde in den Jahren vor der Corona-Pandemie mit energetischen Nutzungsgrade von etwa 50% betrieben. Die Verhältnis Wärme zu Strom in der energetischen Nutzung variierte dabei im Bereich zwischen 0,97 und 1,86. (ifeu, 2021, 2020)

Unter der Annahme, dass nur noch minimal Strom in der Anlage produziert wird, die derzeit installierte thermische Leistung bestehen bleibt und dass die Müllmengen nur leicht zurückgehen, könnte langfristig eine thermische Leistung von 120 MW nutzbar sein.

5.2.8 Biomasseverbrennung

In dieser Studie wurde unterstellt, dass Biomasse lediglich im Rahmen des derzeitigen Ausbauplanes des Biomassekraftwerkes Fechenheim für die Fernwärmeerzeugung verwendet wird. Dieser sieht vor, die derzeitige maximale thermische Ausgangsleistung von 27 MW (Feuerungswärmeleistung 44 MW und Stromauskoppelung von 12 MW) auf 40 MW thermische Ausgangsleistung zu erhöhen. Ein damit einhergehender Biomassebedarf liegt über dem innerstädtischen Potenzial an thermischer Bereitstellung aus fester Biomasse (132 GWh/a) aber unter dem regionalen Potenzial an thermischer Bereitstellung aus fester Biomasse (492 GWh/a) lt. Analysen zum Masterplan 100% der Stadt Frankfurt am Main (Stryi-Hipp et al., 2015).

5.2.9 Potenzial saisonaler Wärmespeicher

Überblick Methodik:

- Als zentrales Konzept in der Analyse werden Erdbeckenspeicher (Pit Thermal Energy Storages – PTES) betrachtet
 - Die Nutzung von saisonalen Bohrlochspeichern (Borehole Thermal Energy Storage – BTES) wird bereits in der Nutzung oberflächennaher Geothermie im Rahmen der Regeneration inkludiert.
 - Ob eine saisonale Speicherung im vermuteten Aquifer unter der Stadt möglich ist, ist derzeit noch nicht geklärt.
 - PTES bieten höhere Ein- und Ausspeiseleistungen als BTES. Durch das sehr beschränkte Platzangebot in Frankfurt a. M. wird angenommen, dass nur entweder BTES oder PTES umgesetzt werden kann
- Größtes bisher detailliert geplantes PTES-Projekt ist Big Solar Graz (BMVIT, 2016)
 - 1,8 Mio. m³ Wasser, ca. 6 ha Flächenbedarf
 - Speicherkapazität ca. 100 – 150 GWh
 - Ein-/Ausspeicherleistung von 100 – 200 MW
- Annahme: bis 2045 lassen sich zwei Projekte in der Größenordnung von Big Solar Graz in Frankfurt am Main umsetzen
- Die in der Modellierung verwendeten Technologie- und Kostendaten zu saisonalen Speichern sind in Kapitel 6.3 dargestellt

6. Wärmewende-Szenarien für die Gebäude in Frankfurt a. M.

Auf Basis des erhobenen Bestandes und der analysierten Potenziale wurden schrittweise Wärmewende-Szenarien für die Stadt Frankfurt am Main bis 2035 und 2045 erarbeitet. Zunächst wurden Szenarien zur Senkung des Wärmebedarfs erstellt. Darauf aufbauend wurden potenzielle Eignungsgebiete für Wärmenetze identifiziert. Im nächsten Schritt erfolgte eine Untersuchung verschiedener Varianten zur Aufbringung der Fernwärme in den identifizierten Gebieten, sowie die Analyse dezentraler Optionen zur Wärmebereitstellung. In den einzelnen Schritten wurden zahlreiche unterschiedliche Varianten analysiert und diskutiert. Als letzter Schritt wurden potenziell sinnvolle Varianten der einzelnen Analyseschritte miteinander kombiniert, um daraus stadtweite Wärmewende Szenarien abzuleiten.

6.1. Szenarien zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden bis 2035 und 2045

Überblick Methodik:

- Basis für die Entwicklung der Szenarien bis 2035 und 2045 sind die Kosten-Potenzial-Berechnungen, so wie sie in Kapitel 5.1 dargestellt sind
- Auswahl eines langfristigen Zielszenarios, und damit der jeweils sinnvollsten Sanierungsvariante je archetypischem Gebäude: als Zielszenario wurde das Szenario mit langfristig 50% Einsparungen am Nutzenergiebedarf zur Bereitstellung von Raumwärme der bestehenden Gebäude ausgewählt.
- Definition von Sanierungsraten (historisch und zukünftig) für verschiedene archetypische Gebäude (Gebäudetyp und Baualterklasse). Für zukünftig mögliche Sanierungsraten werden zwei Szenarien definiert: BAU und AMB (itioniert).
- Annahme, dass historische Sanierungen zu geringeren Einsparungen führten als die Zielsanierungen lt. Kosten-Potenzial-Berechnungen; die Gebäude müssen daher noch einmal saniert werden, um die entsprechenden Einsparungen zu erreichen. Die Annahme ist, dass die durchschnittlichen Einsparungen bei historischen Sanierungen 35% gegenüber dem Ausgangszustand betragen.
- Jährlicher Gebäudeabriss wird berücksichtigt, Daten stammen aus der Invert-Modellierung im der Zuge Kosten-Potenzial-Berechnungen
- Zuwachs der Flächen anhand Bevölkerungsentwicklung nach Stadtteilen (siehe Kapitel 3.3)
- Neubau wird mit Effizienzhausstandard 40 errichtet

Zentrale Datenquellen:

- Ergebnisse der Berechnungen mit „Invert – Effizienzpotenziale“, so wie in Kapitel 5.1 dargestellt
- Daten zu historischen Sanierungsraten und Qualitäten aus der Datenerhebung zum Wohngebäudebestand in Hessen (Cischinsky and Diefenbach, 2018)

Im BAU-Szenario werden gleiche Sanierungsraten für Einfamilienhäuser (EFH), Mehrfamilienhäuser (MFH) und Nichtwohngebäude (NWG) angenommen. Für Gebäude errichtet in und nach den 1980er Jahren werden ebenfalls gleiche Sanierungsraten angenommen, unabhängig davon, wo sie verortet sind. Laut (Cischinsky and Diefenbach, 2018) lag die aktuelle durchschnittliche Sanierungsrate für Wohngebäude in Hessen im Zeitraum zwischen 2010 und 2016 bei 1%. Dies wird für das BAU-Szenario in die Zukunft fortgeschrieben. Im AMB-Szenario wurden erhöhte Sanierungsraten unterstellt. Für neuere Gebäude (errichtet in den 1980er Jahren und danach) werden stufenweise geringere Sanierungsraten berücksichtigt. In denkmalgeschützten Gebieten wird nur die Hälfte der Rate angesetzt, welche in anderen Gebieten für ältere Gebäude angenommen wird. Im Gegensatz dazu werden in Gebieten mit überwiegend öffentlichem Wohnungsbau höhere Raten berücksichtigt. Die in der Modellierung verwendeten Daten sind in den Tabellen Tabelle 17 und Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 17: Sanierungsraten für das BAU-Szenario

Bauperiode	Szenario: BAU		
	öffentlicher Wohnbau	Sonstige	Regionen mit Denkmalschutz
Vor 1980	1,33%		50% der Rate in anderen Gebieten
1980 - 1990	1%		
1990 - 2000			
Nach 2000			

Tabelle 18: Sanierungsraten für das AMB-Szenario

Bauperiode	Szenario: AMB		
	öffentliche Wohnbau	Sonstige	Regionen mit Denkmalschutz
Vor 1980	EFH: 2,5% MFH: 2,7% NWG: 2,3%	WG: 2,5% NWG: 2,3%	50% der Rate in anderen Gebieten
1980 - 1990	80% der Rate der Bauperiode "Vor 1980"		
1990 - 2000	60% der Rate der Bauperiode "Vor 1980"		
Nach 2000	25% der Rate der Bauperiode "Vor 1980"		

EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, NWG: Nicht-Wohngebäude, WG: Wohngebäude

Die folgende Tabelle 19 zeigt die in der Modellierung verwendeten Annahmen zu den Anteilen bereits historisch sanierter Gebäude in den verschiedenen Baualtersklassen. Diese Daten wurden aus (Cischinsky and Diefenbach, 2018) abgeleitet.

Tabelle 19: Annahmen zum Anteil bereits sanierter Gebäude nach Bauperiode und Gebiet

Baujahr der Gebäude	Gebiete mit öffentlichem Wohnbau	Alle anderen Gebiete
Bis 1948	66%	33%
1949-1968	44%	35%
1969-1978	31%	26%
1979-1990	21%	11%
1991-1999	16%	11%
2000-2010	2%	2%

Quelle: (Cischinsky and Diefenbach, 2018), eigene Berechnungen und Annahmen

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- Diagramm: Szenarien zur Senkung des Wärmebedarfs in Gebäuden in Frankfurt a. M. bis 2035 und 2045
- Diagramm: Durchschnittliche jährliche Investitionskosten für Gebäudesanierung und Investitionskosten pro sanierter Bruttogeschossfläche

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Tabelle:** Notwendige durchschnittliche jährliche Sanierungsraten nach Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (Tabelle 20)
- **Karten:** Verteilung des Wärmebedarfs und der Investitionskosten auf die Gebiete in der Stadt (Abbildung 18)

Die folgende Tabelle 20 zeigt die durchschnittlichen jährlichen Sanierungsraten in den Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden in der Stadt, welche in den Szenarien hinterlegt ist. Die Werte stellen dabei das gewichtete Mittel aus den angenommenen Sanierungsraten je archetypischen Gebäuden über den gesamten Szenarien-Zeitraum dar.

Tabelle 20: Durchschnittliche jährliche Sanierungsraten in den berechneten Szenarien

	BAU	AMB
Wohngebäude	1,08%	2,00%
Nichtwohngebäude	0,94%	1,40%
Alle Gebäude	1,02%	1,72%

Die folgende Abbildung 18 zeigt verschiedene Dichtekarten für das Stadtgebiet von Frankfurt am Main, welche sich aus den Szenarienrechnungen ergeben. Bei den drei Karten in der linken Spalte handelt es sich um Wärmedichtekarten: dargestellt sind der Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser in den Gebäuden auf Ebene einzelner Hektarelemente für die Jahre 2035 und 2045 in den Szenarien BAU (nur 2035) und AMB. Die drei Dichtekarten in der mittleren sowie in der rechten Spalte zeigen die Sanierungskosten auf Ebene einzelner Hektarelemente. Die Karten in der mittleren Spalte zeigen dabei die gesamten Kosten, die drei Karten in der rechten Spalte zeigen nur die energetischen Zusatzkosten (EZK). Auch in dieser Abbildung zeigt sich der markante Unterschied zwischen den EZK und den Gesamtkosten. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass im Stadtzentrum zum einen deutlich höhere Dichten an Wärmebedarf auftreten, auch nach umgesetzten Sanierungsmaßnahmen, sowie auch deutlich höhere Sanierungsausgaben anfallen, gegenüber den äußeren Stadtteilen.

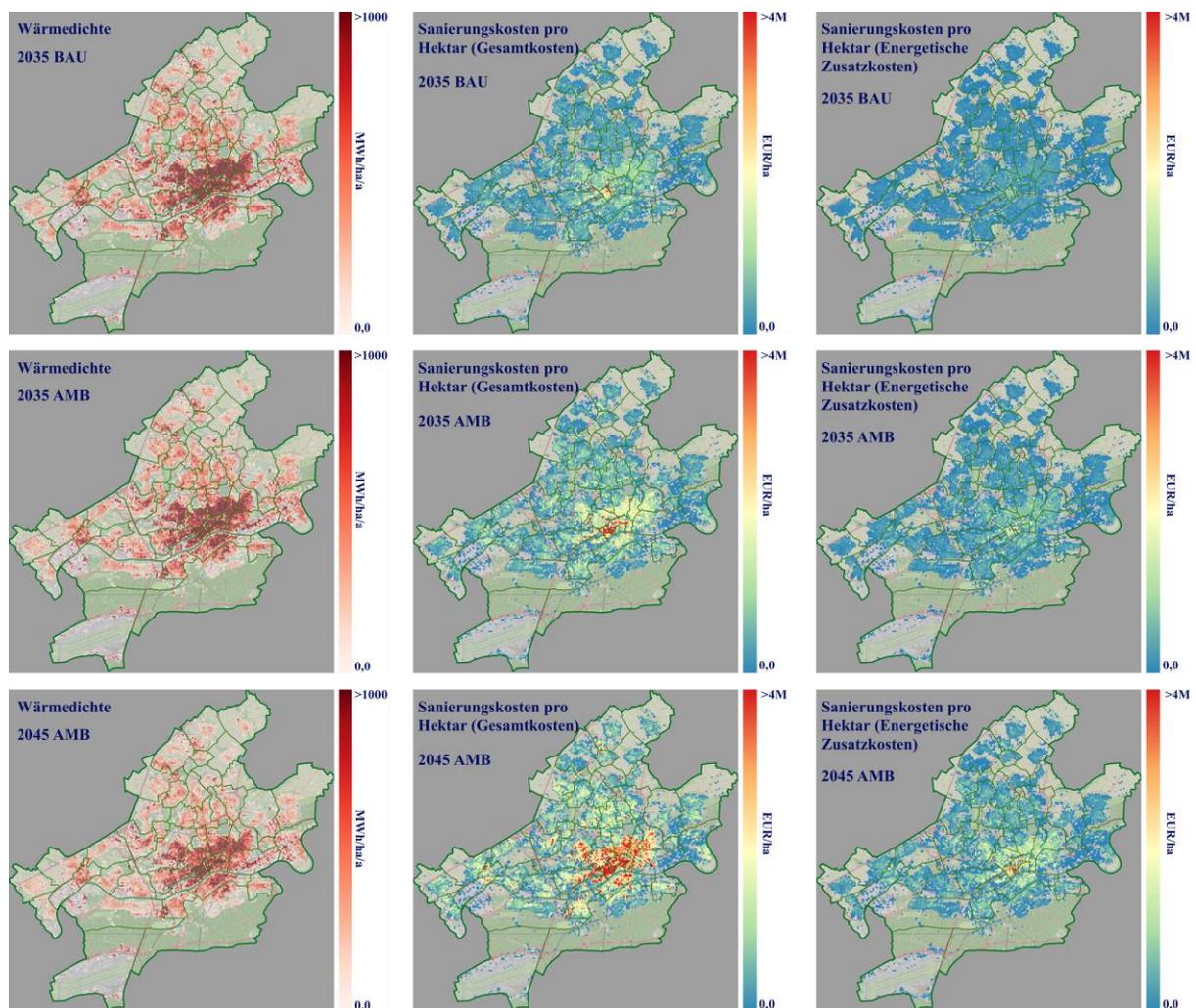


Abbildung 18: Verteilung des Wärmebedarfs und der Investitionskosten in Sanierungsmaßnahmen (Gesamtkosten bzw. energetische Zusatzkosten) auf die Gebiete der Stadt für die drei berechneten Szenarien (2035 BAU, 2035 AMB und 2045 AMB)

