
Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland

Strategien für den Markthochlauf in
Wärmenetzen und Industrie

STUDIE

Agora
Energiewende



Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland

IMPRESSUM

STUDIE

Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland

Strategien für den Markthochlauf in
Wärmenetzen und Industrie

ERSTELLT VON

Agora Energiewende
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-energiewende.de
info@agora-energiewende.de

PROJEKTPARTNER

Fraunhofer-Einrichtung für Energie-
infrastrukturen und Geothermie IEG
Gulbener Straße 23 | 03046 Cottbus
<https://www.ieg.fraunhofer.de/>

Projektleitung Fraunhofer IEG:
Björn Drechsler
bjoern.drechsler@ieg.fraunhofer.de
Fabian Ahrendts
fabian.ahrendts@ieg.fraunhofer.de

Satz: Karl Elser Druck GmbH
Lektorat: Berit Sörensen
Titelbild: Dusan Petkovic | Shutterstock

293/03-S-2023/DE

Version: 1.1, Juli 2023



Dieses Werk ist lizenziert unter
CC BY-NC-SA 4.0.

PROJEKMLEITUNG

Uta Weiß
uta.weiss@agora-energiewende.de
Anna Kraus
anna.kraus@agora-energiewende.de

AUTORINNEN UND AUTOREN:

Fabian Ahrendts, Björn Drechsler, Julian Hendricks,
Jan Küpper, Susanne Lang, Tim Peil, Daniel Scholz,
Dr. Elena Timofeeva, Dr.-Ing. Matthias Utri, Lisa
Weidinger (alle Fraunhofer IEG); Anna Kraus, Uta
Weiß, Simon Müller (alle Agora Energiewende).

Die Verantwortung für die Inhalte der Kapitel
2 bis 8 liegt ausschließlich bei Fraunhofer IEG.
Agora Energiewende hat die Zusammenfassung
(Kapitel 1) verfasst. Die Handlungsempfehlungen
(Kapitel 9) wurden von Fraunhofer IEG und Agora
Energiewende gemeinsam verfasst.



Unter diesem Scan-Code steht
diese Publikation als PDF zum
Download zur Verfügung.

Bitte zitieren als:

*Agora Energiewende, Fraunhofer IEG (2023):
Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland.
Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen
und Industrie.*

www.agora-energiewende.de

DANKSAGUNG

Erst das Engagement vieler weiterer Kolleginnen und Kollegen hat diese Studie möglich gemacht. Für die tatkräftige Unterstützung bedanken möchten wir uns daher bei Nikola Bock, Chrissie Donnelly, Janne Görlach, Alexandra Langenheld, Maxi Matzanke, Dr. Julia Metz, Dr. Jahel Mielke, Paul Münnich, Lea Marie Nesselhauf, Frank Peter, Ada Rühring, Dr. Barbara Saerbeck, Hendrik Staudinger, Alexandra Steinhardt, Gloria Watzinger, Anja Werner (alle Agora Energiewende).

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

die vorliegende Studie zu Großwärmepumpen gibt einen Gesamtüberblick über das Potenzial und den Marktstatus von Großwärmepumpen sowie ihren Einsatz in Wärmenetzen und beschäftigt sich mit den für ihren Einsatz erforderlichen politischen Handlungsprioritäten.

Der Roll-out von Großwärmepumpen erfordert einen Dreiklang aus strategischer Zielsetzung und Anreizen von öffentlicher Seite, technologischer Innovation durch Hersteller und beschleunigter Umsetzung durch Fernwärmeunternehmen und Industrie. Dies erfordert eine lösungsorientierte Partnerschaft von Unternehmen und öffentlicher Hand. Vor diesem Hintergrunde liegt es nahe, sich für den Markthochlauf von Großwärmepumpen die Idee der *Mission Economy* der italienisch-amerikanischen Ökonomin Marianna Mazzucato für die deutsche Klimatransformation nutzbar zu machen.

Dieser neue Ansatz für die Lösung großer gesellschaftlicher Aufgaben zeichnet sich durch eine aktive Partnerschaft zwischen privatem und öffentlichem Sektor aus: Der Staat definiert grobe Anforderungen und zu lösende Probleme, ohne dabei kleinteilige Vorgaben zu machen, und stellt für die Privatwirtschaft Investitionssicherheit her. Im Gegenzug binden sich private Akteure an Zielvorgaben wie zum Beispiel Kostensenkungen oder attraktive Angebote für Kundinnen und Kunden. Zudem übernimmt der Staat unternehmerische Risiken, partizipiert aber auch an den Erlösen.

Mit unserer Studie wollen wir einen Beitrag leisten, die erheblichen Potenziale von Großwärmepumpen und Wärmenetzen für die Umsetzung der Wärmewende zu heben.

Ich wünsche eine angenehme Lektüre!

Simon Müller
Direktor Deutschland, Agora Energiewende

Ergebnisse auf einen Blick:

1

Wärmeanwendungen bis 200 Grad sind für über drei Viertel des deutschen Erdgasverbrauchs und über ein Viertel der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Aktuell dominieren fossile Energien die Wärmeversorgung in industriellen Prozessen, Gebäuden und Wärmenetzen. Für die Erreichung der Klimaziele und zur Senkung des Erdgasverbrauchs ist es daher entscheidend, die Versorgung auf klimaneutrale Lösungen auf Basis Erneuerbarer Energien umzustellen.

2

Die gesamte deutsche Wärmenachfrage bis 200 Grad lässt sich technisch vollständig durch Wärmepumpen decken. Großwärmepumpen können hierbei erhebliche Potenziale in Geothermie, Gewässern und Abwärme heben. Bis 2045 können Großwärmepumpen 70 Prozent der Fernwärmeversorgung sicherstellen und somit einen Großteil des Erdgases ersetzen.

3

Großwärmepumpen sind eine bewährte Technologie, die in Deutschland über ein erhebliches Marktpotenzial verfügt. Jedoch waren 2023 erst 60 Megawatt Leistung installiert. Komplexe Planungs- und Genehmigungsverfahren bremsen den Markthochlauf. Zudem begünstigen das bestehende Fördersystem über das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) sowie die höhere Abgabenlast auf Strom gegenüber Erdgas bisher gasbasierte Wärmelösungen – diese Fehlanreize gilt es zu beheben.

4

Ein schneller Hochlauf von Großwärmepumpen erfordert einen klug ineinandergreifenden Instrumentenmix. Übergeordnet ist ein klares Zielbild erforderlich, kombiniert mit transformationskonformen Energiepreisen und reformierten Netzentgelten. Hersteller sollten die hierdurch entstehende Planungssicherheit nutzen, um Innovationen voranzutreiben und Herstellungskosten zu senken. Eine reformierte Förderkulisse und Maßnahmen zur Beschleunigung von Großwärmepumpenprojekten in Wärmenetzen können dann die Nachfrage ankurbeln.

Inhalt

1	Zusammenfassung	11
2	Hintergrund, Ziel und Gegenstand der Studie	19
2.1	Ausgangslage: Wärmeerzeugung noch weitgehend fossil	19
2.2	Ziel und Gegenstand dieser Studie	20
2.3	Großwärmepumpen – Begriffsklärung und Status quo	21
2.4	Aktuelle Rolle der Großwärmepumpen im deutschen Fernwärmesektor	22
2.5	Bedeutung und Erfolgsfaktoren von Großwärmepumpen in Europa	28
3	Entwicklungsszenarien für Wärmenetze und Großwärmepumpen zur Erreichung der Klimaziele	31
3.1	Entwicklungspfade für eine volkswirtschaftlich effiziente Energie- und Wärmewende	31
3.2	Flexibler, systemdienlicher Betrieb von Großwärmepumpen	38
3.3	Eckdaten des notwendigen Roll-outs von Großwärmepumpen in der Fernwärme	45
4	Wärmequellen: Potenziale und Voraussetzungen	48
4.1	Bedeutung der Wärmequelle für Großwärmepumpen	48
4.2	Potenziale und Voraussetzungen verschiedener Wärmequellen	50
4.3	Wärmepotenziale in Deutschland	56
5	Stand der Technik: Hauptkomponenten, Kennzahlen, Entwicklungspotenziale	57
5.1	Funktionsprinzip von Kompressionswärmepumpen	57
5.2	Schlüsselkomponente Verdichter	60
5.3	Bedeutung umweltfreundlicher Kältemittel	62
6	Der Markt für Großwärmepumpen: Produkte, Hersteller, Industriepolitik	66
6.1	Der Markt für Großwärmepumpen: Produkte und Hersteller	66
6.2	Die Herstellerperspektive: höhere Planungssicherheit als Voraussetzung für größere Produktionsvolumina und kürzere Lieferzeiten	69
7	Regulatorischer und wirtschaftlicher Rahmen, Anreizsysteme und Fördermöglichkeiten in Deutschland	72
7.1	Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Großwärmepumpenprojekten	72
7.2	Wärmegestehungskosten von Großwärmepumpenprojekten ohne Fördermitteleinfluss für verschiedene Wärmequellen	75
7.3	BEW-Förderung als zentrales Instrument zur Transformation der Wärmenetze	81
7.4	Förderung im Rahmen des KWKG über iKWK-Ausschreibungen und EE-Bonus	84
7.5	Bedarf zur Weiterentwicklung des KWKG	85

8	Planung und Entwicklung von Großwärmepumpenprojekten für Wärmenetze: Perspektive der Fernwärmeversorger	88
8.1	Leistungsfähige Stadtwerke und Fernwärmeversorger als Schlüsselakteure	88
8.2	Potenziale zur Prozessbeschleunigung aus Sicht der Fernwärmeversorger	90
9	Handlungsfelder für den beschleunigten Roll-out von Großwärmepumpen in der Fernwärme	96
9.1	Gesamtrahmen: klare Ziele, effiziente Energiepreise und reformierte Netzentgelte	96
9.2	Großwärmepumpen: schnelle Kostensenkung, weitere Performancesteigerung und höhere Fertigungskapazitäten	97
9.3	Wärmenetze: bereinigte Förderlandschaft, verbindliche Planung und vereinfachte Umsetzung	98
	Literaturverzeichnis	102
A.1	Übersicht Großwärmepumpenprojekte und detaillierte Beschreibung ausgewählter Projekte	114
A.2	Dispatch und Nachfrage im Strom- und Fernwärmesektor in allen Stützjahren der T45-Szenarien „Strom“ und „H₂“	122
A.3	Großwärmepumpenprodukte am Markt (TRL = 9) und weitere Wärmepumpenprodukte und -technologien	129
A.4	Analyse der Wärmegestehungskosten	133
A.5	Checkliste für Fernwärmeversorger zur Planung und Realisierung von Großwärmepumpenprojekten	135

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung A:	Endenergieverbrauch nach Anwendungszwecken in Deutschland 2021 und Energieträger zur Bereitstellung	11
Abbildung B:	Gegenüberstellung des möglichen Wärmeangebots durch Wärmepumpen und der Wärmebedarfe bis 200 °C in Deutschland (exklusive Umgebungsluft)	12
Abbildung C:	Das durchschnittliche Fernwärmenetz einer deutschen Stadt im Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2020	13
Abbildung D:	Maximale Vorlauftemperatur und Heizleistung verfügbarer Großwärmepumpen	14
Abbildung E:	Potenziale und Handlungsprioritäten für klimaneutrale Wärme bis 200 °C	18
Abbildung 1:	Anteil des Wärmesektors am Endenergiebedarf in Deutschland 2021	19
Abbildung 2:	Anzahl und Trassenlänge der rund 3.800 Wärmenetze nach Temperaturniveaus	23
Abbildung 3:	Anzahl und thermische Leistung von KWK-Anlagen größer 500 kW sowie von KWK-Anlagen und Heizwerken in Wärmenetzen	24
Abbildung 4:	Bestehende und geplante Großwärmepumpenprojekte in Deutschland	26
Abbildung 5:	Wärmequellen und Einzelleistungen bestehender und geplanter Großwärmepumpen in Deutschland	27
Abbildung 6:	Länder Europas mit den größten Anteilen von Großwärmepumpen an der Wärmeerzeugung im Fernwärmesektor	28
Abbildung 7:	Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen in ausgewählten Ländern	29
Abbildung 8:	Eckdaten der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien im Jahr 2030 – Vergleich verschiedener Studien über Energiesysteme	33
Abbildung 9:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor	34
Abbildung 10:	Entwicklung der Fernwärmeerzeugung (Fernwärmeabsatz zzgl. Leitungsverluste) in den T45-Szenarien	35
Abbildung 11:	Entwicklung des Technologie- und Energieträgermix zur Fernwärmeerzeugung in den T45-Szenarien	37
Abbildung 12:	Entwicklung der installierten thermischen Leistung in der Fernwärme	37
Abbildung 13:	Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Winterwoche im Jahr 2045	39
Abbildung 14:	Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Sommerwoche im Jahr 2045	41
Abbildung 15:	Entwicklung der Wärmespeicherkapazität in der Fernwärme	42
Abbildung 16:	Anteil der Großwärmepumpe an der Wärmeerzeugung in Abhängigkeit von der Residuallast	42
Abbildung 17:	Geordneter Fernwärmelastgang im Jahr 2045	43
Abbildung 18:	Ökonomischer und ökologischer Mindestvorteil des flexiblen Betriebs einer Großwärmepumpe	44
Abbildung 19:	Roll-out von Großwärmepumpen in zwei ineinander übergehenden Phasen	45
Abbildung 20:	Verteilung des jährlichen Großwärmepumpenzubaus von 4,0 bis 4,9 GW auf die verschiedenen Leistungsklassen orientiert am heutigen KWK-Anlagenbestand	46
Abbildung 21:	Das durchschnittliche Fernwärmenetz einer deutschen Stadt im Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2020	47
Abbildung 22:	Theoretisch mögliche COPs von Wärmepumpen bei der Verwendung verschiedener Wärmequellen bei einem Wärmepumpen-Gütegrad von 50 Prozent und unterschiedlichen Temperaturen des Wärmenetzes	49
Abbildung 23:	Gegenüberstellung des möglichen Wärmeangebots durch Wärmepumpen und der Wärmebedarfe bis 200 °C in Deutschland (exklusive Umgebungsluft)	55

Abbildung 24: Schematische Darstellung einer Großwärmepumpe	58
Abbildung 25: Exemplarischer Einfluss unterschiedlicher Verschaltungsvarianten auf die Kosten der Kreislaufkomponenten und den COP bei konstanten Randbedingungen	59
Abbildung 26: Heizleistung, Temperaturhub und Flexibilität in Abhängigkeit von der Verdichtertechnologie	61
Abbildung 27: Leistungszahlen (COPs) für unterschiedliche Kältemittel eines einstufigen Kreislaufs	63
Abbildung 28: Maximale Vorlauftemperatur und Heizleistung verfügbarer Großwärmepumpen	67
Abbildung 29: COP und Temperaturhub für am Markt vertretene Modelle von Großwärmepumpen mit unterschiedlichen Quellen- und Senkentemperaturen	68
Abbildung 30: Wirtschaftliche Einflussfaktoren für Großwärmepumpenprojekte	72
Abbildung 31: Einfluss der Wärmequelle und der übrigen Anlagenkomponenten auf die Investitionskosten von Großwärmepumpenprojekten	76
Abbildung 32: Spezifische Wärmegehungskosten im Jahr 2030 für unterschiedliche Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden und der Strombezugskosten jeweils für Anlagen mit 1 MW und 10 MW Heizleistung bei einer Senktemperatur von 100 °C	80
Abbildung 33: Überblick zu den Fördermodulen der BEW	82
Abbildung 34: Leistungsphasen eines Großwärmepumpenprojekts mit Angabe der wichtigsten Aufgaben und ungefähren Zeitdauer in Monaten	91
Abbildung 35: Möglichkeiten zur Beschleunigung der Planung, Genehmigung und Realisierung von Großwärmepumpenprojekten	94
Abbildung 36: Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Winterwoche im Szenario T45-Strom	123
Abbildung 37: Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Winterwoche im Szenario T45-H ₂	124
Abbildung 38: Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Sommerwoche im Szenario T45-Strom	125
Abbildung 39: Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Sommerwoche im Szenario T45-H ₂	126
Abbildung 40: Ökonomischer und ökologischer Mindestvorteil des flexiblen Betriebs einer Großwärmepumpe im Szenario T45-Strom	127
Abbildung 41: Ökonomischer und ökologischer Mindestvorteil des flexiblen Betriebs einer Großwärmepumpe im Szenario T45-H ₂	128
Abbildung 42: Übersicht über am Markt erhältliche Großwärmepumpen (TRL = 9)	129
Abbildung 43: Übersicht über neu- oder weiterentwickelte Großwärmepumpen (TRL < 9) nach IEA HPT Annex 58	131
Abbildung 44: Zusammensetzung der Wärmegehungskosten für unterschiedliche Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden	133
Abbildung 45: Spezifische Wärmegehungskosten im Jahr 2030 bei Nutzung unterschiedlicher Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden und der Strombezugskosten jeweils für Anlagen mit 1 MW und 10 MW Heizleistung bei einer Senktemperatur von 80 °C	134

Tabelle 1:	Eigenschaften und relative Bewertung verschiedener Umwelt- und Abwärmequellen für den Betrieb von Großwärmepumpen	48
Tabelle 2:	Umwelteigenschaften ausgewählter Arbeitsmittel unterschiedlicher Klassen in Bezug auf Klimawirksamkeit, Toxizität und Brennbarkeit	64
Tabelle 3:	Annahmen für die Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten von Großwärmepumpen mit 1 MW versus 10 MW	78
Tabelle 4:	Einordnung der iKWK-Förderung in den Kontext des notwendigen Roll-outs von Großwärmepumpen	86
Tabelle 5:	Handlungsprioritäten für klimaneutrale Wärme bis 200 °C	101
Tabelle 6:	Übersicht Großwärmepumpenprojekte in Wärmenetzen	114
Tabelle 7:	Übersicht Großwärmepumpenprojekte in der dezentralen Wärmeversorgung und in industriellen Prozessen	116
Tabelle 8:	Überblick zu weiteren marktreifen und neuartigen Wärmepumpentechnologien	132
Tabelle 9:	Checkliste wichtiger Fragestellungen bei Großwärmepumpenprojekten	135

Abkürzungsverzeichnis

AGFW	Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.)
ArbStättV	Arbeitsstättenverordnung
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
BauGB	Baugesetzbuch
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BWP	Bundesverband Wärmepumpe e. V.
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
dena	Deutsche Energie-Agentur GmbH
EEG	Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien (Erneuerbaren-Energien-Gesetz)
EnEfG	Energieeffizienzgesetz
EPC	Engineering, Procurement and Construction
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GW/GWh	Gigawatt/Gigawattstunden
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluorolefin-Kältemittel
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HTWP	Hochtemperatur-Wärmepumpe
IEA	Internationale Energie Agentur
IHX	Internal heat exchanger (Interner Wärmeübertrager)
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
kW/kWh	Kilowatt/Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung
KWP	Kommunale Wärmeplanung
KWW	Kompetenzzentrum Kommunale Wärmewende
LNG	Liquid Natural Gas
LULUCF	Land use, land-use change and forestry (Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
LWG	Landeswassergesetze
MVR	Mechanical vapor recompression (Mechanische Dampfnachverdichtung)
MW/MWh	Megawatt/Megawattstunden
Mt	Megatonnen
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotenzial)
OPEX	Operational Expenditures (Betriebskosten)
PFAS	Per- and polyfluoroalkyl substances (Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen)
PKNS	Plattform Klimaneutrales Stromsystem
PPA	Power Purchase Agreement
PtG/PtL	Power to Gas / Power to Liquid
TCP	Technology Collaboration Programmes
TRL	Technology readiness level (Technologiereifegrad)
TWh	Terrawattstunden
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
Vbh	Vollbenutzungsstunden
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Zusammenfassung

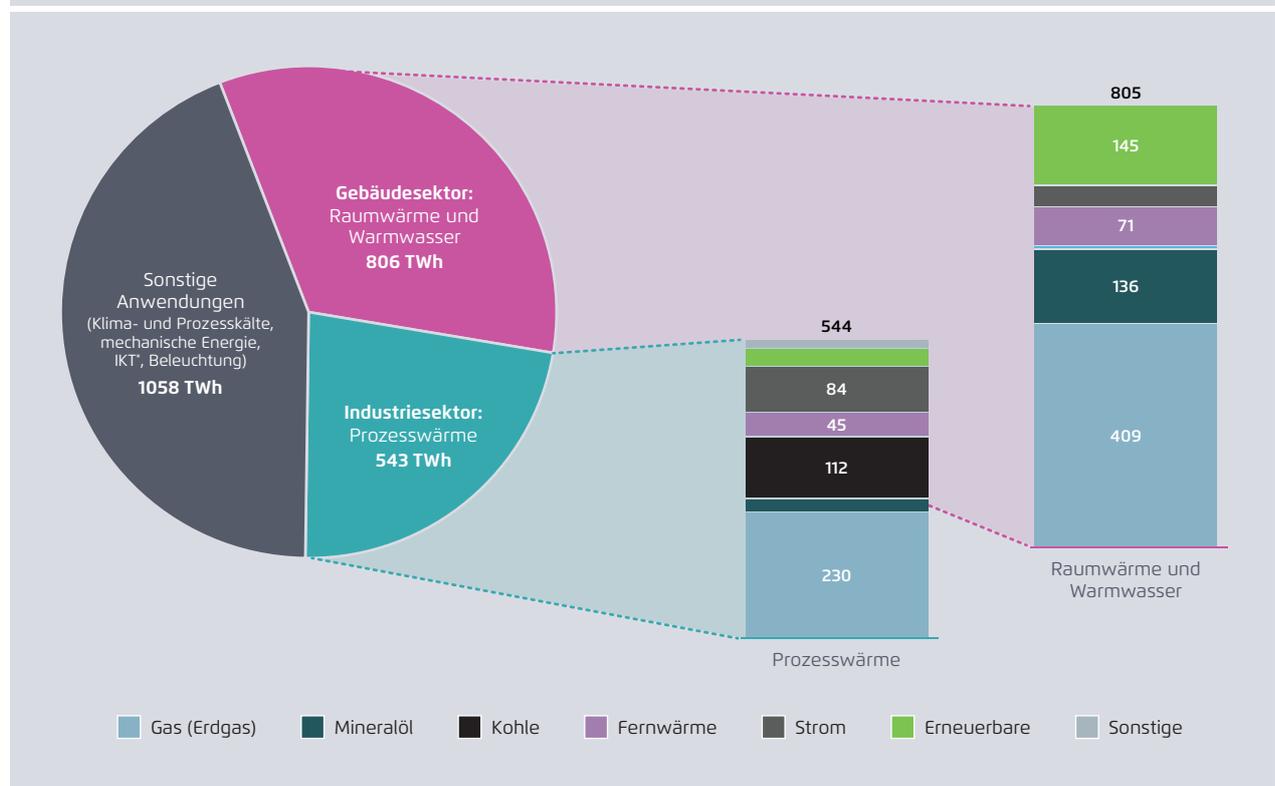
Hintergrund

Eine klimaneutrale Wärmeversorgung ist entscheidend, damit Deutschland seine Klimaziele erreichen kann. Deutschland hat sich verbindlich zum Ziel gesetzt, bis 2045 vollständig klimaneutral zu sein. Entscheidender Zwischenschritt auf dem Weg dahin ist das ebenfalls verbindliche Ziel von -65 Prozent Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 bis 2030. Dem Wärmesektor kommt für die Klimaziele dabei eine Schlüsselrolle zu: Immer noch werden knapp 80 Prozent des Wärmebedarfs in Gebäuden und der Industrie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gedeckt.

Der Großteil der Wärmenachfrage entfällt auf niedrige Temperaturbereiche. Die Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme bis 200 °C sowie Warmwasser erfordert einen erheblichen Energie- und Erdgaseinsatz und verursacht dabei hohe CO₂-Emissionen. Diese Temperaturbereiche umfassen vollständig die in Wärmenetzen benötigten Temperaturen von in der Regel 90 °C bis 110 °C sowie ein gutes Drittel des industriellen Wärmebedarfs (UBA 2017). Die Wärmenachfrage bis 200 °C war 2021 für 43 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs verantwortlich, bewirkte einen Erdgasverbrauch von 494 Terrawattstunden (TWh) (76 Prozent des Gesamtverbrauchs) und verursachte Treibhausgasemissionen in Höhe von 215 Mio. t CO₂-Äq.

Endenergieverbrauch nach Anwendungszwecken in Deutschland 2021 (links)
Energieträger zur Bereitstellung (rechts)

Abbildung A



Agora Energiewende basierend auf AGEb (2022b). * Informations- und Kommunikationstechnik

Potenzial, Marktstatus und Innovationsfelder

Großwärmepumpen sind eine Schlüsseltechnologie für den klimaneutralen Betrieb von Wärmenetzen und die Bereitstellung industrieller Prozesswärme bis 200 °C.

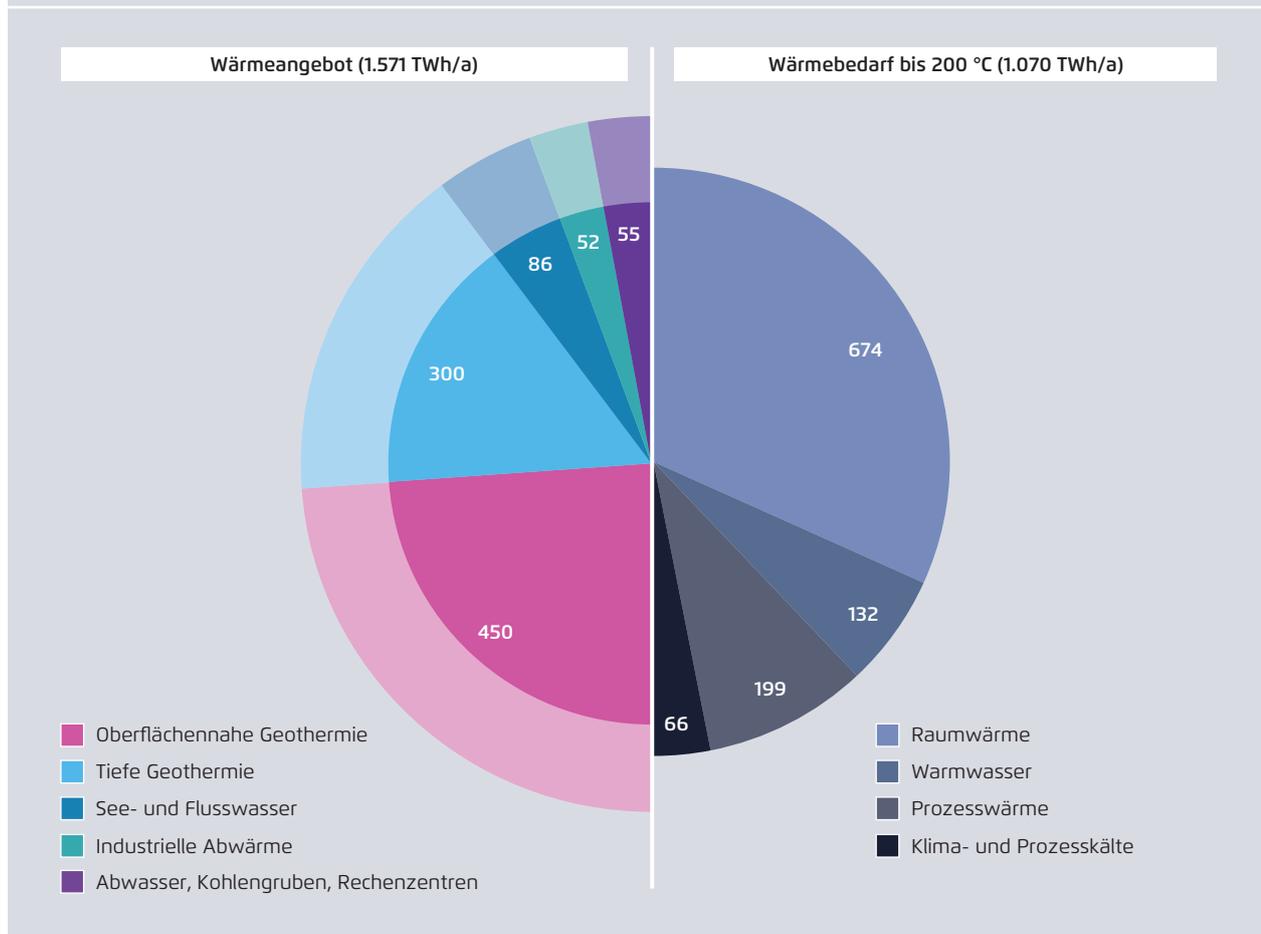
Wärmepumpen veredeln natürliche Wärmequellen, indem sie diese unter Einsatz von Strom auf ein höheres Temperaturniveau heben und so besser nutzbar machen. Die hierfür erforderliche Strommenge beträgt dabei lediglich einen Bruchteil

der erzeugten Wärme, das heißt, der Wirkungsgrad beträgt deutlich mehr als 100 Prozent. Der Effizienzvorteil ist umso größer, je kleiner der erforderliche Temperaturhub ist.¹ Schon heute können Zieltemperaturen bis 200 °C effizient erreicht werden. Für

1 Der Temperaturhub ist die Differenz zwischen der Temperatur der genutzten Wärmequelle (beispielsweise Luft, Erdboden, Flusswasser oder eine Kläranlage) und der in der Wärmepumpe erzeugten Vorlauftemperatur, die z. B. in ein Wärmenetz oder einen Industrieprozess eingespeist wird.

Gegenüberstellung des möglichen Wärmeangebots* durch Wärmepumpen und der Wärmebedarfe bis 200 °C** in Deutschland (exklusive Umgebungsluft)

Abbildung B



Fraunhofer IEG basierend auf Born et al. (2022), Bracke et al. (2022), Kammer (2018), Gerhardt et al. (2019), Fritz und Pehnt (2018), Wolf (2017), Stobbe et al. (2015). * Das Wärmeangebot setzt sich aus den Potenzialen der verschiedenen Umwelt- und Abwärmequellen (dunklere Farben) zuzüglich der jeweiligen Antriebsenergie (transparente Farben) für die Wärmepumpen bei einem angenommenen mittleren COP von 2,5 zusammen. ** Wärmeanteile des Endenergiebedarfs Deutschlands im Jahr 2021. Herausgerechnet wurde der Prozesswärmebedarf von Privathaushalten sowie Prozesswärme > 200 °C

diese Studie werden alle Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung ab 500 Kilowatt (kW) als Großwärmepumpen definiert.

Langfristig lässt sich der gesamte Wärmebedarf bis 200 °C in Deutschland durch Wärmepumpen decken.

Ohne Berücksichtigung der Wärmequelle Luft bieten die oberflächennahe und tiefe Geothermie das mit Abstand größte Potenzial, gefolgt von Seen und Flüssen, industrieller Abwärme sowie Abwasser, ehemaligen Kohlegruben und Rechenzentren (Abbildung B).

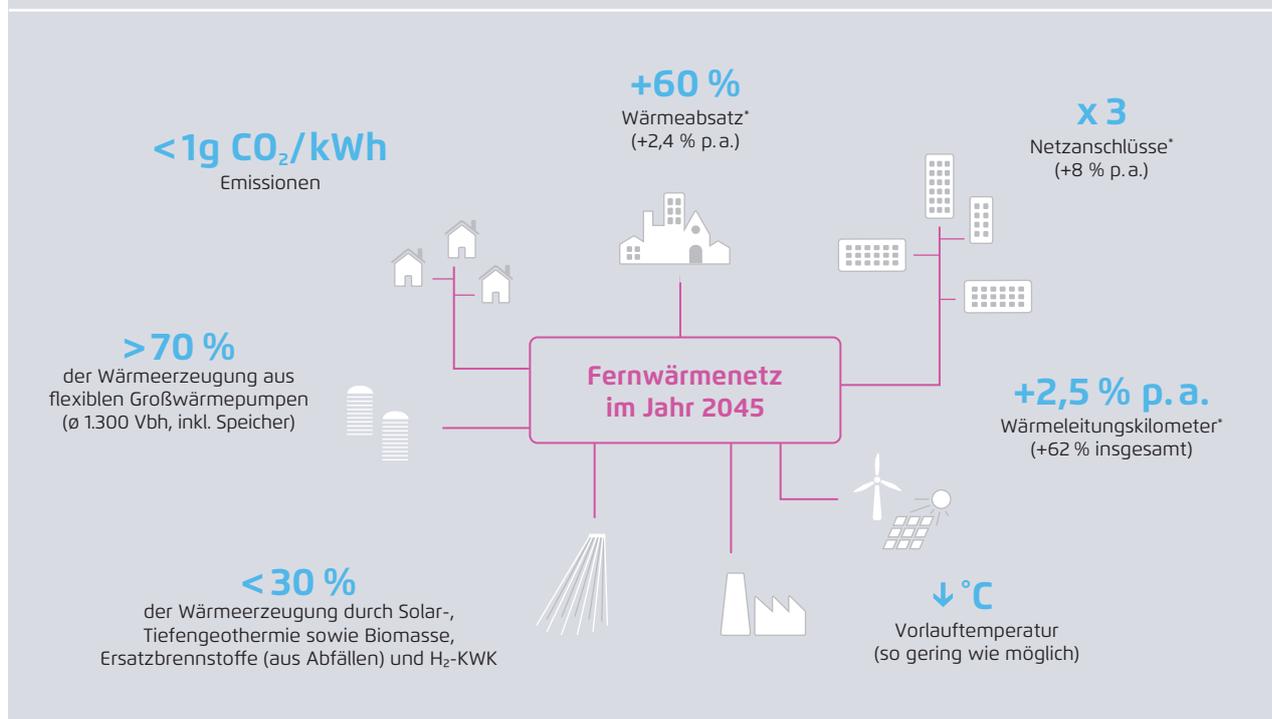
Großwärmepumpen könnten im Jahr 2045 über 70 Prozent der Fernwärme bereitstellen. Wärmenetze sind Voraussetzung für einen klimaneutralen Gebäudebestand im Jahr 2045 – und Großwärmepumpen sind der Schlüssel dazu. Die Wärmeerzeugung

in Wärmenetzen steht jedoch vor grundlegenden Veränderungen, denn aktuell wird der Großteil der Fernwärme noch in fossil befeuerten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) erzeugt. In Zukunft können vor allem Großwärmepumpen diese fossile Wärme ersetzen – dafür braucht es einen durchschnittlichen jährlichen Zubau von mindestens 4 Gigawatt (GW) neuer thermischer Großwärmepumpenleistung bis 2045. Das bedeutet auch: Die entscheidende Technologie für die Klimaneutralität der Wärmenetze ist schon heute bekannt, technisch ausgereift und kann bei entsprechendem Zubau vor 2030 signifikante CO₂-Einsparungen bewirken.