6.2. Identifikation von Eignungsgebieten für Wärmenetze

Überblick Methodik:

- Die Identifikation von potenziellen Eignungsgebieten für Wärmenetze zur Versorgung des thermischen Energiebedarfs der Gebäude erfolgt über die Abschätzung von durchschnittlichen Wärmeverteilungskosten (\emptyset WVK) in unterschiedlichen Gebieten der Stadt. Die Festsetzung von maximal zulässigen \emptyset WVK in der gesamten Stadt ergibt dann Gebiete, die potenziell für Wärmenetze geeignet sein könnten.
- Die geografische Auflösung für die Berechnungen ist 100 x 100 m. \emptyset WVK werden für jeden ha berechnet.
- Basis sind die Wärmebedarfsdichtekarten sowie die Geschossflächendichtekarten, die in vorhergehenden Schritten erarbeitet wurden (siehe Kapitel 6.1).
- Zentrales Konzept zur Abschätzung der Investitionskosten in die Fernwärmeleitungen je ha ist die lineare Wärmedichte. Das dabei eingesetzte Fernwärme-Ausbau-Modell wurde im Rahmen des EU-Projektes „Hotmaps“ entwickelt und in Folgeprojekten weiterentwickelt. Details zur Methodik finden sich in (Fallahnejad et al., 2018) und (Büchele et al., 2021)
- Identifizierte Gebiete mit einem jährlichen Fernwärme-Absatz-Potenzial von unter 5 GWh werden in der Analyse ausgeschlossen, da angenommen wird, dass diese nicht wirtschaftlich erschließbar sind.
- Zahlreiche Varianten mit unterschiedlichen Eingangsparametern werden mit dem Modell gerechnet, um Sensitivitäten aufzuzeigen.
- Mit der Stadt abgestimmte Parameter werden dann verwendet, um Fernwärme-Potenzialgebiete zu identifizieren und auszuweisen.

Zentrale Datenquellen:

- Kostendaten zum Bau von Fernwärmeleitungen werden aus drei verschiedenen Quellen herangezogen: Daten bereitgestellt von der Mainova AG (Mainova, 2023), Daten aus der Machbarkeitsstudie für ein Fernwärme-Netz in Sossenheim (GITA, 2023), sowie Daten aus den Untersuchungen im Rahmen des Projekts Hotmaps (Fay et al., 2020)
- Die verwendeten Kostendaten zum Bau der Leitungen beziehen sich auf eine Standardverlegung; d.h. bei Umlegungen, Querungen oder sonstigen Erschwernissen bei der Ausführung, können deutlich höhere Kosten anfallen

Um die Ergebnisse eindeutig nachvollziehen zu können, werden zunächst zentrale Begriffe definiert, so wie sie in der vorliegenden Analyse zu verstehen sind:

Fernwärmegebiete / FW-Gebiete: Unter FW-Gebieten werden in dieser Analyse diejenigen Hektarelemente im Stadtgebiet von Frankfurt am Main verstanden, welche als Ergebnis der Berechnungen mit dem Fernwärme-Ausbau-Modell bei angeführten Eingangsparametern zu definierten Wärmeverteilungskosten versorgt werden könnten. Aus jeder Berechnung mit dem Modell ergeben sich derartige Gebiete.

Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete: Unter diesem Begriff werden Gebiete verstanden, die ebenfalls mit dem Modell berechnet wurden, und nach eingehender Diskussion als potenziell geeignet für die Fernwärme identifiziert wurden. Da es sich um einen vereinfachten, stadtweiten Modellierungsansatz handelt, müssen die hier identifizierten Fernwärme-Potenzialgebiete in weiterer Folge noch genauer geprüft werden.

Marktanteil / Anschlussgrad: Da die Wärmeverteilungskosten und damit die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen stark vom Anteil der angeschlossenen Abnehmer in einem erschlossenen Gebiet abhängt, wird dies in der Modellierung berücksichtigt. Im Modell wird der Anteil des Wärmebedarfs definiert, der in einem erschlossenen Gebiet an die Fernwärme angeschlossen wird, d.h. der Marktanteil je Gebiet. Aus Gründen der Einfachheit wird der Begriff Anschlussgrad in diesem Dokument ebenfalls verwendet, und meint hierbei nicht den Anteil der angeschlossenen Gebäude, sondern den Anteil des angeschlossenen Wärmebedarfs und ist somit ident mit dem Begriff des Marktanteils verwendet.

Die folgende Abbildung 19 zeigt die in der Modellierung eingesetzten Kostendaten zum Bau von Fernwärmeleitungen in der Stadt Frankfurt. Dabei sind zum einen konkrete Datenpunkte dargestellt, so wie sie in den Datenquellen angegeben sind, zum anderen die in der Modellierung verwendete lineare Kostenfunktion.

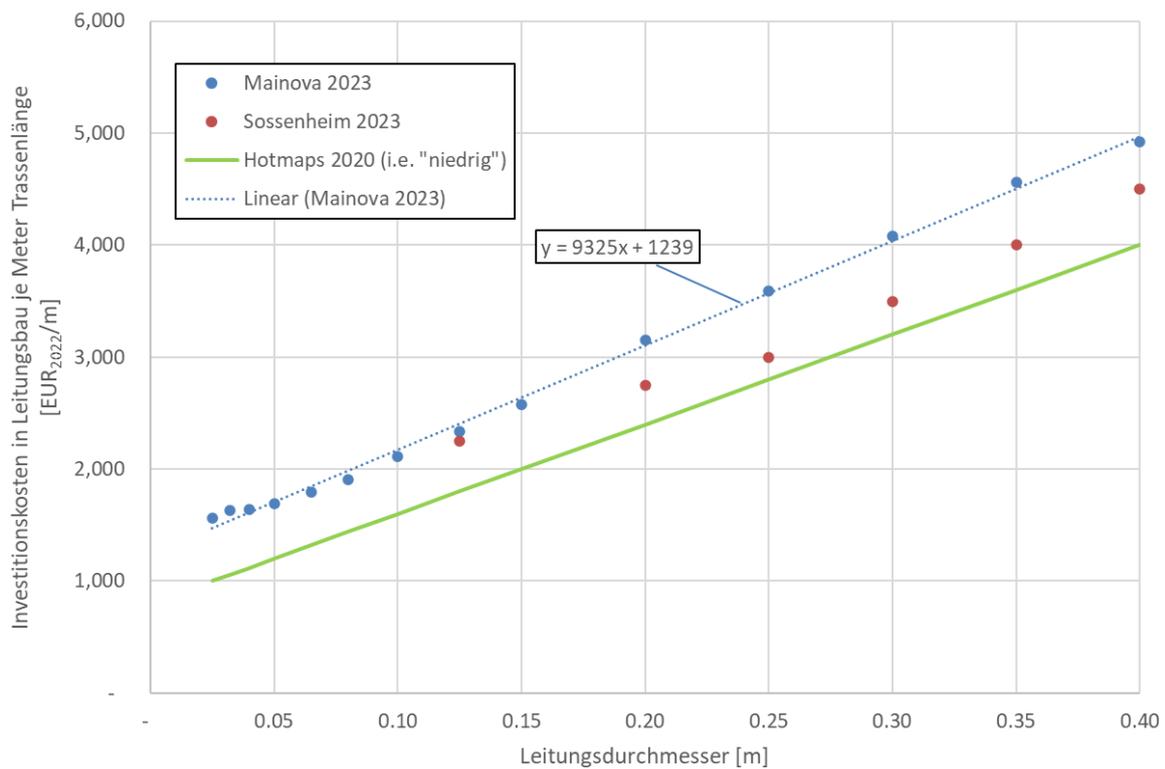


Abbildung 19: Investitionskosten in den Bau von Fernwärmeleitungen in Frankfurt (Quelle: (Mainova, 2023), (GITA, 2023), (Fay et al., 2020))

Potenziell geeignete Gebiete zur Versorgung mit Fernwärme im Stadtgebiet von Frankfurt am Main wurden zunächst mit über 3 000 unterschiedlichen Kombinationen an Eingangsparametern im Modell berechnet. Nach zahlreichen Diskussionen mit dem Auftraggeber und der Mainova AG wurden letztlich 1 620 verschiedenen Kombinationen analysiert. Tabelle 21 zeigt die analysierten Eingangsparameter in das Modell mit den entsprechenden Varianten. Es wurden zwei verschiedene Wärmebedarfsszenarien als Ergebnis der Untersuchungen in Kapitel 6.1 analysiert, zwei verschiedene Kostenkurven zu den Netzausbaukosten (siehe auch Abbildung 19), die beiden Zieljahre 2035 und 2045, drei verschiedene angestrebte Marktanteile von Fernwärme in Fernwärmegebieten, drei verschiedene Abschreibedauern und Zinssätze, sowie 10 verschiedene Obergrenzen für Ø Wärmeverteilungskosten in der Stadt.

Tabelle 21: Analysierte Varianten der Eingangsparameter in das Modell zur Analyse von Eignungsgebieten für Fernwärme in der Stadt Frankfurt a. M.

Parameter	Wert	Einheit	Anzahl an Fällen
Wärmebedarfsszenario	BAU, AMB	-	2
Netzausbaukosten-Konstante & -Koeffizient (C₁, C₂)	(800, 8 000) und (1 239, 9 325)	(EUR/m, EUR/m ²)	2
Zieljahr	2035, 2045 (nur für AMB, nicht für BAU)	-	2
Beginnender FW-Marktanteil in FW-Gebieten	0,33	-	1
Angestrebter FW-Marktanteil in FW-Gebieten	0,55; 0,70; 0,90	-	3
Abschreibedauer	30; 40; 50	Jahre	3
Zinssatz (real)	0,02; 0,05; 0,08	-	3
Obergrenze der Ø Wärmeverteilungskosten (WVK)	26; 28; ...; 44	EUR/MWh	10

Nach eingehender Diskussion der Methodik, der Eingangsparameter, sowie der berechneten Ergebnisse mit dem Auftraggeber sowie der Mainova AG wurden für die Identifikation von Fernwärme-Potenzialgebieten die Parameter in der folgenden Tabelle 22 angesetzt.

Tabelle 22: Modellparameter für die Identifikation von Fernwärme-Potenzialgebieten

Parameter	Wert	Einheit
Wärmebedarfsszenario	AMB	-
Netzausbaukosten-Konstante & -Koeffizient (C₁, C₂)	(1 239, 9 325)	(EUR/m, EUR/m ²)
Zieljahr	2045	-
Beginnender FW-Marktanteil in FW-Gebieten	0,33	-
Angestrebter FW-Marktanteil in FW-Gebieten	0,90	-
Abschreibedauer	40	Jahre
Zinssatz (real)	0,02	-
Obergrenze der Ø Wärmeverteilungskosten (WVK)	34 – 44	EUR/MWh

Berechnung der Netzausbau-Geschwindigkeit und der notwendigen Investitionen

Überblick Methodik:

- Ausgangspunkt sind die Ergebnisse der Berechnungen mit dem Fernwärme-Ausbau-Modell: die gesamt notwendige Länge der Verteilleitungen und der Hausanschlussleitungen sowie der die zugehörigen Investitionskosten je m Trassenlänge
- Die vorhandene Netzlänge wird mit 440 km angesetzt, wovon 300 km als Verteilleitungen und 140 km als Hausanschlussleitungen angenommen wird
- Der jährlich notwendige Netzausbau wird als Differenz zwischen Netzlänge im Zielszenario und derzeit vorhandenem Netz über eine Dauer von 22 Jahren gerechnet (von 2023 bis 2045)
- Zusätzlich werden ca. 5% der Länge des Verteilnetzes als Transportleitungen angesetzt, um weitere Erzeugungsanlagen die evtl. auch weiter vom Versorgungsgebiet entfernt liegen anzuschließen
- Transportleitungen werden in der Berechnung als DN300 mit ca. 4 000 EUR/m angesetzt
- Darüber hinaus werden in der Gegenüberstellung der Wärmebereitstellungskosten von Fernwärme und von dezentralen Versorgungsoptionen die Kosten für zusätzliche Übergabestationen, Rohrverlegung in die Gebäude, Steuerung etc. berücksichtigt. Hierbei wird angenommen, dass die gleichen Kosten auftreten, wie wenn man auf einen Gasanschluss wechselt.