In der Industrie kann der beschleunigte Hochlauf von Wärmepumpen den Gasverbrauch bis 2030 gegenüber 2021 um 25 Prozent senken. Große Potenziale liegen vor allem in der Chemie-, Papier-

Das durchschnittliche Fernwärmenetz einer deutschen Stadt im Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2020*

Abbildung C

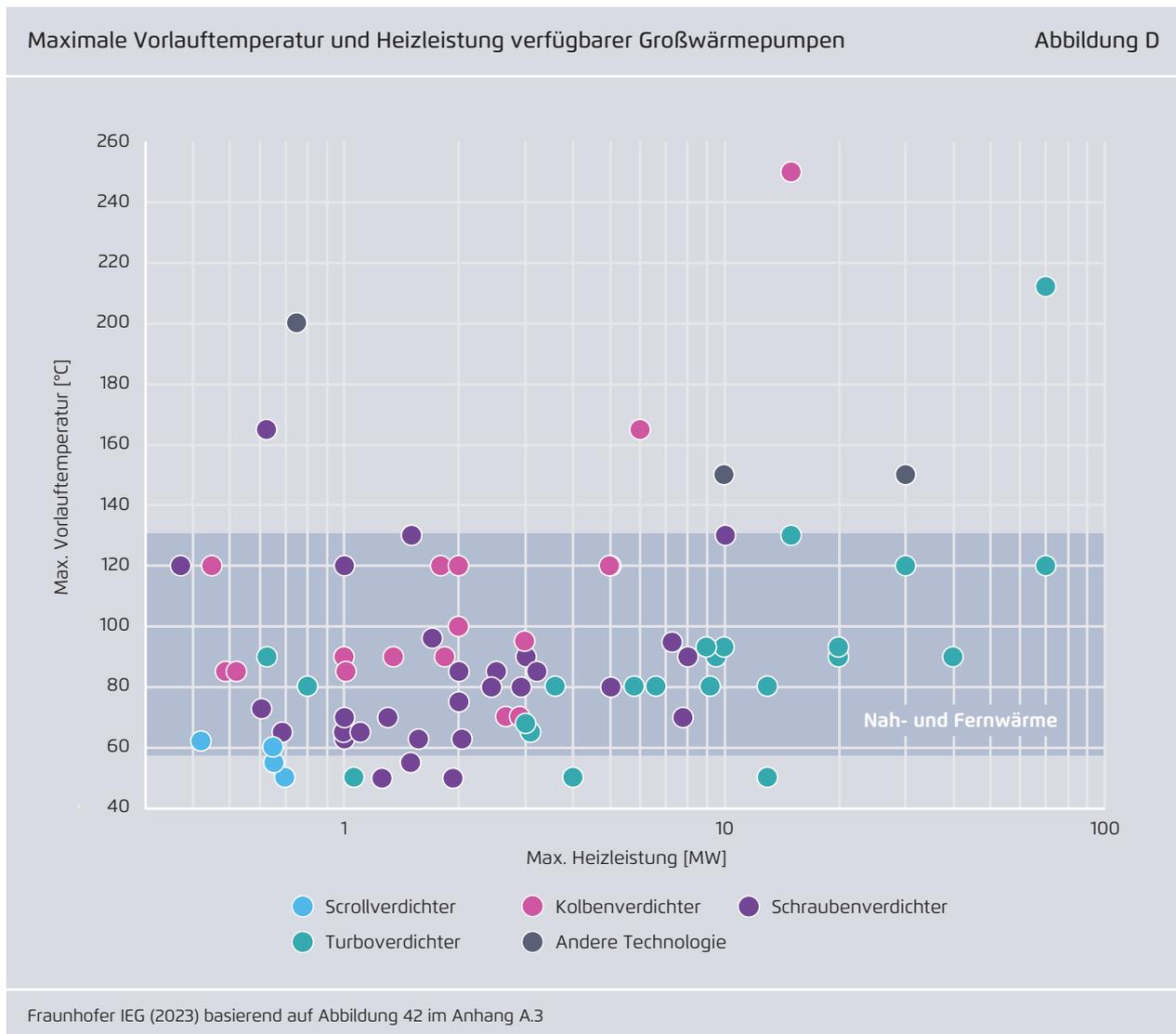


Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022). * ggü. dem Stand im Jahr 2020; Zahlen auf Basis von: Langfristszenarien III (Fraunhofer ISI et al. 2022b)

und Lebensmittelindustrie sowie im Maschinenbau, zum Beispiel in Trocknungsprozessen oder in der Dampferzeugung. Großwärmepumpen sind eine effiziente Möglichkeit zur Erzeugung von klimaneutraler Industrierwärme. Sie können nicht nur auf Basis von Umweltwärme hohe Temperaturen bereitstellen, sondern durch die intelligente Nutzung von Abwärme auch oberhalb von 200 °C eingesetzt werden (Agora Industrie und Future-Camp 2022).

Großwärmepumpen nutzen bewährte Technologien und können schnell skaliert werden. Der Markt für

Großwärmepumpen in Deutschland steckt hingegen noch in den Kinderschuhen. Für den Temperaturbereich von Wärmenetzen haben die Hersteller bereits ein breites Spektrum marktreifer Großwärmepumpenprodukte im Angebot. Viele davon sind bereits in verschiedenen Ländern Europas zuverlässig in Betrieb. In Deutschland sind dagegen bislang sowohl im Fernwärme- als auch im Industriesektor nur wenige Großwärmepumpen installiert: Eine mittlere zweistellige Zahl an Anlagen bringt es auf eine installierte Wärmeleistung von insgesamt weniger als 100 Megawatt (MW), weitere 600 MW sind derzeit in Bau oder in Planung.



Ein konsequenter Markthochlauf kann technische Innovationen und Kostensenkungen befördern.

Erhebliches Innovationspotenzial besteht etwa bei Verdichtern – der Schlüsselkomponente von Wärmepumpen – hinsichtlich neuer Kältemittel, flexiblerer Betriebsweisen und höherer Zieltemperaturen. Darüber hinaus müssen Großwärmepumpen künftig regelungs- und steuerungstechnisch so ausgelegt werden, dass sie ihren Betrieb flexibel auf die Strommarktsituation abstimmen.

Die Verfügbarkeit standardisierter Lösungen im Leistungsbereich von 1 MW bis 10 MW ist für einen erfolgreichen Hochlauf zentral.

Aktuell ist das Marktsegment ab 1 MW Leistung noch stark durch kundenspezifische Lösungen und sehr geringe Stückzahlen gekennzeichnet. Dabei gehen die Hersteller davon aus, dass im Leistungsbereich bis ca. 10 MW Wärmeleistung noch erhebliche Potenziale für mehr Standardisierung vorhanden sind. Da Wärmepumpen erhebliche Skaleneffekte aufweisen, trägt die Verfügbarkeit von größeren Standardkomponenten wesentlich zu Kostensenkungen bei und kann gleichzeitig die Projektplanung vereinfachen. Sie sollte daher einen Fokus für den Markthochlauf bilden.

Handlungsempfehlungen

Bis zum Jahr 2045 müssen im Durchschnitt jedes Jahr weit über 300 Einzelprojekte mit einer neuen Großwärmepumpenleistung von über 4 GW sowie 800 km neue Wärmetrassen geplant, finanziert und errichtet werden. Dies ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die seitens der Politik eine klare Prioritätensetzung und bei Herstellern und Fernwärmebetreibern ein hohes Maß an Innovation und Effizienz erfordert. Dabei ist entscheidend, dass durch einen zeitlich klug gestaffelten Mix aus Preissignalen, Fördermaßnahmen und ordnungsrechtlichen Vorgaben ein schneller Hochlauf gelingt und gleichzeitig Lieferketten und Umsetzungskapazitäten ohne problematische Engpässe mitwachsen können.

Die notwendigen Maßnahmen lassen sich entlang von drei zentralen Handlungsfeldern kategorisieren.

Es gilt erstens einen stimmigen Gesamtrahmen zu setzen, der ein klares strategisches Zielbild mit konsistenten Preissignalen für die Nutzung von Energieträgern und Infrastrukturen kombiniert. Zweitens müssen seitens der Hersteller Innovations- und Kostensenkungspotenziale konsequent und schnell gehoben werden. Drittens muss durch eine Reform der Förderkulisse und ein Maßnahmenbündel zur Umsetzungsvereinfachung die Transformation der Wärmenetze strukturell beschleunigt werden.

Gesamtrahmen: klare Ziele, effiziente Energiepreise und reformierte Netzentgelte

Das Potenzial von Großwärmepumpen und Wärmenetzen für eine klimaneutrale Energieversorgung kann nur dann schnell und umfassend gehoben werden, wenn Hersteller und Anwender sich auf den Hochlaufpfad verlassen können und Marktkräfte durch effiziente Preissignale den Hochlauf unterstützen. Neben einer klar artikulierten glaubhaften Zielvision für den Hochlaufpfad sind in diesem Zusammenhang vor allem die relativen Preise verschiedener Energieträger und die Nutzungsentgelte für Infrastrukturen die wichtigsten Stellschrauben.

- Um für Hersteller und Anwender Zielklarheit zu schaffen, sollte ein Stakeholder-Prozess auf Bundesebene (Großwärmepumpengipfel) eine langfristige Zielvision mit ambitionierten Zwischenzielen entwickeln.
- Die Wirtschaftlichkeit von Großwärmepumpen in Planung und Betrieb hängt entscheidend vom **Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen** ab – aktuell erzeugen Steuern, Abgaben und Umlagen Fehlansätze. Das auf europäischer Ebene geplante neue Emissionshandelssystem (ETS2) für den Gebäude- und Verkehrssektor bzw. eine Erhöhung der Preise im Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) können die aktuelle Schieflage korrigieren. Darüber hinaus ist Strom gegenüber Gas weiterhin mit

höheren Steuern, Abgaben und Umlagen belegt. Ein weiterer Abbau dieser Fehlanreize, beispielsweise durch eine Senkung der Stromsteuer auf das europäische Mindestniveau, kann hier Abhilfe schaffen.

- Die Einführung von **zeitvariablen Netzentgelten** ist unerlässlich, damit Wärmepumpen erneuerbaren Strom systemdienlich und netzschonend einsetzen.

Großwärmepumpen: schnelle Kostensenkung, weitere Performancesteigerung und höhere Fertigungskapazitäten

Großwärmepumpen bergen erhebliche Potenziale für Leistungssteigerungen bei gleichzeitiger Kostenreduktion – die Hersteller müssen diese Potenziale konsequent heben und sollten hierbei intelligent unterstützt werden. Das technische Grundprinzip und die einzelnen Komponenten von Wärmepumpen sind seit Jahrzehnten bekannt und marktgängig. Hingegen steckt die industrielle Großfertigung leistungsfähiger Großwärmepumpen aufgrund mangelnder Nachfrage noch in den Kinderschuhen. Eine vorausschauende Ausweitung des Angebots ist daher unerlässlich, damit bei schnell anziehender Nachfrage keine Lieferengpässe bzw. starke Kostensteigerungen auftreten.

- **Eine Ausweitung von Standardlösungen auf Leistungsbereiche bis 10 MW sollte prioritär vorangetrieben werden.** Erstens können die spezifischen Investitionskosten (Euro pro MW) durch größere Anlagen gesenkt werden. Zweitens erlaubt eine Standardisierung höhere Stückzahlen und dadurch Skaleneffekte bei der Fertigung. Für den Markthochlauf kann eine Fokussierung auf zahlreiche Projekte in diesem mittleren Leistungsbereich besonders förderlich sein.
- **Die Weiterentwicklung von Verdichtern birgt erhebliche Potenziale für eine höhere Performance von Großwärmepumpen und für die Verwendung natürlicher Kältemittel.** Technische Innovationen bei Verdichtern und Kältemitteln erlauben Leistungssteigerungen entlang drei

zentraler Eigenschaften: Erstens können höhere Zieltemperaturen und Temperaturhübe erzielt werden. Zweitens sind teils erhebliche Effizienzsteigerungen möglich, d. h. eine Verbesserung des COP. Drittens kann eine höhere Flexibilität erreicht werden, indem der Betrieb in breiteren Leistungsbereichen und mit schnelleren Lastwechseln sowie An- und Abfahrbefehlen ermöglicht wird. Dies unterstützt eine systemdienliche Betriebsweise.

- **Der Aufbau von industriellen Fertigungskapazitäten sollte ein industriepolitischer Fokus sein.** Nur mit einer deutlichen Ausweitung der globalen und europäischen Fertigungskapazitäten kann das Potenzial von Großwärmepumpen voll ausgeschöpft werden. Vor dem Hintergrund einer stärkeren Betonung resilienter Lieferketten kommt dem Aufbau auch europäischer Fertigungskapazitäten eine zentrale Rolle zu – daher sollte die Ansiedlung von neuen Produktionskapazitäten, kombiniert mit Instrumenten zur langfristigen Abnahmesicherung, prioritär vorangetrieben werden.

Wärmenetze: bereinigte Förderlandschaft, verbindliche Planung und vereinfachte Umsetzung

Der Aus- und Neubau von Wärmenetzen sowie deren Ertüchtigung sind wesentlicher Taktgeber für den Markthochlauf von Großwärmepumpen – derartige Maßnahmen müssen daher einfach, zügig und ökonomisch attraktiv umsetzbar sein. Um dieses Ziel zu erreichen sind teils grundsätzliche Anpassungen im Hinblick auf drei Bereiche erforderlich. Erstens müssen Fördersysteme verbessert bzw. besser aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere die Parallelführung von Förderungen nach dem lange bestehenden Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) und der neuen Bundesförderung Effiziente Wärmenetze (BEW) führt aktuell zu Fehlanreizen. Zweitens muss eine kommunale Energie-Verteil-Strategie erarbeitet werden: aufbauend auf einer verbindlichen, kommunalen Wärmeplanung geht aus ihr hervor, in welchen

Gebieten eine netzgebundene Wärmeversorgung prioritär zum Einsatz kommen sollte. Drittens gilt es durch ein Bündel von Anpassungen und Vereinfachungen bei Genehmigungs- und Umsetzungsverfahren die erforderliche Projektlaufzeit von aktuell bis zu sechs Jahren auf rund drei Jahre zu halbieren.

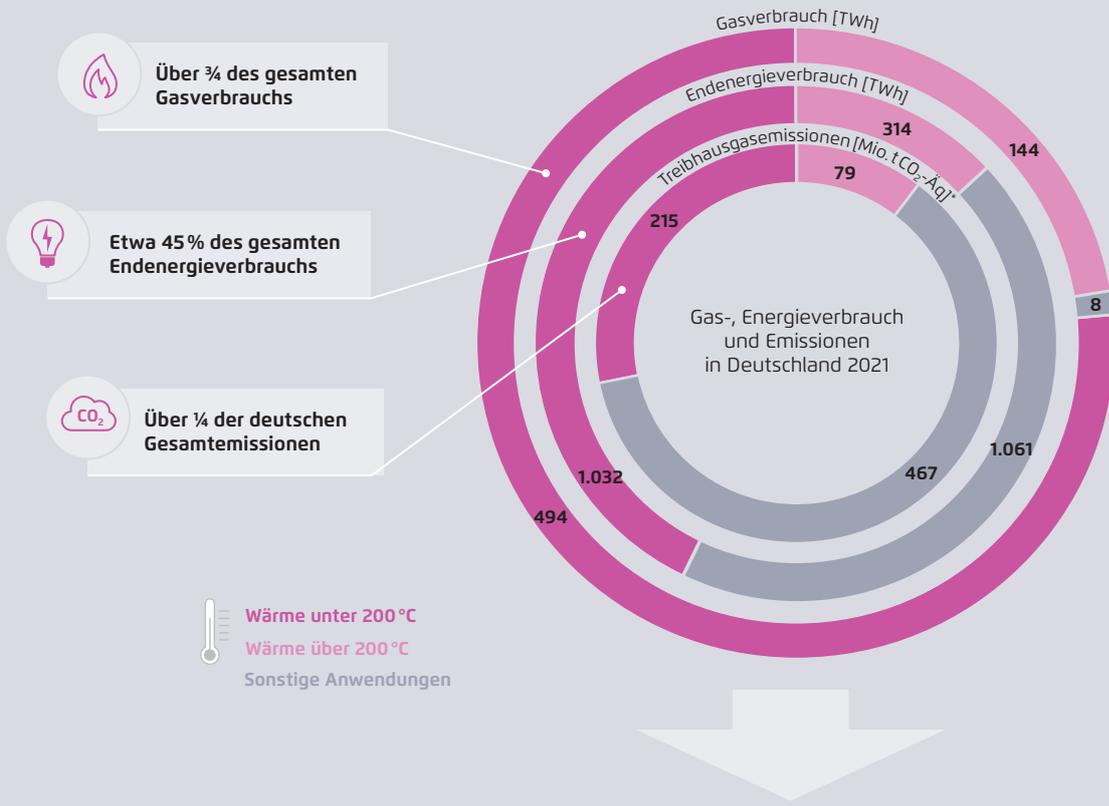
- Neben der BEW besteht das alte Fördersystem für Kraft-Wärme-Kopplung über das **KWKG** weiter. Dies führt aktuell zu starken Fehlanreizen, insbesondere einer zu kleinen Auslegung von Wärmepumpen und einem aus Stromsystem Sicht hoch problematischen wärmegeführten Dauerbetrieb von KWK-Anlagen und Wärmepumpen. Dies sollte über eine grundsätzliche Reform des KWKG behoben werden.
- **Stärkung der finanziellen Ausstattung der BEW.** Die im Programm vorgesehenen Finanzmittel von 3 Mrd. Euro sind keinesfalls ausreichend, um den in dieser Studie skizzierten Markthochlauf zu unterstützen. Eine Analyse von Agora Energiewende (Agora Energiewende, 2022) empfahl vor diesem Hintergrund eine Aufstockung der Mittel um weitere 8 Mrd. Euro auf insgesamt 11 Mrd. Euro.
- **Einführung einer verbindlichen kommunalen Wärmeplanung und Weiterentwicklung zur kommunalen Energie-Verteil-Strategie.** Über den Erfolg der Wärmewende entscheidet die Umsetzung vor Ort – dafür ist eine flächendeckende kommunale Wärmeplanung entscheidend. Es gilt auf Bundesebene hierfür verbindliche Regelungen aufzustellen, sodass verlässliche und vergleichbare Wärmepläne in allen Kommunen entstehen. Darüber hinaus sollte die kommunale Wärmeplanung zu einer kommunalen Energie-Verteil-Strategie weiterentwickelt werden, die eine abgestimmte Planung der Strom-, Gas-, Wasserstoff- und Wärmenetze ermöglicht.
- **Beschleunigte Planung von Großwärmepumpenprojekten, vereinfachte Genehmigungen und stärkere Umsetzungskapazitäten.** Die Verkürzung von Projektlaufzeiten von aktuell vier bis sechs Jahre auf rund drei Jahre erfordert ein Bündel an Einzelmaßnahmen, die für sich genommen nur

einen begrenzten Beitrag leisten können, im Rahmen eines Gesamtpakets aber eine starke Wirkung entfalten. Diese sind in Kapitel 8 umfassend dargestellt.

Die im Rahmen dieser Studie vorgelegten Handlungsempfehlungen stellen ein in sich schlüssiges und umfassendes Gesamtpaket dar, mit dem der ambitionierte Hochlauf von Großwärmepumpen und Wärmenetzen gelingen kann. Dabei ist klar, dass in vielen Bereichen weitere Analysen und Präzisierungen erfolgen müssen. Gleichzeitig unterstreicht die Analyse, welchen Beitrag innovative Ansätze in der Wärmebereitstellung für eine erfolgreiche Transformation zur Klimaneutralität leisten können – vorausgesetzt, sie werden zügig und ambitioniert umgesetzt.

Potenziale und Handlungsprioritäten für klimaneutrale Wärme bis 200 °C

Abbildung E



Über ¾ des gesamten Gasverbrauchs

Etwa 45% des gesamten Endenergieverbrauchs

Über ¼ der deutschen Gesamtemissionen

Handlungsprioritäten für klimaneutrale Wärme bis 200 °C	
Gesamtrahmen: klare Ziele, effiziente Energiepreise und reformierte Netzentgelte	Stakeholder-Prozess für Zielklarheit (Großwärmepumpengipfel)
	Wirtschaftlichkeit von Strom gegenüber Gas; CO ₂ -Bepreisung
	Energiesystemdienliche Netzentgelte und schnellere Netzanschlüsse
Großwärmepumpen: schnelle Kostensenkung, weitere Performancesteigerung und höhere Fertigungskapazitäten	Standardisierung, Modularisierung und Skalierung der Produkte und Prozesse
	Innovationsschwerpunkte: Temperaturhübe, Effizienzsteigerungen und flexibler Betrieb; breiterer Einsatz natürlicher Kältemittel
	Aufbau von Fertigungskapazitäten
Wärmenetze: bereinigte Förderlandschaft, verbindliche Wärmeplanung und vereinfachte Umsetzung von Großwärmepumpenprojekten	Aufstockung von Fördermitteln und Beseitigung von Fehlanreizen
	Verbindliche kommunale Wärmeplanung und Weiterentwicklung zur kommunalen Energie-Verteil-Strategie
	Beschleunigte Planung, Genehmigung und Umsetzung von Großwärmepumpenprojekten

Agora Energiewende basierend auf AGEB (2022b). * Emissionen basierend auf Verteilung der Energieträger nach AGEB (2022b) sowie Emissionsfaktoren nach UBA (2022), nicht klimabereinigt. Eigene Annahmen zur Verteilung der Energieträger auf die Temperaturbereiche basierend auf Agora Industrie und FutureCamp (2022)

2 Hintergrund, Ziel und Gegenstand der Studie

2.1 Ausgangslage: Wärmeerzeugung noch weitgehend fossil

Mehr als die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland entfällt auf den Wärmesektor (Stand: 2021). Von den 1.415 TWh Wärmebedarf dient mit 674 TWh fast die Hälfte der Raumwärmeerzeugung, weitere knapp 40 Prozent entfallen auf die Prozesswärme (543 TWh pro Jahr). Warmwasser sowie Klima- und Prozesskälte machen mit 132 TWh beziehungsweise 66 TWh kleinere Anteile aus (siehe Abbildung 1) (AGEB 2022b).

Immer noch wird rund 80 Prozent des Wärmebedarfs durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gedeckt. Im Gebäudesektor werden noch die Hälfte aller Wohnungen mit fossilem Gas versorgt. Der

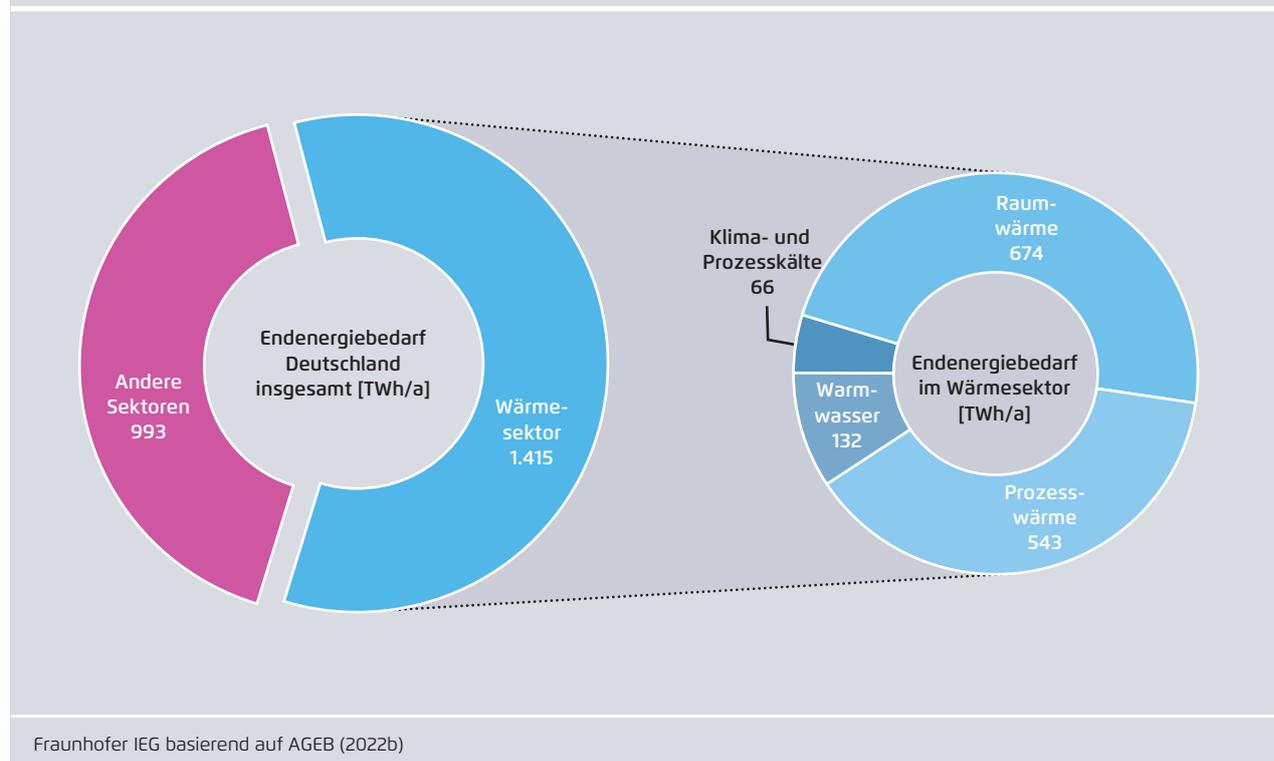
Anteil der Fernwärme am Endenergiebedarf verharrt mit etwa 8 Prozent auf ähnlichem Niveau wie 2011. Der Anteil Erneuerbarer Energien (sowohl direkt genutzt als auch indirekt in der Fernwärme) nahm mit etwa 0,6 Prozent pro Jahr in den letzten drei Jahren nur marginal zu (AGEB 2022b). Auch in der Industrie ist die Wärmeerzeugung mit 41 Prozent auf Basis von Erdgas und mit 20 Prozent auf Basis von Kohle überwiegend fossil (AGEB 2022b).

Die damit einhergehenden stagnierenden CO₂-Emissionen führten dazu, dass im Jahr 2022 das Treibhausgasminderungsziel des Gebäudesektors das dritte Jahr in Folge verfehlt wurde (UBA 2023c).

Zur beschleunigten Dekarbonisierung des Wärmesektors ist es aufgrund dessen Größe, Vielfalt und

Anteil des Wärmesektors am Endenergiebedarf in Deutschland 2021

Abbildung 1



Komplexität erforderlich, zahlreiche Handlungsfelder gleichzeitig zu bearbeiten. Wie in Kapitel 3.1 näher ausgeführt und begründet wird, ist anerkannt, dass die Wärmeversorgung in Zukunft vor allem durch dezentrale Wärmepumpen und klimaneutrale Wärmenetze erfolgen wird und dass gleichzeitig die Gebäudesanierung vorangetrieben werden muss. Diese Studie konzentriert sich vor allem auf die künftige Deckung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs in Wärmenetzen in Deutschland und nimmt dabei speziell die wachsende Bedeutung der Großwärmepumpen in den Blick.

2.2 Ziel und Gegenstand dieser Studie

Ziel dieser Studie ist es, die aktuellen Herausforderungen und Handlungsfelder für den zügigen und flächendeckenden Roll-out von Großwärmepumpen aufzuzeigen sowie Handlungsempfehlungen für energie- und industriepolitische Maßnahmen zu formulieren.

Ein Schwerpunkt der Studie liegt auf dem Einsatz von Großwärmepumpen in Wärmenetzen. Zu diesem Zweck werden in Kapitel 3 die Potenziale und Ziele des Markthochlaufs von Großwärmepumpen im Fernwärmesektor und deren schnell wachsende Bedeutung für das sich rasant verändernde Energiesystem betrachtet.

Daran anschließend wird in Kapitel 4 untersucht, welche Wärmequellen in Deutschland mit welchen Potenzialen für den Betrieb von Großwärmepumpen zur Verfügung stehen und welche Herausforderungen mit der Nutzbarmachung dieser Potenziale verbunden sind.

Kapitel 5 beschreibt den aktuellen Stand der Technik und benennt dabei die wichtigsten Komponenten und techno-ökonomischen Kennzahlen von Großwärmepumpen und betrachtet Auswahl- und Auslegungskriterien in einem stetig komplexer werdenden

Energiesystem. Dabei zeigt sich, dass die Einsatz- und Entwicklungsmöglichkeiten von Großwärmepumpen bereits heute größer sind, als es ihre bisherige Rolle vermuten lässt – und zwar sowohl für Wärmenetze als auch für die Wärmeerzeugung in der Industrie.

Kapitel 6 gibt einen Überblick über die bereits heute am Markt verfügbaren Großwärmepumpen und thematisiert die aktuellen Herausforderungen aus der Perspektive der Hersteller.

Im Kapitel 7 werden der aktuelle regulatorische und wirtschaftliche Rahmen, die Anreizmechanismen und Fördermöglichkeiten für die Investition in Großwärmepumpen und deren Betrieb in Deutschland betrachtet. Zudem enthält dieses Kapitel eine Gegenüberstellung und Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten verschiedener aktueller und künftiger Anwendungsfälle für Großwärmepumpen in Wärmenetzen in Deutschland.

Die Anwenderperspektive, das heißt die Sicht der Stadtwerke und FernwärmeverSORGER, auf die aktuellen Markthindernisse, Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei der Realisierung von Großwärmepumpenprojekten in Deutschland wird in Kapitel 8 erörtert. Darauf aufbauend werden die sich daraus ergebenden Handlungsfelder für einen schnellen Markthochlauf und kürzere Planungs-, Genehmigungs- und Realisierungszeiträume identifiziert und dargelegt.

Den Abschluss der Studie bildet Kapitel 9, in welchem die in dieser Studie entwickelten energie- und industriepolitischen Handlungsempfehlungen und Maßnahmen für einen erfolgreichen Roll-out der Großwärmepumpentechnologie in Deutschland zusammengefasst und hinsichtlich der verschiedenen Stakeholder und Themenbereiche strukturiert werden.

2.3 Großwärmepumpen – Begriffsklärung und Status quo

Begriffsklärung Großwärmepumpen

Durch Nutzung unterschiedlicher erneuerbarer Wärmequellen oder der Abwärme anderer Prozesse können Wärmepumpen auch in Quartiers-, Nah- und Fernwärmenetzen (zusammengefasst „Wärmenetze“) und in der Industrie zur Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme sowie Warmwasser eingesetzt werden. Der Begriff „Großwärmepumpe“ wird in der Branche jedoch unterschiedlich verwendet, beispielsweise nur in Bezug auf den Einsatz in Fernwärmenetzen oder aber in Bezug auf die Heizleistung des Aggregats. Im Rahmen dieser Studie werden alle Wärmepumpen ab einer Heizleistung von 500 kW pro Einheit als Großwärmepumpen betrachtet, da ab dieser Leistungsgröße typischerweise andere Verdichtertechnologien als bei den kleineren Leistungsklassen zum Einsatz kommen.

Heute bereits am Markt verfügbare Großwärmepumpen erreichen Senktemperaturen von etwa 90 °C bis 130 °C und können damit viele Anwendungsfälle zur Bereitstellung von Fern- und Nahwärme abdecken (siehe Kapitel 2.4). Dabei sind zwei wesentliche Entwicklungstrends hervorzuheben, dank derer sich der Einsatzbereich für Großwärmepumpen in den kommenden Jahren stetig erweitern wird. Einerseits ermöglichen technische Innovationen der Hersteller von Jahr zu Jahr höhere Senktemperaturen und Effizienzen, sodass auch immer mehr Prozesswärmebedarfe durch Großwärmepumpen gedeckt werden können. Andererseits sorgen die höhere Energieeffizienz im Neubau und fortschreitende Sanierungen von Bestandsgebäuden für geringere spezifische Wärmebedarfe der Kunden und ermöglichen damit auch sinkende Vorlauftemperaturen. Sinkende Vorlauftemperaturen wiederum bedeuten einen effizienteren Betrieb und vereinfachen höhere Abdeckungsgrade mit Erneuerbaren Energien. Diese und weitere Aspekte werden in den folgenden Kapiteln ausführlicher beleuchtet.