Zentrale Datenquellen:

- Daten zur derzeit vorhandenen Netzlänge der Fernwärmesysteme in Frankfurt a. M. aus dem Geschäftsbericht der Mainova AG von 2021 (Mainova, 2022a)
- Invert Datenbank zu Kosten und Effizienzen von dezentralen Wärmebereitstellungssystemen (Invert, 2023)

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Karte:** Identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete in Abhängigkeit durchschnittlicher Wärmeverteilkosten (ØWVK) im Bereich von 34 – 44 EUR/MWh zur weiteren Prüfung; alleinstehend sowie in Kombination mit bereits vorhandenen Netzgebieten sowie bestehenden und geplanten Rechenzentrum-Clustern
- **Diagramm:** Ausbaugeschwindigkeiten [km/a] und jährliche Investitionen für den Fernwärme-Leitungsbau [Mio. EUR/a] in verschiedenen gerechneten Szenarien mit einer unterstellten Anschlussrate von 90%

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Diagramme:** Sensitivitätsanalyse mit niedrigen Netzausbaukosten und mit Netzausbaukosten nach Mainova AG (Abbildungen Abbildung 20 und Abbildung 21)
- **Karte:** Berechnete Fernwärmegebiete bei maximal 36 EUR/MWh Ø Wärmeverteilkosten in der Stadt Frankfurt a. M. für unterschiedliche Anschlussraten in 2045 (70% vs. 90%) und unterschiedliche Kostenfunktionen zu den Netzausbaukosten (Abbildung 22)
- **Diagramm:** Zusammensetzung der Wärmeverteilkosten in den identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten in 4 ausgewählten Varianten der Obergrenze der ØWVK (Abbildung 23)
- **Diagramm:** Historisch beobachteter durchschnittlicher jährlicher Fernwärme-Trassenausbau in unterschiedlichen Städten in Österreich und Deutschland (Abbildung 24)

Die folgenden Abbildungen Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit dem Fernwärme-Ausbaumodell unter verschiedenen Anschlussraten, Abschreibedauern, Netzausbaukosten sowie Obergrenzen der ØWVK. Die Abbildungen zeigen dabei den Anteil der Wärmeabdeckung durch Fernwärme am gesamten Wärmebedarf der Gebäude im Stadtgebiet Frankfurt am Main, absolute Investitionen in die Netzinfrastruktur, sowie die Trassenlängen des gesamten sich ergebenden Netzes.

Die Abbildungen zeigen die deutliche Abhängigkeit der Netzausdehnung (z.B. Marktanteil FW im Stadtgebiet) von den angesetzten Netzausbaukosten sowie die deutliche Abhängigkeit der ØWVK vom Anschlussgrad (55%, 70% oder 90%). Hohe FW-Marktanteile zu niedrigen Verteilkosten ergeben sich nur im Fall hoher Anschlussgrade.

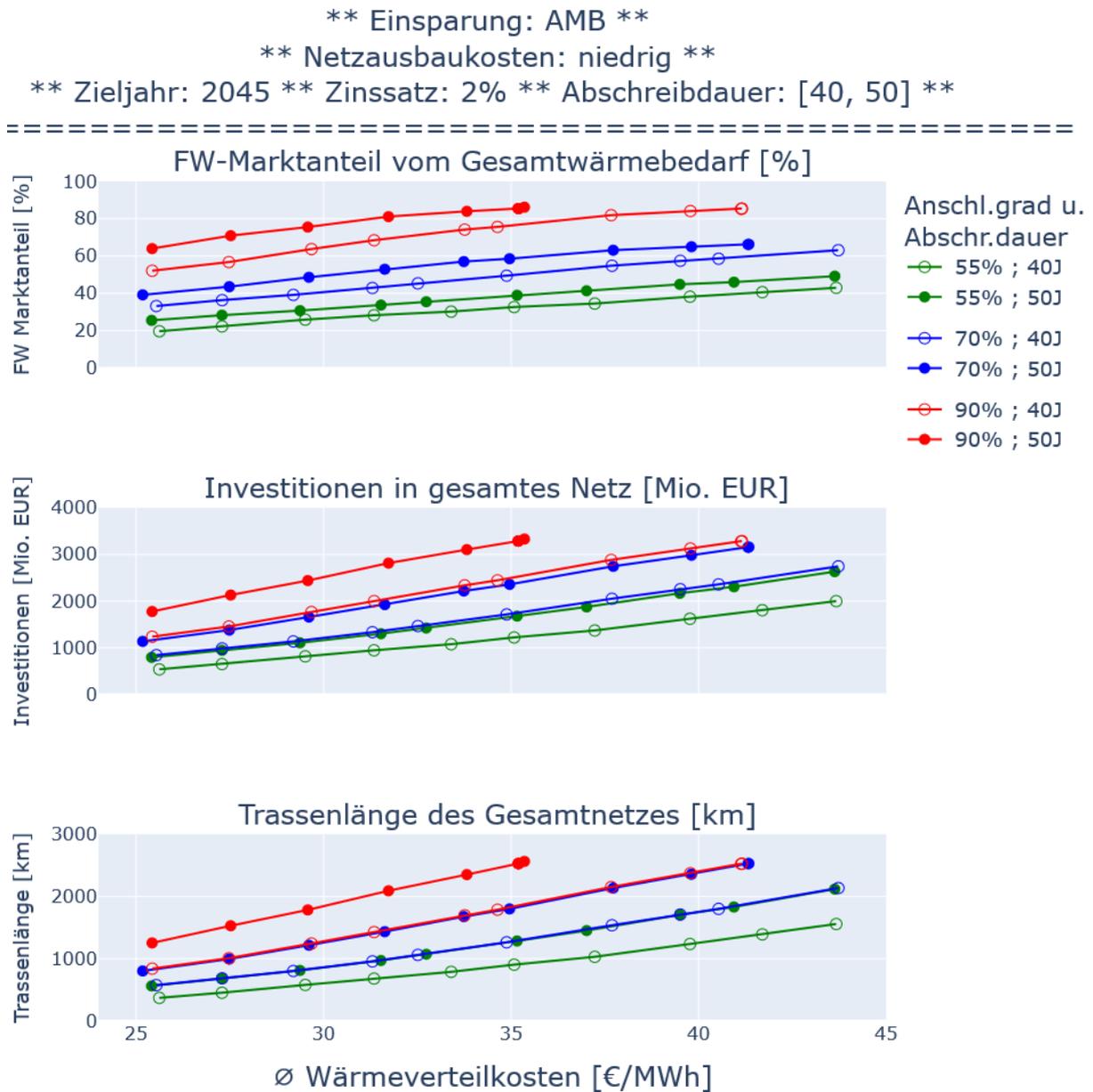


Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse mit dem Fernwärme-Ausbau-Modell – Netzausbaukosten niedrig (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)

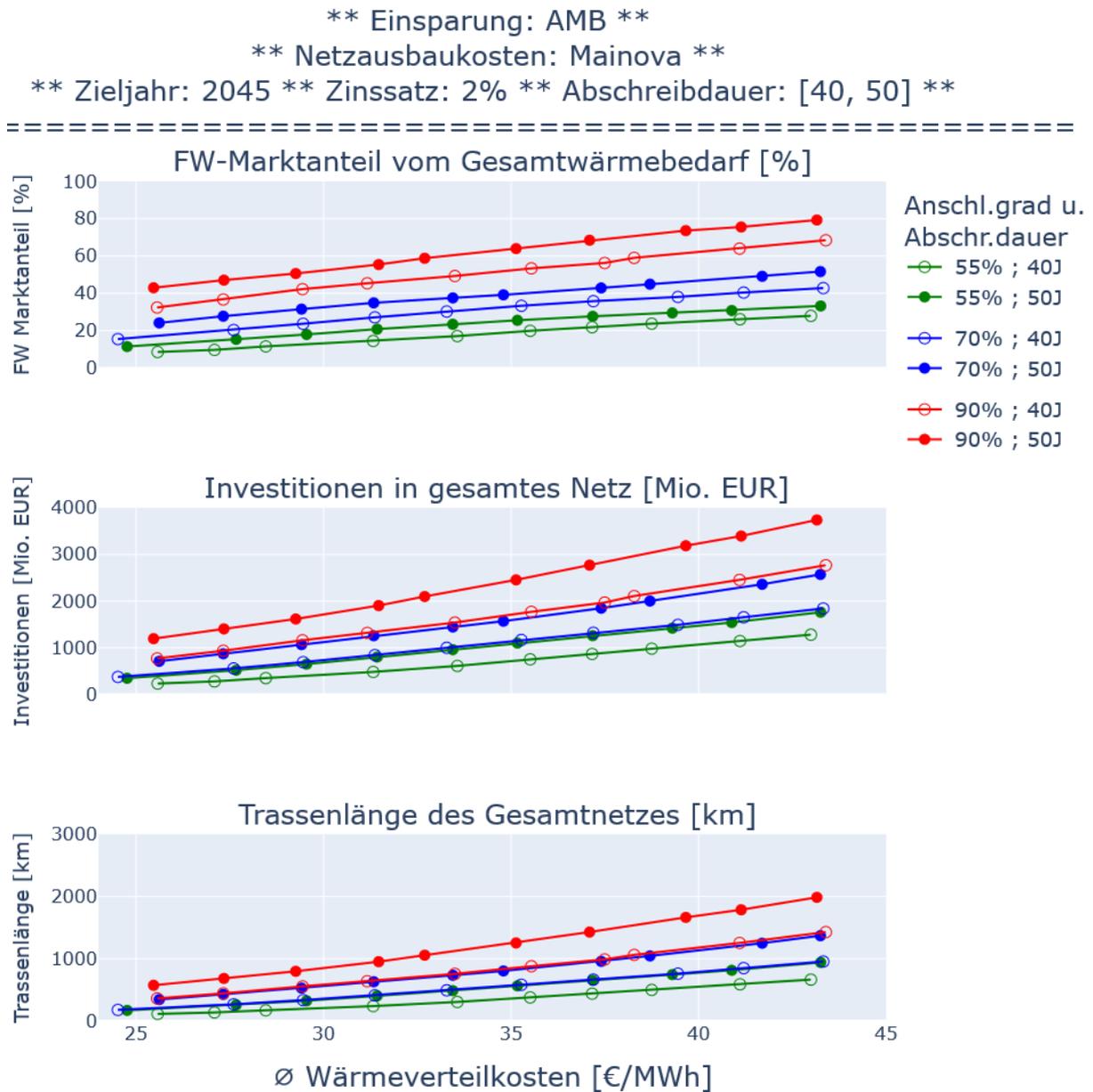


Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse mit dem Fernwärme-Ausbaumodell – Netzausbaukosten Mainova (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)

Die folgende Abbildung 22 zeigt die berechneten Fernwärme-Gebiete im Jahr 2045 bei einem Zinssatz von 2%, Abschreibdauer von 40 Jahren, einer Obergrenze der ØWVK von 36 EUR/MWh in Abhängigkeit des im Jahr 2045 angestrebten Anschlussgrades (70% vs. 90%) sowie der verwendeten Netzausbaukosten (Niedrig vs. Mainova). Auch in dieser Abbildung zeigt sich die deutliche Abhängigkeit der potenziell wirtschaftlichen Netzausdehnung vom Anschlussgrad und von den Netzausbaukosten.

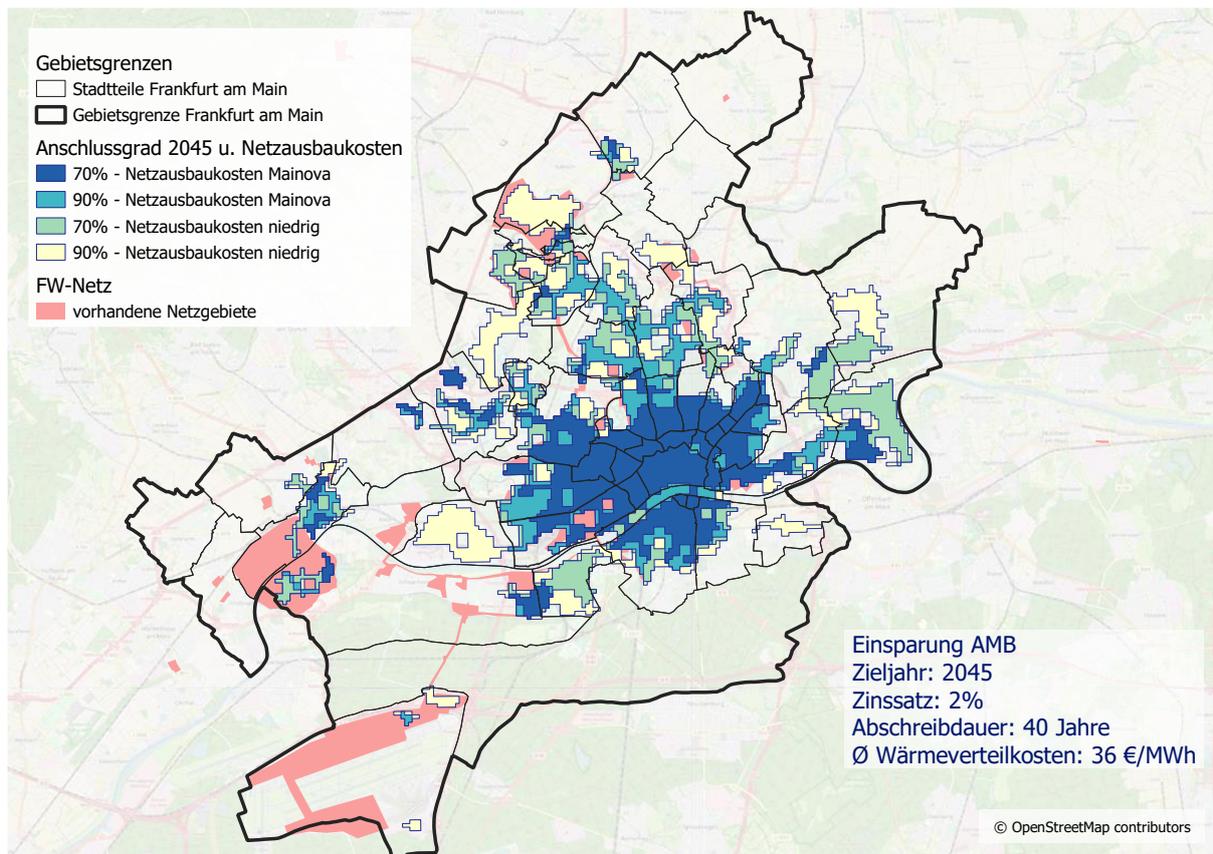


Abbildung 22: Berechnete Fernwärmegebiete bei maximal 36 EUR/MWh Ø Wärmeverteilkosten in der Stadt Frankfurt a. M. für unterschiedliche Anschlussraten in 2045 (70% vs. 90%) und unterschiedliche Kostenfunktionen zu den Netzausbaukosten (Niedrig vs. Mainova)

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass die Ergebnisse eine markante Abhängigkeit hinsichtlich der erzielbaren Marktanteile / Anschlussgrade sowie der maximal zulässigen Ø Wärmeverteilkosten aufweisen. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse eine geringere Abhängigkeit von den unterstellten Einsparungen in den Gebäuden.