In der Industrie rücken Wärmepumpen zusätzlich zur verbesserten Wärmeintegration immer stärker in den Fokus. Liegt Abwärme bei entsprechend hohen Temperaturen vor, können Wärmepumpen das Temperaturniveau der Abwärme auch auf über 200 °C heben und so für eine erneute Nutzung zugänglich machen.

Großwärmepumpen im Fokus von Forschung, Industrie und Politik

Über die Großwärmepumpentechnologie wurden in den letzten Jahren im Bereich der Forschung und Entwicklung, in der Energiewirtschaft und in der Politik viele neue Erkenntnisse gewonnen, Fortschritte erzielt und investitionsfördernde Maßnahmen und Gesetzespakete auf den Weg gebracht, unter anderem:

→ EU-weite Veröffentlichungen und Aktivitäten, beispielsweise:

- Die Publikation „Hochtemperatur-Wärmepumpen“ mit einer umfassenden Beschreibung des Marktes für Großwärmepumpen und des aktuellen Stands von Forschung und Technik (Arpagaus 2019).
- In den von der Internationalen Energie Agentur IEA koordinierten Technology Collaboration Programmes (TCP) for heatpumping technologies (HPT) wird aktuell im Annex 58 ein Überblick über Konzepte und Strategien hinsichtlich einer wärmepumpenbasierten Prozesswärmeversorgung gegeben und im Annex 59 eine Untersuchung des Potenzials von wärmepumpenbasierten Trocknungsprozessen durchgeführt (IEA 2023c, 2023a).
- Im IEA TCP for district heating and cooling (DCP) werden zurzeit in den Annexen TS4, TS6, TS7 die optimale Betriebsführung und Instandhaltung von Wärmenetzen mittels digitalen Prozessmanagements, das Alterungsverhalten und die Lebensdauerprognose von Wärmenetzen sowie das Potenzial aus der Kopplung von Industrieprozessen und Wärmenetzen beforscht (IEA 2018–2024, 2021–2025a, 2021–2025b).

→ **Mehrere Projekte und Publikationen in Deutschland, unter anderem:**

- Start der Reallaborprojekte für Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen im Jahr 2021 (AGFW 2023b).
- Inbetriebnahme, Baubeginn, Planungsbeginn beziehungsweise Ankündigung von mehr als 25 neuen Großwärmepumpenprojekten in Deutschland (siehe Kapitel 2.4).
- Veröffentlichung der Roadmaps Tiefe Geothermie (Bracke et al. 2022) und der Roadmap Oberflächennahe Geothermie (Born et al. 2022).

→ **Aktivitäten, Förderprogramme und Gesetzesinitiativen der Bundesregierung (Auswahl):**

- Start des Kompetenzzentrums Kommunale Wärmewende (KWW) mit dem Ziel, eine bundesweite Vernetzungs- und Unterstützungsplattform für die flächendeckende kommunale Wärmeplanung (KWP) zu etablieren.
- Inkrafttreten der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) am 15. September 2022, welche die Errichtung neuer Wärmenetze mit hohen Anteilen Erneuerbarer Energien und die Dekarbonisierung bestehender Wärmenetze fördert (siehe Kapitel 7.3).
- Ankündigung eines neuen Wärmeplanungsgesetzes, das die kommunale Wärmeplanung bundesweit als zentrales Koordinierungs- und Planungsinstrument für eine klimaneutrale Wärmeversorgung regelt (BMWK 2023).

2.4 Aktuelle Rolle der Großwärmepumpen im deutschen Fernwärmesektor

Der deutsche Fernwärmesektor im Überblick

Vom gesamten Endenergiebedarf im Wärmesektor in Deutschland im Jahr 2021 machte die Fernwärmeerzeugung (Verbrauch zuzüglich Netzverluste) mit 134 TWh bzw. 9,5 Prozent noch einen relativ geringen Anteil aus (AGEB 2022a). Davon wiederum wurden nur 29 TWh (22 Prozent) durch erneuerbare Energieträger bereitgestellt, größtenteils handelte es sich dabei um

Biomasse. Die aktuellsten Klimaneutralitätsszenarien lassen jedoch erkennen, dass Biomasse dauerhaft keine große Rolle in der Wärmeerzeugung spielen wird. Dafür ist das nachhaltige Potenzial von Biomasse zu gering (vgl. Fraunhofer ISI et al. 2022a). Die Fernwärmeerzeugung mittels Großwärmepumpen, Solarthermie und Geothermie spielt bisher noch nahezu keine Rolle. In der Industrie wurden zuletzt 9 Prozent der Prozesswärme über Wärmenetze bereitgestellt (AGEB 2022b).

Zur Erreichung der Ziele der Wärmewende müssen sowohl der Anteil der Fernwärmenetze an der Wärmeversorgung als auch die Bedeutung der Großwärmepumpen für die Fernwärmenetze in den nächsten Jahren in Deutschland sehr stark zunehmen (siehe Kapitel 3).

In Deutschland betreiben derzeit ca. 465 Fernwärmenetzbetreiber (BDEW 2022) sowie zahlreiche Nahwärme- und Quartiersnetzbetreiber knapp 3.800 Wärmenetze mit einer Trassenlänge von insgesamt 31.252 km (Stand: 2020). Im Jahr 2020 betrug der Netto-Zubau in den Wärmenetzen rund 423 km (619,3 km Zubau vs. 196,3 km Rückbau).

Die Wärmenetze werden mit sehr unterschiedlichen Vorlauftemperaturen von unter 60 °C bis über 130 °C betrieben. Bei Vorlauftemperaturen unterhalb von etwa 130 °C wird in den Wärmenetzen flüssiges Wasser ggf. bei Überdruck umgewälzt. Bei Vorlauftemperaturen oberhalb von etwa 130 °C wird in der Regel Dampf genutzt. Dampfnetze haben das Potenzial, durch den Anteil latenter Wärme größere Wärmemengen zu transportieren, und kommen vorwiegend in industriellen Anwendungen zum Einsatz. Zur Steigerung der Effizienz geht der Trend dahin, die Vorlauftemperaturen in Netzen mit flüssigem Wasser abzusenken und Dampfnetze zurückzubauen (AGFW 2022).

Eine Absenkung der Vorlauftemperaturen hat die Vorteile, dass

- sich die Leitungsverluste verringern (aufgrund sinkender Temperaturdifferenz zur Umgebung) und

→ der Energieeinsatz für die Wärmeerzeugung sinkt (aufgrund einer Verringerung des notwendigen Temperaturhubes).

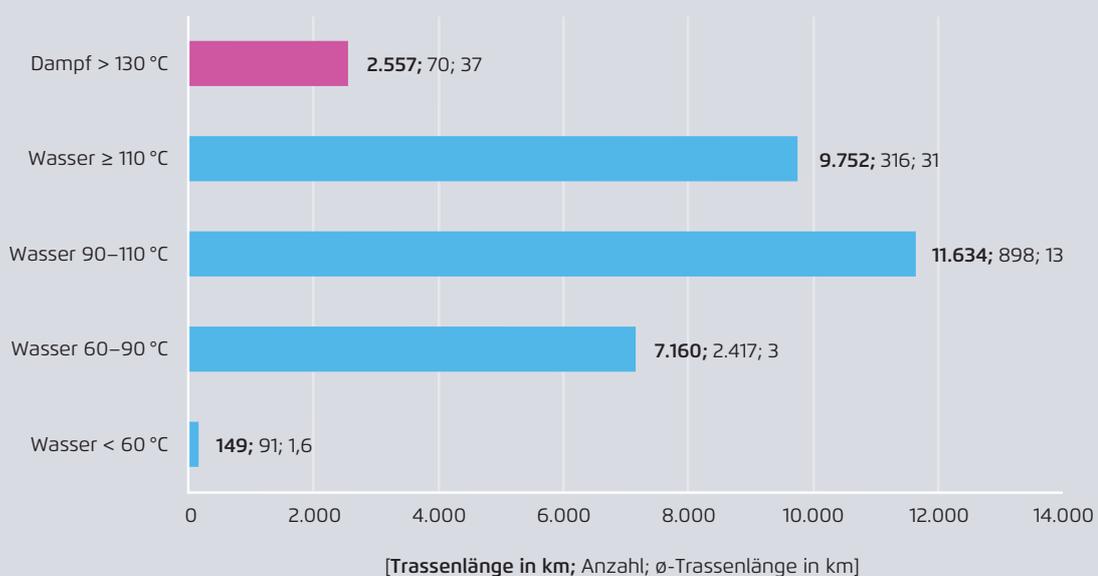
Fernwärmenetze mit hohen Temperaturniveaus sind in der Regel besonders große Netze: je höher das Temperaturniveau, desto größer die durchschnittliche Trassenlänge (siehe Abbildung 2). Die knapp 900 Wassernetze im Temperaturbereich zwischen 90 °C und 110 °C (24 Prozent aller Wärmenetze und 37 Prozent aller Trassenkilometer) haben eine durchschnittliche Trassenlänge von knapp 13 km und die 316 Wassernetze mit 110 °C oder mehr weisen eine Trassenlänge von durchschnittlich knapp 31 km auf (8 Prozent aller Wärmenetze und 31 Prozent aller Trassenkilometer). Die immer noch rund 70 Dampfnetze mit etwa über 130 °C in Deutschland haben im Durchschnitt sogar eine Trassenlänge von rund 36,5 km (2 Prozent aller Wärmenetze, 8 Prozent der gesamten Trassenkilometer).

Diese Angaben zeigen, dass eine große Zahl von Wärmenetzen und Trassenkilometern in den nächsten Jahrzehnten durch unterschiedliche Maßnahmen ihre Netztemperaturen schrittweise absenken müssen. Darüber hinaus wird deutlich, welche Temperaturniveaus Großwärmepumpen und andere erneuerbare Wärmeerzeuger erreichen müssen, damit sie in bestehende Wärmenetze integriert werden können.

Die gesamte Nettowärmeerzeugung in Wärmenetzen basierte im Jahr 2020 zu rund 70 Prozent auf der Verbrennung fossiler Energieträger (knapp 49 Prozent Erdgas, rund 14 Prozent Steinkohle, knapp 6 Prozent Braunkohle und rund 1 Prozent Mineralöl), hinzu kommt der fossile (nicht-biogene) Anteil der Abfallverbrennung. Nur bezogen auf die KWK-Anlagen liegt der Erdgasanteil an der Nettowärmeerzeugung mit rund 47 Prozent leicht unter dem Gesamtwert, bei Heizwerken liegt der Erdgasanteil mit rund 61 Prozent deutlich oberhalb des Gesamtwerts (AGFW 2022).

Anzahl und Trassenlänge der rund 3.800 Wärmenetze nach Temperaturniveaus

Abbildung 2



Fraunhofer IEG basierend auf AGFW (2022)

Im Jahr 2020 stellten KWK-Anlagen rund 86 Prozent der Nettowärmeerzeugung bereit. Im Jahr 2020 waren in Wärmenetzen insgesamt knapp 2.300 Heizwerke mit einer thermischen Leistung von rund 21 GW (Ø 9,3 MW pro Anlage) sowie rund 9.500 KWK-Anlagen mit einer thermischen Leistung von rund 49 GW installiert (Ø 5,2 MW pro Anlage). Überdies gab es Ende 2020 in Deutschland in Wärmenetzen 289 Wärmespeicher mit einer gesamten Wärmespeicherkapazität von ca. 66 Gigawattstunden (GWh) (Ø rund 230 Megawattstunden (MWh) pro Wärmespeicher) (AGFW 2022).

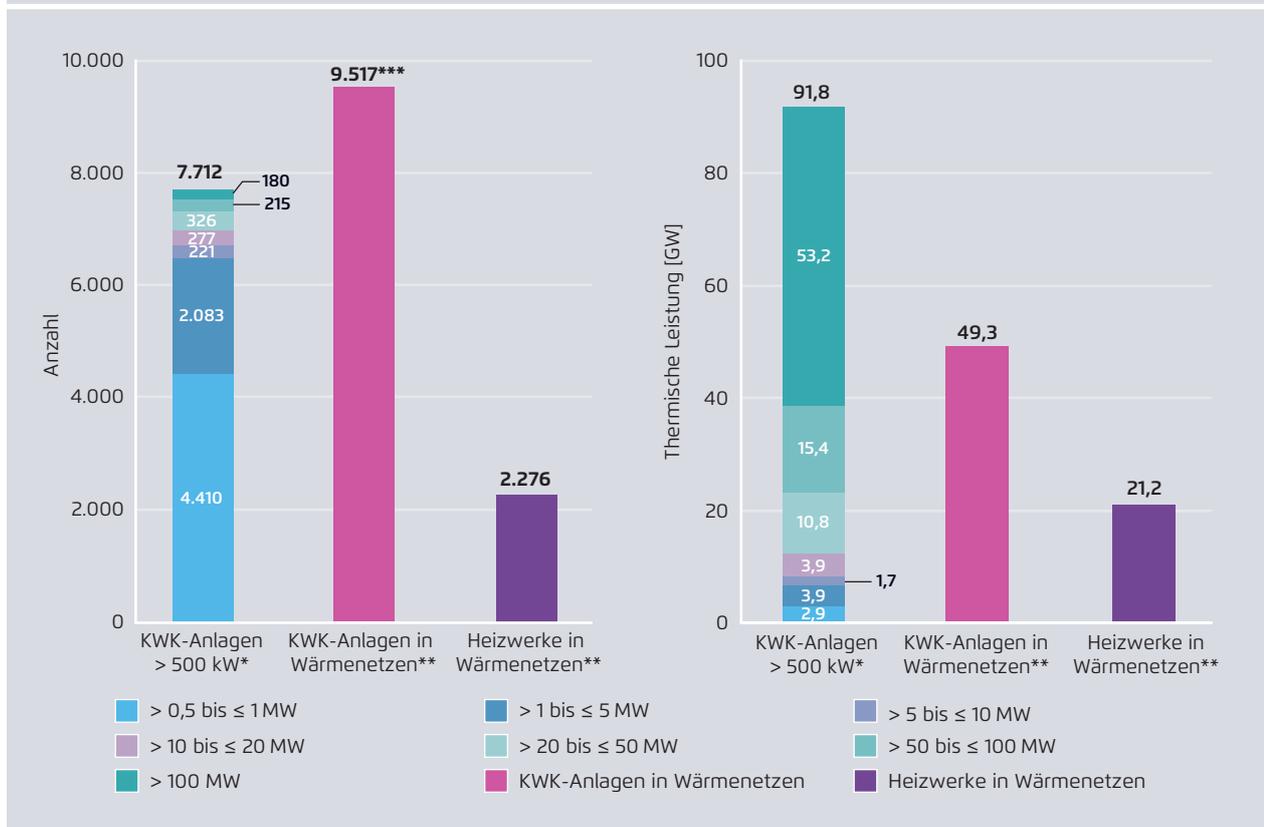
Der Großteil der bestehenden Wärmeezeugungsanlagen ist bis zum Jahr 2045 zu modernisieren, auf klimaneutrale Brennstoffe umzustellen (insbesondere

Biomasse oder grünen Wasserstoff) oder durch erneuerbare Wärmeezeugungsstechnologien zu ersetzen. Wie sich dieser Transformationsbedarf zahlenmäßig auf die unterschiedlichen Leistungs-klassen und Bestandwärmenetze verteilt, wird aus den öffentlich verfügbaren Daten nicht genau ersichtlich. Eine Orientierung kann allerdings die Betrachtung der Verteilung des gesamten KWK-Anlagenbestands auf die verschiedenen Leistungsklassen im Bereich ab 0,5 MW bieten (siehe Abbildung 3).

Unter der vereinfachten Annahme, dass für die bestehenden, zum Großteil fossil befeuerten Heiz-kraftwerke und Heizwerke in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten Ersatzkapazitäten auf Basis Erneuer-

Anzahl und thermische Leistung von KWK-Anlagen größer 500 kW sowie von KWK-Anlagen und Heizwerken in Wärmenetzen

Abbildung 3



Fraunhofer IEG basierend auf * BNetzA (2023a), ** AGFW (2022). *** enthält Mehrfachzählungen, soweit in Heizwerken mehrere Energieträger eingesetzt wurden

erbarer Energien und Abwärme geschaffen werden müssen, vermittelt Abbildung 3 einen ungefähren Eindruck davon, in welcher Höhe Investitionen vonnöten sein werden, damit eine ausreichende Zahl an Großwärmepumpen mit entsprechender Leistung vorhanden ist.

Großwärmepumpen in Deutschland: Überblick über installierte und geplante Leistung

Großwärmepumpen nehmen in der Wärmebereitstellung in Deutschland aktuell eine untergeordnete Rolle ein. Während in anderen Ländern Europas Großwärmepumpen zum Teil schon seit Jahrzehnten eine wichtige Rolle spielen (z. B. Skandinavien und Finnland), sind in Deutschland sowohl im Fernwärme- als auch im Industriesektor bisher nur vergleichsweise wenige Großwärmepumpen installiert. Aufgrund der geringen Bedeutung von Großwärmepumpen in Deutschland in der Vergangenheit sind dazu bisher auch nur wenig statistische Daten öffentlich verfügbar.

Das Fraunhofer IEG hat daher eigene Recherchen durchgeführt, ausgewählte Fernwärmeversorger sowie Hersteller und Betreiber von Großwärmepumpen kontaktiert und die Informationen einschlägiger Verbände (Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) und Bundesverband Wärmepumpe (BWP)) ausgewertet. Die Ergebnisse der Recherche erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, geben aber einen aktuellen Überblick über die Anzahl bereits in Betrieb befindlicher sowie derzeit geplanter Großwärmepumpenprojekte in Deutschland.

Demnach waren Anfang 2023 in Deutschland mindestens 30 Wärmepumpenanlagen mit jeweils einer thermischen Leistung von 500 kW oder mehr in Betrieb, die zusammen eine Gesamtleistung von ca. 60 MW aufweisen. Überdies waren Anfang 2023 nach Informationen des Fraunhofer IEG mindestens 30 weitere Großwärmepumpenprojekte mit einer Gesamtleistung von rund 600 MW bereits im Bau oder in Planung. Die Großwärmepumpenprojekte, für die der Standort bekannt ist, sind in Abbildung 4

dargestellt. Des Weiteren gibt es derzeit einige Ankündigungen sowie noch nicht öffentlich bekannt gemachte große Wärmepumpenprojekte mit Einzelleistungen im ein- bis dreistelligen MW-Bereich, die mit dem Ziel einer baldigen Realisierung derzeit im Rahmen von Machbarkeitsstudien untersucht werden.

Für die Großwärmepumpen(-projekte), für welche auch Informationen zur maximal durch die Aggregate abzudeckenden Vorlauftemperatur vorliegen, gibt Abbildung 5 einen Überblick über die Einzelleistungen und Wärmequellen der Anlagen.

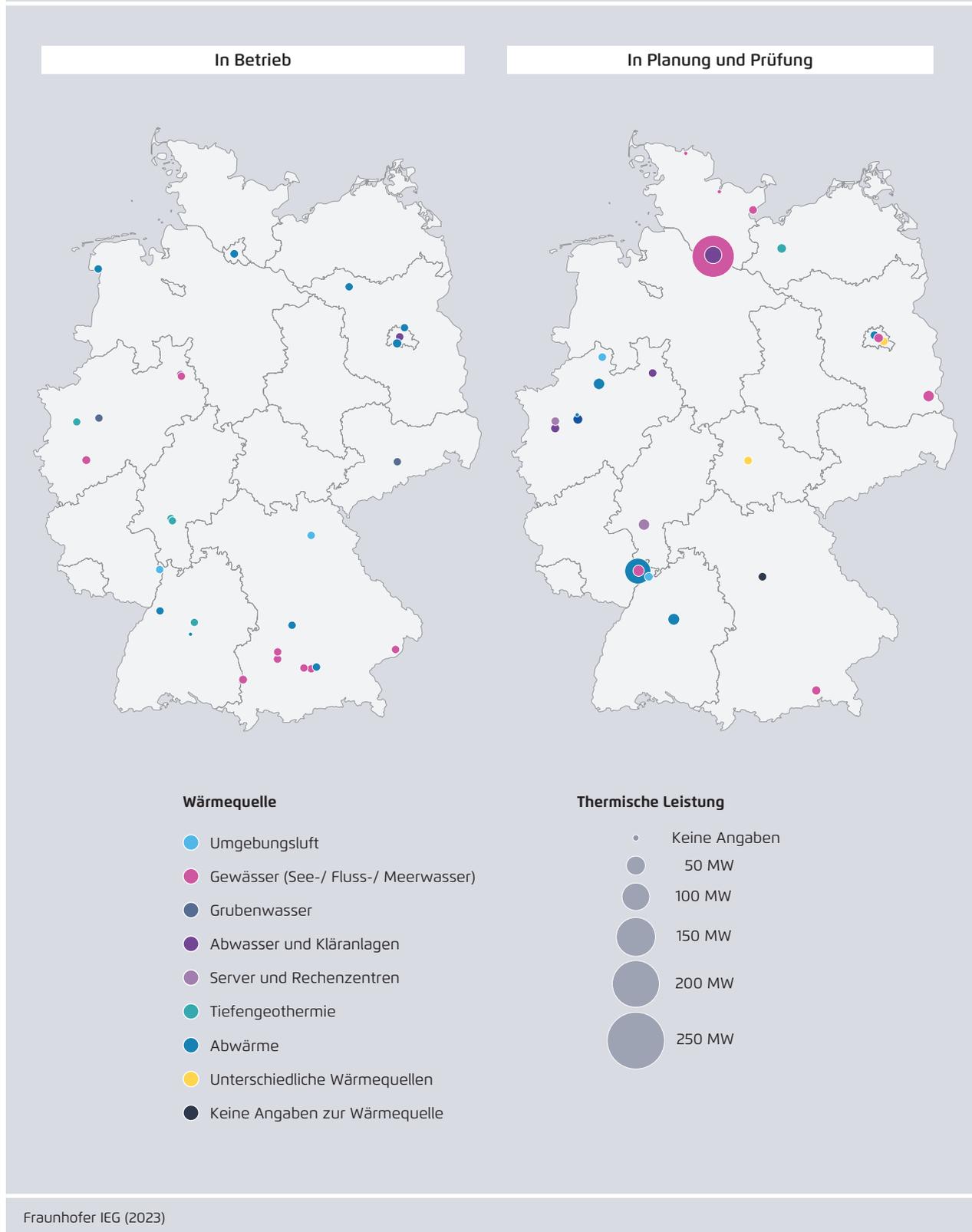
Abwärme und Gewässer dienen also innerhalb der recherchierten Projekte am häufigsten als Wärmequelle, Projekte mit Abwasser und Grubenwasser kommen weniger häufig vor und Außenluft, tiefe Geothermie sowie Server- und Rechenzentrumsabwärme werden bisher nur vereinzelt genutzt. Naheliegende und mögliche Ursachen für dieses Bild werden im Kapitel 4 ausführlicher erläutert.

Derzeit sind in Deutschland im Bereich größer 10 MW noch keine Wärmepumpen in Betrieb. Unter den geplanten Anlagen sind mehrere Anlagen mit einer thermischen Leistung von mehr als 10 MW und Vorlauftemperaturen von 80 °C bis 125 °C. Diese Anlagen nutzen überwiegend Gewässer (Fluss-, Meeres- und Seewasser) als Wärmequelle, aber auch Abwasser und Abwärme. Im unteren Leistungsbereich und im Bereich niedrigerer Vorlauftemperaturen gibt es vermutlich mehr geplante Projekte, als durch die Recherche erfasst werden konnten, da davon auszugehen ist, dass nicht alle Projekte in diesem Bereich durch Pressemitteilungen oder ähnliches angekündigt werden, insbesondere im Vergleich zu den Projekten mit hohen thermischen Leistungen.

Was die Vorlauftemperaturen betrifft, decken die recherchierten Großwärmepumpen den gesamten Bereich von 35 °C bis 125 °C ab. Die Großwärmepumpen zur Fernwärmeversorgung erreichen dabei Vorlauftemperaturen von 80 °C bis 125 °C.

Bestehende und geplante Großwärmepumpenprojekte in Deutschland

Abbildung 4



Die Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen von weniger als 80 °C dienen überwiegend zur Versorgung von Nahwärmenetzen, zur dezentralen Wärmeversorgung und zur Prozesswärmeversorgung.

Gespräche des Fraunhofer IEG mit Projektentwicklern und Herstellern von Großwärmepumpen deuten darauf hin, dass die Projektdynamik im Industriesektor derzeit mindestens genauso hoch ist wie im Fernwärmesektor und dort auch Wärmepumpen mit noch höheren Temperaturen (siehe Abbildung 42 im Anhang A.3) geplant werden. Im Industriebereich ist die Datenlage jedoch wenig transparent. Aus öffentlich zugänglichen Daten konnte lediglich folgendes geplantes Projekt ausgemacht werden:

→ Großwärmepumpenanlage in der Chemieindustrie mit 120 MW zur Dampferzeugung BASF (2022).

Bei den bereits umgesetzten Projekten sind die Daten etwas leichter zugänglich. Es konnten folgende Industrieprojekte recherchiert werden:

- eine Großwärmepumpenanlage mit insgesamt 10 MW und 80 °C Vorlauftemperatur, die in der Holzwerkstoffindustrie eingesetzt wird (Jakobs und Stadtländer 2020),
- eine Großwärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 3,2 MW und einer Vorlauftemperatur von 35 °C zur Dekarbonisierung eines Trocknungsprozesses in der Lebensmittelindustrie, welche schon seit 2010 in Betrieb ist (Jakobs und Stadtländer 2020), und
- eine Großwärmepumpe zur Vorwärmung von Prozesswasser auf 75 °C mit 1,7 MW (Jakobs und Stadtländer 2020).

Wärmequellen und Einzelleistungen bestehender und geplanter Großwärmepumpen in Deutschland*

Abbildung 5



Anhang A.1 enthält eine Übersicht der bekannten Großwärmepumpenprojekte, von denen eine kleine Auswahl zusätzlich in Form einzelner Steckbriefe etwas ausführlicher beschrieben wird.

2.5 Bedeutung und Erfolgsfaktoren von Großwärmepumpen in Europa

In anderen Staaten Europas sind Wärmepumpen im Gebäudesektor und Großwärmepumpen im Fernwärmesektor präsenter als in Deutschland. Neben den Vorreitern Norwegen (NO) mit einem Anteil an Großwärmepumpen von rund 13 Prozent und Schweden (SE) mit einem Großwärmepumpenanteil an der Fernwärmeversorgung von über 8 Prozent weisen auch Finnland (FI), Dänemark (DK) und Frankreich (FR) überdurchschnittliche Wärmeerzeugungsanteile durch Großwärmepumpen im Fernwärmesektor auf. In den Wärmenetzen Großbritanniens (UK), Italiens (IT) und Österreichs (AT) sind ebenfalls bereits vereinzelte Großwärmepumpen im Einsatz. In den

übrigen Ländern Europas spielen Großwärmepumpen mit Werten von oder nahe 0 Prozent bisher genauso wenig eine Rolle wie in Deutschland, weshalb der durchschnittliche Anteil an Großwärmepumpen im Jahr 2020 im Kreis der 27 EU-Länder bei 1,2 Prozent lag und Anfang 2023 nur unwesentlich größer sein wird (siehe Abbildung 6).

Ob Großwärmepumpen in anderen Staaten eine größere Rolle spielen oder nicht, hat dabei verschiedene Ursachen. Die klimatischen Bedingungen und die Anzahl der Heizgradtage im Jahr gehören allerdings nicht dazu, wie insbesondere Norwegen und Schweden zeigen. Relevante Kriterien, die vor allem in ihrer Kombination einen Effekt haben, sind vielmehr die folgenden Aspekte:

→ Verhältnis der Strombezugskosten zu den Gasbezugskosten: Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto attraktiver wird der Betrieb von Wärmepumpen. Energie- und wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen und Prioritäten haben darauf einen großen Einfluss.

Länder Europas mit den größten Anteilen von Großwärmepumpen an der Wärmeerzeugung im Fernwärmesektor (Datenstand: 2020/2021)

Abbildung 6



Fraunhofer IEG basierend auf Bacquet et al. (2022), Euroheat & Power (2022). * Norsk Fjernvarme (2023) (berechnet aus der genutzten Umgebungswärme unter Verwendung der Jahresarbeitszahlen in Schweden). ** SCB (2022). *** Danish Energy Agency (2022). **** FEDENE und SNCU (2022)

- Vorhandensein und Höhe der CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe: Eine wirkungsvolle CO₂-Bepreisung wie beispielsweise in Schweden führt dazu, dass der Verbrauch CO₂-armer oder -freier Energieträger (insbesondere Strom aus Erneuerbaren Energien) verhältnismäßig attraktiver wird.
- Bedeutung fossiler Energieträger wie Erdgas, Stein- und Braunkohle sowie Kernenergie für die Energieerzeugung: Wichtig ist auch der nachdrückliche Wille von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft – wie z. B. in Dänemark –, die Energie- und insbesondere die Wärmeversorgung unabhängiger von fossilen Energiequellen und -importen zu machen und die Energieversorgung zu transformieren.

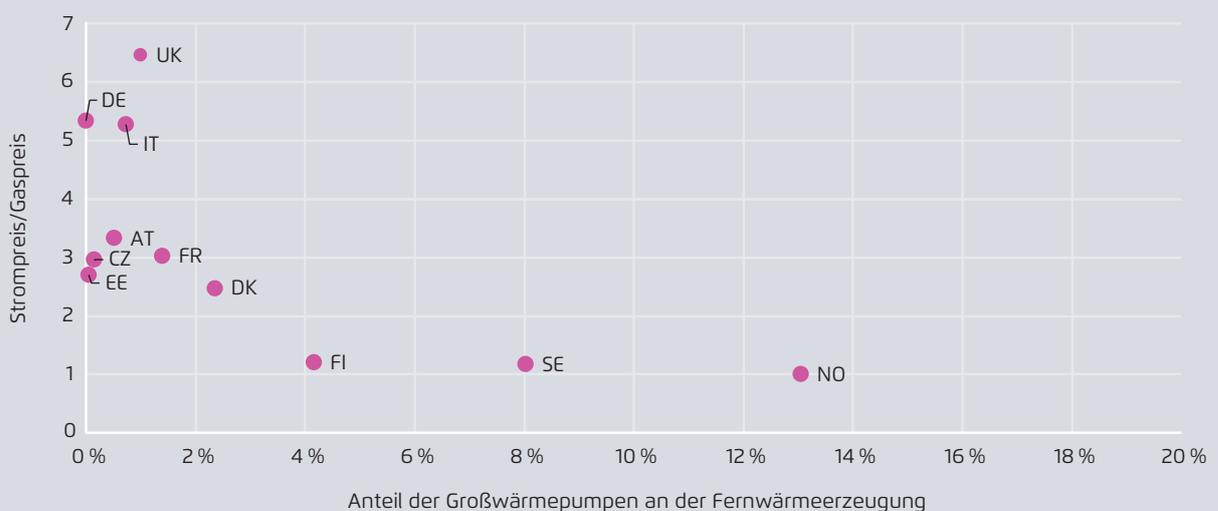
Die Verhältnisse der Strom- und Gaspreise der letzten Jahre werden für ausgewählte Abnahmeländer in Abbildung 7 einander gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die drei Länder – Norwegen, Schweden und Finnland –, in denen die Anteile von

Großwärmepumpen am höchsten sind, auch ein entsprechend niedriges Verhältnis der Strom- und Gaspreise haben. Gleichzeitig implizieren die Preisverhältnisse in den anderen Ländern aber auch, dass die Relation der Strom- und Gaspreise zueinander allein noch kein ausreichendes Kriterium für die Bedeutung von Großwärmepumpen in Wärmenetzen ist.

Vielmehr ist es für die Transformation der Wärmeversorgung von entscheidender Bedeutung, dass in der Energie- und Wirtschaftspolitik klare Ziele und Prioritäten gesetzt werden. Des Weiteren müssen die betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Anreize so konsistent aufeinander abgestimmt sein, dass sie keine gegensätzlichen Investitionssignale aussenden. Schließlich muss die Planungssicherheit über die gesamte Lebensdauer zentraler Wärmeerzeugungssysteme ausreichend hoch sein. Diese Aspekte werden in den Kapiteln 6, 7 und 8 näher beleuchtet und in den Handlungsempfehlungen (Kapitel 9) zusammengefasst.

Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen in ausgewählten Ländern*

Abbildung 7



Fraunhofer IEG basierend auf Eurostat (2023a, 2023b, 2023c, 2023d) und de Boer et al. (2020). * inkl. Steuern und Abgaben, Entgelte, Umlagen und Gebühren exkl. Umsatzsteuer im Durchschnitt der Jahre 2017 bis 2021 für die Abnahmefälle „Band ID: 2.000 bis 20.000 MWh Strom“ und „Band I4: 100.000 bis 1.000.000 GJ Gas“

Schweden, Finnland, Dänemark und Norwegen stechen in Bezug auf die bereits installierte thermische Gesamtleistung von Großwärmepumpen und deren Anteile an der Fernwärmeversorgung gegenüber dem Rest Europas heraus (Euroheat & Power 2022). Was diese Länder im Hinblick auf die besondere Rolle der Großwärmepumpen auszeichnet und welche politischen Weichenstellungen und/oder energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen den Ausschlag für diese Entwicklung im Bereich des Fernwärmesektors gegeben haben könnten, wird nachfolgend betrachtet.