Die folgende Abbildung 23 zeigt die Zusammensetzung der Wärmeverteilkosten in den identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten für 4 verschiedene maximal erlaubte ØWVK. Die Anteile werden dabei als Anteile am angeschlossenen Wärmebedarf der Gebäude ausgewiesen. Die Abbildung verdeutlicht zum einen, dass die WVK in einem relevanten Anteil (>50%) der gesamten Fernwärme-Gebiete höher sind als die ØWVK in der gesamten Stadt. Gleichzeitig verdeutlicht sie, dass die Gebiete mit niedrigen WVK eine Erschließung der Gebiete mit höheren WVK ermöglichen.

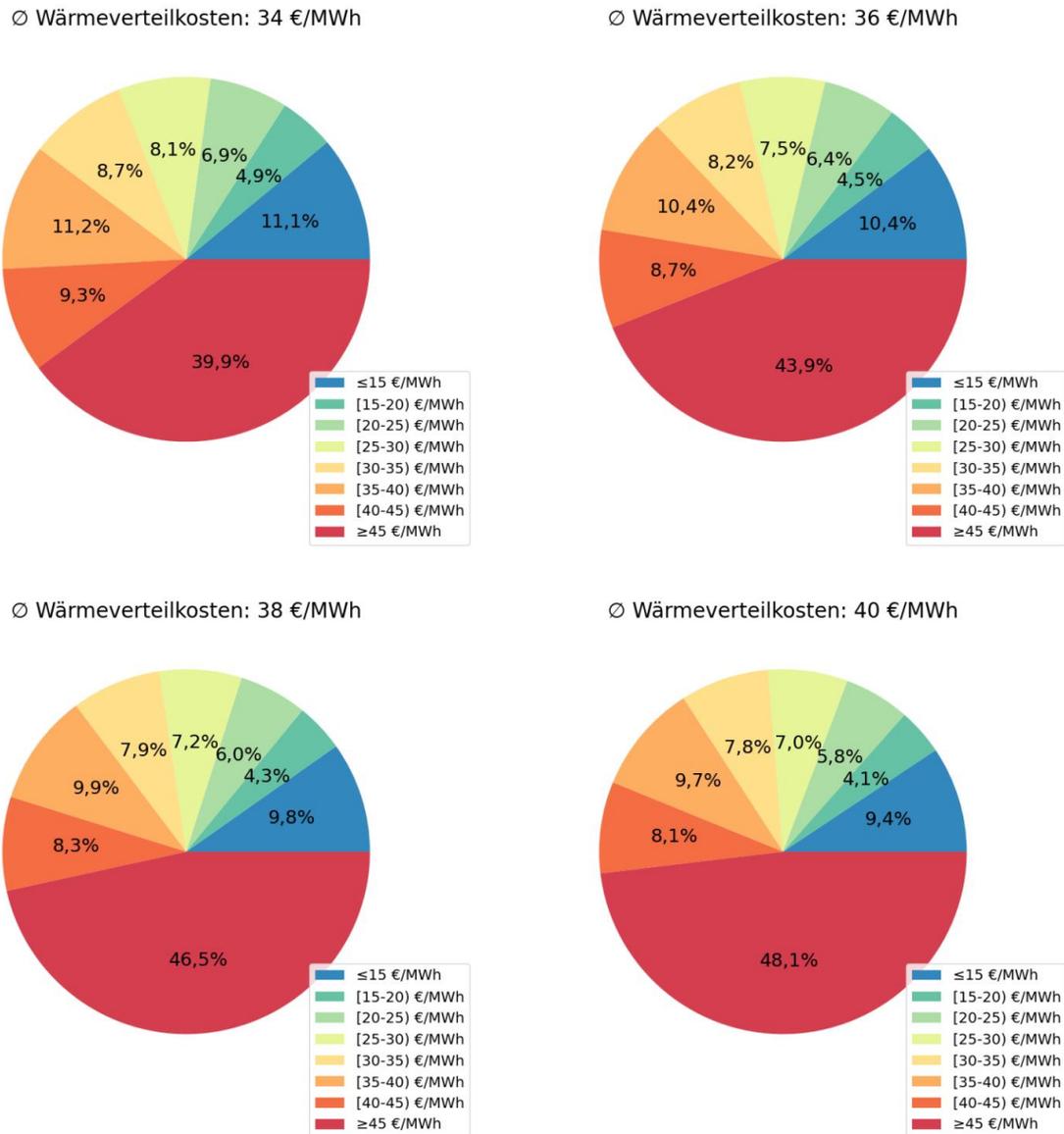


Abbildung 23: Zusammensetzung der Wärmeverteilungskosten in den identifizierten Fernwärme-Potenzialgebieten in 4 ausgewählten Varianten der Obergrenze der ØWVK (34, 36, 38, 40 EUR/MWh) (Quelle: eigene Berechnungen und eigene Darstellung)

In den Jahren zwischen 2019 und 2023 wurden in Frankfurt am Main von der Mainova AG jährlich jeweils zwischen 2 und 3 km neue Trasse verlegt. Hierbei sind Hausanschlussleitungen inkludiert. Um bis ins Jahr 2045 verschiedene in der Analyse identifizierte Fernwärme-Potenzialgebiete mit entsprechendem Anschlussgrad zu erschließen, ist eine Steigerung des Trassenausbau in Frankfurt am Main notwendig. Je nach Szenario müssten jährlich zwischen 5 km und 25 km Trasse zugebaut werden (siehe Hauptdokument zur Studie). Dies entspricht Werten von 0,01 bis 0,03 km/Tausend Einwohner.

Die folgende Abbildung 24 zeigt durchschnittliche Werte zum jährlichen Trassenausbau in verschiedenen Städten in Österreich und Deutschland, die historisch erreicht werden konnten. In Österreichs größeren Städten wurden vor allem in den 1990er Jahren die Fernwärmesysteme stark

ausgebaut. In Graz, Linz und Wien konnten damals jeweils mehr als 13 km Trasse pro Jahr verlegt werden, in Wien sogar über 50 km pro Jahr. In der Stadt Linz konnten dabei sogar knapp 0,09 km pro Tausend Einwohner verlegt werden.

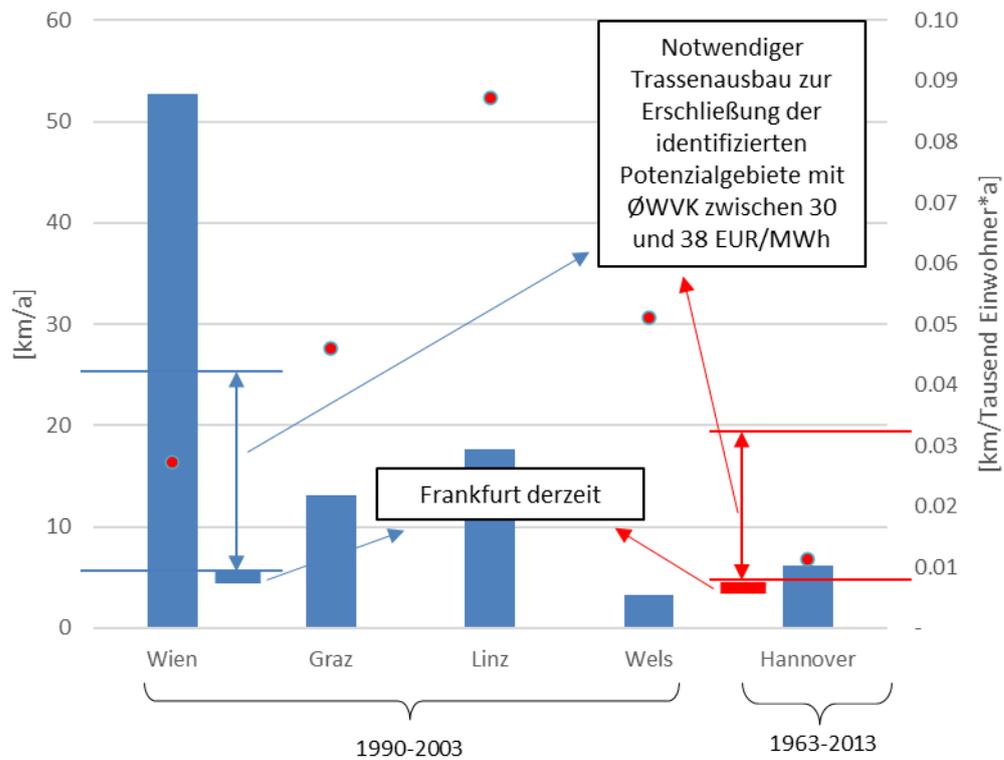


Abbildung 24: Historisch beobachteter durchschnittlicher jährlicher Fernwärme-Trassenausbau in unterschiedlichen Städten in Österreich und Deutschland (Quelle: eigene Darstellung mit Daten aus (Böhmer and Gössl, 2009), (enercity, 2013))

6.3.Szenarien zur Deckung der Fernwärme aus klimaneutralen Quellen

Überblick Methodik:

- Optimierung des Einsatzes und der Investitionen in den Kraftwerkspark der Frankfurter Fernwärme mit dem Modell „Hotmaps Fernwärme Aufbringung“
- Stündliche Auflösung von Wärmebedarf, Temperaturen (Verteilnetz, Abwärmequellen) und Energieträgerpreisen für ein Jahr
- Temperaturabhängigkeit der COPs von Wärmepumpen wird berücksichtigt
- Dampf- und Heiz-/Warmwassernetze werden separat gerechnet; mögliche Heiz-/Warmwassernetze werden als ein zusammenhängendes Netz modelliert; ein möglicher Energieaustausch zwischen Dampf- und Heiz-/Warmwassernetzen wird nicht berücksichtigt.
- Berechnungen erfolgen für die Jahre 2035 und 2045
- Varianten mit unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Technologien (Portfolien), unterschiedlichem Netzausbau und damit unterschiedlichen Fernwärme- bzw. Ferndampfbedarfen und unterschiedlichen Energieträgerpreisen werden gerechnet

Details zum eingesetzten Optimierungsmodell können in der online verfügbaren Modellbeschreibung unter folgendem [Link](#) nachgelesen werden. (Büchle et al., 2020) zeigt eine Anwendung des Modells für die Analyse verschiedener Fernwärme-Portfolien für das Wärmenetz in Linz, Österreich.

Wärmebedarfe in Warmwasser- und Dampfnetzen

Überblick Methodik:

- Basis sind die Berechnungen zu Fernwärmepotenzialgebieten (siehe Kapitel 6.2)
- Aus den Berechnungen werden 3 verschiedene Ausbauszenarien des gesamten Fernwärme- und Ferndampfgebietes in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung herangezogen: 5 km/a, 15 km/a und 25 km/a
- Zusätzlich zum Wärmebedarf der Gebäude wird Prozesswärme berücksichtigt, so wie sie im Jahr 2019 aus der Fernwärme bzw. Ferndampf gedeckt wurde (ifeu, 2020) (345 GWh/a); der Bedarf an Prozesswärme wird als konstant fortgeschrieben; es wird davon ausgegangen, dass davon konstant 40% als innere Gewinne den Energiebedarf zur Raumwärmebereitstellung reduzieren
- Bedarfsreduktion im Dampfnetz auf Basis der Reduktion durch die Sanierungen (BAU vs. AMB) sowie durch teilweisen Rückbau des Dampfnetzgebietes (33% bzw. 50% Rückbau bis 2045)

Die folgende Tabelle 23 zeigt die in der Modellierung der Fernwärmeaufbringung verwendeten Wärmebedarfe für die Jahre 2035 und 2045 nach Raumwärme, Warmwasser sowie Prozesswärme im Dampf- und im Heiz-/Warmwassernetz für unterschiedliche Annahmen zur Bedarfsentwicklung. Die Werte repräsentieren dabei die Bedarfe auf Kundenseite, inkludieren als noch nicht die Verluste in der Wärmeverteilung über die Wärmenetze.

Die Tabelle zeigt den Bedarfsrückgang im Dampfnetz sowie den deutlichen Bedarfsanstieg im Heiz-/Warmwassernetz. Im sehr hohen Bedarfsszenario zum Heiz-/Warmwassernetz werden bis 2035 gut 1,5 TWh jährlich nachgefragt, bis 2045 knapp 2,4 TWh jährlich. Dieses Szenario (in der Tabelle als „Sehr hoch“ bezeichnet) geht einerseits von einem starken Ausbau der Fernwärme aus, bei gleichzeitig starkem Rückbau des Dampfnetzes, das Dampfnetz wird dabei teilweise zu einem Heiz-/Warmwassernetz umgebaut. Daher lässt sich dieses Szenario nur mit dem Dampfnetz-Szenario „Niedrig“ kombinieren.