Festzustellen ist, dass die Rolle von Wärmenetzen für eine sichere, bezahlbare und nachhaltige Energieversorgung in diesen Ländern überdurchschnittlich positiv bewertet wird (Breitschopf et al. 2022). Ein möglicher Grund für die höhere Akzeptanz von Wärmenetzen, genauso wie von Großwärmepumpen, kann in den langjährigen Erfahrungswerten liegen. Oft wurden diese Investitionen bereits vor vielen Jahren getätigt und leisten seitdem gute Dienste. So wurden beispielsweise in Schweden schon zwischen 1980 und 1990 mehrere Großwärmepumpen in Fernwärmesystemen installiert (Euroheat & Power 2022).

Im Gegensatz zu anderen Staaten Europas haben Endverbraucher in den Ländern Schweden, Dänemark und Norwegen absolut betrachtet vergleichsweise hohe jährliche Wärmekosten (Breitschopf et al. 2022). Dies trifft auch auf Deutschland zu und liegt

vor allem daran, dass in diesen Ländern auch die Wärmenachfrage durch die vergleichsweise niedrigen Außentemperaturen im Jahresdurchschnitt höher ist. Dass Nordeuropa beim Roll-out von Großwärmepumpen dennoch vorne liegt, kann insbesondere darin begründet sein, dass in allen vier Staaten (Schweden, Dänemark, Norwegen und Finnland) bereits seit längerem sowohl eine CO₂-Besteuerung für den Wärmemarkt (Anfang der 90er-Jahre des 20. Jahrhunderts) als auch eine Förderung von Investitionskosten für Großwärmepumpen existieren (Euroheat & Power 2022). In Schweden beträgt die CO₂-Steuer auf fossile Brennstoffe außerhalb des EU-Emissionshandelssystems mittlerweile 122 Euro pro Tonne CO₂ (Government Offices of Sweden 2023). In Finnland werden weiterhin auch die Betriebskosten von Wärmenetzen gefördert (Euroheat & Power 2022).

Am Beispiel von Dänemark zeigen sich auch die positiven Auswirkungen einer politisch gesteuerten Wärmeplanung und der damit einhergehenden frühzeitigen und fortlaufenden Beteiligung verschiedener Stakeholder wie kommunaler Energieversorger, Planungsbüros, Behörden und Verwaltungen. Dies kann nicht nur Genehmigungsprozesse vereinfachen und beschleunigen, sondern auch zu einem höheren Bekanntheitsgrad und somit höherer Akzeptanz von Wärmenetzsystemen führen (Breitschopf et al. 2022). Dänemark gilt daher als Best-Practice-Beispiel für die erfolgreiche Wärmeplanung und -wende (Breitschopf et al. 2022).

3 Entwicklungsszenarien für Wärmenetze und Großwärmepumpen zur Erreichung der Klimaziele

3.1 Entwicklungspfade für eine volkswirtschaftlich effiziente Energie- und Wärmewende

Überblick über aktuelle Energiesystem- und Klimaneutralitätsstudien

Deutschland hat sich im Rahmen des im Juni 2021 novellierten Bundes-Klimaschutzgesetzes² (KSG) verpflichtet, die Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 zu erreichen. Zur Schaffung von mehr Verbindlichkeit und Steuerungsmöglichkeiten wurden im KSG auch spezifische Dekarbonisierungsziele für die einzelnen Sektoren festgelegt. Um den von der Energie- und Wärmewende betroffenen Stakeholdern Orientierung zu geben, wurden in den Jahren 2021 und 2022 zudem mehrere Energiesystem- und Klimaneutralitätsstudien bzw. Langfristszenarien erstellt und veröffentlicht.

Im Jahr 2021 sind die sogenannten „Big 5“-Klimaneutralitätsstudien erschienen:

- „Klimaneutrales Deutschland 2045“ von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (Prognos et al. 2021)
- „Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ im Auftrag des Bundesver-

bandes der Deutschen Industrie e. V. (BDI) (BCG und BDI 2021)

- dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ (dena 2021)
- „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Fraunhofer ISI et al. 2021)
- „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“ des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung (BMBF) geförderten Kopernikus-Projekts Ariadne (PIK 2021)

Diese Studien beschreiben unter anderem, auf welchen Transformationspfaden und mit welchem Technologie- und Maßnahmenmix die Klimaschutzziele aus volkswirtschaftlicher Sicht am kosteneffizientesten erreicht werden könnten. Sie bestätigen, dass die Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 bzw. 2050³ in Deutschland einen verstärkten Einsatz erneuerbaren Stroms in allen Sektoren erfordert und damit einhergehend einen enormen Ausbaubedarf von Wind- und Photovoltaikkapazitäten mit sich bringt. Die Studien sind sich überdies einig, dass zur Erreichung der Ziele im Gebäudesektor die Wärmepumpentechnologie und dekarbonisierte Wärmenetze eine wichtige Rolle spielen (PIK 2022).

Seit der Erstellung der „Big 5“-Klimaneutralitätsstudien gab es maßgebliche energiepolitische Entwicklungen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

2 Das KSG wurde am 19. November 2019 vom Bundestag beschlossen. Im KSG wurden die im Klimaplan 2050 festgelegten Klimaschutz- und Sektorziele erstmals gesetzlich verankert. Das Bundesverfassungsgericht verpflichtet mit seiner Entscheidung vom 24. März 2021 den Gesetzgeber, das KSG für die Zeiträume ab dem Jahr 2031 fortzuschreiben. Dies und eine Verschärfung der Ziele auf EU-Ebene führten zu einer Novellierung des KSG, welche am 24. Juni 2021 vom Bundestag beschlossen wurde.

3 Die „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“ von Fraunhofer ISI et al. 2021 wurden noch vor der Novellierung des KSG erstellt, sodass sie entsprechend den Zielen des ursprünglichen KSG aus dem Jahr 2019 Klimaneutralität bis 2050 abbilden.

Aktuelle Entwicklungen und ihre Bedeutung für die Untersuchungen dieser Studie

Der politisch festgelegte Ausbau der Erneuerbaren Energien definiert maßgeblich das Stromsystem der Zukunft. Mit der Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) hat die neue Bundesregierung ein neues Ziel festgelegt: Bis zum Jahr 2030 sollen 80 Prozent des Bruttostromverbrauchs aus Erneuerbaren Energien stammen (zuvor waren es 65 Prozent). Gleichzeitig wurde die Schätzung des zukünftigen Stromverbrauchs auf 750 TWh angehoben. Damit einhergehend wurden die Ausbauziele für Wind- und Solarenergie erhöht.

Die Studie „Klimaneutrales Stromsystem 2035“ von Agora Energiewende (Agora Energiewende, Prognos, Consentec 2022) beschreibt, wie diese Ziele erreicht werden können und welche Herausforderungen hinsichtlich der dafür notwendigen Maßnahmen zum Infrastrukturausbau (Erneuerbare Energien und Stromnetze) und zur Flexibilisierung der Stromverbrauchsseite bestehen.

Durch den beschleunigten Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien verbessert sich auch die CO₂-Bilanz aller stromverbrauchenden Anlagen und Systeme, wie zum Beispiel Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge. Werden diese dann auch noch flexibel vorrangig in den Zeiten betrieben beziehungsweise geladen, in denen die Anteile Erneuerbarer Energien im Strommix besonders hoch sind, verbessert sich deren CO₂-Bilanz weiter (zur Flexibilität und Sektorkopplung im künftigen Energiesystem siehe Kapitel 3.2).

Die fossile Energiekrise unterstreicht die Notwendigkeit einer beschleunigten Wärmewende. Durch die infolge des Angriffskriegs von Russland gegen die Ukraine verursachten energiewirtschaftlichen Turbulenzen im Jahr 2022 wurde überdeutlich, wie abhängig die Europäische Union und insbesondere Deutschland von fossilen Energien – insbesondere Erdgas – ist. Um die Abhängigkeit von fossilen

Brennstoffen aus Russland schnell und nachhaltig zu verringern, hat die EU-Kommission im Mai 2022 den REPowerEU-Plan vorgelegt. Dieser sieht unter anderem vor, dass die Industrie in Europa ihren Erdgasverbrauch bis 2030 nahezu halbiert. Die Studie „Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie“ (Agora Industrie und FutureCamp 2022) zeigt die großen Potenziale der Elektrifizierung von industrieller Prozesswärme, was die Bedeutung der Großwärmepumpen im Rahmen der Dekarbonisierung der Industrie deutlich macht.

Die T45-Szenarien dienen als Grundlage für die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie. Um die jüngsten energiepolitischen Entwicklungen zu berücksichtigen, wurde im Rahmen dieser Studie entschieden, die aktualisierten „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“ (Fraunhofer ISI et al. 2022b) als Grundlage der Untersuchung zu wählen.

In den aktualisierten Langfristszenarien werden in fünf Szenarien unterschiedliche Pfade zur Dekarbonisierung Deutschlands bis zum Jahr 2045 abgeleitet („T45-Szenarien“). In den drei Hauptszenarien wird entweder ein verstärkter Einsatz von Strom (T45-Strom), von Wasserstoff (T45-H₂) oder von synthetischen Kohlenwasserstoffen (T45-PtG/PtL) angenommen. Für das Szenario T45-Strom werden darüber hinaus ein Unterszenario mit geringerer Energieeffizienz (T45-RedEff) und ein Unterszenario mit geringerem Erdgasverbrauch (T45-RedGas) analysiert. Alle T45-Szenarien berücksichtigen neben den Zielen des novellierten KSG (u. a. Klimaneutralität 2045 und verschärfte Sektorziele) auch die erhöhten Ausbauziele aus dem EEG 2023. Unter den T45-Szenarien verursacht das Szenario T45-Strom die geringsten kumulierten Kosten für die Volkswirtschaft. Mehr synthetische Kohlenwasserstoffe und weniger effiziente Gebäude bedeuten höhere Gesamtkosten für das System.

Ein Vergleich der T45-Hauptszenarien mit den Ergebnissen der anderen hier vorgestellten Klimaneutralitätsstudien zeigt, dass die Berücksichtigung

der in den Jahren 2021 und 2022 beschlossenen ambitionierten energiepolitischen Ziele und Maßnahmen für das Jahr 2030 mit einer maßgeblichen Erhöhung der erneuerbaren Stromerzeugung (Anteile und Energiemengen) sowie einer deutlichen Verringerung der absoluten Treibhausgasemissionen einhergeht (siehe Abbildung 8). Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Verwendung möglichst aktueller Klimaneutralitätsszenarien.

Von den betrachteten Studien sind die T45-Szenarien des BMWK am aktuellsten und weisen überdies den größten Betrachtungsumfang auf. Da die Erkenntnisse aus den Langfristszenarien zudem auch in die neue Systementwicklungsstrategie des BMWK für den

Energiesektor einfließen sollen, wurden die T45-Hauptszenarien als Grundlage für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Studie ausgewählt.

Die Rolle von Großwärmepumpen in Szenarien für die Wärmewende

Die Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestands im Jahr 2045 erfordert einen starken Ausbau der Wärmenetze und eine starke Erhöhung der Zahl der Wärmepumpen. Die Optimierungsvorgaben für alle T45-Szenarien sind so parametrisiert, dass ein klimaneutraler Gebäudesektor bis zum Jahr 2045 erreicht wird. Dies schließt auch Annahmen zur steten Verringerung der spezifischen Endener-

Eckdaten der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien im Jahr 2030 – Vergleich verschiedener Studien über Energiesysteme

Abbildung 8

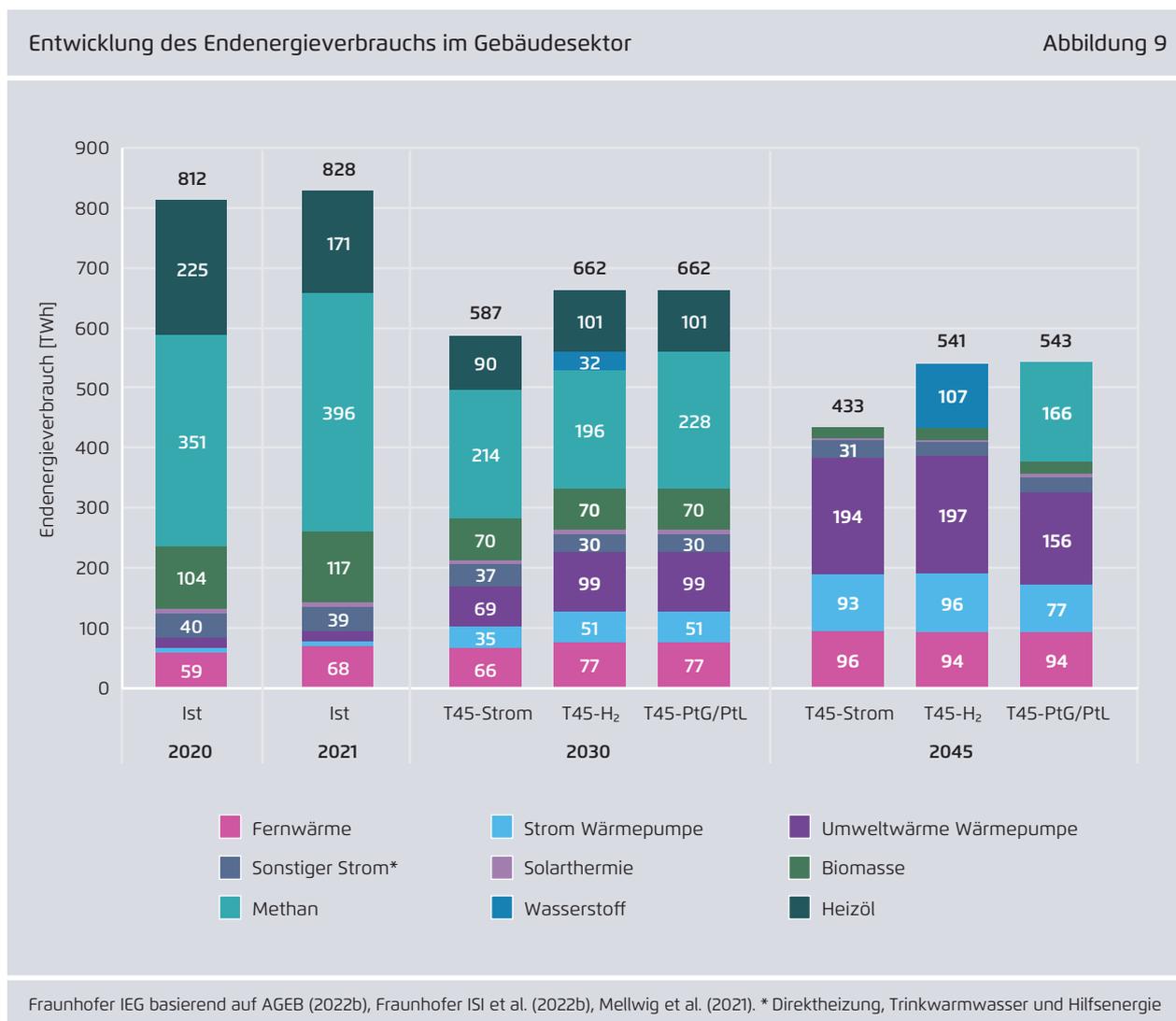


Fraunhofer IEG basierend auf Prognos et al. (2021), PIK (2022), Fraunhofer ISI et al. (2021), Fraunhofer ISI et al. (2022b).
 * Treibhausgasemissionen inkl. Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)

gieverbräuche von Gebäuden mit ein, welche durch Sanierungsmaßnahmen und den Einsatz effizienterer Wärmeversorgungstechnologien erreicht werden. Für das Szenario T45-Strom ergibt sich aus den modellierten Sanierungszyklen eine Sanierungsrate von durchschnittlich 1,95 Prozent pro Jahr und für alle anderen T45-Szenarien eine Sanierungsrate von durchschnittlich 1,49 Prozent pro Jahr, mit dementsprechenden Auswirkungen auf die bis zum Jahr 2045 erzielbaren Endenergieeinsparungen. Bei den Wärmeversorgungstechnologien dominieren dezentrale Wärmepumpen und Fernwärme, welche unter anderem die Wärmererzeugung

aus Großwärmepumpen einschließt (siehe Abbildung 9).

Auch für die Dekarbonisierung des Industriesektors spielt die Elektrifizierung der Wärmeversorgung eine wesentliche Rolle. In Bezug auf die volkswirtschaftlich effiziente Transformation des Industriesektors zeigen die T45-Szenarien, dass dafür neben dem Einsatz klimaneutral hergestellter synthetischer Brennstoffe auch die Elektrifizierung vieler industrieller Prozesse ein wesentlicher Faktor ist. Aus diesem Grund steigt der Industriestromverbrauch in allen T45-Szenarien deutlich an. Ein Teil dieses zusätzli-



chen Stromverbrauchs resultiert aus der (Prozess-) Wärmeversorgung durch Elektrodenkessel und Großwärmepumpen, welche nicht Teil von Fernwärmenetzen sind. Gleichzeitig erhöht sich in den T45-Szenarien auch der Fernwärmebedarf im Industriesektor bis 2045 um den Faktor 1,4–1,9 (im Vergleich zu 2020), zu dessen Deckung Großwärmepumpen künftig ebenfalls einen entscheidenden Beitrag leisten können.

Über alle Szenarien hinweg zeigt sich eine deutliche Steigerung des Fernwärmeabsatzes – sowohl für den Gebäude- als auch für den Industriesektor. Ausgehend von 116 TWh im Jahr 2021 steigt auch der Fernwärmeabsatz in den T45-Szenarien stark an. So ergibt sich in Abhängigkeit vom jeweils optimalen Energiemix im Industriesektor für den Fernwärmeabsatz im Jahr 2045 in den verschiedenen T45-Sze-

narien eine Bandbreite von 158–167 TWh, was einer Steigerung um 36 bis 44 Prozent gegenüber dem Jahr 2021 entspricht (siehe Abbildung 10).

Der Fernwärmeabsatz für den Gebäudesektor liegt mit 94–96 TWh im Jahr 2045 (Steigerung um 38 bis 41 Prozent gegenüber 2021) in allen Szenarien auf einem ähnlich hohen Niveau. Das entspricht einem durchschnittlichen Absatzwachstum von 1,1 TWh pro Jahr in Deutschland (+ 1,5 Prozent pro Jahr). Da allerdings im gleichen Zeitraum der individuelle Wärmebedarf der Gebäude aufgrund von Effizienz- und Sanierungsmaßnahmen stetig sinkt, ist eine Steigerung des Fernwärmeabsatzes im Gebäudesektor gleichbedeutend mit umfangreichen Netzverdichtungs- und Netzerweiterungsmaßnahmen. Konkret zeigen die T45-Szenarien, dass sich die Anzahl der Wärmenetzanschlüsse bis 2045 ungefähr

Entwicklung der Fernwärmeerzeugung (Fernwärmeabsatz zzgl. Leitungsverluste) in den T45-Szenarien

Abbildung 10



Fraunhofer IEG basierend auf AGEB (2022a), Fraunhofer ISI et al. (2022b)

verdreifachen müsste (Steigerung um den Faktor 2,9–3,1) und dass dazu jedes Jahr etwa 130.000 bis 150.000 neue Netzanschlüsse (+ 8 Prozent pro Jahr) sowie ein Zubau von 800 km Verteilnetztrassen (+ 2,5 Prozent pro Jahr) realisiert werden müssen (Mellwig 2022).

Bei vereinfacht angenommen Investitionskosten von 500–1.000 Euro pro Meter Trassenlänge⁴ ergibt sich auf Basis dieser Werte allein für den Verteilnetzausbau im Fernwärmesektor ein jährliches Investitionsvolumen in Höhe von 400–800 Mio. Euro.⁵

Zum Vergleich: Im Jahr 2020 betrug der Netto-Zubau in den Wärmenetzen laut AGFW rund 423 km, was ungefähr der Hälfte des künftig notwendigen Zubaus entspricht.

Entscheidend ist dabei, dass die Ermöglichung niedrigerer Netztemperaturen zum wesentlichen Merkmal künftiger Netzverdichtungs- und -erweiterungsprojekte wird und sich das durchschnittliche Temperaturniveau des gesamten Fernwärmenetzes auf diese Weise nach und nach stufenweise verringern kann.

Großwärmepumpen könnten im Jahr 2045 bereits mehr als 70 Prozent der Fernwärme bereitstellen.

Über alle T45-Szenarien hinweg zeigt sich, dass für ein effizientes Energiesystem ein schneller Ausbau der Wärmeerzeugung durch Großwärmepumpen von zentraler Bedeutung ist und dass diese das Potenzial haben, schon in naher Zukunft die Wärmenetze zu dominieren. Die T45-Szenarien

zeigen ebenso, dass die Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen stark zurückgehen wird und ungefähr ab 2040 nur noch geringe KWK-Anteile aus der Verbrennung von Ersatzbrennstoffen, Biomasse und grünem Wasserstoff für den Einsatz als Spitzenlast- und *Backup*-Kapazitäten benötigt werden (siehe Abbildung 11).

Großflächige Potenziale zur Abwärmenutzung aus der Industrie sowie aus Rechenzentren und aus Elektrolyseuren (die allerdings durch die Optimierungsalgorithmen überwiegend nahe den Standorten großer Windparks und Photovoltaik-Freiflächenanlagen verortet werden) sind in den T45-Szenarien bisher nicht oder nur in geringem Umfang bei der Wärmeversorgung berücksichtigt. Der Einbezug dieser zusätzlichen Abwärmequellen könnte – unter Voraussetzung ihrer Wirtschaftlichkeit – den großen Bedarf an Großwärmepumpen noch etwas verringern.

Damit die Großwärmepumpen in der Fernwärme ihr volles Potenzial für die Energiewende entfalten können, ist bis 2045 ein durchschnittlicher Zubau von mindestens 4 GW pro Jahr notwendig. In den T45-Szenarien ergibt sich bis zum Jahr 2045 eine Leistung von durch Großwärmepumpen erzeugter Energie von mindestens 90 GW (Abbildung 12).

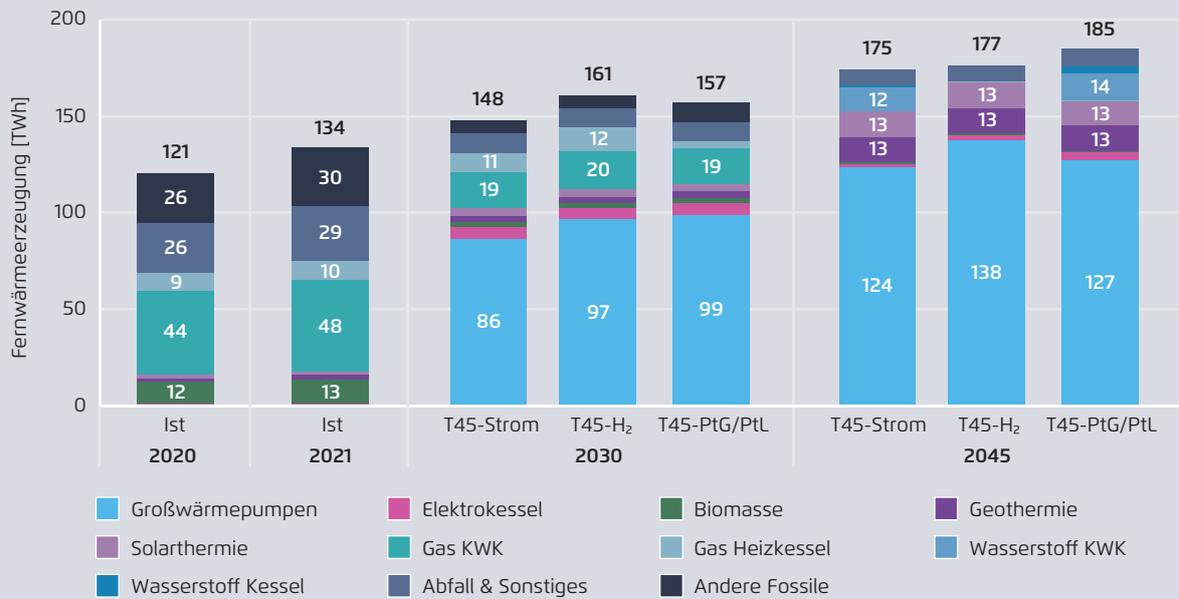
Im Vergleich dazu fängt Deutschland mit der Anfang 2023 in Betrieb befindlichen und geplanten Leistung von Großwärmepumpen von weniger als 1 GW (siehe Kapitel 2.4) fast bei null an. Das heißt, dass sich allein im Fernwärmesektor bis 2045 ein jährliches Marktvolumen für neue Großwärmepumpen von mindestens 4 GW ergibt. Der Bedarf an Großwärmepumpen für Industriebetriebe, welche nicht an Wärmenetze angeschlossen sind, ist in dieser Zahl zudem noch unberücksichtigt.

4 Exemplarische Annahme auf Basis der Kostenbandbreite für konventionelle Wärmenetze und Niedertemperaturwärmenetze verschiedener Leistungsbereiche und Bauvoraussetzungen aus dem Technikatalog zur kommunalen Wärmeplanung in Baden-Württemberg (KEA-BW 2022).

5 Ins Gasverteilnetz wurden im Jahr 2021 ca. 1,7 Mrd. Euro investiert. Davon etwa 1,1 Mrd. Euro in Neubau, Ausbau und Erweiterung sowie 0,6 Mrd. Euro in Erhalt und Erneuerung der Gasverteilnetze (BNetzA 2023b).

Entwicklung des Technologie- und Energieträgermix zur Fernwärmeerzeugung in den T45-Szenarien

Abbildung 11



Fraunhofer IEG basierend auf AGEb (2022a), AGEE (2022), AGFW (2022), Fraunhofer ISI et al. (2022b)

Entwicklung der installierten thermischen Leistung in der Fernwärme

Abbildung 12



Fraunhofer IEG basierend auf AGFW (2022), Fraunhofer ISI et al. (2022b). * Braunkohle, Steinkohle, Abfall und sonstige fossile Energieträger

3.2 Flexibler, systemdienlicher Betrieb von Großwärmepumpen

Grundsätze eines flexiblen Strom- und Wärmesystems

Fernwärmenetze verfügen traditionell über mehrere verschiedene Wärmeerzeugungsanlagen und -technologien und können zudem das Leitungsnetz in gewissem Umfang auch als Wärmespeicher nutzen. Zunehmend werden auch *Power-to-Heat*-Anlagen und Großwärmespeicher in Wärmenetze integriert. Fernwärmeversorger haben so die Möglichkeit, den Einsatz ihres Wärmeerzeugungsportfolios in Abhängigkeit von der Angebots- und Nachfragesituation am Strom- und Wärmemarkt sowie unter Berücksichtigung weiterer technischer und regulatorischer Restriktionen fortwährend zu optimieren.

Voraussetzungen für eine zu 100 Prozent auf Erneuerbaren Energien basierende Stromerzeugung im Jahr 2035 sind neben dem Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Stromnetze auch mehr Flexibilität, Speicherkapazitäten und Sektorenkopplung im Gesamtsystem.

Das künftige Strommarktdesign muss den systemdienlichen Betrieb von Großwärmepumpen anreizen und ermöglichen.

Die Realisierung der in den Optimierungsmodellen der T45-Szenarien ermittelten Kostenvorteile eines verstärkten Einsatzes von Großwärmepumpen setzt dabei allerdings voraus, dass diese und andere flexible Stromverbraucher und Energiespeicher auch tatsächlich von den niedrigen Stromgestehungskosten der Wind- und Solaranlagen profitieren können – zum Beispiel über flexible Netznutzungsentgelte und eine langfristige Absicherung von günstigen Strombezugskosten –, wenn sie ihren Einsatz systemdienlich an der Verfügbarkeit des Wind- und Solarstroms sowie der Netzauslastung orientieren.

Wie groß die Flexibilitätsanforderungen im Strom- und Fernwärmesektor in Zukunft sein werden und welche konkreten Anforderungen sich daraus an den

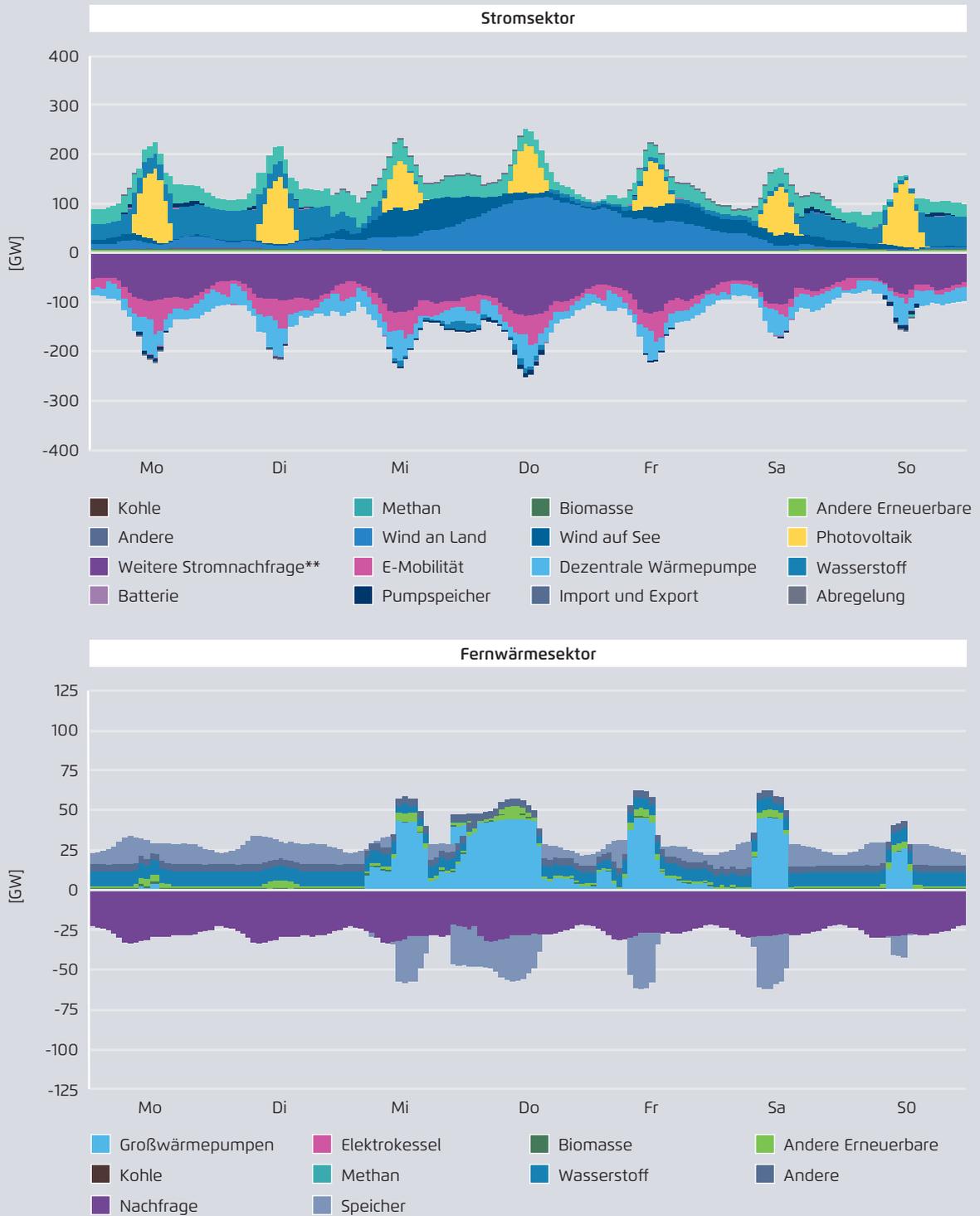
Betrieb von Großwärmepumpen ergeben, wird im Folgenden anhand der Simulationsergebnisse aus dem T45-Stromszenario für eine beispielhafte Winter- und für eine beispielhafte Sommerwoche des Jahres 2045 aufgezeigt. Dabei wird der Winter in Zukunft genauso wie heute durch eine hohe Wärmenachfrage und über dem Jahresdurchschnitt liegende Windstromerzeugung, aber vergleichsweise geringe Auslastungsfaktoren von Photovoltaikanlagen gekennzeichnet sein. Im Sommer wird es dagegen naturgemäß nur einen sehr geringen Fernwärmebedarf, aber gleichzeitig tagsüber sehr häufig sehr hohe Spitzen von Strom aus Erneuerbaren Energien insbesondere aus Photovoltaikanlagen geben, welche selbst den wachsenden Endverbrauch im Stromsektor noch erheblich übersteigen werden.

Stromsystemfreundlicher Betrieb von Großwärmepumpen

Im Winter werden künftig Großwärmepumpen das hochflexible Wärmeerzeugerportfolio dominieren und durch Solar- und Geothermie, klimaneutrale KWK sowie Wärmespeicher ergänzt. Abbildung 13 stellt die Einspeise- und Nachfragelastgänge im Strom- und Fernwärmesektor für eine typische Winterwoche des Jahres 2045 im Szenario T45-Strom dar. Dabei wird deutlich, dass in einem kostenoptimalen Energiesystem die Großwärmepumpen immer dann eingesetzt werden, wenn die Stromerzeugung (aus Erneuerbaren Energien) hoch ist und günstige Strombezugskosten realisiert werden können. Die Wärmeproduktion, die dann nicht benötigt wird, um den zeitgleichen Wärmebedarf zu decken, wird in Großwärmespeichern zwischengespeichert. In den Zeiten, in denen es zwar einen Wärmebedarf gibt, aber die regenerative Stromerzeugung gering und das Stromgroßhandelsmarktpreisniveau infolgedessen höher ist, wird der Wärmebedarf aus den vorher gefüllten Wärmespeichern und anderen Wärmeerzeugungstechnologien gedeckt, zum Beispiel aus KWK-Anlagen mit Biomasse, Ersatzbrennstoffen oder grünem Wasserstoff als Energieträger.

Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Winterwoche im Jahr 2045*

Abbildung 13



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b). * Anfang Februar 2045 im T45-Stromszenario. ** inkl. Stromnachfrage aus Großwärmepumpen

Im Sommer werden flexible Großwärmepumpen zusammen mit Wärmespeichern zukünftig den größten Teil der Wärmenachfrage decken. Für eine typische Sommerwoche des Jahres 2045 sind die Einspeise- und Nachfragelastgänge im Strom- und Fernwärmesektor des Szenarios T45-Strom in Abbildung 14 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Großwärmepumpen künftig selbst im Sommer bei geringen Wärmebedarfen in hohem Maße eingesetzt werden (müssen), und zwar immer dann, wenn die Stromerzeugung aus Solar- und Windenergieanlagen besonders hoch ist.

Dieser flexible, „grünstromgeführte“ Wärmepumpeneinsatz entlastet durch die Kopplung mit dem Wärmesektor die Stromnetze, vermeidet unnötige Drosselungen der erneuerbaren Stromproduktion und verbessert zudem die CO₂-Bilanz der Wärmeerzeugung. Gleichzeitig wird der Großteil der in diesen Zeiten erzeugten Wärme jedoch nicht umgehend verbraucht, sondern in Wärmespeichern für die Zeiten, in denen höhere Wärmebedarfe auf ein niedriges erneuerbares Stromangebot treffen, aufgespart.

Der sich in den T45-Szenarien ergebende Wärmespeicherbedarf wird in Abbildung 15 aufgezeigt. Demnach muss die gesamte installierte Wärmespeicherkapazität von etwa 66 GWh im Jahr 2020 um den Faktor 9–13 auf 625–871 GWh im Jahr 2045 ansteigen. In der Energiesystemoptimierung der T45-Szenarien sind die Großwärmespeicher dabei so ausgelegt, dass sie die maximale Wärmelast im Jahr 2045 bei voller Beladung im Mittel über 15 bis 21 Stunden decken könnten. In Vergleich zu 2020 ergibt dies rechnerisch eine Steigerung der Entladedauer um den Faktor 6–9.

Saisonale Wärmespeicher wie beispielsweise geothermische Speicher, Aquiferspeicher und Grubenwärme-/Grubenspeicher sowie große Erdwärmesonden- und Erdbeckenspeicher wurden in den Langfristszenarien nicht explizit berücksichtigt. Das heißt, dass in einzelnen Wärmenetzen unter

bestimmten Bedingungen⁶ die Wärmespeicherung eine größere Rolle spielen kann.

Ein flexibler, systemdienlicher Betrieb von Großwärmepumpen ist ökologisch und ökonomisch vorteilhaft und ermöglicht hohe Anteile an Erneuerbaren Energien. Bei einer volkswirtschaftlich optimalen Betriebsweise steigt der Anteil der Großwärmepumpen an der Wärmeerzeugung

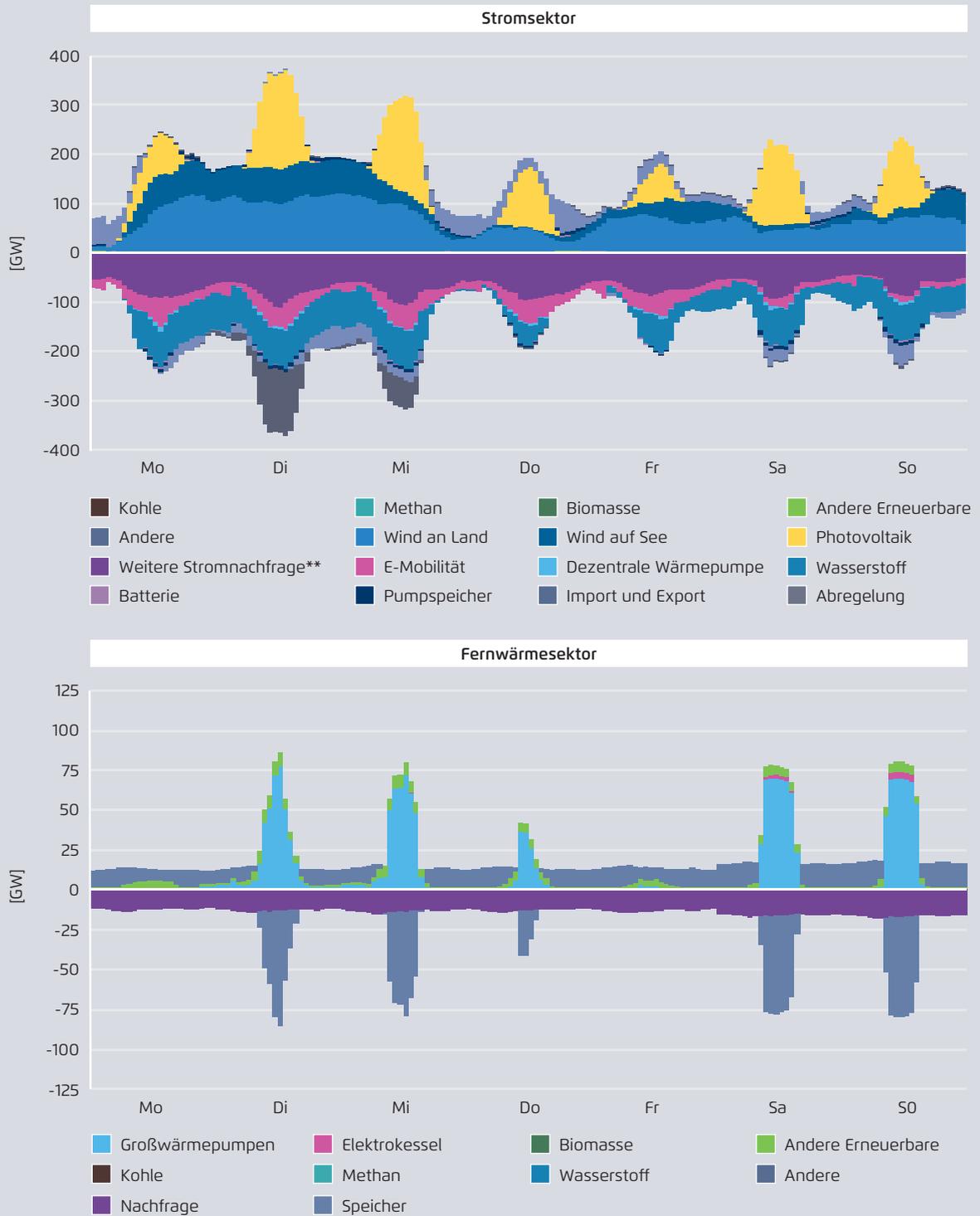
- mit steigendem Anteil von Wind- und Photovoltaik an der Stromerzeugung, weil dies gleichbedeutend mit einem geringeren CO₂-Emissionsfaktor im Strommix ist.
- mit sinkender Residuallast, weil die „Stromüberschüsse“ aus Erneuerbaren Energien durch die mit den Wärmepumpen mögliche Kopplung der Sektoren einen Wert erhalten.
- mit sinkendem Strompreis, weil sich dadurch die Strombezugskosten für die Wärmepumpenbetreiber verringern.

Dies wird durch die in Abbildung 16 dargestellten Regressionsanalysen der relevanten Daten des T45-Stromszenarios anschaulich bestätigt. Eine Voraussetzung dafür ist ein Strommarktdesign, in dem die niedrigen Stromgestehungskosten der Erneuerbaren Energien auch niedrige Strombezugskosten bei den Stromverbrauchern zur Folge haben. Damit Großwärmepumpen überdies systemdienlich flexibel betrieben werden können, dürfen Marktpreissignale nicht verzerrt werden, wie es beispielsweise durch die bestehende Netzentgeltsystematik geschieht, welche eine gleichmäßige Netznutzung (hohe Vollbenutzungsstunden) belohnt.

⁶ Neben der geologischen Eignung bzw. dem Platzangebot für saisonale Wärmespeicher sollten qualitativ hochwertige Wärmequellen (hoher COP bzw. niedrige Betriebskosten) vorhanden sein.

Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Sommerwoche im Jahr 2045*

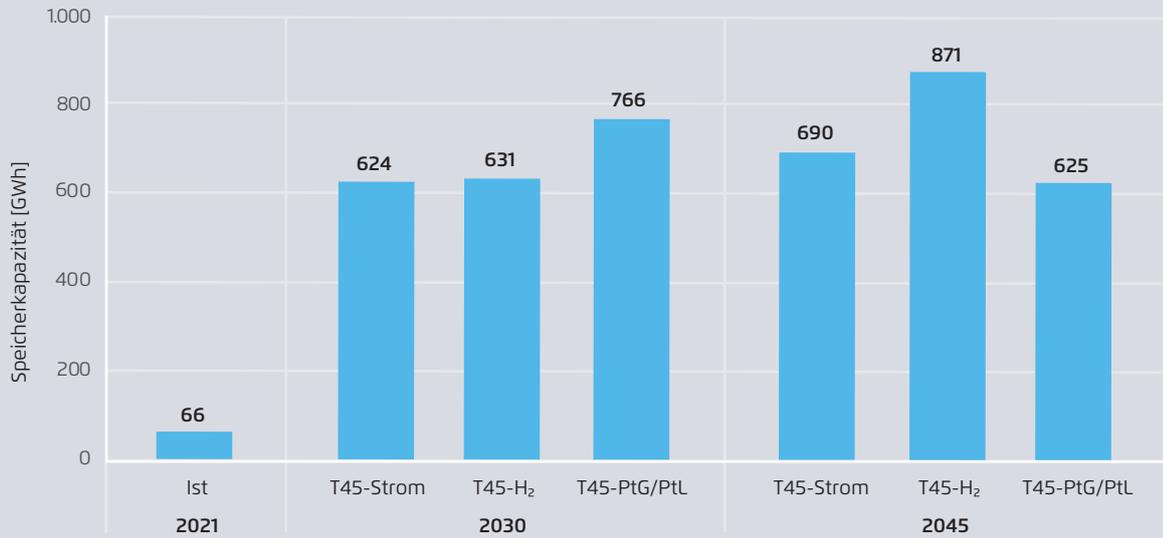
Abbildung 14



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b). * Ende August 2045 im T45-Stromszenario. ** inkl. Stromnachfrage aus Großwärmepumpen

Entwicklung der Wärmespeicherkapazität in der Fernwärme

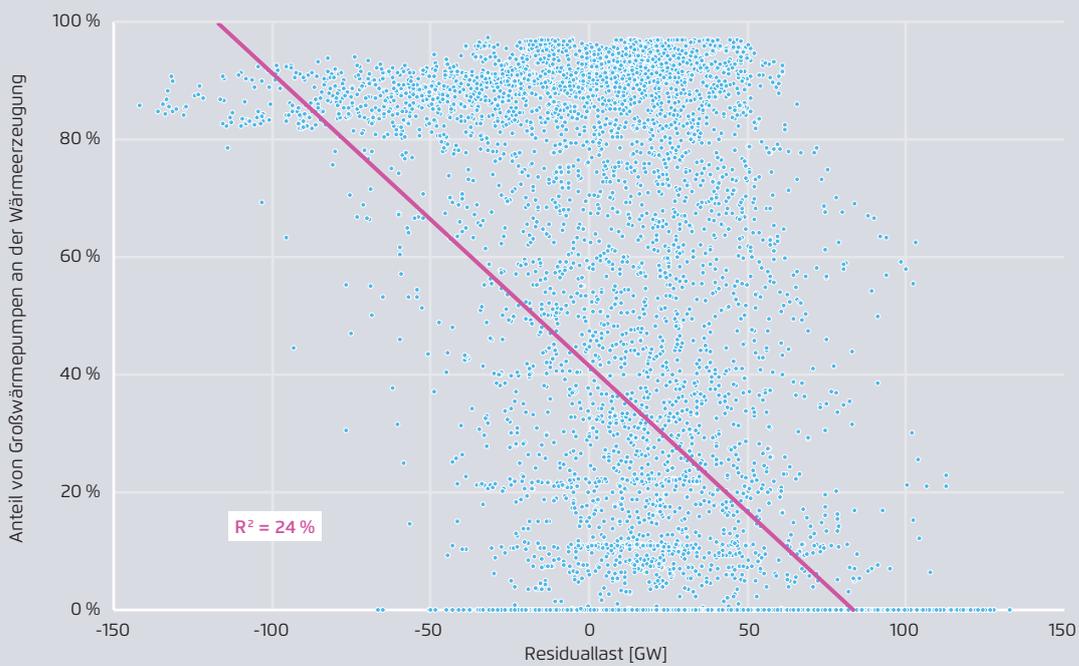
Abbildung 15



Fraunhofer IEG basierend auf AGFW (2022), Fraunhofer ISI et al. (2022b)

Anteil der Großwärmepumpe an der Wärmeerzeugung in Abhängigkeit von der Residuallast

Abbildung 16



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b)

Zukünftig werden Großwärmepumpen in Wärmenetzen im Durchschnitt mit nur noch rund 1.300 Vollbenutzungsstunden pro Jahr betrieben. Um die hohen Flexibilitätsanforderungen im Betrieb erfüllen zu können, müssen die Großwärmepumpen in Bezug auf ihre ausgelegte Wärmeleistung künftig stärker überdimensioniert werden. Das bedeutet, dass die installierte Leistung der Großwärmepumpen die maximale Heiz-/Wärmelast der an die Fernwärmenetze angeschlossenen Verbraucher künftig um ein Mehrfaches übersteigen wird. Daraus folgt unmittelbar, dass die Summe der jährlichen Vollbenutzungsstunden (Vbh) von Großwärmepumpen in Zukunft mit rund 1.247 Vbh im Jahr 2030 und rund 1.308 Vbh im Jahr 2045 (im Szenario T45-Strom, siehe Abbildung 17) deutlich niedriger sein wird als heute.

Der Einfluss der zu erwartenden künftigen Auslastung einer Großwärmepumpe auf ihre Wirtschaftlichkeit und die Frage, welche Auswirkungen unter-

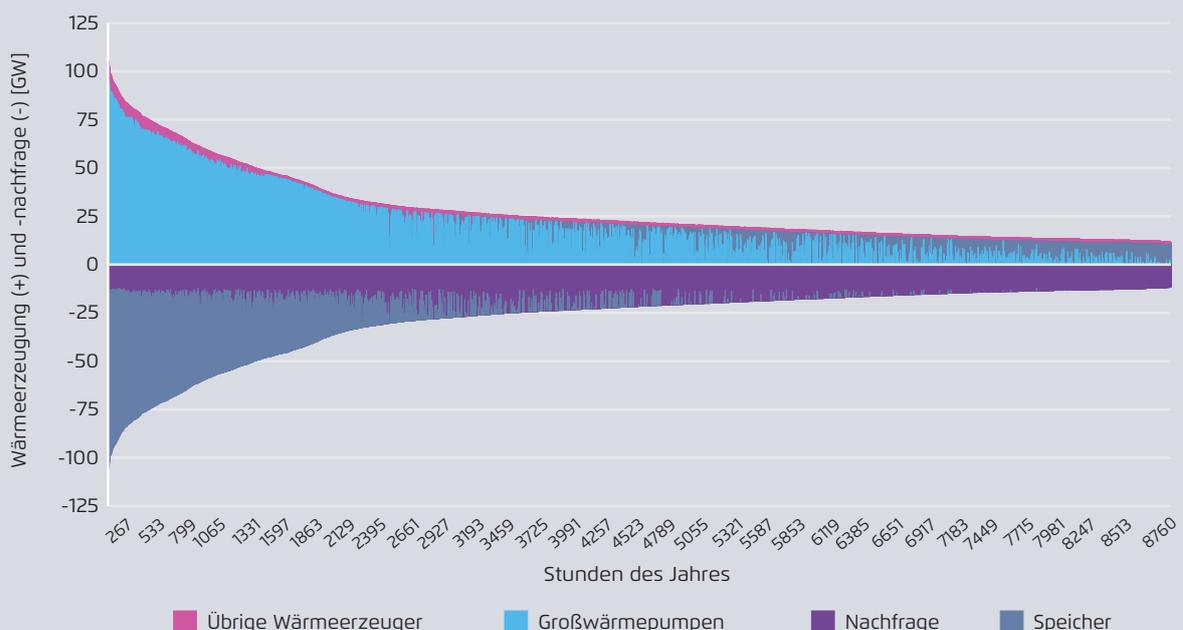
schiedliche COPs⁷ (engl. Coefficient of Performance), unterschiedliche Wärmequellen und unterschiedliche Auslastungsdauern auf die Wärmegestehungskosten und damit die Wirtschaftlichkeit eines Großwärmepumpenprojekts haben, können über Sensitivitätsanalysen bereits in der Phase der Grundlagenermittlung untersucht werden. Für die Bereitstellung grober Orientierungswerte wird dazu eine Auswahl sinnvoller Sensitivitätsanalysen im Kapitel 7.2 beschrieben.

Im Unterschied zu Wärmenetzen weisen Produktionsprozesse in der Industrie üblicherweise eine deutlich höhere Jahresauslastung auf. Für Wärmepumpen, die zur Versorgung dieser Produktionsprozesse mit Wärme eingesetzt werden, können daher durchschnittlich rund 6.000 Vollbenutzungsstunden

7 Der COP (auch Leistungszahl) beschreibt das Verhältnis der erzeugten Wärmeleistung zur eingesetzten elektrischen Leistung.

Geordneter Fernwärmelastgang* im Jahr 2045

Abbildung 17



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b). * Wärmelast inkl. Speicherbeladung im Szenario T45-Strom

den angenommen werden (Agora Industrie und FutureCamp 2022).

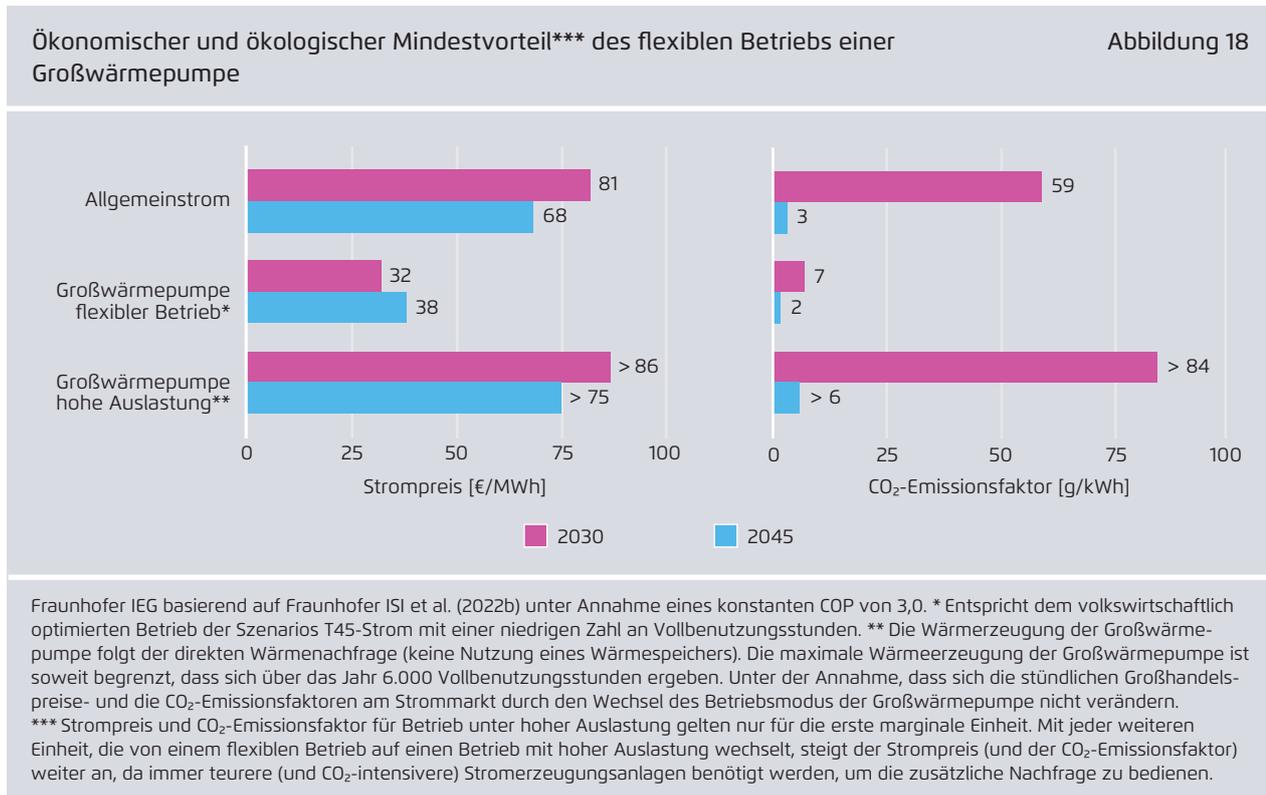
Durch einen „grünstromgeführten Betrieb“ können Großwärmepumpen sehr schnell sehr niedrige CO₂-Emissionsfaktoren erreichen. Eine am Strom-großhandelspreis ausgerichtete flexible Betriebsweise von Großwärmepumpen erhöht den Anteil Erneuerbarer Energien im Strombezug. Der dadurch erzielbare wärmepumpenspezifische Strommix weist gegenüber dem gesamtdeutschen Strommix einen deutlich niedrigeren CO₂-Emissionfaktor auf (-88 Prozent in 2030 und -55 Prozent in 2045). Dieser Vorteil des „grünstromgeführten“ Betriebs ist besonders in der Phase bis ungefähr zum Jahr 2030 relevant und er verringert sich, je größer der Anteil der Erneuerbaren Energien am gesamten Strommix in Deutschland wird. Die Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Strompreissignale nicht weiterhin durch eine Netzentgeltsystematik verzerrt werden, welche den flexiblen Strombezug mit hohen Lastspit-

zen in Zeiten eines hohen Stromangebotes sowie eine niedrige Zahl an Vollbenutzungsstunden bestraft.

Durch die Verdrängung CO₂-intensiver fossiler Wärmeerzeugung durch Großwärmepumpen mit sehr niedrigem CO₂-Emissionsfaktor können somit schnell viele CO₂-Emissionen im Fernwärmesektor vermieden werden.

Eine flexible Betriebsweise von Großwärmepumpen (geringe Zahl an Vollbenutzungsstunden) verringert gegenüber einem Dauerbetrieb (hohe Zahl an Vollbenutzungsstunden) die Strombezugskosten am Großhandelsmarkt deutlich. In Szenario T45-Strom ergeben sich auf diese Weise Einsparungen bei der Stromproduktion durch Großwärmepumpen von etwa 40 bis 60 Prozent gegenüber dem Jahresdurchschnittspreis.

Abbildung 18 fasst den ökonomischen (Strompreis) und ökologischen Mindestvorteil (CO₂-Emissions-



faktor des Stroms) eines flexiblen Einsatzes der Großwärmepumpe gegenüber einer Betriebsweise mit Auslastung (hohe Zahl an Vollbenutzungsstunden) für die Jahre 2030 und 2045 zusammen. Eine Übersicht zu den weiteren Stützjahren sowie dem Szenario T45-H₂ befindet sich im Anhang A.2.

Die vorstehend beschriebenen Anforderungen an die hochflexible Betriebsweise der Großwärmepumpen erfordern, dass diese zukünftig technisch in der Lage sein müssen, sehr große Leistungsbereiche mit hohen Lastgradienten abzudecken – entweder als Einzelanlage oder im Verbund mit weiteren Großwärmepumpen unterschiedlicher Leistungsklassen und Betriebscharakteristika. Darauf, dass dies machbar ist, deuten sowohl der aktuelle Stand der Technik und der zu erwartende technische Fortschritt als auch die Aussagen von auf Großwärmepumpen spezialisierten Herstellern und Planungsbüros hin (mehr Informationen dazu siehe Kapitel 5 und 6).

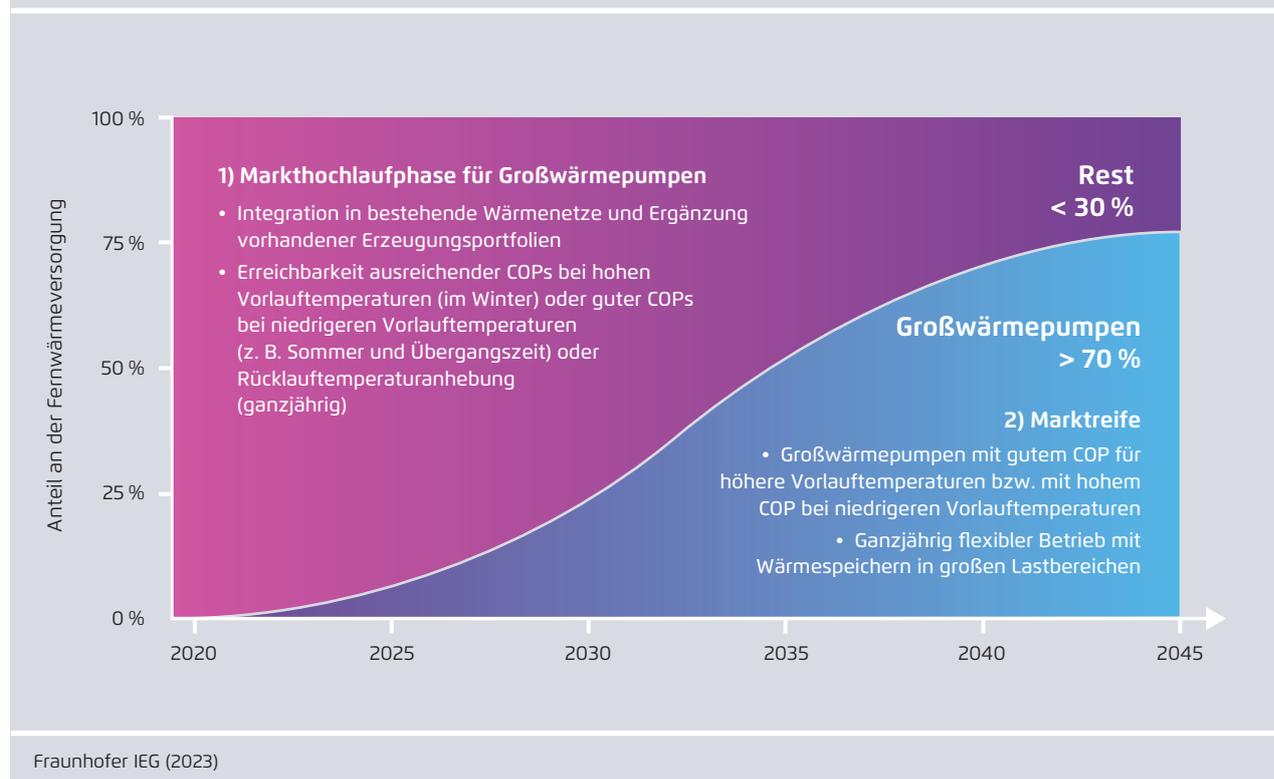
3.3 Eckdaten des notwendigen Roll-outs von Großwärmepumpen in der Fernwärme

Damit Großwärmepumpen bis zum Jahr 2045 tatsächlich 70 Prozent des Fernwärmebedarfs oder mehr decken können, müssen ab sofort jedes Jahr mehrere Gigawatt an Wärmeleistung und mehrere Gigawattstunden an Wärmespeicherkapazität zugebaut werden. Dabei lässt sich der geplante Roll-out von Großwärmepumpen grob in zwei Phasen unterteilen (siehe Abbildung 19):

→ In der ersten Phase des Markthochlaufs werden Großwärmepumpen noch überwiegend in bestehende Wärmenetze mit hohen Vorlauftemperaturen integriert und ergänzen vorhandene Erzeugungsportfolien. Überdies entstehen vor allem auf Quartiers- und Stadtteilebene neue Wärmenetze mit niedrigeren Temperaturniveaus, welche durch

Roll-out von Großwärmepumpen in zwei ineinander übergehenden Phasen

Abbildung 19



Großwärmepumpen bereitgestellt werden. Diese Phase ist gekennzeichnet durch hohe Vorlauftemperaturen (im Winter) oder gute COP-Werte (siehe Kapitel 4 und 5) bei niedrigeren Vorlauftemperaturen (zum Beispiel Sommer und Übergangszeit) oder bei der Integration der Großwärmepumpe in den Rücklauf der Bestandswärmenetze (ganzjährig).

→ In der zweiten Phase der Marktreife übernehmen Großwärmepumpen in immer mehr Wärmenetzen die zentrale Rolle der Wärmeversorgung und werden in Kombination mit Großwärmespeichern ganzjährig flexibel und systemdienlich betrieben. Der technische Fortschritt führt in modernen Netzen mit niedrigen und den verbleibenden Netzen mit höheren Vorlauftemperaturen zu verbesserten COP-Werten.

Jährlich müssen rund 340 bis 410 Großwärmepumpenprojekte mit zusammen 4,0–4,9 GW zugebaut werden. Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ergibt sich in den T45-Szenarien für das Jahr 2045 eine volkswirtschaftlich optimale Leistung von Groß-

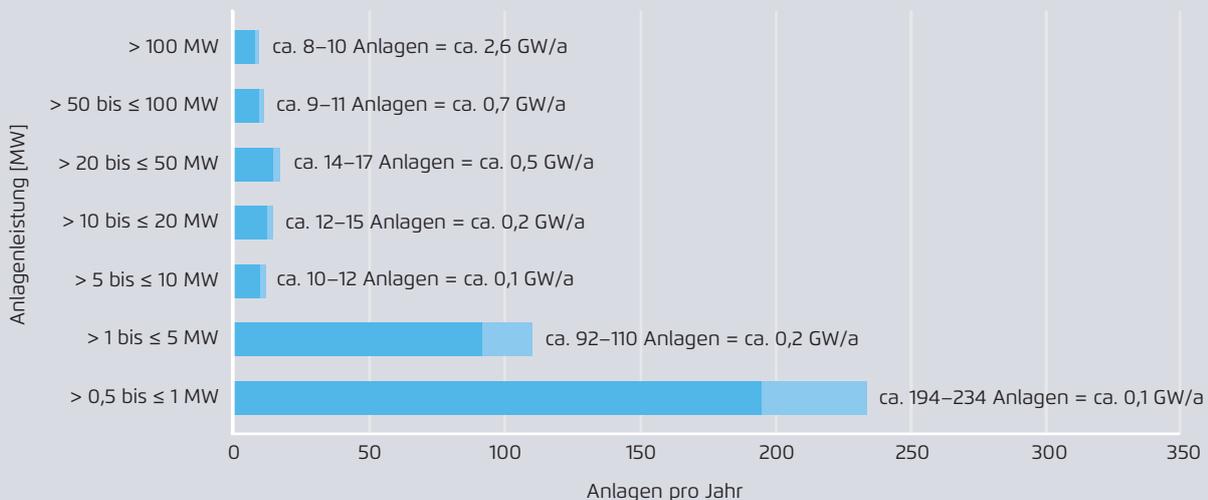
wärmepumpen in Höhe von 90 GW bis 108 GW. Bei weniger als 1 GW in Deutschland im Jahr 2023 installierter Großwärmepumpenleistung entspräche das in den verbleibenden 22 Jahren bis 2045 einem durchschnittlichen jährlichen Zubaubedarf von rund 4,0–4,9 GW pro Jahr.

Unter Annahme einer Größenverteilung der Großwärmepumpen entsprechend dem KWK-Anlagenbestand größer 500 kW (siehe Abbildung 20) wäre das gleichbedeutend mit rund 340 bis 410 einzelnen neuen Projekten pro Jahr, welche den gesamten Planungs-, Genehmigungs- und Finanzierungsprozess durchlaufen müssen und dafür dementsprechende Ressourcen benötigen.

Der Vergleich mit den anderen großen Klimaneutralitätsstudien zeigt, dass die Großwärmepumpe in fast allen Szenarien einen großen Teil der zukünftigen Fernwärmeerzeugung abdecken wird. Das genaue Ausmaß hängt dabei vor allem davon ab, in welchem Umfang die Potenziale aus der Abwärme-

Verteilung des jährlichen Großwärmepumpenzubaues von 4,0 bis 4,9 GW auf die verschiedenen Leistungsklassen orientiert am heutigen KWK-Anlagenbestand*

Abbildung 20



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b), BNetzA (2023a). * Annahme: Größenverteilung der Großwärmepumpen entspricht dem der KWK-Anlagen > 500 kW Ende 2022

nutzung, der Geothermie und der Solarthermie sowie die Geschwindigkeit der Gebäudesanierung in den Szenarien Berücksichtigung finden.

Es besteht jedoch kein Zweifel, dass sich der künftige Ausbaupfad für Großwärmepumpen verbreitern muss und dass dazu die passenden politischen Leitplanken und regulatorischen Rahmenbedingungen vorhanden sein müssen.