Tabelle 23: Wärmebedarfe in GWh/a in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung nach Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme (excl. Verteilverluste)

Modellierte Wärmebedarfs-Szenarien in der Fernwärme			Raum-wärme	Warm-wasser	Prozess-wärme	Gesamt
2035	Dampf-Netz	Niedrig	332	91	204	627
		Hoch	406	100	226	732
	Warmwasser-Netz	Niedrig	802	214	119	1 134
		Hoch	954	253	119	1 326
		Sehr hoch	1 102	292	141	1 534
2045	Dampf-Netz	Niedrig	181	61	136	378
		Hoch	243	81	183	506
	Warmwasser-Netz	Niedrig	1 027	395	162	1 584
		Hoch	1 255	487	162	1 905
		Sehr hoch	1 547	588	209	2 343

Lastprofil der Fernwärme

Überblick Methodik:

- Ausgangspunkt sind gemessene Lastprofile von bestehenden Erzeugungsanlagen in Frankfurt a. M.
- Die gemessenen Profile werden zunächst auf den gesamten Fernwärmebedarf im Basisjahr skaliert und danach auf stündliche Profile für Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme und Netzverluste aufgeteilt.
- Folgende Annahmen werden zur Aufteilung getroffen: Prozesswärme wird konstant übers Jahr nachgefragt; die Netzverluste sind proportional zur Temperaturdifferenz Vorlauf/Rücklauf zu Außentemperatur verteilt; Warmwasserlast, Prozesswärmelast und Netzverluste ergeben die Basislast im Sommer; das stündliche Profil für Raumwärme ergibt sich somit als Residuum in der Berechnung
- Berechnung der Lastprofile für 2035 und 2045 über die Skalierung der Profile im Basisjahr mit den Bedarfen nach Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme entsprechend Tabelle 23. Abschätzung zukünftiger Netzverluste auf Basis zukünftiger durchschnittlicher Linienwärmedichten, (Mathiesen et al., 2019) und eigenen Annahmen mit durchschnittlich 10% pro Jahr

Zentrale Daten:

- Gemessene Lastprofile einzelner bestehender Anlagen im Dampf- bzw. Heiz-/Warmwassernetz in Frankfurt a. M. für das Jahr 2016 (Mainova, 2020b)
- Stündliche Profile für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude bzw. Nichtwohngebäude in Hessen aus der Hotmaps Datenbank (Hotmaps, 2020)
- Profil der Außentemperatur in Frankfurt a. M. (EU PVSEC, 2017)
- Profile für Vorlauf- und Rücklauf Temperatur abgeleitet aus den technischen Anschlussbedingungen der Mainova AG (Mainova, 2022b); für die Modellierung der Heiz-/Warmwassernetze werden die Anschlussbedingungen für die Heidestrasse verwendet (Vorlauf zwischen 70 und 90°C in Abhängigkeit der Außentemperatur, Rücklauf 50°C)

Die folgende Abbildung 25 zeigt beispielhaft das berechnete Lastprofil für das modellierte Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2035 für das Bedarfsszenario „Hoch“, aufgeteilt nach Warmwasser, Prozesswärme, Netzverluste und Raumwärme. Darin ist deutlich zu sehen, dass die Netzverluste im Verhältnis relativ konstant sind über das Jahr, so wie auch Warmwasser- und Prozesswärmelast, während der Wärmebedarf für Raumwärme stark von der Außentemperatur abhängt und an sehr kalten Tagen hohe Lastspitzen entstehen.

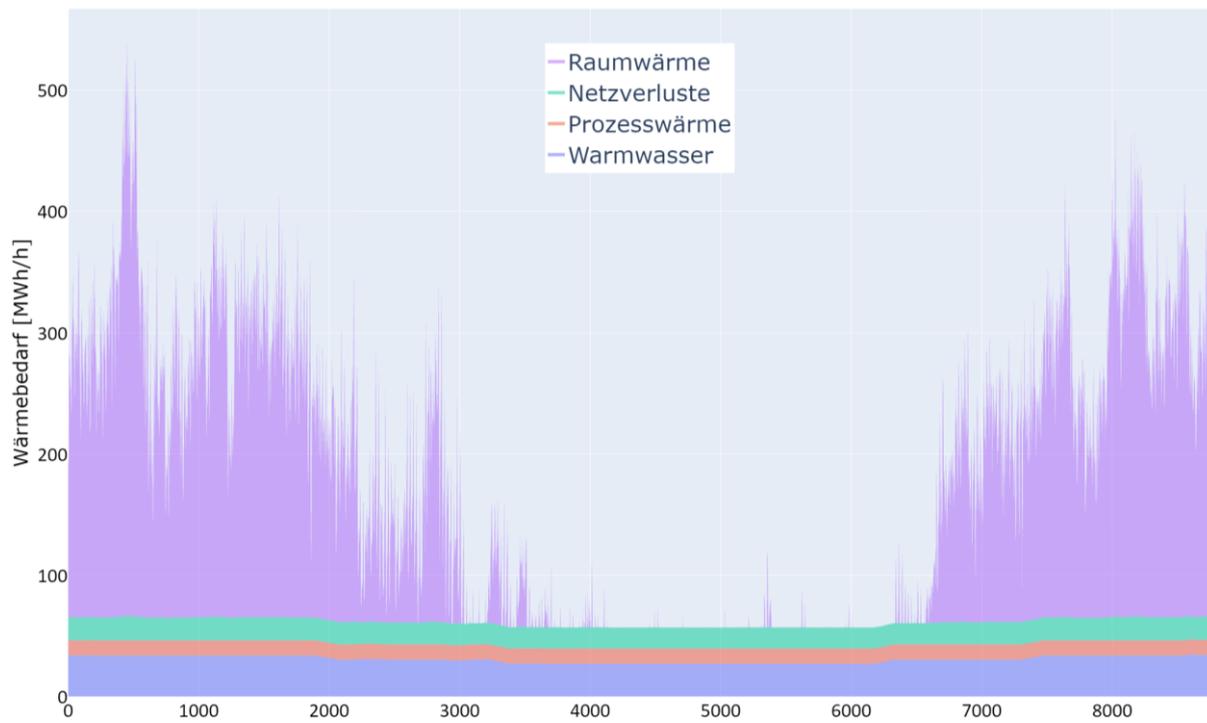


Abbildung 25: Berechnetes Lastprofil für das Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2035 für das Bedarfsszenario „Sehr hoch“

Kapazitäten an Anlagen zur Erzeugung von Fernwärme in der Modellierung

Überblick Methodik:

- Ableitung möglicher Anlagenkapazitäten im Dampf- und in Heiz-/Warmwassernetzen aus den identifizierten Potenzialen an erneuerbaren Energien und Abwärme in Kombination mit möglichen Strategien zum Kapazitätsausbau
- Drei Portfolio-Varianten werden analysiert
- Anlagenkapazitäten werden teilweise optimiert in einem vorgegebenen Leistungsbereich, teilweise fix vorgegeben

Die folgende Tabelle 24 beschreibt die Logik der drei analysierten Portfolio-Varianten, die für die Fernwärme-Aufbringung analysiert wurden.

Tabelle 24: Bezeichnung und Logik der drei Portfolio-Varianten in der Modellierung der Fernwärme-Aufbringung

Bezeichnung	Beschreibung
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.

Die folgenden Tabellen Tabelle 25 bis Tabelle 28 zeigen die in der Modellierung verwendeten Technologie-Optionen zur Fernwärme-Aufbringung separat nach Dampfnetz und Heiz-/Warmwassernetze jeweils für die Jahre 2035 und 2045. Die Tabellen zeigen zum einen Wertebereiche (z.B. 0 - 100), zum anderen eindeutige Werte (z.B. 120). Ist ein Wertebereich angegeben, so ist in der Modellierung der gesamte Bereich an angegebenen Leistungen möglich, das Modell optimiert die Anlagenkapazität der entsprechenden Technologien im jeweiligen Szenario. Ist ein eindeutiger Wert angegeben, so ist dies als eine vordefinierte Kapazität im Aufbringungs-Portfolio modelliert.

Tabelle 25: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2035 – Dampfnetz

Technologie	Einheit	Portfolio 1 Gas-KWK	Portfolio 2 RZ-Amb	Portfolio 3 RZ-Divers	Langfristiges Gesamtpotenzial
MVA¹	MW	120	120	120	120
Tiefengeothermie	MW	-	-	-	41
Oberflächennahe Geothermie Wärmepumpe	MW	-	-	-	362 – 2 100
Abwärme Rechenzentren Wärmepumpe	MW	-	-	-	188 – 490
Flusswasser Wärmepumpe	MW	-	-	-	250
Abwasser Kläranlage Wärmepumpe	MW	-	-	-	65
Industrielle Abwärme	MW	-	-	-	40
Elektroden-Heizer	MW	0 - 100	0 - 100	0 - 150	
Biomasse KWK²	MW	-	-	-	
Gas KWK²	MW	200	0 - 200	0 - 200	
Gas HW³	MW	120	120	120	
Wochenspeicher	MW (MWh)	-	-	-	
Saisonalspeicher	MW (MWh)	-	-	-	

¹ MVA ... Müllverbrennungsanlage

² KWK ... Kraft-Wärme-Kopplung

³ HW ... Heizwerk

Tabelle 26: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2035 – Heiz-/Warmwassernetz

Technologie	Einheit	Portfolio 1 Gas-KWK	Portfolio 2 RZ-Amb	Portfolio 3 RZ-Divers	Langfristiges Gesamtpotenzial
MVA¹	MW	-	-	-	120
Tiefengeothermie	MW	-	0 - 30	0 - 30	41
Oberflächennahe Geothermie Wärmepumpe	MW	0 - 15	-	-	362 – 2 100
Abwärme Rechenzentren Wärmepumpe	MW	0 - 100	0 - 200	0 - 150	188 – 490
Flusswasser Wärmepumpe	MW	0 - 50	0 - 80	0 - 80	250
Abwasser Kläranlage Wärmepumpe	MW	0 - 65	0 - 65	0 - 65	65
Industrielle Abwärme	MW	0 - 40	0 - 40	0 - 40	40
Elektroden-Heizer	MW	0 - 100	0 - 100	0 - 150	
Biomasse KWK²	MW	0 - 40	0 - 40	0 - 20	
Gas KWK²	MW	200	0 - 200	0 - 200	
Gas HW³	MW	0 - 100	0 - 100	0 - 200	
Wochenspeicher	MW (GWh)	75 (1,8)			
Saisonalspeicher	MW (GWh)		100 (150)	50 (75)	

¹ MVA ... Müllverbrennungsanlage

² KWK ... Kraft-Wärme-Kopplung

³ HW ... Heizwerk

Tabelle 27: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2045 – Dampfnetz

Technologie	Einheit	Portfolio 1 Gas-KWK	Portfolio 2 RZ-Amb	Portfolio 3 RZ-Divers	Langfristiges Gesamtpotenzial
MVA¹	MW	120	120	120	120
Tiefengeothermie	MW	-	-	-	41
Oberflächennahe Geothermie Wärmepumpe	MW	-	-	-	362 – 2 100
Abwärme Rechenzentren Wärmepumpe	MW	-	-	-	188 – 490
Flusswasser Wärmepumpe	MW	-	-	-	250
Abwasser Kläranlage Wärmepumpe	MW	-	-	-	65
Industrielle Abwärme	MW	-	-	-	40
Elektroden-Heizer	MW	0 - 100	0 - 100	0 - 150	
Biomasse KWK²	MW	-	-	-	
Gas KWK²	MW	100	0 - 100	0 - 100	300
Gas HW³	MW	0 - 100	0 - 100	0 - 200	
Wochenspeicher	MW (MWh)	-	-	-	
Saisonalspeicher	MW (MWh)	-	-	-	

¹ MVA ... Müllverbrennungsanlage

² KWK ... Kraft-Wärme-Kopplung

³ HW ... Heizwerk

Tabelle 28: Technologie-Optionen für die Fernwärmeaufbringung in den Modellrechnungen – 2045 – Heiz-/Warmwassernetz

Technologie	Einheit	Portfolio 1 Gas-KWK	Portfolio 2 RZ-Amb	Portfolio 3 RZ-Divers	Langfristiges Gesamtpotenzial
MVA¹	MW	-	-	-	120
Tiefengeothermie	MW	-	0 - 30	0 - 30	41
Oberflächennahe Geothermie Wärmepumpe	MW	0 - 30	-	-	362 – 2 100
Abwärme Rechenzentren Wärmepumpe	MW	0 - 150	0 - 400	0 - 250	188 – 490
Flusswasser Wärmepumpe	MW	0 - 100	0 - 150	0 - 150	250
Abwasser Kläranlage Wärmepumpe	MW	0 - 65	0 - 65	0 - 65	65
Industrielle Abwärme	MW	0 - 40	0 - 40	0 - 40	40
Elektroden-Heizer	MW	0 - 200	0 - 100	0 - 150	
Biomasse KWK²	MW	0 - 40	0 - 40	0 - 40	
Gas KWK²	MW	300	0 - 300	0 - 300	
Gas HW³	MW	0 - 200	0 - 100	0 - 200	
Wochenspeicher	MW (GWh)	75 (1,8)			
Saisonalspeicher	MW (GWh)		200 (300)	100 (150)	

¹ MVA ... Müllverbrennungsanlage

² KWK ... Kraft-Wärme-Kopplung

³ HW ... Heizwerk

Daten zu den modellierten Technologien zur Fernwärme-Aufbringung

Überblick Methodik:

- Daten zu Kosten und Effizienzen aus verschiedenen Quellen werden verglichen
- Kostendaten werden mit der Entwicklung des Preisindex der Bauwirtschaft für Wärmeversorgungsanlagen auf 2022 umgerechnet
- Kosten sowie Effizienzen von Verbrennungsanlagen beziehen sich auf den Heizwert (H_u)

Zentrale Datenquellen:

- Kostendaten zu Groß-Wärmepumpen im Fernwärmesystem aus (AGFW, 2020)
- Effizienzen und deren Temperatursensitivität für Groß-Wärmepumpen aus (Gumhalter, 2019) und (Totschnig et al., 2017)
- Kosten und Effizienzen von Wärmespeichern aus (Doczekal, 2019) und (Haller and Ruesch, 2019)
- Alle anderen Daten aus werden dem Datensatz zu Anlagen in Deutschland aus dem EU Projekt RES-H verwendet (EC DG-ENER et al., 2022)

Die folgenden Tabellen Tabelle 29 bis Tabelle 31 zeigen die in der Modellierung verwendeten Technologiedaten.