Zur Einordnung: Ein durchschnittliches Zubauziel von 4,5 GW neuer Großwärmepumpenleistung pro Jahr entspräche bei angenommenen spezifischen Investitionskosten (inkl. Planung, Wärmespeicher, Peripherie, Errichtung und Inbetriebnahme) in Höhe von 600–800 Euro pro kW einem Investitions- / Marktvolumen von rund 2,7–3,6 Mrd. Euro pro Jahr. Ausführlichere Informationen zur Aufteilung und

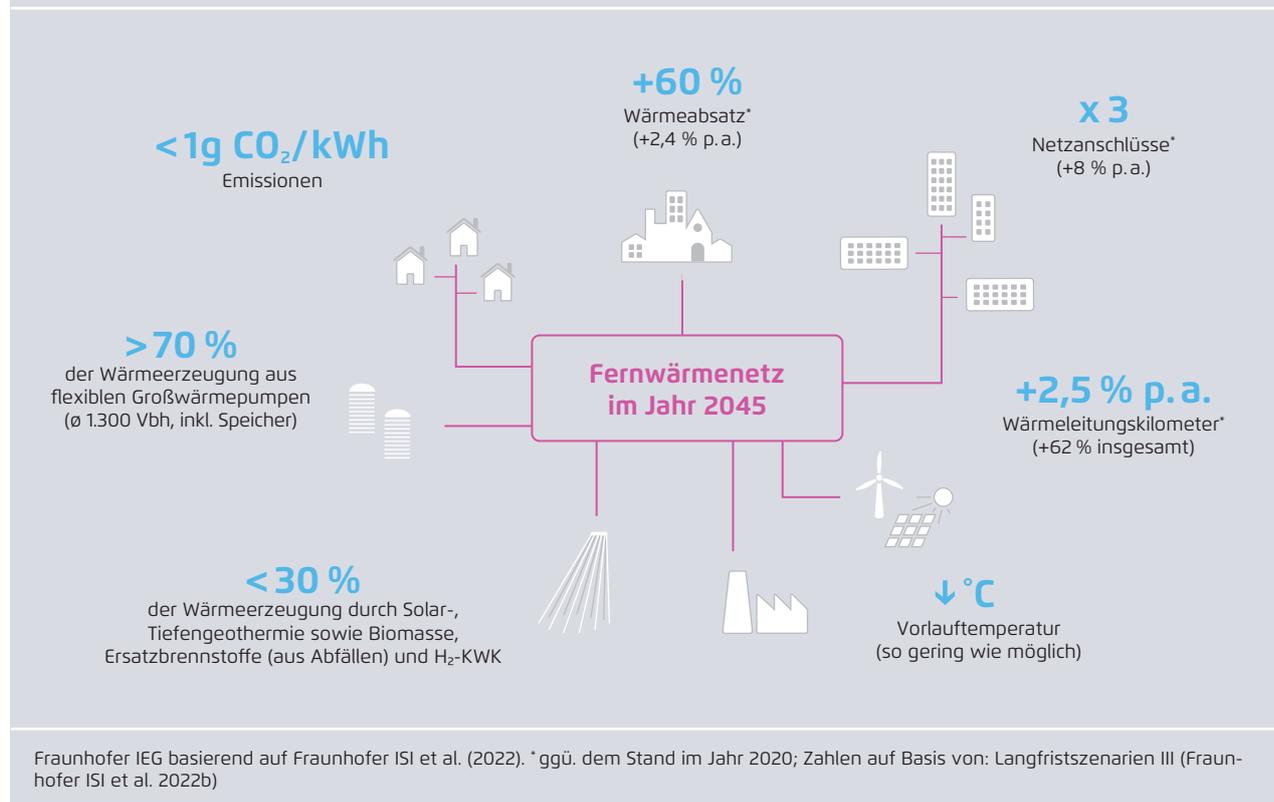
Höhe der spezifischen Investitionskosten je nach Leistungsklasse und Wärmequelle sind in Kapitel 7.2 enthalten.

Das durchschnittliche Fernwärmenetz wird sich im Jahr 2045 wesentlich zum Jahr 2020 unterscheiden.

Abbildung 21 gibt einen vereinfachten Überblick, wie sich das durchschnittliche deutsche Fernwärmenetz im Vergleich zum Jahr 2020 verändern müsste, wenn die Ergebnisse der T45-Szenarien zugrunde gelegt und von der nationalen Ebene auf die kommunale Ebene übertragen werden.

Das durchschnittliche Fernwärmenetz einer deutschen Stadt im Jahr 2045 im Vergleich zum Jahr 2020*

Abbildung 21



4 Wärmequellen: Potenziale und Voraussetzungen

4.1 Bedeutung der Wärmequelle für Großwärmepumpen

In den vorherigen Kapiteln wurde erörtert, welche Rolle Großwärmepumpen für den Erfolg der Wärmewende und auch der Energiewende insgesamt spielen. Es wurde aufgezeigt, dass aus energiewirtschaftlicher Perspektive sehr schnell sehr viele Großwärmepumpen geplant, errichtet und systemdienlich betrieben werden müssen, um Wärmenetze effizient dekarbonisieren zu können.

Welche Wärmequellen mit welchen Potenzialen in Deutschland zur Verfügung stehen und welche Vor- und Nachteile diese Wärmequellen im Hinblick auf deren Erschließung und Nutzung sowie Auslegung und den Betrieb der Großwärmepumpen mit sich bringen, wird in diesem Kapitel analysiert.

Wärmepumpen nehmen Umwelt- oder Abwärme von einer bestimmten Wärmequelle bei niedriger Tempe-

ratur auf und geben sie zuzüglich der Antriebsenergie bei höherer Temperatur wieder an eine Wärmesenke ab. Die Eigenschaften der Wärmequelle und der Wärmesenke bestimmen jedes Projekt und beeinflussen dessen Wirtschaftlichkeit.

Die wichtigsten Umwelt- und Abwärmequellen für den Betrieb von Großwärmepumpen sind in Tabelle 1 anhand der wichtigsten Merkmale bewertet. Sie werden im weiteren Verlauf noch im Detail erläutert. Diese Zusammenstellung ließe sich fortsetzen: Weitere Wärmequellen sind beispielsweise die Solarthermie sowie die thermische Nutzung von U-Bahn-Schächten in Ballungsgebieten.

Senkenseitig gibt es in Deutschland im Bereich der Fernwärme ungefähr 3.800 einzelne Wärmenetze – also Wärmesenken – mit unterschiedlichen Netztemperaturen, Netzdichten und Trassenlängen (siehe Kapitel 2.4). Es wird erwartet, dass die Anzahl der

Eigenschaften und relative Bewertung* verschiedener Umwelt- und Abwärmequellen für den Betrieb von Großwärmepumpen

Tabelle 1

Umwelt- und Abwärmequellen	COP	Investitionsaufwand	Saisonale Verfügbarkeit	Temperatur	Potenzial
Umgebungsluft	--	+	-	-10–30 °C	unbegrenzt
Oberflächennahe Geothermie	+	o	+	5–15 °C	450 TWh/Jahr
Mitteltiefe und tiefe Geothermie	+	--	+	15 °C (nach oben offen)	300 TWh/Jahr
Grubenwasser aus dem Bergbau	+	o	+	10–40 °C	4 TWh/Jahr**
Gewässerthermie (Flusswasser, Seewasser, Meerwasser)	o	+	o	4–25 °C	86 TWh/Jahr***
Abwasser und Kläranlagen	+	+	+	10–17 °C	34 TWh/Jahr
Industrielle Abwärme	+	+	+	20–100 °C	52 TWh/Jahr****
Abwärme aus Großrechenzentren	+	+	+	20–60 °C	16 TWh/Jahr

Fraunhofer IEG basierend auf Born et al. (2022), Bracke et al. (2022), Bracke et al. (2018), Kammer (2018), Gerhardt et al. (2019), Wolf (2017), Fritz und Pehnt (2018), (AGFW) (2020). * Bewertung der einzelnen Faktoren in Relation zu den anderen aufgezählten Umwelt- und Abwärmequellen. ** Nach Ende des Braunkohletagebau deutlich geringer. *** Keine Studien für die thermische Meerwassernutzung bekannt. **** Rückrechnung aus technischem Potenzial mit angenommenem COP von 2,5

Wärmenetze und damit die Trassenkilometer weiter anwachsen werden (siehe Kapitel 3.1).

Die Effizienz einer Wärmepumpe steigt mit höheren Quellen- und niedrigeren Netztemperaturen. Neben Unterschieden in der Temperatur, bei der die Wärme von einer Wärmepumpe aufgenommen wird, unterscheiden sich die Umwelt- oder Abwärmquellen auch durch den Aufwand für ihre Nutzbarmachung. Die Effizienz einer Wärmepumpe steigt mit höheren Temperaturen der Wärmequelle, wodurch die

Betriebskosten (operational expenditure, OPEX) sinken. Der Aufwand zur Erschließung der Umwelt- oder Abwärme und ihrer Anbindung an die Wärmepumpe hat erheblichen Einfluss auf die Investitionsausgaben (capital expenditure, CAPEX).

Die individuellen Standortbedingungen in Bezug auf die Temperatur der Wärmequelle und des Fernwärmenetzes bestimmen die erwartbare Anlagen-effizienz. Die Voraussetzungen für den effizienten Betrieb von Großwärmepumpen sind daher von

Theoretisch mögliche COPs von Wärmepumpen bei der Verwendung verschiedener Wärmequellen bei einem Wärmepumpen-Gütegrad* von 50 Prozent und unterschiedlichen Temperaturen des Wärmenetzes

Abbildung 22



Fraunhofer IEG (2023). * Der höchste theoretisch erreichbare COP einer Wärmepumpe wird beim sogenannten Carnot-Prozess erreicht. Er kann als verlustfreies Referenzmodell einer Wärmepumpe zu Rate gezogen werden. Das Verhältnis aus realem COP und Carnot-COP wird als Gütegrad bezeichnet. Aufgrund verschiedener Einflussfaktoren wie Reibung im System oder abgestrahlter Wärme werden derzeit üblicherweise Gütegrade von 40 bis 60 Prozent erreicht. ** Für Quellentemperaturen, die sich der Temperatur der Senke annähern, konvergiert der COP gegen unendlich.

Standort zu Standort und von Projekt zu Projekt verschieden. In Abbildung 22 werden für Kombinationen unterschiedlicher Wärmequellen und Wärmenetze theoretisch erreichbare COPs dargestellt.

Für die Nutzung der verschiedenen Wärmequellen sind eine Reihe genehmigungsrechtlicher Aspekte zu beachten. Großwärmepumpen werden vom Hersteller meist als Aggregat mit den notwendigen Sicherheitsprüfungen in den Verkehr gebracht. Die Peripherie der Gesamtanlage muss separat eine Zulassung durchlaufen, weil diese zumeist nicht vom Hersteller des Aggregats beigestellt wird. Durch Aufbau einer Gesamtanlage mit Anbindung sowohl an die Wärmequelle als auch die Wärmesenke entstehen neue genehmigungsrechtliche Aufgaben für den potenziellen Betreiber einer Anlage. Dabei werden für Großwärmepumpen unabhängig von der Wärmequelle eine Reihe von technischen Vorschriften berührt. Auf die wichtigsten von ihnen wird im Folgenden eingegangen.

Für die Erteilung einer Baugenehmigung müssen die Vorschriften der lokalen Bauordnung und insbesondere der DIN EN 378 1 bis 4 (Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen) erfüllt sein. Die Norm DIN EN 378 beschreibt den anerkannten Stand zur sicheren Aufstellung von Kältemaschinen und Wärmepumpen und regelt beispielsweise Anforderungen an den Brandschutz.

Großwärmepumpen sind keine automatisch genehmigungspflichtigen Anlagen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Die Kältemittelmengen heute üblicher Großanlagen liegen deutlich unter den Grenzwerten für Stoffmengen, die eine Genehmigung erfordern würden. Für Anlagen im dreistelligen MW-Bereich wäre dies etwa beim Kältemittel Ammoniak zu überprüfen.

In Bezug auf Immissionen unterliegen Wärmepumpen aber durchaus der Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anlei-tung zum Schutz gegen Lärm, kurz TA-Lärm). Ver-

schränkt mit der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), die viele weitere Sicherheitsaspekte wie beispielsweise den Betrieb von Druckgeräten regelt, und der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) ergeben sich daraus Anforderungen an Schallpegelminderungen in definierten Abständen zur Wärmepumpe.

Die Aufstellung von Wärmepumpen tangiert nicht nur bei der Gewässerthermie, sondern fast immer das durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und Landeswassergesetze (LWG) regulierte Schutzgut Wasser, weil Peripheriekreise oft mit wassergefährdenden Frostschutzmitteln versetzt sind. Es bedarf dann einer wasserrechtlichen Genehmigung.

Zu beachten ist, dass in Deutschland die Landes- oder gar Kommunalbehörden für die Genehmigungen verantwortlich sind, die einen unterschiedlichen Erfahrungsschatz in Bezug auf Großwärmepumpenprojekte haben.

Im Weiteren sollen die Herausforderungen bei der Erschließung der bisher nur stichpunktartig aufgezählten verschiedenen Wärmequellen weiter thematisiert werden. Dabei geht es sowohl um aus der Technologie resultierende Einschränkungen als auch um die aktuelle Gesetzeslage in Deutschland hinsichtlich der Voraussetzungen an eine genehmigungsfähige Großwärmepumpe mit Peripherie.

4.2 Potenziale und Voraussetzungen verschiedener Wärmequellen

Umgebungsluft – unerschöpfliche Wärmequelle, die in der kalten Jahreszeit allerdings Nachteile hat

Die vor allem bei kleineren dezentralen Wärmepumpen vielfach genutzte Umgebungsluft ist überall verfügbar. Diese Wärmequelle weist starke jahreszeitliche Temperaturschwankungen und niedrige Temperaturen in der Heizperiode auf. Diese niedrigen Temperaturen stellen in mehrerlei Hinsicht eine Herausforderung dar. Große Temperaturspreizungen

zur Außenluft gerade bei Wärmenetzen mit hohen Vorlauftemperaturen können im Einzelfall angepasste Betriebsmodi wie etwa eine Rücklaufanhebung im Winter oder eine Beschränkung des Betriebs auf die Übergangsjahreszeit erfordern.

Die Erschließung von Luft als Wärmequelle verursacht gegenüber anderen Wärmequellen einen vergleichsweise geringen Investitionsaufwand, hat aufgrund geringerer erzielbarer Jahresarbeitszahlen aber Nachteile in Bezug auf die Betriebs- bzw. Strombezugskosten.

Für Großwärmepumpen mit Luft als Wärmequelle müssen zudem sehr große Volumenströme durch die Ventilatoren bewegt werden. Während Wärmepumpenaggregate in schallisolierte Gebäude eingebaut werden können, ist dies bei den Luftwärmetauschern und zugehörigen Ventilatoren nicht möglich. Bei der Standortwahl muss daher – genauso wie bei konventionellen Heizkraftwerken – darauf geachtet werden, dass die von der TA-Lärm vorgeschriebenen Immissionsrichtwerte eingehalten werden. Die Auskühlung feuchter Luft kann zur Vereisung der Wärmeübertrager einer Luftwärmepumpe führen, die dann abgetaut werden müssen. Abtauvorgänge auch beim Start von Wärmepumpen erfordern zusätzlichen Energieeinsatz, der die Anlageneffizienz weiter senkt.

Die Abkühlung der Quellenluft kann sich gerade im urbanen Raum positiv auf das Stadtklima auswirken. Allerdings ist eine sorgfältige Planung zur Führung der Luftströme vor dem Hintergrund der geographischen Randbedingungen nötig. Dies liegt daran, dass kalte Luft im Vergleich zu warmer Luft schlechter aufsteigt und unter bestimmten Bedingungen Kaltluftseen oder Vereisung drohen.

Oberflächennahe Geothermie – Potenzial, bis zu 75 Prozent der in Deutschland benötigten Wärme für Raumwärme und Warmwasser bereitzustellen

Von oberflächennaher Geothermie wird bis zu Erschließungstiefen von 400 m gesprochen. Erdwärme ist ein sogenannter bergfreier Bodenschatz,

dessen Eigentum nicht an ein Grundstück gekoppelt ist. Ausnahmetatbestände bestehen jedoch, wenn die geothermische Nutzung in Verbindung mit dem Grundstück steht. Die gewerbliche Gewinnung von Erdwärme bedarf deshalb einer Bergbauberechtigung durch ein Landesbergamt. Geothermie berührt auch in besonderer Weise das Schutzgut Wasser. Nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bzw. dem Landeswassergesetz sind Verunreinigungen des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu vermeiden. Sowohl wasserrechtlich als auch technisch wird zwischen Erdwärmesonden und Bohrungen zur Grundwassernutzung unterschieden. Erdwärmesonden sind geschlossene Systeme, die keine direkte Gewässerbenutzung darstellen. Trotzdem kann eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich werden, da in den Kreisläufen fast immer auch wassergefährdendes Frostschutzmittel umgewälzt wird, welches im Falle einer Leckage zur Verunreinigung des Wassers führen könnte. Offene Systeme zur Grundwassernutzung unterliegen prinzipiell einer strengen Regulierung.

Die Umweltwärmequelle Geothermie steht ganzjährig bei stabilen Temperaturen zur Verfügung. Unmittelbar unter der Erdoberfläche können flache Kollektoren verlegt werden. Weil diese mit der Leistung in der Fläche erheblich wachsen, sind derartige Kollektorsysteme für Großwärmepumpen wenig geeignet. Eine Ausnahme könnten hier Agrothermieprojekte im ländlichen Raum sein. Im Allgemeinen sind Bohrungen für offene oder geschlossene Systeme zielführender. In der Roadmap „Oberflächennahe Geothermie“ des Fraunhofer IEG aus dem Jahr 2022 wurde für Deutschland ein mögliches Angebot von Nutzwärme in Höhe von rund 496 bis 600 TWh pro Jahr für einen mittleren COP von 4 ermittelt, welches einem Deckungsanteil von bis zu 75 Prozent der in Deutschland benötigten Wärme für Raumwärme und Warmwasser entspricht (Born et al. 2022).

Die Gesamteffizienz der Anlage wird sowohl durch die Betriebsweise, die Geometrie der Erschließungssysteme als auch durch die Eigenschaften des Untergrunds

bestimmt. Da es sich um erprobte Standardtechnologien handelt und der oberflächennahe Untergrund in der Regel gut erkundet ist, ist das Planungs- und Erschließungsrisiko anders als bei der mitteltiefen und tiefen Geothermie als gering einzustufen.

Mitteltiefe und tiefe Geothermie – großes Potenzial und ganzjährig hohe Quelltemperaturen verfügbar, aber aufwendig zu erschließen und nicht flächendeckend verfügbar

Mit steigender Bohrtiefe wird von mitteltiefer und tiefer Geothermie gesprochen, wobei die Abgrenzung (ca. 1.000–1.500 m) in der Literatur nicht einheitlich erfolgt. Ab Bohrtiefen von etwa 600–800 m können keine kleinen mobilen Bohrgeräte mehr zum Einsatz kommen. Dies begründet einen Kostensprung bei der Erschließung. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Temperatur in Mitteleuropa um etwa 3 Kelvin pro 100 m. Bei hinreichender hydraulischer Durchlässigkeit der Gesteinsformationen lässt sich durch tiefegeothermische Bohrungen Wärme auf hohen Temperaturniveaus bereitstellen. Das Gesamtpotenzial des Süddeutschen Molassebeckens, des Oberrheingraben, des Norddeutschen Beckens und der Rhein-Ruhr-Region kann bei Temperaturen von 35 bis 65 °C auf etwa 150 bis 300 TWh pro Jahr geschätzt werden (Bracke et al. 2022). Die Aufsuchungsaktivitäten, die Durchführung von Tiefbohrungen und die spätere Gewinnung von mitteltiefer und tiefer Geothermie unterliegen dem Bergrecht.

Mitteltiefe und tiefe offene geothermische Systeme unterliegen einem hohen Fündigkeitsrisiko. So kann die Qualität des Reservoirs durch eine zu niedrige Temperatur oder unvorteilhafte hydrochemische Eigenschaften des Thermalwassers nicht den Erwartungen entsprechen. Vor allem aber hinter den Erwartungen zurückbleibende Produktionsraten können zu höheren Betriebskosten über die gesamte Lebensdauer führen. Es ist möglich, durch hydraulisches Stimulieren gegebenenfalls in Kombination mit einer Säuerung die natürlichen Durchlässigkeiten zu erhöhen. Auch sind Ablenkbohrungen oder Lateralbohrungen im Nutzhorizont möglich. Diese Verfahren sind jedoch mit

erheblichen zusätzlichen Investitionen und genehmigungsrechtlichen Risiken behaftet. Für die tiefe Geothermie ist daher ein relativ großer Erschließungsaufwand charakteristisch (siehe Kapitel 7.2).

In vielen Staaten übernehmen staatliche Akteure das Fündigkeitsrisiko. Zunehmend werden privatwirtschaftliche Versicherungsmodelle relevant. Eine rein privatwirtschaftliche Risikübernahme des Fündigkeitsrisikos wurde 2003 erstmalig beim Geothermieprojekt in Unterhaching bei München entwickelt und angewandt (Seipp et al. 2016). Neben Versicherungen sind auch Zuschuss-, Kredit- oder Bürgschaftslösungen denkbar. Deutschland ist vor allem im Bereich der Tiefengeothermie untererkundet. Im Oktober 2021 wurde daher vom Umweltbundesamt (UBA) die Studie „Ausbau klimaneutraler erneuerbarer Fernwärme aus tiefegeothermischen Quellen“ ausgeschrieben. Ziele dieser Studie sind unter anderem Möglichkeiten zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit zur Erkundung und Erschließung von Geothermieprojekten sowie verschiedene Förderinstrumente zur Absicherung der Fündigkeitsrisiken zu entwickeln (Bracke et al. 2022).

Grubenwasser – nur lokal begrenzt verfügbar, aber dort eine sehr wertvolle Wärmequelle

Dem Erdreich kann nicht nur über geothermische Bohrungen Wärme entzogen werden. Der vorwiegend in Nordrhein-Westfalen durchgeführte flächendeckende Steinkohleabbau führte zu Geländeabsenkungen oberhalb der ehemaligen Grubenschächte. Zur Vermeidung weiterer Absenkungen sowie dem Schutz vor Überflutungen muss das Kohlengrubenwasser dauerhaft abgepumpt werden. Diese Wasserhaltung stellt damit eine sogenannte Ewigkeitslast dar. Im Vergleich dazu ist die Nutzung von Sumpfungswässern des Braunkohletagebaus auf die Zeit des Abbaus beschränkt. Die Betrachtung aller Standorte ergibt dabei ein Potenzial von etwa 4 TWh pro Jahr für das Jahr 2035 und 1 TWh pro Jahr im Jahr 2050 bei einer mittleren Quellentemperatur von ungefähr 35 °C (Bracke et al. 2018).

Gewässerthermie aus Oberflächenwasser – einfach erschließbare Energiequelle mit starken jahreszeitlichen Temperaturschwankungen

Unter dem Begriff Gewässerthermie wird die energetische Nutzung der Umweltwärme aus Oberflächenwassern wie Seen, Flüssen und Meerwasser zusammengefasst. Grundsätzlich bedarf es dazu wasserrechtlicher Genehmigungen. In gewissem Umfang kann die Auskühlung überhitzter Gewässer positive Auswirkungen auf deren Ökologie oder auch das Stadtklima haben. Typischerweise werden Auflagen zur Begrenzung der maximalen Auskühlung und zur Ausleitung großer Wassermengen gemacht. Da Großwärmepumpen das Wasser lediglich abkühlen und nicht stofflich umsetzen, ist eine Nutzungskonkurrenz um die Ressource Wasser durch seinen Einsatz als Wärmequelle nicht zu befürchten.

Im Gegensatz zu anderen Ländern, wie beispielsweise der Schweiz oder Großbritannien, gibt es für Gewässerwärmequellen in Deutschland noch kein Kataster. In der Schweiz wurde ein solches Kataster für Seen und Flüsse durch die Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) erstellt (Gaudard et al. 2018). Während im Bereich der thermischen Meerwasser-nutzung nach Kenntnis der Autoren noch gar keine Potenzialstudien für Deutschland existieren, gibt es für das Potenzial aus Seen lediglich eine grobe Abschätzung anhand des Wärmebedarfs in deren näherem Umkreis. Hierbei wurde eine mögliche Entzugsleistung von rund 59 TWh pro Jahr ermittelt Kammer (2018). Die Temperaturen schwanken jahreszeitlich sehr stark und liegen etwa bei 4 bis 25 °C (Gerhardt et al. 2019).⁸

Aus technologischer Sicht ergeben sich auch durch die Biologie der Gewässer besondere Herausforde-

rungen. Zur Vermeidung von Bewuchs, beispielsweise durch Muscheln, sind hohe Strömungsgeschwindigkeiten sowie Rechen und/oder Filter notwendig. Es sind gut zu reinigende Wärmeübertrager wie Rohrbündelwärmeübertrager zu wählen und die Reinigbarkeit der Rohrleitungsanlage im Inneren ist sicherzustellen, was einen erhöhten Platzbedarf nach sich zieht. Des Weiteren wird in der Praxis versucht, den Anforderungen an den Gewässerschutz durch den Einsatz ungefährlicherer Kältemittel gerecht zu werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei das nicht brennbare und nicht toxische Kältemittel CO₂. Es erfordert sehr hohe Drücke in der Wärmepumpe, was diese verteuert. Zudem erfordern die thermodynamischen Eigenschaften dieses Kältemittels besonders niedrige Rücklauftemperaturen für einen effizienten Betrieb. Die Gründe dafür werden in Kapitel 5 näher erläutert.

Abwasser und Kläranlagen – ganzjährig und nahezu in allen größeren Ortschaften, also in Wärmesenkennähe, vorhanden

Abwasserkanäle und Abwasserbehandlungs-/Kläranlagen stellen eine nahezu flächendeckend verfügbare Wärmequelle mit geringen Temperaturschwankungen von etwa 17–20 °C im Sommer und 10–12 °C im Winter dar (AGFW 2020). Deshalb ist der COP im Winter in der Regel besser als bei Luft oder Gewässern als Wärmequelle. Häufig ist zudem eine örtliche Nähe zu den Wärmeabnehmern gegeben (Ecke und Göke 2017). Theoretisch lassen sich mit der deutschlandweit insgesamt vorhandenen Ab- und Klärwassermenge bei einem Entzug von 3 Kelvin jährlich rund 31 TWh Umweltwärme gewinnen. Die mögliche Entzugsleistung wird durch die minimale notwendige Abwassertemperatur bei Kläranlageneintritt begrenzt. Weil die Volumenströme aber zeitlich variieren und außerdem nur ein Teil der Potenziale technisch erschließbar sind, weichen die in der Literatur dokumentierten theoretischen Potenziale in der Praxis nach unten ab. Bereits installierte Projekte und durchgeführte Studien ergaben, dass eine Temperaturreduktion von 4 Kelvin die Funktionsfähigkeit von Kläranlagen nicht beeinträchtigt (Fritz und Pehnt 2018).

8 Die Untergrenze ergibt sich aus der notwendigen Quelltemperatur, um quellenseitig eine Vereisung durch Auskühlung zu vermeiden. Sie entspricht der Temperatur, zu der im Winter vom Grund nur oberflächlich gefrorener Gewässer wegen der Anomalie des Wassers bei 4 °C abgepumpt werden kann.

Für Abwasserkanäle wurde bei einer Temperaturabsenkung von 4 Kelvin ein Potenzial von rund 25 TWh pro Jahr (Fritz und Pehnt 2018) und für eine Temperaturabsenkung auf 3 °C ein Potenzial von rund 8–9 TWh pro Jahr (Gerhardt et al. 2019) für Kläranlagen errechnet.

Eine technische Herausforderung bei der Nutzung von Abwasserkanälen ist das stark schwankende Wasserangebot.⁹ Zudem stellen Verschmutzungen durch biologische Ablagerungen Herausforderungen für die Nutzung von Abwasserkanälen und Kläranlagen dar. Speziell bei Kläranlagen ist darauf zu achten, dass das Reinwasser vor Kältemiteleintrag geschützt wird. Hier gelten noch schärfere Anforderungen als bei der Gewässerthermie. Dem kann bei indirekter Einbindung durch Zwischenkreise und bei direkter Einbindung mit doppelwandigen Wärmetauschern Rechnung getragen werden.

Neben der technischen Lösung bedarf es auch immer der juristischen Klärung der Haftung bei Reinwasserkontamination und insofern von Beginn an einer engen Kooperation zwischen Kläranlagenbetreibern und Abwasserbetrieben sowie den Betreibern der Großwärmepumpe.

Industrielle Abwärme – große Potenziale, hoher Kooperationsbedarf zwischen Abwärmelieferant und Abwärmennutzer

Industrielle Abwärme fällt deutschlandweit in großen Mengen und auf unterschiedlich hohen Temperaturniveaus an, die dabei teilweise oberhalb des Temperaturniveaus von Fernwärmenetzen liegen. Die Industrieabwärme, vor allem jene auf höheren Temperaturniveaus, sollte in erster Linie soweit wie möglich wieder den Industrieprozessen zugeführt werden, um dort die Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz

zu heben. Erst nach dieser Nutzungskaskade oder wo keine Wärmerückführung möglich oder energetisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, sollte die restliche industrielle Abwärme zur Nutzung in Fernwärmenetzen ausgekoppelt werden. Allein für den Temperaturbereich < 100 °C kann das gesamte Potenzial zuzüglich der Antriebsenergien für die Großwärmepumpen auf 86 TWh pro Jahr geschätzt werden (Wolf 2017).

Bei der Auskopplung von Wärme aus Industrieprozessen stellt die Wärme jedoch lediglich ein Kuppelprodukt dar. Das heißt, dass die Industrieunternehmen ihre Produktion nicht an Wärmebedarfen ausrichten werden und dass eine etwaige Wärmeauskopplung keine nachteiligen Auswirkungen auf den eigentlichen Prozess haben sollte. Aus den daraus resultierenden Anforderungen an einzuhaltende Temperaturdifferenzen und Stoffströme ergeben sich beispielsweise bei *Batch*-Prozessen bestimmte Bedarfe an zusätzlichen Pufferspeichern. Auch Kontamination ist – ähnlich wie bei Gewässerthermie oder Wärmegewinnung aus Klärwässern – zu vermeiden.

Zudem besteht ein hoher Abstimmungsbedarf zwischen den Wärmeabnehmern und den Industrieunternehmen, die andere (typischerweise kürzere) Investitions- und Betriebshorizonte haben als ein Fernwärmenetzbetreiber. Es sind Fälle denkbar, bei denen die Abwärmequelle früher als geplant versiegen könnte, weil Industrieprozesse aus unternehmerischen Gründen gewandelt oder eingestellt werden. Außerdem kann es durch die Industrietransformation zu Umstrukturierung von Industriestandorten und damit zur Verringerung der verfügbaren Abwärme kommen. Folglich besteht ein gesteigerter Kooperationsbedarf zwischen Abwärmelieferant und Abwärmennutzer. Der Verkauf von Abwärme darf außerdem nicht zu einem fossilen „Lock in“ führen.

Abwärme aus Rechenzentren – große Synergiepotenziale, sofern die Rechenzentren nahe der Wärmesenken errichtet werden

Im Bereich der Abwärmequellen werden Rechenzentren wegen der fortschreitenden Digitalisierung an

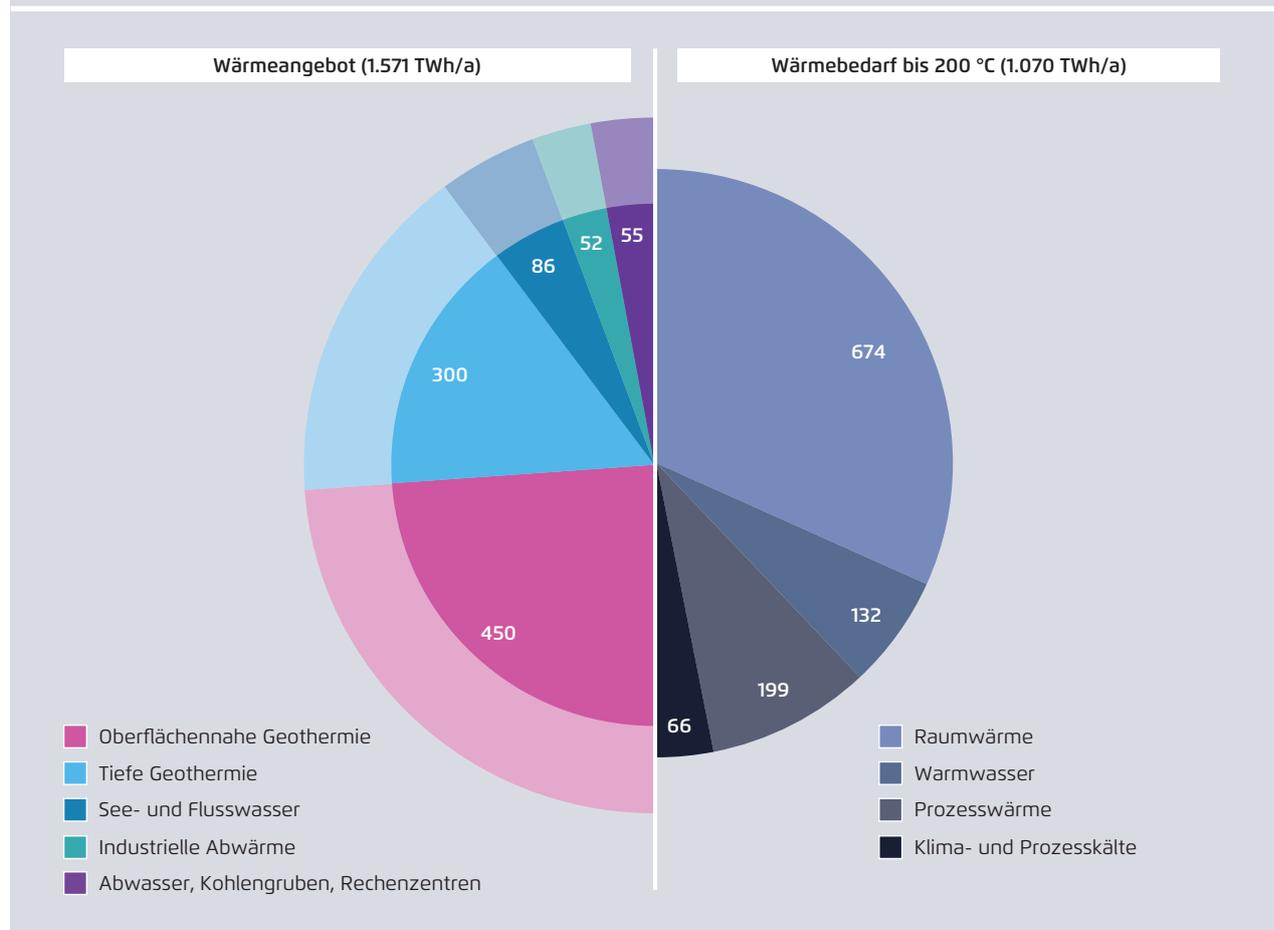
⁹ Im Jahr 2019 entfielen 26 Prozent der in Deutschland anfallenden Abwassermenge auf periodisch auftretendes Niederschlagswasser. Weitere 17 Prozent entfallen auf Fremdwasser (UBA 2023b). Diese könnten ebenfalls als periodisch auftretend angenommen werden.