Tabelle 29: In den Modellrechnungen verwendete Effizienzen, Investitionskosten, O&M Kosten und Lebensdauern von Anlagen zur Bereitstellung von Fernwärme

	Effizienz thermisch (+ elektrisch)	Investitionskosten [kEUR ₂₀₂₂ /MW _{th}]	O&M Kosten fix [EUR ₂₀₂₂ /MW*yr]	O&M Kosten variabel [EUR ₂₀₂₂ /MWh]	Lebensdauer [a]
WP¹ – Flusswasser	3,3	871	17 420	0	25
WP¹ – Abwasser	3,3	780	15 600	0	25
WP¹ – Abwärme Rechenzentrum	4,9	936	18 720	0	25
Biomasse KWK²	0,82 (+0,3)	1 528	40 210	2	25
Tiefe Geothermie Direkt	1	4 588	78 000	5,5	25
Abwärme Industrie (direkt genutzt)	1	325	8 883	0	25
Elektroden-Heizer	0,99	58	-	0,6	25
Gas HW³	1,06	35	1 368	1,1	25
Gas KWK²	0,45 (+0,4)	670	21 557	4,8	25
WP¹ – Oberflächennahe Geothermie	2,2 – 3,2	750	-	0	25
MVA⁴ – nur Wärmebereitstellung	1,06	1 907	66 904	6,8	25

¹ WP ... Wärmepumpe

² KWK ... Kraft-Wärme-Kopplung

³ HW ... Heizwerk

⁴ MVA ... Müllverbrennungsanlage

Tabelle 30: In den Modellrechnungen verwendete Parameter zur Temperatur-Sensitivität von Wärmepumpen

	Sensitivität COP² bei Änderung Quelltemperatur (1/°C)	Sensitivität COP² bei Änderung Vorlauftemperatur (1/°C)	Sensitivität COP² bei Änderung Rücklauftemperatur (1/°C)	Mindesttemperatur der Quelle (°C)³	Ausblendtemperatur der Quelle (°C)⁴	Durchschnittliche Quelltemperatur (°C)	Nennvorlauftemperatur (°C)	Nennrücklauftemperatur (°C)
WP¹ – Flusswasser	0,0578	-0,0247	-0,0136	6	8	10	80	40
WP¹ – Abwasser	0,0578	-0,0247	-0,0136			10	70	50
WP¹ – Abwärme Rechenzentren	0	-0,0247	-0,0136			30	70	35
WP¹ – Oberflächennahe Geothermie	0	-0,0247	-0,0136			15	44	17

¹ WP ... Wärmepumpe

² COP ... Coefficient of Performance

³ Wenn Quelltemperatur niedriger ist, dann wird die WP abgeschaltete

⁴ Zwischen Ausblend- und Mindesttemperatur wird die verfügbare Leistung linear reduziert

Tabelle 31: In den Modellrechnungen verwendete Effizienzen, Investitionskosten, O&M Kosten und Lebensdauern von Speichern im Fernwärmesystem

	Stündliche Speicherverluste [-]	Be- und Entlade-wirkungsgrad [-]	Investitionskosten [EUR₂₀₂₂/MWh]	O&M Kosten fix [EUR/MWh]	Lebensdauer [a]
Wochenspeicher	0,001	0,97	2 500	0	25
Saisonale Speicher	0,001	0,97	400	0	25

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Diagramme:** Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die analysierten Portfolien im Heiz-/Warmwassernetz sowie im Dampfnetz im Jahr 2035
- **Diagramme:** Last- und Aufbringungsprofil im Heiz-/Warmwassernetz sowie im Dampfnetz für ein ausgewähltes Szenario im Jahr 2035

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Diagramme:** Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die analysierten Portfolien im Heiz-/Warmwassernetz sowie im Dampfnetz im Jahr 2045 (Abbildungen Abbildung 26 und Abbildung 27)
- **Diagramme:** Last- und Aufbringungsprofil im Heiz-/Warmwassernetz sowie im Dampfnetz für ein ausgewähltes Szenario im Jahr 2045 (Abbildungen Abbildung 28 und Abbildung 29)

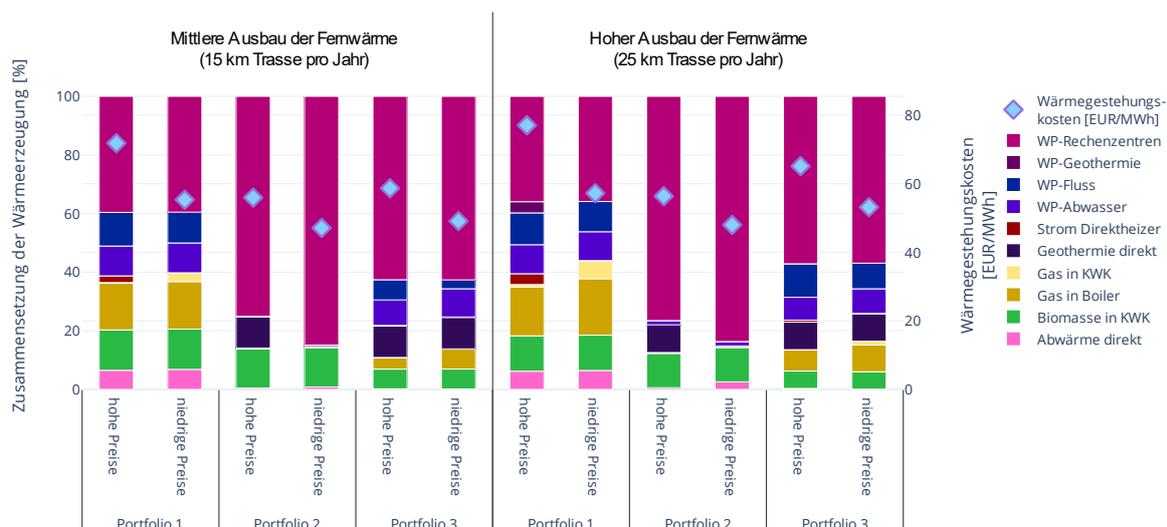


Abbildung 26: Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolien im Heiz-/Warmwassernetz bei mittlerem bzw. hohem Ausbau der Fernwärme im Jahr 2045 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)

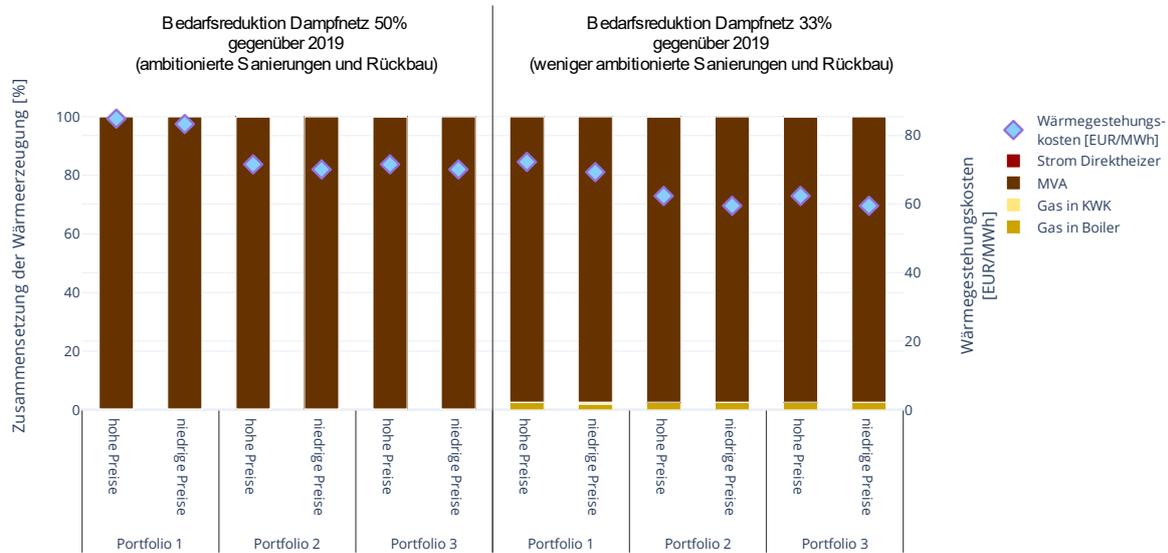


Abbildung 27: Zusammensetzung der Wärmeerzeugung sowie Wärmegestehungskosten für die drei analysierten Portfolios im Dampfnetz bei höherer bzw. niedrigerer Reduktion des Wärmebedarfs im Dampfnetz im Jahr 2035 jeweils für hohe bzw. niedrige Energieträgerpreis-Annahmen (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)

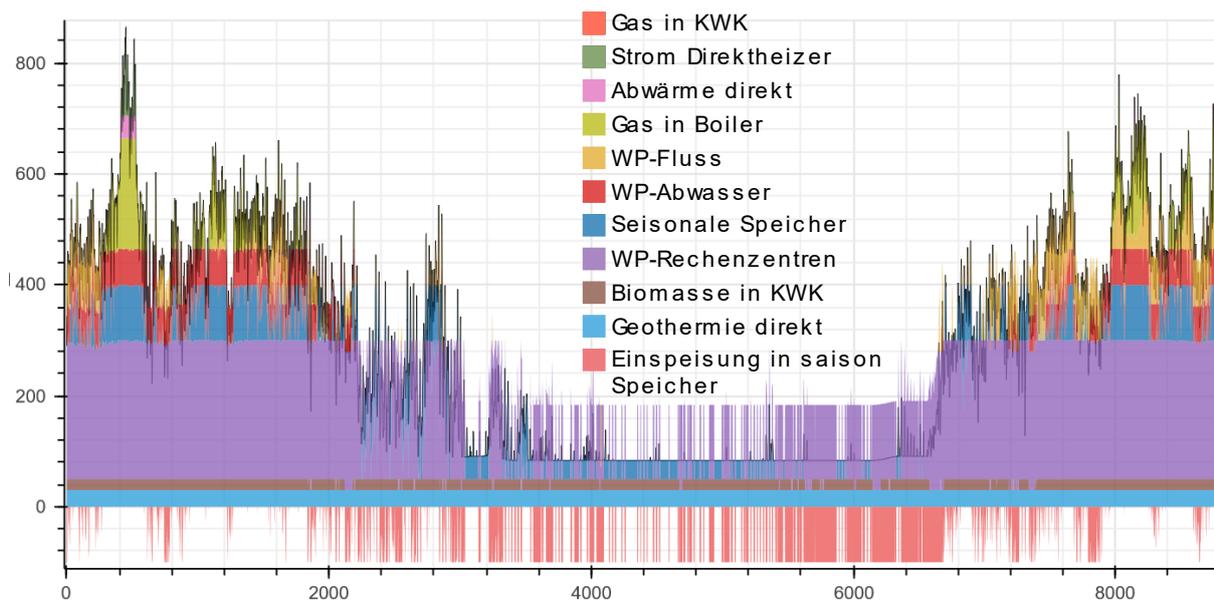


Abbildung 28: Last- und Aufbringungsprofil im Heiz-/Warmwassernetz im Jahr 2045, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, hoher Ausbau der Fernwärme (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)

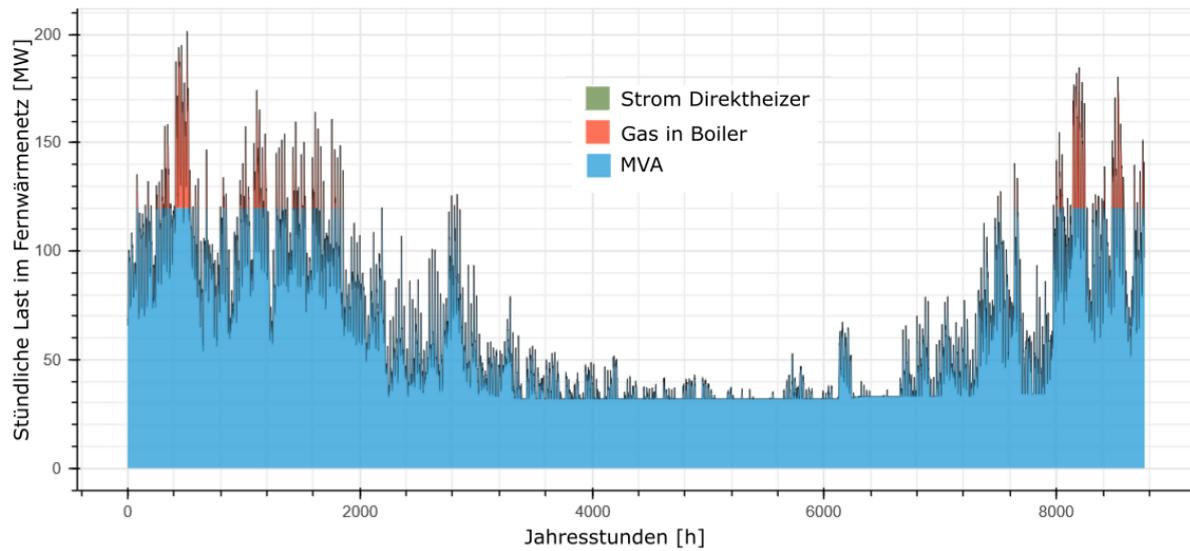


Abbildung 29: Last- und Aufbringungsprofil im Dampfnetz im Jahr 2045, Portfolio 3 (RZ-Divers), hohe Energieträgerpreise, Bedarfsreduktion im Dampfnetz 24% gegenüber 2019 (Quelle: e-think, eigene Berechnungen)

6.4.Kosten von Wärmebereitstellungssystemen und Szenarien zur dezentralen Einzelversorgung

Überblick Methodik:

- Ziel ist die Abschätzung der zu erwartenden Wärmebereitstellungskosten einer dezentralen Wärmebereitstellung
- Berechnung der Wärmegestehungskosten einer dezentralen Wärmebereitstellung auf Basis der erforderlichen Investitionskosten sowie der verbrauchsabhängigen- und -unabhängigen jährlichen Betriebskosten
- Berechnung der Investitionskosten auf Basis der berechneten erforderlichen Heizlast der Gebäude
- Exogene Annahme zu Anteilen der verfügbaren Heizungssysteme getrennt für kleine Wohngebäude sowie große Wohngebäude und Nichtwohngebäude
- Berechnung der stadtweiten Durchschnittskosten für diese Gebäudetypen unterschieden nach Neubau, thermisch saniert und thermisch unsaniert
- Die Auswirkungen auf die Energieinfrastruktur, die mit einem starken Anstieg oder Rückgang einzelner Energieträger verbunden sind und damit einhergehende Investitionskosten werden nicht berücksichtigt.
- Kostendaten zu dezentralen Wärmebereitstellungsanlagen und Fernwärme wurden aus der Invert-Datenbank entnommen und mit aktuellen Datenquellen abgeglichen
- Kostendaten zu Wärmebereitstellungsanlagen werden mit der Entwicklung des Preisindex der Bauwirtschaft für Wärmeversorgungsanlagen auf 2022 umgerechnet

Zentrale Daten:

- Invert Datenbank zu Kosten und Effizienzen von dezentralen Wärmebereitstellungssystemen (Invert, 2023)
- Daten zu Heizungssystemkosten aus (Koch et al., 2021), (FfE and Ökoinstitut, 2021), (EC DG-ENER et al., 2022)
- Entwicklung des Baukostenindex in den letzten Jahren aus (BKI, 2022)
- Entwicklung des Baupreisindex in den letzten Jahren aus (Statistische Bundesamt, 2023) und 2022 (DESTATIS, 2022)

Unter den unterschiedlichen, möglichen Technologiekombination wurden 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. Die Systeme wurden so ausgelegt, 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 des Warmwasser- zu Heizenergiebedarf sowie

der Jahresdauerlinie der Heizlast ab. In dieser Arbeit wurde die Jahresdauerlinie der Heizlast durch ein rechtwinkeliges Dreieck approximiert (siehe Abbildung 30).