Bedeutung gewinnen. Auch wenn berücksichtigt wird, dass der spezifische Strombedarf von Rechenzentren aufgrund von Effizienzsteigerungen mit der Zeit abnehmen wird, kann aufgrund zahlreicher geplanter und angekündigter Projekte von einem allgemeinen Anstieg des Energiebedarfs dieser Branche in Deutschland ausgegangen werden. Laut T45-Langfristszenarien wird der Bedarf im Jahr 2025 auf etwa 16 TWh prognostiziert und für das Jahr 2045 auf bis zu 23 TWh geschätzt. Die eingesetzte elektrische Energie wird dabei in Wärme umgewandelt und

kann somit durch Wärmepumpen nutzbar gemacht werden. Unter der Annahme eines Nutzungsgrades von 70 Prozent der Abwärme ergibt sich ein maximales thermisches Potenzial von 16 TWh im Jahr 2045. Voraussetzung zur Erschließung dieses Potenzials ist, dass bei künftigen Rechenzentren auf eine örtliche Nähe zu Wärmesenken – beispielsweise einem Wärmenetz – geachtet wird. Das vom Kabinett beschlossene Energieeffizienzgesetz (kurz: EnEfG, Stand: 19. April 2023) schreibt für Rechenzentren unter anderem eine bilanzielle Deckung des Energie-

Gegenüberstellung des möglichen Wärmeangebots* durch Wärmepumpen und der Wärmebedarfe bis 200 °C** in Deutschland (exklusive Umgebungsluft)

Abbildung 23



Fraunhofer IEG basierend auf Born et al. (2022), Bracke et al. (2022), Kammer (2018), Gerhardt et al. (2019), Fritz und Peht (2018), Wolf (2017), Stobbe et al. (2015). * Das Wärmeangebot setzt sich aus den Potenzialen der verschiedenen Umwelt- und Abwärmequellen (**dunklere Farben**) zuzüglich der jeweiligen Antriebsenergie (**transparente Farben**) für die Wärmepumpen bei einem angenommenen mittleren COP von 2,5 zusammen. ** Wärmeanteile des Endenergiebedarfs Deutschlands im Jahr 2021. Herausgerechnet wurde der Prozesswärmebedarf von Privathaushalten sowie Prozesswärme > 200 °C

bedarfs ausschließlich über ungeförderten Strom aus Erneuerbaren Energien ab dem Jahr 2027 vor (ab dem Jahr 2024 zu mindestens 50 Prozent). Neue Rechenzentren, die ab Juli 2026 ihren Betrieb aufnehmen, müssen zudem eine sogenannte Energieverbrauchseffektivität von mindestens 1,3 aufweisen (vorher in Betrieb gegangene Rechenzentren müssen diesen Wert bis zum Juli 2030 erreichen).

In Abhängigkeit vom Kühlkonzept variiert die Temperatur der anfallenden Abwärme von Rechenzentrum zu Rechenzentrum. Während bei einem luftgekühlten Rechenzentrum Temperaturen bis ca. 30 °C entstehen, beträgt die Abwärme eines flüssigkeitsgekühlten Zentrums etwa 60 °C.

4.3 Wärmepotenziale in Deutschland

Deutschlands Wärmebedarfe bis 200 °C könnten vollständig durch Wärmepumpen gedeckt werden.

Abbildung 23 zeigt für die vorstehend beschriebenen Wärmequellen (ohne Umgebungsluft) die Obergrenzen der bisher für Deutschland ermittelten Wärmemengenpotenziale und stellt sie zur Orientierung dem Endenergieverbrauch im Wärmesektor des Jahres 2021 gegenüber. Bezüglich der Potenziale gibt es noch Unschärfen, die sich in der Spannweite der in der Literatur verfügbaren Daten widerspiegelt. Derzeit

sind allerdings sowohl auf Bundesebene als auch in mehreren Bundesländern verschiedene Potenzialanalysen in Arbeit oder in Planung – nicht zuletzt, um die notwendigen Grundlagen für zahlreiche Wärmetransformationsstudien und kommunale Wärmepläne zu schaffen, welche in den nächsten Jahren erarbeitet werden müssen. Demzufolge wird sich der Datenstand in den nächsten Jahren diesbezüglich auf jeden Fall verbessern.

Die unter dem Begriff Prozesswärmebedarfe in Abbildung 23 zusammengefassten Wärmebedarfe gliedern sich über unterschiedliche Temperatur- und Industriesegmente. Berücksichtigt wurden Bedarfe, die mit Wärmepumpen bei Temperaturen bis 200 °C dargeboten werden müssen und insofern mit Großwärmepumpen sinnvoll dekarbonisierbar wären. Bis zu diesen Temperaturen sind, wie in Kapitel 6.1 und Anhang A.3 dargestellt wird, bereits heute Serienprodukte mehrerer Großwärmepumpenhersteller verfügbar oder in fortgeschrittener Entwicklung. Einzelne in Entwicklung befindliche Anlagen erreichen zudem Senktemperaturen von bis zu 250 °C. Über diese Temperatur hinaus können andere direktelektrische Lösungen, wie etwa Elektrodenkessel oder elektrische Öfen, eingesetzt werden. Insgesamt liegen etwa 37 Prozent des industriellen Wärmebedarfs bei unter 200 °C (UBA 2017).

5 Stand der Technik: Hauptkomponenten, Kennzahlen, Entwicklungspotenziale

Die Auswahl geeigneter Großwärmepumpen wird im konkreten Anwendungsfall durch die Randbedingungen vor Ort vorgegeben. Sie bestimmen die Bauform und das Kältemittel der Großwärmepumpe. Die niedrige Quelltemperatur definiert die Temperatur, bei der lokal verfügbare Umweltwärme durch die Wärmepumpe aufgenommen werden kann. Die hohe Senkentemperatur ist durch die Temperatur bestimmt, bei der die von der Großwärmepumpe bereitzustellende Wärme einem Fernwärmenetz oder einem Industrieprozess dargeboten wird. Sind die Randbedingungen der anzubindenden Quelle und Senke bekannt, kann eine geeignete Wärmepumpe für ein Projekt ausgewählt werden.

5.1 Funktionsprinzip von Kompressionswärmepumpen

Großwärmepumpen funktionieren zwar nach dem gleichen thermodynamischen Prinzip wie die deutlich bekannteren kleinen Wärmepumpen für Gebäude, sind aber in Bezug auf ihre Dimensionen (Heizleistung, Volumenstrom, Druckverhältnisse, Platzbedarf), ihre Komplexität, das Investitionsvolumen und den Aufwand für Betrieb, Wartung und Instandhaltung eher mit Blockheizkraftwerken beziehungsweise KWK-Anlagen zu vergleichen.

Die zu Grunde liegenden technischen Zusammenhänge werden im Folgenden anhand der Kompressionswärmepumpe erläutert, die in Fernwärmeanwendungen die am weitesten verbreitete Wärmepumpentechnologie darstellt.

Geschlossene Kompressionswärmepumpen nehmen auf einem niedrigen Temperaturniveau thermische Energie auf und geben sie zusammen mit der Antriebsenergie auf einem höheren Temperatur-

niveau an eine Wärmesenke ab. Dabei zirkuliert ein Kältemittel im Inneren und durchläuft vier wesentliche Prozessschritte: Temperaturerhöhung durch Verdichtung, Wärmeabgabe, Entspannung und Erwärmung.

Auf Bauteilebene erfolgt die Temperaturerhöhung durch die Druckerhöhung in einem Verdichter. Im einfachsten denkbaren Kreislauf für eine Kompressionswärmepumpe mit geschlossenem Kreislauf erfolgt die Wärmeabgabe über einen ersten Wärmeübertrager, die Entspannung über ein Expansionsventil und die Wärmezufuhr über einen zweiten Wärmeübertrager, bevor das Kältemittel zum Verdichter zurückgeführt wird.

In den Wärmeübertragern finden bei unterkritischen Prozessen sogenannte Phasenwechsel statt.¹⁰ Deshalb wird der Wärmeübertrager für die Wärmeabgabe des Kältemittels als Kondensator und der Wärmeübertrager für die Wärmeaufnahme als Verdampfer bezeichnet. Bei transkritischen Prozessen erfolgt die Wärmeabgabe ohne Phasenübergang, weshalb in diesem Fall anstatt von einem Kondensator von einem Gaskühler gesprochen wird. Für die beiden Wärmeübertrager werden in der Regel Rohrbündelwärmeübertrager und bei wenig verschmutzten Medien Plattenwärmeübertrager verwendet (Arpagaus 2019). Einen Kreislauf mit der Darstellung der vier Hauptkomponenten zeigt schematisch Abbildung 24.

Zur Effizienzsteigerung von Kompressionswärmepumpen und für einen optimalen Anlagenbetrieb haben sich eine Vielzahl unterschiedlicher Verschäl-

¹⁰ Phasenwechsel bezeichnen Änderungen des Aggregatzustandes von Medien, also Übergänge zu festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand, zum Beispiel durch Verdampfung oder Kondensation.

tungsvarianten am Markt etabliert. Abbildung 25 zeigt exemplarisch den Einfluss ausgewählter Verschaltungsvarianten auf die Kosten der Kreislaufkomponenten und auf den COP für einen Wärmepumpenprozess mit unveränderlichen Werten für den Temperaturhub und die Senktemperatur (Mateu-Royo et al. 2021).

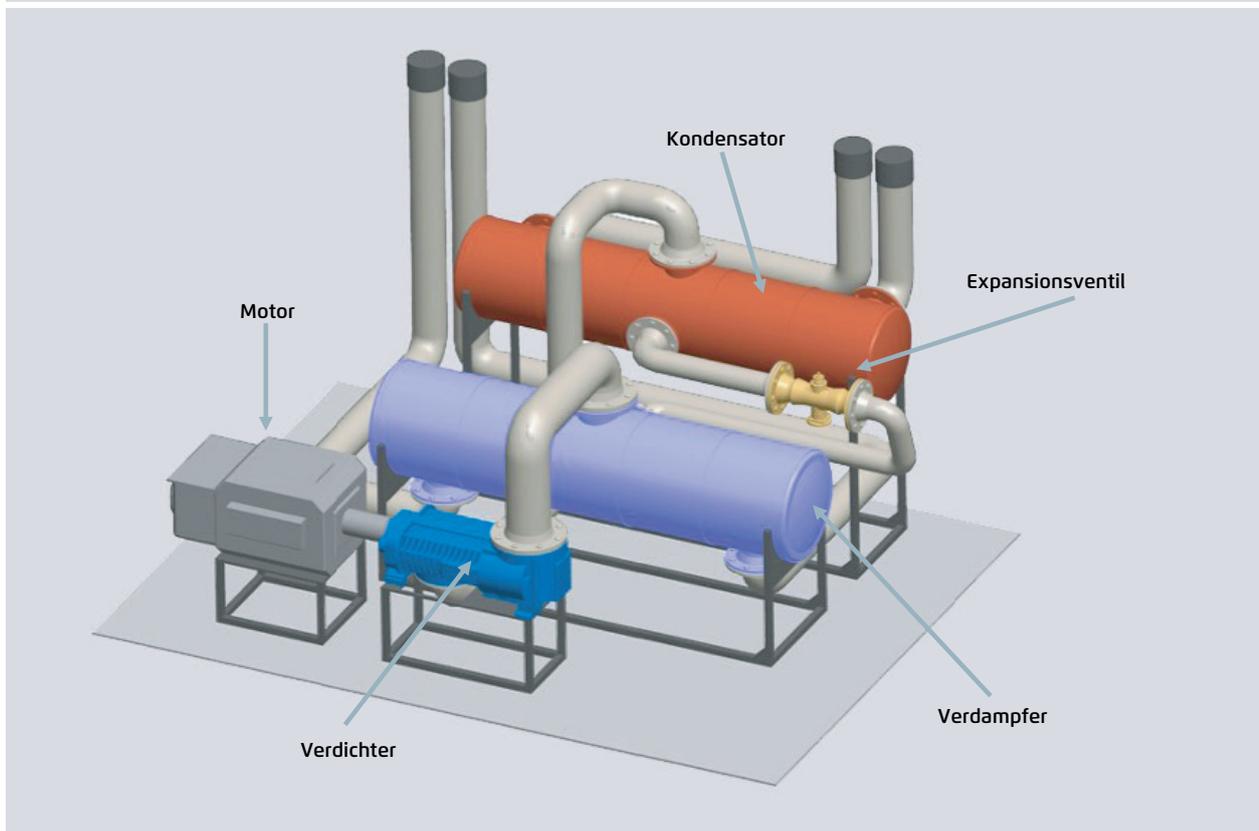
Komplexe Verschaltungen mit einer größeren Anzahl von Bauteilen zur Erhöhung des COP führen zu höheren Investitionskosten. Daher ist stets eine Abwägung zwischen den potenziellen Vorteilen und dem höheren Investitionsbedarf erforderlich. Mit zunehmenden Vollbenutzungsstunden können die geringeren Verbrauchskosten die höheren Investitionskosten überwiegen, sodass sich auf Basis der kalkulierten Vollbenutzungsstunden der Einfluss

einer Verschaltungsvariante auf die Wirtschaftlichkeit der Gesamtinvestition ermitteln lässt.

Die Wahl der passenden Verschaltungsvariante ermöglicht die optimale Auslegung auf die jeweiligen Temperaturniveaus von Wärmequelle und Wärmesenke. Eine gängige Wärmepumpenkonfiguration zur Effizienzsteigerung stellt der Einsatz eines internen Wärmeübertragers IHX (engl. Internal Heat Exchanger) zwischen Kondensatoraustritt und Verdampferaustritt dar. Die zusätzliche Überhitzung des Kältemittels vor der Kompression ermöglicht neben der Vermeidung von Tropfenschlag im Kompressor eine Absenkung der erforderlichen Verdichterleistung und somit einen Anstieg des COP. Eine Reduktion des vom Verdichter zu überwindenden Druckverhältnisses kann zudem durch die Integration eines Ejektors

Schematische Darstellung einer Großwärmepumpe

Abbildung 24



Fraunhofer IEG (2023)

erreicht werden, der das unter hohem Druck stehende Kältemittel nach dem Verlassen des Kondensators mit der Strömung am Verdampferaustritt zusammenführt und somit auf ein höheres Druckniveau komprimiert.

Zur Überbrückung großer Temperaturhübe haben sich mehrstufige Verdichter, die auf unterschiedlichen Druckniveaus arbeiten, am Markt etabliert. Zwischen den Verdichterstufen findet eine Zwischenkühlung statt.

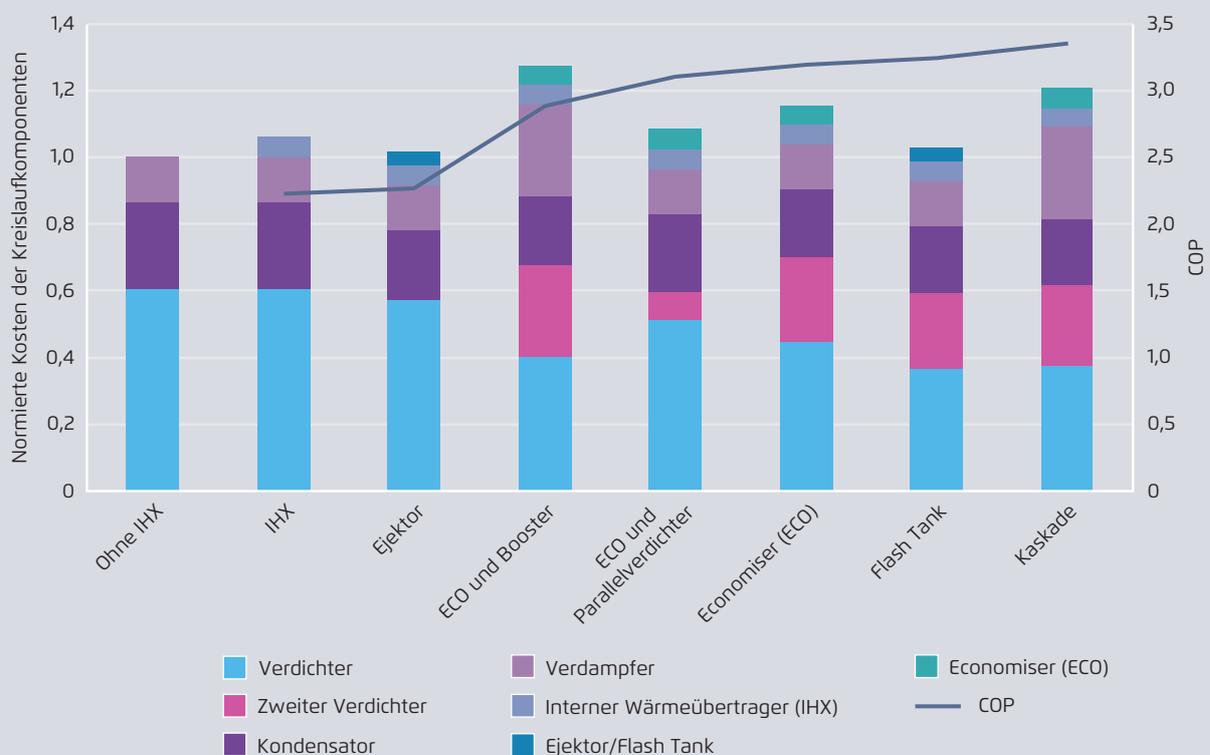
Zur weiteren Effizienzsteigerung können hierfür zusätzlich sogenannte Economiser oder Flash Tanks integriert werden. Dabei wird zwischen zwei Verdichterstufen oder direkt in den Verdichter überhitz-

ter Dampf (Economiser) bzw. gesättigter Dampf (Flash Tank) eingespritzt, wodurch das erforderliche Druckverhältnis und somit die Antriebsenergie der Verdichter reduziert werden kann. Der Economiser kann zusätzlich mit einem weiteren Verdichter (Parallelverdichter) oder einem weiteren Verdampfer (Booster) verschaltet werden.

Ein zusätzlicher Verdampfer ermöglicht die Nutzung von Wärmequellen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus. Für die Umsetzung hoher Temperaturhübe besteht zudem die Möglichkeit, zwei in Reihe geschaltete Kältemittelkreisläufe mit unterschiedlichen Kältemitteln zu verwenden. Durch eine solche Wärmepumpen-Kaskade lassen sich die Verdichter

Exemplarischer Einfluss unterschiedlicher Verschaltungsvarianten auf die Kosten der Kreislaufkomponenten und den COP bei konstanten Randbedingungen*

Abbildung 25



Fraunhofer IEG basierend auf Mateu-Royo et al. (2021). * Kältemittel (R245fa), Temperaturhub (60K) und Senktemperatur (130 °C) werden bei allen Verschaltungsvarianten konstant gehalten.

und Kältemittel optimal auf den jeweiligen Temperaturbereich auslegen.

Eine weitere Effizienzsteigerung ist durch die Rückgewinnung von Abwärme und die Integration von Expandern perspektivisch möglich. Neben den bereits etablierten Konzepten ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten, um zukünftig die Effizienz von Großwärmepumpen weiter zu erhöhen. Beispielsweise lässt sich die Abwärme des elektrischen Antriebs oder des Verdichters durch Wärmerückgewinnung direkt nutzen. Ein weiteres Potenzial zur COP-Steigerung ist durch die Integration eines Expanders gegeben. Hierbei wird anstelle der Expansion im Expansionsventil mechanische Arbeit für den Antrieb des Verdichters rückgewonnen. Für die technische Umsetzung eignen sich insbesondere transkritische Kreisläufe, da in diesem Fall das Kältemittel einphasig entspannt werden kann.

5.2 Schlüsselkomponente Verdichter

Die Bauform der einzelnen Komponenten einer Großwärmepumpe muss den Anforderungen der Wärmequelle und der Wärmesenke genügen. Da der Verdichter den Temperatur- und Leistungsbereich sowie die Effizienz maßgeblich vorgibt und bei einer Wärmepumpe auch die teuerste Einzelkomponente darstellt, wird auf dieses Bauteil nachfolgend gesondert eingegangen.

Als Verdichtertechnologien haben sich mehrstufige Hubkolbenkompressoren, ein- oder zweiwellige Hochdruckschraubenverdichter und mehrstufige Turbokompressoren bei Großwärmepumpen am Markt etabliert (Arpagaus 2020). Auch Scrollverdichter sind in der Wärmepumpentechnik weit verbreitet, aufgrund der kleinen Volumenströme jedoch in der Regel bei Leistungsklassen unterhalb von 500 kW vorzufinden. Aufgrund dieser technischen Differenzierung wurde für diese Studie die Grenze zur Definition einer Großwärmepumpe bei 500 kW gezogen. Abbildung 26 vergleicht die Verdichtertechnologien

in Bezug auf umsetzbare Heizleistungen und Temperaturhübe sowie die Eignung für flexible Betriebsweisen. Diese Einordnung dient als Orientierung und ist für den einzelnen Verdichter nicht als allgemeingültig zu betrachten.

Hubkolbenverdichter werden im Bereich der Großwärmepumpen vor allem für kleinere Leistungsklassen mit dementsprechend kleineren Volumenströmen eingesetzt, da sich mit ihnen aufgrund des Verdrängungsprinzips die höchsten Druckverhältnisse und somit Temperaturhübe verwirklichen lassen. Zudem kann diese Bauform effizient im Teillastbereich eingesetzt werden. Dem gegenüber stehen jedoch hohe Lärmemissionen bzw. Vibrationen, die einen Einfluss auf den Einsatzort der Wärmepumpe haben können.

Schraubenverdichter werden vorwiegend für höhere Leistungen bis in den Megawatt-Bereich verwendet. Aufgrund der guten Kühlbarkeit, der Möglichkeit einer ölfreien Lagerung und der Umsetzbarkeit hoher Druckverhältnisse sind Schraubenverdichter ebenfalls für weite Temperaturbereiche bis hin zu Hochtemperaturanwendungen geeignet. Zudem gelten sie als wartungsarm und robust über eine lange Lebensdauer mit einer hohen Effizienz über einen breiten Leistungsbereich.

Turbokompressoren weisen die größten Volumenströme und somit Heizleistungen von bis zu 70 MW auf (Siemens Energy 2023b). Auch diese Verdichtertechnologie kann dank innovativer Magnetlagerung ölfrei arbeiten. In kleineren Leistungsklassen kommt sie jedoch aufgrund des geringen Druckanstiegs pro Stufe und des damit verbundenen hohen Antriebsenergiebedarfs seltener zum Einsatz. Zudem sind Turboverdichter nicht optimal für Regelungen über weite Leistungsbereiche auslegbar, weil sie auf einem anderen physikalischen Arbeitsprinzip als Kolben- und Schraubenverdichter beruhen. Die Druckerhöhung geschieht nicht durch Verdrängung, sondern durch Impulsübertragung und Verzögerung.

Bei Verdichtern besteht vor allem hinsichtlich neuer Kältemittel, flexiblerer Betriebsweisen und höherer Senktemperaturen Entwicklungsbedarf.

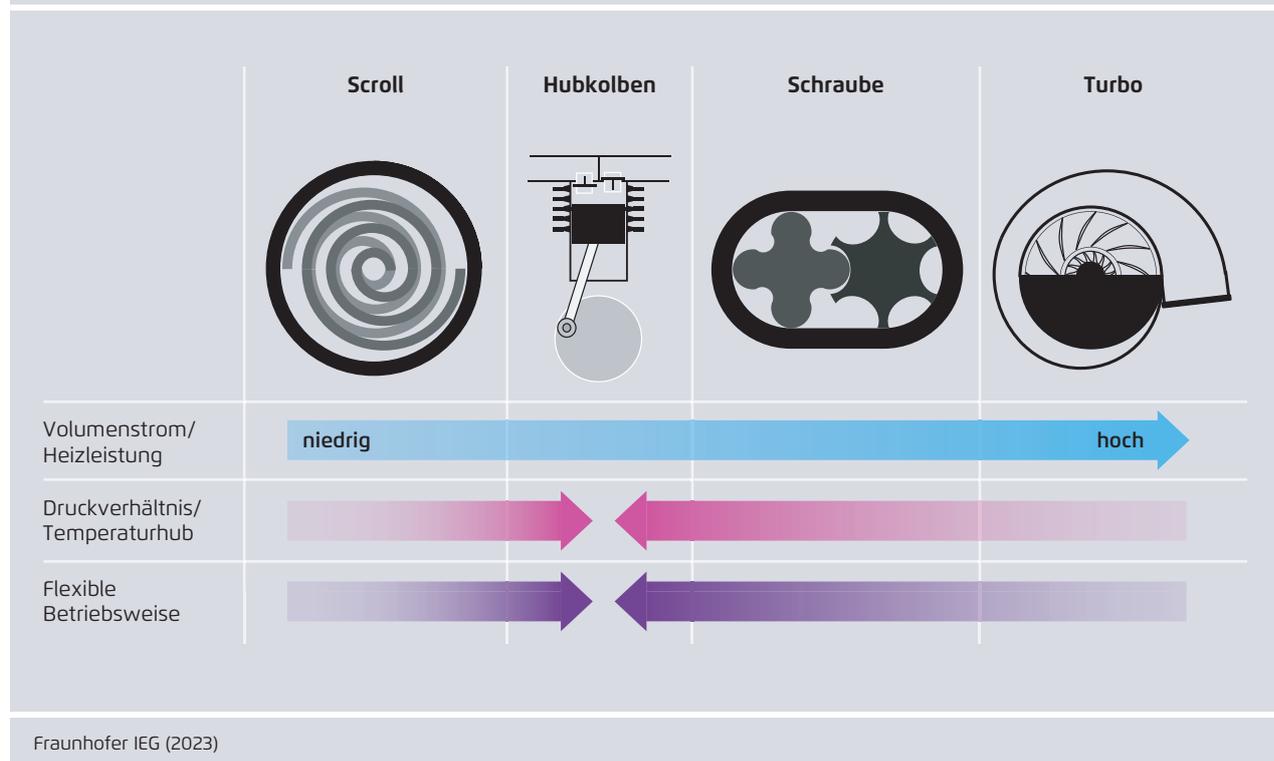
Für den Verdichter als Schlüsselkomponente einer Wärmepumpe besteht vor allem hinsichtlich der Anpassung an neue Kältemittel, flexiblere Betriebsweisen und höhere Senktemperaturen Entwicklungsbedarf. Dies kann eine Neuauslegung und Weiterentwicklung der Kühlung oder Schmierung und von mechanischen Bauteilen wie Lager und Ventilen, Dichtungen und anderen Kunststoffen bedeuten. Zur Verbesserung der Hitzebeständigkeit werden beispielsweise ölfreie Verdichter mit dem Fokus auf innovativen Lagerungen oder Direkteinspritzung von Kältemitteln erprobt. Auch der Einsatz hitzebeständiger Materialien und neue Kühltechnologien werden von mehreren Herstellern ins Auge gefasst. Da die Prozessdampferzeugung mittels offener Großwärmepumpen immer mehr an Bedeutung gewinnt, besteht zudem ein Bedarf an

der Weiterentwicklung und Optimierung mechanischer Dampfkompressoren.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, erfordert ein netzdienlicher Betrieb der Großwärmepumpen eine Anpassung an flexible und wahlweise wärme- oder stromgeführte Betriebsweisen. Dies beinhaltet insbesondere eine Auslegung auf einen breiten Betriebsbereich mit einem möglichst effizienten und robusten Verhalten im Teillastbereich sowie auf schnelle Lastwechsel und An- und Abfahrvorgänge. Für den Intradayhandel und die Minutenreserve bedeutet dies, dass Großwärmepumpen zukünftig in der Lage sein müssen, mindestens in 15-Minuten-Takten auf etwaige An- und Abfahrbefehle reagieren zu können. Eine Teilnahme am Sekundär- oder Primärregelleistungsmarkt wäre mit noch kürzeren Reaktionszeiten und höheren Präqualifikationsanforderungen verbunden (50Hertz Transmission GmbH et al. 2022).

Heizleistung, Temperaturhub und Flexibilität in Abhängigkeit von der Verdichtertechnologie

Abbildung 26



Großwärmepumpen müssen regelungs- und steuerungstechnisch so ertüchtigt werden, dass sie dynamisch auf eine sich verändernde Strommarktsituation reagieren können. Bei Großwärmepumpen erfolgt die Leistungsregelung durch die Anpassung der Verdichterdrehzahl mithilfe eines Frequenzumrichters. Daher gibt der Verdichter die Flexibilität maßgeblich vor. Verdrängermaschinen wie Hubkolben- und Schraubenverdichter lassen sich im Vergleich zu Turboverdichtern deutlich effizienter über einen breiten Betriebsbereich einsetzen. Turboverdichter ermöglichen hingegen deutlich höhere Heizleistungen. Da für Fernwärmanwendungen hohe Leistungsklassen bei gleichzeitig von Jahr zu Jahr geringeren Vollbenutzungsstunden und höherer Flexibilität gefordert werden, ist zwischen dem Betrieb einzelner Großanlagen und einer modularen Betriebsweise mehrerer Großwärmepumpen mit optimierter Leistungsregelung abzuwägen.

Mehrere kleinere Wärmepumpeneinheiten können neben einer potenziellen Steigerung der Flexibilität zudem hinsichtlich der Standardisierung von Produktion und Planung vorteilhaft sein. Der modularen Betriebsweise stehen jedoch im Vergleich zur Einzelanlage höhere Investitionskosten gegenüber, weshalb eine Hochskalierung von Hubkolben- und Schraubenverdichtern für höhere Leistungsklassen von einigen Herstellern angestrebt wird.

5.3 Bedeutung umweltfreundlicher Kältemittel

Die Wahl des richtigen Kältemittels für eine Wärmepumpe ist zunächst eine technische Frage: Es muss ein Medium gefunden werden, dessen thermodynamische Eigenschaften optimale Effizienz für die durch die Anwendung bestimmte Quellen- und Senktemperatur und für die gewählte Verschaltungsvariante verspricht. Für bestimmte Temperaturbereiche kommen unterschiedliche Kältemittel in Frage.

In Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen bis 80 °C sind heute die Kältemittel R410a und R134a weit verbreitet. Das natürliche Kältemittel Ammoniak (R717) hat einen ähnlichen Einsatzbereich mit Senktemperaturen bis 110 °C. Für Vorlauftemperaturen bis 80 °C ist zudem das Kältemittel Propan (R290) eine Alternative.

Wärmepumpen mit Kohlenstoffdioxid (R744) als Kältemittel werden mit Einsatztemperaturen senkenseitig von 80 °C bis 120 °C und quellenseitig unterhalb von 30 °C betrieben (Arpagaus 2019). Eine sehr effiziente Betriebsweise von CO₂-Wärmepumpen ergibt sich bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf. Hierbei wird die Wärmeabgabe durch eine Gaskühlung mit sinkender Temperatur des Kältemittels erreicht statt durch isotherme Kondensation.

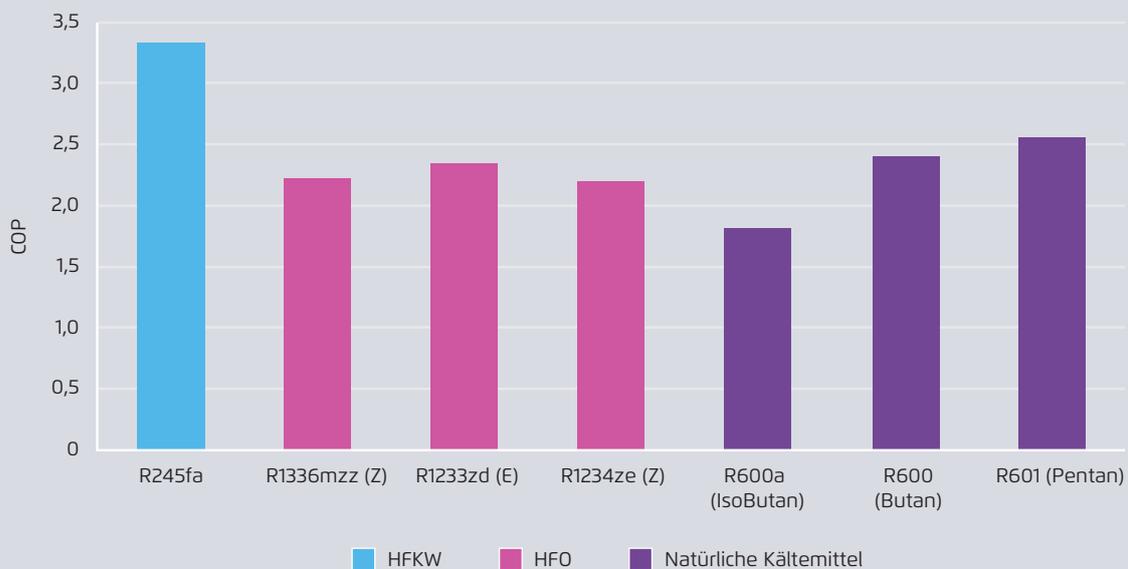
Für Hochtemperatur-Anwendungen oberhalb von 120 °C eignen sich auch Kohlenwasserstoffe wie Iso-Butan (R600a), Butan (R600) oder Pentan (R601). Für den Hochtemperaturbereich setzen viele Hersteller von Großwärmepumpen zudem synthetische Hydrofluorolefin- (HFO) Kältemittel ein. Zu nennen für den Temperaturbereich über 120 °C sind vor allem die HFO-Kältemittel R1336mzz(Z), R1233zd(E) und R1234ze(Z).