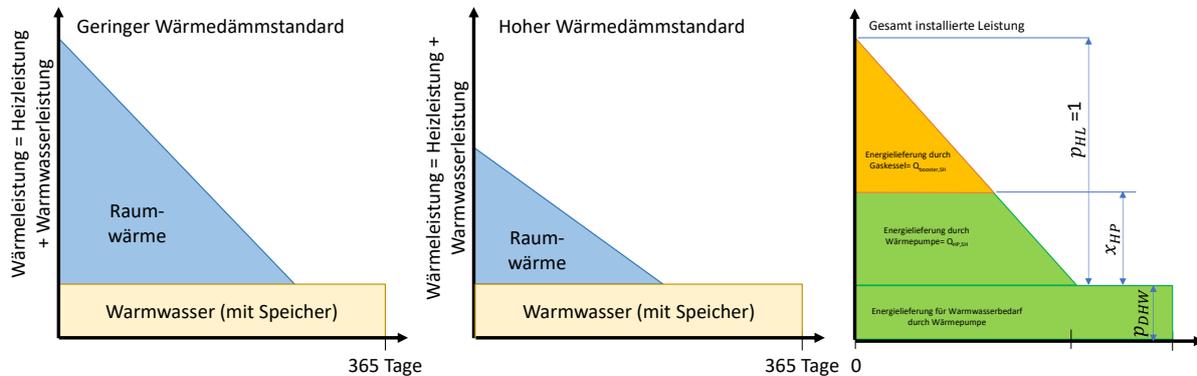


Abbildung 30: Jahresdauerlinie und Auslegung einer dezentralen Hybridheizanlagen mit Wärmepumpe und Gaskessel zur Spitzenlastdeckung.

Unter diesen Annahmen errechnet sich der Anteil an der erforderlichen Heizwärmebedarfsleistung, der durch die Wärmepumpe bereitgestellt werden muss (x_{HP}) durch

$$x_{HP} = 1 - (1 - s_{HP,tot} + f_{DHW} * (1 - s_{HP,tot}))^{0,5}$$

Wobei $s_{HP,tot}$ den Anteil am gesamten Energiebedarf, der durch die Wärmepumpe bereitgestellt werden muss, darstellt (65%) und f_{DHW} definiert das Verhältnis der jährlichen Jahresenergiemenge für die Warmwasserbereitstellung zur Jahresenergiemenge zur Raumwärmebereitstellung. Im Mittel bedeutet dies, dass bei heutigen unrenovierten Gebäuden die Wärmepumpe etwa 40% der Gebäudeheizlast abdecken muss, die verbleibenden 60% liefert der Gaskessel. Eine solche Auslegung führt im Falle einer nachträglichen thermischen Gebäudesanierung auch dazu, dass (im Mittel) die Wärmepumpe den gesamten erforderlichen Leistungsbedarf (nach thermischer Sanierung) abdecken kann und damit der Gaskessel nicht mehr erforderlich ist. Die Kosten einer solchen hybriden Heizungsanlage wurden unter der Annahme berechnet, dass geringere Skaleneffekte (economies-of-scale) auftreten. Diese Annahme wird damit begründet, dass eine solche Anlagen zwei getrennte Systeme (mit jeweils geringeren Leistungen) erfordert.

Die folgende Tabelle zeigt die Kostenparameter, die in der vorliegenden Studie verwendet wurden. Die hier verwendeten Kosten beinhalten keine Zusatzkosten für Systemwechsel, wenn also anstatt eine bestehenden Technologie zu ersetzen (z.B. einen alten Gaskessel durch einen neuen ersetzen) auf eine neue Technologie umgestellt wird. In der Regel fallen hierbei zusätzliche Kosten an, wie beispielsweise für die Installation von Verrohrung, Stromanschluss, etc.

Tabelle 32: Techno-ökonomische Parameter zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von dezentralen Wärme-erzeugungsanlagen

	Invest. Kostenfaktor f [EUR] *	Invest. Kosten-exponent e *	O&M Kosten [EUR/kW] **	Jahres-wirkungsgrad ***
Gaskessel, kleine Wohngebäude (WG)	1 306	0,33	13	0,98
Gaskessel, große WG und Nicht-WG	751	0,14	13	0,98
Biomassekessel (Pelletkessel)	5 592	0,50	32,5	0,85
Außenluft-Wärmepumpe (WP)	2 216	0,20	15	3,1
Grabenkollektor/ Grundwasser-Wärmepumpe	4 064	0,28	15	4,2
Hybrid-WP (Außenluft-WP und Gaskessel)	1 912	0,27	20	3,1/0,98
Direktstromheizung (Infrarot, Nachtspeicher), kleine WG	203	0	2,6	1
Direktstromheizung (Infrarot, Nachtspeicher), große WG und Nicht-WG	251	0	2,6	1

* Die spezifischen Investitionskosten [EUR/kW] errechnen sich durch $f[\text{EUR}] \cdot P[\text{kW}]^{-e}$
 ** Verbrauchsunabhängige jährliche Wartungs- und Instandsetzungskosten und fixe Gebühren und Abgaben
 *** Exkl. Verteilverluste, bezogen auf H_u , bei einer durchschnittlichen Wärmeverteiltemperatur von 35°C
 Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde eine Abschreibungsdauer von 20 Jahren angenommen.

Tabelle 33: Anteile der verfügbaren Heizungssysteme getrennt für kleine Wohngebäude sowie große Wohngebäude und Nichtwohngebäude, so wie sie in den beiden Szenarien „Stark reduzierter Einsatz Gas“ und „Gas nur für Spitzenlast“ in den Jahren 2035 und 2045 verwendet wurden

	stark reduzierter Einsatz Gas				Gas nur für Spitzenlast			
	2035		2045		2035		2045	
	kleine WG	große WG und NWG	kleine WG	große WG und NWG	kleine WG	große WG und NWG	kleine WG	große WG und NWG
Gaskessel	0,4	0,48	0,2	0,25	0,25	0,33	0	0
Biomassekessel (Pelletkessel)	0,05	0,03	0,1	0,05	0,05	0,02	0,1	0,05
Außenluft-Wärmepumpe (WP)	0,15	0,15	0,35	0,35	0,2	0,2	0,4	0,45
Grabenkollektor/ Grundwasser-Wärmepumpe	0,1	0,04	0,15	0,15	0,15	0,1	0,25	0,25
Gaskessel	0,4	0,48	0,2	0,25	0,25	0,33	0	0

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Diagramme:** Vergleich der Wärmebereitstellungskosten im Jahr 2035 und im Jahr 2045 für Fernwärme und verschiedene dezentrale Versorgungsoptionen für unterschiedliche Preisszenarien

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

Überblick Methodik:

- Zuvor berechnete Szenarien zu Senkung des Wärmebedarfs, Fernwärme-Ausbau, Deckung der Fernwärme und dezentrale Wärmebereitstellung werden zu gesamtstädtischen Szenarien kombiniert
- Ergebnisse werden zusammengestellt für ...
 - 1 Szenario zur Senkung des Wärmebedarfs (AMB)
 - 3 Szenarien zur Fernwärme-Ausbau-Geschwindigkeit
 - 2 Szenarien zu möglichen Technologie-Kombinationen in Fernwärme bzw. dezentraler Bereitstellung
 - 2 Preisszenarien der Energieträger
 - Die Zeitpunkte 2035 und 2045
- Zusätzlich werden resultierende CO₂-Emissionen für ausgewählte Szenario-Kombinationen und Annahmen berechnet und dargestellt.

Zentrale Datenquellen:

- Die Ergebnisse der zuvor berechneten Szenarien (siehe Kapitel 6.1 bis 6.4)
- Daten aus der Energiebilanz 2019 für den Bedarf an Energieträgern für Raumwärme und Warmwasser im Ausgangsjahr
- Daten zu aktuellen CO₂-Emissionsfaktoren aus (ifeu, 2020) und (Hertle et al., 2019)

Die folgenden Tabellen zeigen die für die Berechnung der CO₂-Emissionen aus der Wärmeversorgung des Wärmebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. getroffenen Annahmen. Tabelle 34 zeigt die Kombination von zuvor gerechneten Szenarien sowie den Annahmen für die nicht gerechneten Szenarien.

Tabelle 35 zeigt die in den jeweiligen Szenario- und Annahmen-Kombinationen verwendeten Emissionsfaktoren.

Tabelle 34: Kombination von gerechneten Szenarien und Annahmen zur Berechnung und Darstellung der CO₂-Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude der Stadt Frankfurt a. M.

	Szenario-Darstellung in Darstellung der CO₂-Emissionen				
Szenario-Kombination im Rahmen der Analyse	2019	Netto-Effekt Sanierung, Abriss, Neubau	Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzenlast*
Preise	-	niedrige Preise			
Fernwärme-Ausbau-Geschwindigkeit	-	hoher Ausbau Fernwärme			
Technologie-Kombinationen zur Wärme-aufbringung	entsprechend Energiebilanz 2019	Müll in der Fernwärme verbleibt, der Rest wird komplett über Gas versorgt	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzenlast*	

Tabelle 35: Emissionsfaktoren zur Berechnung der CO₂-Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude der Stadt Frankfurt a. M.

[tCO ₂ -eq/GWh]	2019	2035							2045						
		Netto-Effekt Neubau	Gasversorgung nicht dekarbonisiert			Gasversorgung teil-dekarbonisiert			Netto-Effekt Neubau	Gasversorgung nicht dekarbonisiert			Gasversorgung komplett dekarbonisiert		
			Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*	Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*		Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*	Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*
Müll	*	*	121	121	121	121	121	121	*	61	61	61	61	61	61
Biomasse in Fernwärme	*	*	*	29	29	*	29	29	*	*	0	0	*	0	0
Biomasse dezentral	*	*	*	25	25	*	25	25	*	*	0	0	*	0	0
Gas in Fernwärme	*	*	247	247	247	105	105	105	*	247	247	247	0	0	0
Gas dezentral	247	247	247	247	247	124	124	124	247	247	247	247	0	0	0
Strom	478	478	*	137	137	*	137	137	478	*	0	0	*	0	0
Fernwärme	129	129	*	*	*	*	*	*	129	*	*	*	*	*	*
Ferndampf	301	301	*	*	*	*	*	*	301	*	*	*	*	*	*
Heizöl EL	318	318	*	*	*	*	*	*	318	*	*	*	*	*	*
Kohle	438	438	*	*	*	*	*	*	438	*	*	*	*	*	*
Sonstige	106	106	*	*	*	*	*	*	106	*	*	*	*	*	*

*Nicht verwendet

Ergebnisse

Im Hauptdokument dargestellte Ergebnisse:

- **Diagramme:** Energieträgereinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. für verschiedene Szenarien zu Technologieeinsatz und Fernwärmeausbau im Jahr 2035 und im Jahr 2045
- **Diagramme:** Jährliche Systemkosten zur Deckung des Wärmebedarfs in den Gebäuden der Stadt Frankfurt a. M. (ohne Sanierungskosten) im Jahr 2035 und im Jahr 2045
- **Diagramm:** CO₂-Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in unterschiedlichen Szenarien
- **Tabelle:** Zusätzliche Kosten bei Versorgung vorwiegend über Gas und nicht-Dekarbonisierung der Gasversorgung
- **Tabelle:** Notwendige Investitionen zur Umstellung der Wärmeversorgung in Frankfurt

Zusätzliche Ergebnisse im vorliegenden Anhang:

- **Tabelle:** 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 Komplet-„Dekarbonisierung Gasversorgung“ und „Versorgung komplett über Gas“) in den Jahren 2035 und 2045 unter den im Bericht beschriebenen Rahmenbedingungen (Quelle: eigene Berechnungen) (Tabelle 36)

Tabelle 36: Berechnete CO₂-Emissionen aus der Versorgung des Wärmebedarfs der Gebäude in Frankfurt a. M. in unterschiedlichen Szenarien in den Jahren 2035 und 2045 unter den beschriebenen Rahmenbedingungen (Quelle: eigene Berechnungen)

[Mio. tCO ₂ -eq/a]	2019	2035							2045						
		Netto-Effekt Sanierung, Abriss, Neubau	Gasversorgung nicht dekarbonisiert			Gasversorgung teil-dekarbonisiert			Netto-Effekt Sanierung, Abriss, Neubau	Gasversorgung nicht dekarbonisiert			Gasversorgung komplett dekarbonisiert		
			Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*	Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*		Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*	Versorgung komplett über Gas	stark reduzierter Einsatz Gas	Gas nur für Spitzen-last*
Müll	*	*	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	*	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Biomasse in Fernwärme	*	*	0	0,01	0	0	0,01	0	*	0	0	0	0	0	0
Biomasse dezentral	*	*	0	0	0	0	0	0	*	0	0	0	0	0	0
Gas in Fernwärme	*	*	0,42	0,11	0,07	0,18	0,05	0,03	*	0,64	0,17	0,07	0	0	0
Gas dezentral	1,10	0,93	0,90	0,49	0,36	0,45	0,24	0,18	0,80	0,52	0,15	0,03	0	0	0
Strom	0,31	0,26	0	0,10	0,15	0	0,10	0,15	0,23	0	0	0	0	0	0
Fernwärme	0,08	0,07	*	*	*	*	*	*	0,06	*	*	*	*	*	*
Ferndampf	0,32	0,27	*	*	*	*	*	*	0,23	*	*	*	*	*	*
Heizöl EL	0,17	0,14	*	*	*	*	*	*	0,12	*	*	*	*	*	*
Kohle	0,01	0,01	*	*	*	*	*	*	0,01	*	*	*	*	*	*
Sonstige	0,02	0,02	*	*	*	*	*	*	0,02	*	*	*	*	*	*

*Nicht verwendet

Literatur und Datenquellen

- Agemar, T., Schellschmidt, R., Schulz, R., 2011. 3D-Modell der Untergrundtemperatur von Deutschland 9.
- AGFW, 2020. Praxisleitfaden Großwärmepumpen. Frankfurt am Main.
- ARIADNE, 2022. Prognose aus Forschungsprojekt ARIADNE, siehe <https://ariadneprojekt.de/>.
- BAfJ, 2016. OGeWV - Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer [WWW Document]. URL https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/BJNR137310016.html (accessed 6.10.23).
- BKI, B.D.A., 2022. Befragung zu den Baukostensteigerungen im Sommer 2022 [WWW Document]. URL <https://bki.de/befragung-zu-den-baukostensteigerungen-im-sommer-2022.html> (accessed 5.19.23).
- BMVIT, 2016. energy innovation austria 1/2016.
- BMWK, B. für W. und K., BMWSB, B. für W., Stadtentwicklung und Bauwesen, 2022. 65 Prozent erneuerbare Energien beim Einbau von neuen Heizungen ab 2024.
- Böhmer, S., Gössl, M., 2009. Optimierung und Ausbaumöglichkeiten von Fernwärmesystemen, Report / Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, Wien.
- Büchele, R., Fallahnejad, M., Felber, B., Hasani, J., Kranzl, L., Themeßl, N., Habiger, J., Hummel, M., Müller, A., Schidinger, D., 2021. Potenzial für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung. TU Wien im Auftrag des BMW, Wien.
- Büchele, R., Kranzl, L., Hartner, M., Hasani, J., 2020. Opportunities and Challenges of Future District Heating Portfolios of an Austrian Utility. *Energies* 13, 2457. <https://doi.org/10.3390/en13102457>
- Bundesnetzagentur, 2022. Monitoringbericht 2020 und 2021.
- Cischinsky, H., Diefenbach, N., 2018. Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- DESTATIS, 2023. Verbraucherpreisindex - Gesamtindex und 12 Abteilungen [WWW Document]. Statistisches Bundesamt. URL <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Verbraucherpreisindex/Tabellen/Verbraucherpreise-12Kategorien.html> (accessed 2.1.23).
- DESTATIS, 2022. Preisindizes für die Bauwirtschaft (No. 2170400223244). DESTATIS.
- Doczekal, C., 2019. Fact sheet: Heat Storages (No. Report in course of the H2020 project TRACER). Güssing Energy Technologies (GET), Güssing.
- DWD, 2022. Klimadaten [WWW Document]. Deutscher Wetterdienst. URL www.dwd.de
- EC DG-ENER, E Think., TU Wien., Fraunhofer ISI., Öko Institut e.V., Viegand Maagoe., 2022. Renewable space heating under the revised Renewable Energy Directive: ENER/C1/2018 494: final report. Publications Office, LU.
- ECO.S, 2018. Klimaschutzteilkonzept für integrierte Wärmenutzung für die Stadt Frankfurt am Main (Abwärmekataster). ECO.S & e.qua, Frankfurt, Berlin.
- enercity, 2013. 50 Jahre Fernwärme aus dem Heizkraftwerk Linden [WWW Document]. Hannover entdecken ... URL <https://www.hannover-entdecken.de/50-jahre-fernwaerme-aus-dem-heizkraftwerk-linden/> (accessed 6.10.23).
- Energierferat, 2020. Klimaschutz-Stadtplan [WWW Document]. URL <http://www.klimaschutzstadtplan-frankfurt.de/> (accessed 7.14.20).
- EU PVSEC, 2017. Daten zu Außentemperatur und solarer Einstrahlung für ein typisches meteorologisches Jahr für die Stadt Frankfurt am Main.
- Fallahnejad, M., Hartner, M., Kranzl, L., Fritz, S., 2018. Impact of distribution and transmission investment costs of district heating systems on district heating potential. *Energy Procedia* 149, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.178>

- Fay, P., Prohaska, G., Hummel, M., Schmidinger, D., Hasani, J., 2020. Hotmaps: Heating and cooling strategies for pilot cities - Frankfurt.
- FfE, Ökoinstitut, 2021. Klimaneutrale Wärme München 2035, Ermittlung der Möglichkeiten zur Umsetzung von Lösungspfaden für eine klimaneutrale Wärmeversorgung in der Landeshauptstadt München. München.
- Fraunhofer ISI, 2020. Home| enertile [WWW Document]. URL <https://www.enertile.eu/enertile-en/index.php> (accessed 7.9.20).
- GDB, 2020. Wassertemperatur: Datendownload Bad Vilbel / Nidda [WWW Document]. URL https://www.gkd.bayern.de/de/fluesse/wassertemperatur/main_unten/bad-vilbel-24807006/download?zr=monat&beginn=01.07.2020&ende=06.07.2020&wertart=ezw (accessed 7.8.20).
- GeoT, 2022. Auskunft zum geplanten Lithium-Förderprojekt in Rüsselsheim. Geothermal Engineering GmbH.
- GITA, 2023. Schätzung der Kosten für den Bau einer Fernwärmetrasse in Sossenheim. GITA Ingenieure.
- Gumhalter, M., 2019. The value of flexibility for large-scale heat pumps in district heating systems - a survey on technical constraints and economic opportunities (Diplomarbeit). TU Wien, Wien.
- Haller, M., Ruesch, F., 2019. Fokusstudie "Saisonale Wärmespeicher - Stand der Technik und Ausblick." Forum Energiespeicher Schweiz.
- Hertle, H., Dünnebeil, F., Gugel, B., Rechsteiner, E., Reinhard, C., 2019. BSKO - Bilanzierungs-Systematik Kommunal, Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den energie- und Verkehrssektor in Deutschland. ifeu - Institut f. Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- HLBG, 2023. Geoportal Hessen [WWW Document]. URL <https://www.geoportal.hessen.de/> (accessed 5.11.23).
- HLNUG, 2023. Hydrogeologie von Hessen - Taunus und Idsteiner Senke. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden.
- HLNUG, 2022. Erdwärme unter Frankfurt? Stadt lässt in 800 Metern Tiefe bohren [WWW Document]. URL https://www.geothermie.de/aktuelles/nachrichten/news-anzeigen/news/erdwaerme-unter-frankfurt-stadt-laesst-in-800-metern-tiefe-bohren.html?tx_news_pi1%5BactbackPid%5D=10&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=e1d49d8dcf9499706858de51517f786c (accessed 6.10.23).
- Hotmaps, 2020. Hotmaps Datenbank: Lastprofile.
- Hummel, M., Müller, A., Forthuber, S., Kranzl, L., Mayr, B., Haas, R., 2023. How cost-efficient is energy efficiency in buildings? A comparison of building shell efficiency and heating system change in the European building stock. Energy Efficiency 16, 32. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10097-6>
- HVBG, 2009. ATKIS-Objektkartenkatalog Basis-DLM Hessen. Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG).
- ifeu, 2021. Energie- und Treibhausgasbilanz der Stadt Frankfurt am Main - Berichtsjahr 2020. ifeu - Institut f. Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- ifeu, 2020. Energie- und Treibhausgasbilanz der Stadt Frankfurt am Main - Berichtsjahr 2019. ifeu - Institut f. Energie- und Umweltforschung, Heidelberg.
- Infraserv, 2017. Infraserv carbon footprint mit Update 2017.
- Invert, 2023. Invert Datenbank - Technologiedaten zu dezentralen Bereitstellungssystemen.
- Invert, 2022. Invert Datenbank - Gebäudebestand in Deutschland.
- ISI, 2021. Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD (Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB)). Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- Kathan, J., Kapeller, J., Reuter, S., Ortmann, P., Rodgarkia-Dara, A., Reger, M., Braendle, G., Gatzen, C., 2022. Importmöglichkeiten für erneuerbaren Wasserstoff. Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK).

- Koch, T., Achenbach, S., Müller, A., 2021. Anpassung der Kostenfunktionenenergierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020. IWU, Darmstadt.
- KSG BW, 2022. Landesrecht BW KSG BW | Landesnorm Baden-Württemberg | Gesamtausgabe | Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg (KSG BW) vom 23. Juli 2013 | gültig ab: 31.07.2013.
- Land Hessen, 2022. Hessisches Energiegesetz (HEG), GVBl. 2012, 444.
- Mainova, 2023. Persönliche Auskunft zu Investitionskosten in Fernwärmeleitungsbau der Mainova AG. Mainova AG.
- Mainova, 2022a. Geschäftsbericht 2021. Mainova AG, Frankfurt am Main.
- Mainova, 2022b. Technische Anschlussbedingungen Wärme der Mainova AG.
- Mainova, 2020a. Karte zu bestehenden Netzgebieten der Mainova AG.
- Mainova, 2020b. Stündliche Profile zur Einspeiseleistung einzelner Anlagen der Mainova AG für das Jahr 2016.
- Mainova, 2018. Kraftwerksbroschüre.
- Mathiesen, B.V., Bertelsen, N., Schneider, N.C.A., García, L.S., Paardekooper, S., Thellufsen, J.Z., Djørup, S.R., 2019. Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe: Unlocking the potential of energy efficiency and district energy (Report), Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe. Aalborg Universitet.
- Öffentlicher-Dienst.Info [WWW Document], 2023. URL <https://oeffentlicher-dienst.info/> (accessed 7.5.23).
- Peters, M., Steidle, T., Böhnisch, H., 2020. Leitfaden Kommunale Wärmeplanung.
- Resch, G., Geipel, J., Hiesl, A., Liebmann, L., Wien, T., Lumberras, S., Olmos, L., Ramos, A., Ploussard, Q., 2019. D7.8: Summary report - Energy Systems: Supply Perspective. Energy Systems 77.
- RWI, 2021. Erstellung der Anwendungsbilanzen 2020 für den Sektor der Privaten Haushalte und den Verkehrssektor in Deutschland. RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Essen.
- Schlomann, B., Wohlfarth, K., Kleeberger, H., Hardi, L., Geiger, B., Pich, A., Roser, A., Gruber, E., Gersperger, A., Holländer, E., 2015. Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013 (Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)). Karlsruhe, München, Nürnberg.
- Schulz, R., Knopf, S., Suchi, E., Öhlschläger, D., Dittmann, J., Müller, C., 2013. Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie.
- SEffm, 2023. Stadtentwässerung Frankfurt am Main - SEVA Sindlingen [WWW Document]. URL <https://www.stadtentwaesserung-frankfurt.de/anlagen/abwasserreinigung/seva-sindlingen.html> (accessed 6.10.23).
- Stadt Frankfurt a. M., 2022a. Demografische Eckzahlen 2020 - Melderegister. Bürgeramt, Statistik und Wahlen. Melderegister.
- Stadt Frankfurt a. M., 2022b. Persönliche Auskunft zu Standorten und IT-Anschlussleistungen von in Planung befindlichen Rechenzentren in der Stadt Frankfurt. Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main.
- Stadt Frankfurt a. M., 2015. Frankfurt am Main - Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung bis 2040 (No. ISSN 0945-4357), Materialien zur Stadtbeobachtung, Heft 19. Frankfurt am Main.
- Statistische Bundesamt, D., 2023. Bau- und Immobilienpreisindex [WWW Document]. Statistisches Bundesamt. URL https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Baupreise-Immobilienpreisindex/_inhalt.html (accessed 5.19.23).
- Strom-Report, 2022. Strommix 2022: Stromerzeugung in Deutschland.
- Stryi-Hipp, G., Eggers, J.-B., Steingrube, A., 2015. Berechnung zeitlich hochaufgelöster Energieszenarien im Rahmen des Projektes Masterplan 100% (Der Bericht wurde erstellt im Auftrag des Energiereferats der Stadt Frankfurt am Main). Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.
- SVA Ffm, 2022. Stadtgrundkarte digitale Gebäudedaten, Adressdaten. Stadtvermessungsamt Frankfurt am Main.

-
- Thews, J.-D., 1996. Erläuterungen zur Geologischen Übersichtskarte von Hessen 1:300000 (GÜK300 Hessen) Teil I: Kristallin, Ordoviz, Silur, Devon, Karbon.- Geologische Abhandlungen von Hessen, Bd. 96,.
- Totschnig, G., Büchele, R., Fritz, S., Kranzl, L., Nagler, J., Ponweiser, K., Baumgartner, W., Postl, J., Adler, B., Brandmayr, J., Blarke, M.B., 2017. Potentiale, Wirtschaftlichkeit und Systemlösungen für Power-to-Heat (Berichte aus der Energie- und Umweltforschung No. 00/2017). Wien.
- VDI, 2022. VDI 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.
- Wilhelm, F., 2014. Hessen: Theoretisch eine Insel [WWW Document]. URL <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/detail/theoretisch-eine-insel-107407> (accessed 6.11.23).



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