Der Einsatz von Wasser (R718) ist für sehr hohe Vorlauftemperaturen von 200 °C und darüber hinaus zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme bzw. Prozessdampf attraktiv.

Kältemittel für Wärmepumpen sind natürlicher oder synthetischer Natur. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit. Der Einfluss des Kältemittels auf die Effizienz eines Wärmepumpenkreislaufs zeigt exemplarisch Abbildung 27.

Leistungszahlen (COPs) für unterschiedliche Kältemittel eines einstufigen Kreislaufs*

Abbildung 27



Fraunhofer IEG basierend auf Mateu-Royo et al. (2021). * Temperaturhub (60 K), Senktemperatur (130 °C) und Kreislaufkonfiguration werden bei allen Kältemitteln konstant gehalten.

Synthetische Kältemittel sind zwar heute noch weit verbreitet, sie und ihre Abbauprodukte besitzen jedoch ein Treibhauspotenzial und werden deshalb in Zukunft weitestgehend verboten werden.

Bis in die 1990er Jahre kamen vor allem Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zum Einsatz, die jedoch entweder direkt oder mittelbar durch ihre Abbauprodukte die Ozonschicht der Atmosphäre schädigen. In Deutschland wird seit 1995 ein Ozonabbaupotenzial ODP (engl. Ozon Depletion Potential) von Null vorgeschrieben, weshalb die meisten ozonabbauenden Kältemittel durch teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) ersetzt wurden. Diese Ersatzstoffe weisen jedoch ein nicht zu vernachlässigendes Treibhauspotenzial auf, wie aus Tabelle 2 hervorgeht.

Das Treibhauspotenzial GWP (engl. Global Warming Potential) erfasst den relativen Beitrag eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Masse CO₂. Daher wird seit 2015 das GWP von Kältemitteln

durch die Europäische F-Gase-Verordnung geregelt. Derzeit ist bis 2030 eine schrittweise Reduktion von HFKW-Kältemitteln auf 21 Prozent vorgesehen, weshalb perspektivisch von einer Verdrängung von Kältemitteln mit einem hohen Treibhauspotenzial auszugehen ist. Darüber hinaus besteht eine weitere Anforderung an das Kältemittel in einer möglichst kurzen Verweilzeit bei Austritt in die Umwelt. Dies gilt nicht nur für das Kältemittel selbst, sondern auch für seine Abbauprodukte.

Insbesondere die Abbauprodukte einiger HFOs weisen die oft als „Ewigkeitschemikalien“ bezeichneten per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) auf, die sich in der Umwelt und im Menschen ansammeln können – ein weiterer Grund für ihr Verbot. PFAS-Stoffe, die vor allem aufgrund ihrer fett-, schmutz- und wasserabweisenden Wirkung in einer Vielzahl alltäglicher Produkte eingesetzt werden, stehen unter anderem im Verdacht, Krebs zu

verursachen. Im Februar 2023 hat die Europäische Chemikalienagentur ECHA aus diesem Grund einen Vorschlag von fünf EU-Staaten vorgestellt, der ein Verbot sämtlicher Verbindungen dieser Substanzklasse innerhalb der nächsten zwölf Jahre vorsieht (ECHA 2023). Eine Entscheidung, dieses Verbot im Rahmen der REACH-Verordnung vorzuschreiben, wird für das Jahr 2025 erwartet. Der Ausschluss von Kältemitteln über die Vorschriften für PFAS könnte zu ihrem noch schnelleren Verbot als durch die F-Gase-Verordnung führen. Ein solches Verbot steht der technischen Umsetzung der Wärmepumpentechnologie nicht im Weg, stellt jedoch manche herstellereitig bereits getroffene Investitionsentscheidung in Frage und beeinflusst damit die Geschwindigkeit des Markthochlaufs.

Die Risiken, die aus der Brennbarkeit und Toxizität einiger natürlicher Kältemittel folgen, sind beherrschbar. Einige natürliche Kältemittel haben im Gegensatz zu synthetischen Kältemitteln den Nachteil, brennbar oder toxisch zu sein. In Bezug auf die

Brennbarkeit betrifft das vor allem die homologe Reihe der Kohlenwasserstoffe und in Bezug auf die Toxizität Ammoniak. Die natürlichen Kältemittel CO₂ und Wasser sind in beiderlei Hinsicht unproblematisch. Die Risiken aus Brennbarkeit und Toxizität lassen sich durch technische Sicherheitseinrichtungen beherrschen. Der sichere Umgang mit wesentlich größeren Mengen dieser Mittel in industriellen Anlagen ist technischer Standard.

Für den unterkritischen Einsatz geben die Verdampfungstemperatur und die kritische Temperatur eines Kältemittels die unteren und oberen Temperaturgrenzen vor. Die mechanische Belastung der Hochdruckbauteile kann durch einen niedrigen kritischen Druck gesenkt werden. Höhere Betriebsdrücke führen aber umkehrt zu höheren volumetrischen Kälteleistungen respektive kleinerem Bau- raum. Das gilt vor allem für das Kältemittel CO₂. Zudem muss das Kältemittel auf die eingesetzten Werkstoffe und Öle des Kreislaufs insbesondere in Bezug auf Materialeinlagerungen, Versprödungen

Umwelteigenschaften ausgewählter Arbeitsmittel unterschiedlicher Klassen in Bezug auf Klimawirksamkeit, Toxizität und Brennbarkeit				Tabelle 2
Klasse	Kältemittel	GWP	Toxisch	Brennbarkeit
HFKW	R245fa	858	Ja	Nein
	R134a	1.300	Nein	Nein
	R410a	2.088	Nein	Nein
HFO	R1234ze (Z)	< 1	Nein	Ja
	R1233zd (E)	1	Nein	Nein
	R1336mzz (Z)	2	Nein	Nein
Natürlich	R717 (Ammoniak)	0	Ja	Ja
	R718 (Wasser)	0,2	Nein	Nein
	R744 (CO ₂)	1	Nein	Nein
	R290 (Propan)	3	Nein	Ja
	R600 (Butan)	4	Nein	Ja
	R601 (Pentan)	5	Ja	Ja
	R600a (Iso-Butan)	3	Nein	Ja

Fraunhofer IEG basierend auf Arpagaus (2019)

und den damit verbundenen Änderungen der Langzeiteigenschaften der verwendeten Materialien abgestimmt sein. Die volumetrische Wärmekapazität gibt die Dimensionierung einer Wärmepumpe vor. Des Weiteren ergeben sich Anforderungen an das Kältemittel in Abhängigkeit des erforderlichen Druckverhältnisses, der Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit am Markt. Die Wahl des Kältemittels erfolgt letztendlich als Kompromiss aus den genannten Aspekten (Arpagaus 2019). Tabelle 2 zeigt für ausgewählte Kältemittel die zuvor genannten Eigenschaften. Innerhalb der Tabelle erfolgt eine Gliederung auf Basis der Klassenzugehörigkeit.

Im Zuge der F-Gase-Verordnung und der Debatte um die PFAS rückt vor allem der Einsatz natürlicher

Kältemittel in den Fokus weiterer Forschung und Entwicklung in Bezug auf Wärmepumpen mit Kaltdampfprozess. Dies beinhaltet sowohl die Erprobung neuer Kältemittel als auch die Neuauslegung und Optimierung der Kreisläufe sowie kritischer Komponenten wie Verdichter oder Wärmeübertrager. Ziel ist hierbei neben der Umsetzung höherer Wirkungsgrade und Temperaturlimits sowie flexiblerer Betriebsweisen vor allem ein sicherer und ökologischer Betrieb von Großwärmepumpen. Neben den vielversprechenden Eigenschaften von Wasser bietet zudem die transkritische Verwendung von Kohlenwasserstoff-Kältemitteln wie Iso-Butan, Butan oder Pentan die Möglichkeit zur Umsetzung von Senktemperaturen oberhalb von 200 °C (Pachai A. C. et al. 2021).

6 Der Markt für Großwärmepumpen: Produkte, Hersteller, Industriepolitik

6.1 Der Markt für Großwärmepumpen: Produkte und Hersteller

Obwohl der Markt für Großwärmepumpen anders als der für kleinere Geräte noch in einer frühen Reifephase ist, werden bereits eine Vielzahl verschiedener Technologien am Markt angeboten. Im Rahmen einer Marktanalyse konnten 36 Hersteller kommerziell verfügbarer Großwärmepumpen für Heizleistungen über 0,5 MW identifiziert werden. Hinzu kommen weitere Hersteller, die als Anlagenbauer individualisierte Konzepte für Großwärmepumpen entwickeln. Es finden sich bereits etablierte Hersteller, große in den Markt hineinwachsende Unternehmen aus der Klima- und Kältetechnik, Prozesstechnik oder Kraftwerkstechnik sowie eine Reihe von Start-ups.

Aktuell sind die meisten Großwärmepumpen bis zu einer Heizleistung von 1 MW Teil standardisierter Produktpaletten. Wie in Kapitel 2.4 erläutert wurde, wird in Deutschland mindestens ein Viertel bis zu einem Drittel aller Großwärmepumpenprojekte unterhalb dieser Heizleistung liegen. Oberhalb von 10 MW handelt es sich hingegen in der Regel um hochgradig kundenspezifische Lösungen. Im Leistungsbereich dazwischen besteht folglich das größte Potenzial weitere Standardisierungen des Angebots.

Abbildung 28 zeigt einen Überblick der maximalen Vorlauftemperaturen, Heizleistungen und eingesetzten Verdichtertechnologien am Markt verfügbarer Produkte von mechanisch angetriebenen Großwärmepumpen mit einem Technologie-Reifegrad (engl. Technology Readiness Level, kurz: TRL) von 9. Im Anhang (siehe A.3, Abbildung 42) ist eine ausführliche Liste dieser Großwärmepumpen hinterlegt. Das Spektrum der Großwärmepumpen

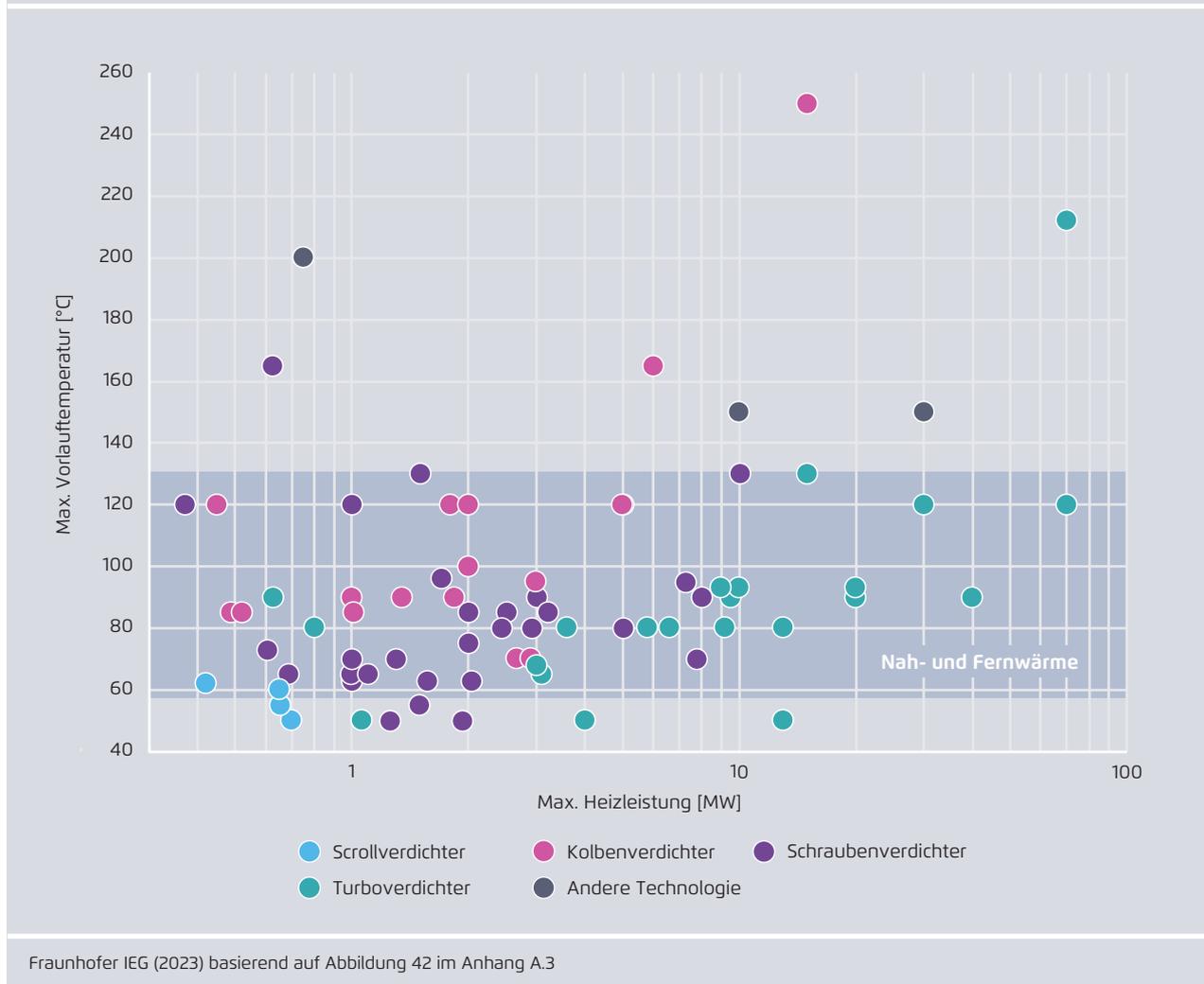
deckt einen Heizleistungsbereich von bis zu 70 MW ab, wobei deutlich größere Heizleistungen durch einen modularen Parallelbetrieb umgesetzt werden können.

Für große Heizleistungen oberhalb von 10 MW kommen überwiegend Turboverdichter zum Einsatz. Die höchsten Temperaturdifferenzen werden hingegen durch Kolbenverdichter erzielt. Bis zu Vorlauftemperaturen von 120 °C und Heizleistungen von 10 MW decken Produkte mit Kolbenverdichtern oder Schrauben- und Turboverdichtern einen breiten Einsatzbereich ab. Scrollverdichter kommen hingegen nur in kleineren Leistungs- und Heizklassen zum Einsatz. Temperaturen oberhalb von 200 °C werden aktuell hauptsächlich durch offene Wärmepumpenprozesse mit der sogenannten mechanischen Dampfkompensation (MVR) zur Prozessdampfbereitstellung erzielt (siehe A.3, Tabelle 8).

Großwärmepumpen für Fernwärmeanwendungen sind bereits heute im Temperaturbereich der Fernwärme am Markt verfügbar. Für Vorlauftemperaturen unterhalb von 120 °C weist der Markt mit 66 unterschiedlichen Produkten bereits ein breites Angebot an unterschiedlichen Großwärmepumpen auf. Da aktuell 90 Prozent der Fernwärmenetze mit Vorlauftemperaturen unterhalb von 110 °C betrieben werden (siehe Abbildung 2), ist die Technologie für diesen Sektor somit weitestgehend erschlossen. Bei höheren Temperaturen fällt die Bandbreite an Großwärmepumpen hingegen weitaus geringer aus. Oberhalb von 140 °C ist der Markt noch nicht vollständig bedienbar und teilweise auf Prototypen beschränkt. Insbesondere für die Erschließung des industriellen Sektors ergibt sich folglich die Notwendigkeit, die Wärmepumpentechnologien bezüglich der Steigerung der Senktemperatur und des Tempera-

Maximale Vorlauftemperatur und Heizleistung verfügbarer Großwärmepumpen

Abbildung 28



turhubs weiterzuentwickeln. Bereits etablierte Hersteller von Großwärmepumpen, neu gegründete Unternehmen sowie bestehende Unternehmen, die in den Markt für Großwärmepumpen einsteigen, entwickeln daher neue Produkte für diesen Temperaturbereich.

Der IEA HPT Annex 58 (siehe A.3, Abbildung 43) gibt einen Überblick über die bereits am Markt verfügbaren Technologien (TRL = 9) und über Hochtemperatur-Wärmepumpen, die sich in der Entwicklung oder kurz vor der Marktreife befinden (TRL < 9) (IEA 2023b). Zur Umsetzung höherer

Temperaturen werden entweder bereits bestehende Konzepte angepasst und modifiziert oder neuartige Technologien entwickelt. Der TRL von Großwärmepumpen nimmt mit größeren Temperaturhüben ab. Gleichzeitig ist dies auch der Bereich, in dem auf Grund von Forschung in den vergangenen Jahren die Leistungszahlen am stärksten verbessert werden konnten. Dies beruht maßgeblich auf technischen Weiterentwicklungen hinsichtlich optimierter Komponenten wie dem Verdichter oder den Wärmeübertragern, innovativer Kreislaufverschaltungen sowie der Anpassung der Regelung und Betriebsweise. Den in Abhängig-

keit vom Temperaturhub erreichbaren COP zeigt Abbildung 29 für unterschiedliche Großwärmepumpen.

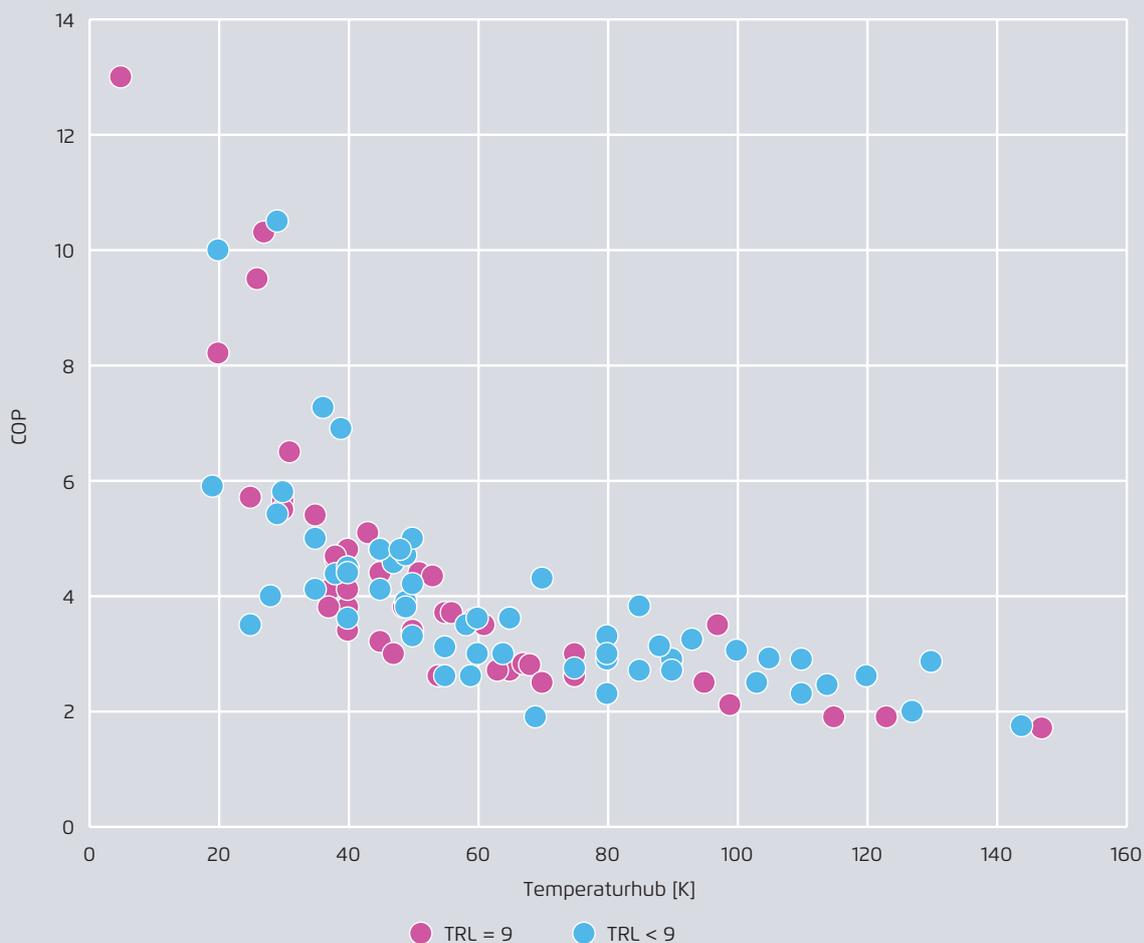
Exkurs: Weitere Wärmepumpentechnologien im Überblick

Neben geschlossenen Kompressionswärmepumpen haben sich am Markt weitere Wärmepumpentechnologien etabliert, die für bestimmte Einsatzgebiete infrage kommen. Zudem gibt es neue zukunftsfähige Technologien, die bereits

Marktreife erreicht haben oder in Forschungsprojekten erprobt werden. Hierbei liegt das Augenmerk insbesondere auf einer Steigerung der Senktemperatur und des Temperaturhubs sowie flexibleren Betriebsweisen auf Basis natürlicher Kältemittel. Einen Überblick zu weiteren marktreifen und neuartigen Wärmepumpentechnologien findet sich im Anhang A.3 (siehe Tabelle 8).

COP und Temperaturhub für am Markt vertretene Modelle von Großwärmepumpen mit unterschiedlichen Quellen- und Senktemperatur

Abbildung 29



Fraunhofer IEG (2023) basierend auf Abbildung 42 und Abbildung 43 im Anhang A.3

6.2 Die Herstellerperspektive: höhere Planungssicherheit als Voraussetzung für größere Produktionsvolumina und kürzere Lieferzeiten

Die Hersteller von Großwärmepumpenaggregaten nehmen eine Schlüsselrolle für einen erfolgreichen Roll-out dieser Technologie in Deutschland ein. Viele sind auf dem gesamten europäischen Markt oder sogar weltweit aktiv und haben daher bereits eine relativ breite marktreife Produktpalette für verschiedene Anwendungsfälle im Portfolio (siehe Kapitel 6.1).

Im Rahmen der Erarbeitung dieser Studie stand das Fraunhofer IEG mit vielen dieser Unternehmen zu spezifischen Fragen hinsichtlich der Entwicklungspotenziale bei der Technik (beispielsweise erreichbare Temperaturen, COPs und Flexibilität) sowie zu deren Plänen bezüglich des Aufbaus weiterer Produktionskapazitäten im direkten Austausch. Zudem wurde im Februar 2023 zusammen mit 21 Vertretern und Vertreterinnen von 15 Herstellern ein Workshop zu den Herausforderungen und Potenzialen des Roll-outs von Großwärmepumpen in Deutschland durchgeführt. Die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse sind mit in diese Studie (unter anderem in Kapitel 5) eingeflossen und werden nachfolgend zusammengefasst wiedergegeben.

Wenn die Signale für eine anhaltend hohe Nachfrage robuster und die Investitionsbedingungen stabiler werden, sind die Hersteller bereit, ihre Produktionskapazitäten innerhalb weniger Jahre zu verdoppeln.

Die Hersteller sind davon überzeugt, dass der Weg zu einem klimaneutralen Energiesystem in Deutschland eine schnelle Einführung von Großwärmepumpen in die wachsenden Fernwärmenetze erfordert.

Derzeit sehen die Hersteller von Großwärmepumpen aber noch nicht die Art von Nachfragesteigerung, wie sie beispielsweise in den T45-Szenarien angenommen wird (siehe Kapitel 3.1). Dennoch nehmen sie durch einen Zuwachs der Anfragen und Machbar-

keitsstudien wahr, dass auf Seiten der Anlagenkäufer und -betreiber aus dem Fernwärme- und Industriesektor das Interesse an Großwärmepumpen stetig steigt.

Gleichzeitig stünden Großwärmepumpen aber weiterhin im Wettbewerb mit gasbasierten Wärmelösungen – und zwar nicht nur bei den Kunden, sondern auch bei jenen Herstellern, die gleichzeitig verschiedene Technologien zur Wärmeversorgung anbieten, beispielsweise auf Basis der Verbrennung von Erdgas oder grünem Wasserstoff. Bei diesem unter anderem durch unklare politische Signale verursachten herstellerinternen Wettbewerb um begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen bestimmt demnach vor allem die aktuelle (gesicherte) Nachfrage die Investitionen in Produktionskapazitäten.

Die meisten Hersteller sind daher eher zurückhaltend, was den Aufbau von Produktionskapazitäten angeht, solange sich das Interesse an Großwärmepumpen nicht in ihren Auftragsbüchern widerspiegelt. Bei deutlich steigender Nachfrage sind alle Hersteller zuversichtlich, dass sie ihre Produktionskapazitäten innerhalb weniger Jahre bereits verdoppeln können. Werden diese neuen Fabriken in Deutschland aufgebaut, hat dies auch industriepolitische Vorteile, da damit zukunftsfähige Industriearbeitsplätze, wertvolles Know-how und systemrelevante Wertschöpfungsnetzwerke gesichert werden können.

Innovationspotenziale und Handlungsbedarf aus Sicht der Hersteller

Optimierung der Investitionsausgaben: Skaleneffekte in der Produktion, eine größere Zahl standardisierte Produktkomponenten für breitere Einsatzbereiche und höhere Leistungsklassen senken den Preis. Eine weitere Standardisierung ihrer Produkte und Komponenten ist möglich und liegt grundsätzlich im Interesse der Hersteller. Allerdings sehen sich viele Hersteller noch häufig

mit Anfragen für kundenspezifische Lösungen konfrontiert. Unterhalb von 1 MW handelt es sich bei den meisten Wärmepumpen bereits um stark standardisierte Produkte. Über 10 MW werden Wärmepumpen zu hochgradig kundenspezifischen Produkten, die oft über große EPC (Engineering, Procurement and Construction)-Verträge abgewickelt werden. Es wird erwartet, dass die meisten Wärmepumpen für Wärmenetze im Leistungsbereich zwischen 1 MW und 10 MW liegen werden. Für den Hochlauf in diesem Marktsegment fehlt vor allem eine breite Verfügbarkeit standardisierter Lösungen und ein ausreichend aktives Feld an Ingenieurdienstleistern zur Unterstützung der Kunden bei der Beschaffung.

Größere Einheiten ermöglichen bezogen auf die installierte Leistung eine deutliche Senkung der spezifischen Kosten. Für das Produktportfolio eines Herstellers sind die Kosten pro installiertem MW Wärmeleistung über 10 MW beispielsweise nur etwa halb so hoch wie bei der Klasse von 2–5 MW.

Für die Optimierung der Betriebskosten ist das Verhältnis des Strom- und Gaspreises entscheidend. Die Erreichung von höheren COPs und die Entwicklung flexiblerer Anlagen für den künftigen Einsatz in der Fernwärme sind möglich. Aufgrund ihrer Erfahrungen auf anderen Märkten Europas sind viele Hersteller zudem davon überzeugt, dass der Absatz ihrer Produkte in Deutschland sich erst beschleunigen wird, wenn alle Marktakteure genügend Planungssicherheit haben. Dazu gehört das Vertrauen, dass sich Erdgas- und Strompreise inklusive der CO₂-Bepreisung und sonstiger Abgaben, Umlagen, Steuern und Fördermittel dauerhaft so entwickeln, dass der Betrieb von Großwärmepumpen künftig wirtschaftlich attraktiver sein wird als der Betrieb gasbasierter Alternativen.

Bislang haben die Hersteller ihre Großwärmepumpen vor allem für hohe Betriebsdauern pro Jahr entwickelt und ausgelegt, da diese vor allem bei Industriekunden den vorherrschenden Anwendungsfall darstellen. Bei

derartigen Projekten hängt die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf die Investitionskosten und die Betriebsstunden vor allem von den Betriebskosten – also dem COP und den Strombezugskosten – ab. Die Höhe der spezifischen Investitionsausgaben (CAPEX) spielte daher bisher häufig eine untergeordnete Rolle. Die Aussicht auf perspektivisch kürzere jährliche Betriebsdauern in der Fernwärme erhöht daher für die Hersteller nun den Druck, auch die Entwicklungspotenziale zur Senkung der Anschaffungskosten für Großwärmepumpen wieder stärker in den Fokus zu nehmen.

Vergleichbares gilt für die steigenden Anforderungen an einen flexiblen und systemdienlichen Betrieb der Großwärmepumpen. Demnach halten es einige Hersteller für möglich, die Auslegung und das Betriebsverhalten ihrer Großwärmepumpen so zu optimieren, dass die Leistungszahl im flexiblen Betrieb noch um 10 bis 20 Prozent verbessert werden könnte.

Die F-Gas- und REACH-Verordnungen haben Auswirkungen auf die Verfügbarkeit synthetischer Kältemittel und die Investitionspläne der Hersteller von Großwärmepumpen. Die Hersteller nehmen wahr, dass die Aspekte der Entflammbarkeit und Toxizität von Kältemitteln für viele ihrer Kunden ein wichtiges Thema sind.

Der allgemeine Trend zu natürlichen Kältemitteln wird jedoch von so gut wie allen Herstellern von Großwärmepumpen anerkannt. Dennoch führt die derzeit auf EU-Ebene geführte Diskussion über die rechtliche Zulässigkeit bestimmter Kältemittel bei den Herstellern zu erhöhter Planungsunsicherheit, sowohl in Bezug auf die Perspektive ihrer vorhandenen Produktionslinien als auch mit Blick auf laufende Entwicklungsaktivitäten und geplante Investitionsentscheidungen (siehe Kapitel 5.3). Ein Bestandschutz für bestehende Produktionskapazitäten und bereits in Betrieb befindliche Anlagen sowie Recyclingprogramme könnten aus Sicht der Hersteller hier Abhilfe schaffen.

Die Beseitigung des Fachkräftemangels ist für den Aufbau der Produktionskapazitäten genauso wie für die Planung und Realisierung der Großwärmepumpenprojekte erforderlich. Auch die Hersteller von Großwärmepumpen sehen sich mit dem Fachkräftemangel konfrontiert – sowohl in den eigenen Unternehmen als auch bei ihren Kunden.

Für eine schnelle und umfassende Steigerung der Produktionskapazitäten können sich einige Hersteller aufgrund ähnlicher Anlagenkomponenten und Prozesse sowohl einen Technologie- und Personaltransfer aus der Produktion konventioneller Gaskessel und KWK-Anlagen als auch aus anderen Branchen, wie beispielsweise der Herstellung von Verbrennungsmotoren für die Automobilindustrie, vorstellen.

Gleichzeitig hegen die Hersteller aber Zweifel, ob die ebenfalls vom Fachkräftemangel betroffenen Stadtwerke, Fernwärmeversorger, Projektentwickler und Bauunternehmen kurzfristig überhaupt in der Lage wären, diesem Tempo zu folgen. Derzeit käme es vor, dass die Hersteller von ihren Kunden gebeten werden, selbst Planungsleistungen zu erbringen, obwohl dies gar nicht zum Kerngeschäft der meisten Hersteller gehört. Gemeinsame Aktivitäten von Politik, Kammern, Gewerkschaften und Unternehmen zur verstärkten Aus- und Weiterbildung sowie Umschulung von Fachkräften sind daher auch für den Markt für Großwärmepumpen relevant.

Klare Investitionssignale, eine bessere Kommunikation und ein Branchendialog auf Bundesebene sind zur Beschleunigung des Roll-out von Großwärmepumpen dringend erforderlich. Gerade internationale Hersteller sind mit den deutschen Anreiz- und Förderprogrammen nicht immer vertraut. Neben einer besseren Kommunikation der Investitionsbedingungen in Deutschland wünschen sich viele Hersteller zudem klarere Investitionssignale und mehr Planungssicherheit von den politischen Entscheidungsträgern.

Zur Beschleunigung der Energiewende fanden im Jahr 2022 bereits mehrere (Klein-)Wärmepumpengipfel und Industriedialoge über Erneuerbare Energien und Stromnetze statt. Gemäß seines Werkstattberichts vom 9. März 2023 plant das BMWK nun die Durchführung eines sogenannten Fernwärmegipfels für den Sommer 2023, in welchem mit zentralen Akteuren neue Vorgaben für den Betrieb von Wärmenetzen erörtert werden sollen (BMWK 2023). „Zentrale Akteure“ sind insbesondere die Hersteller von Großwärmepumpen, die Fernwärmeversorger, Kommunen, Genehmigungsbehörden und Kammern. Dieser Gipfel bietet die Chance, den Dialog zwischen den Schlüsselakteuren herzustellen und auf Hersteller- sowie auf Nachfrageseite für mehr Planungssicherheit zu sorgen.

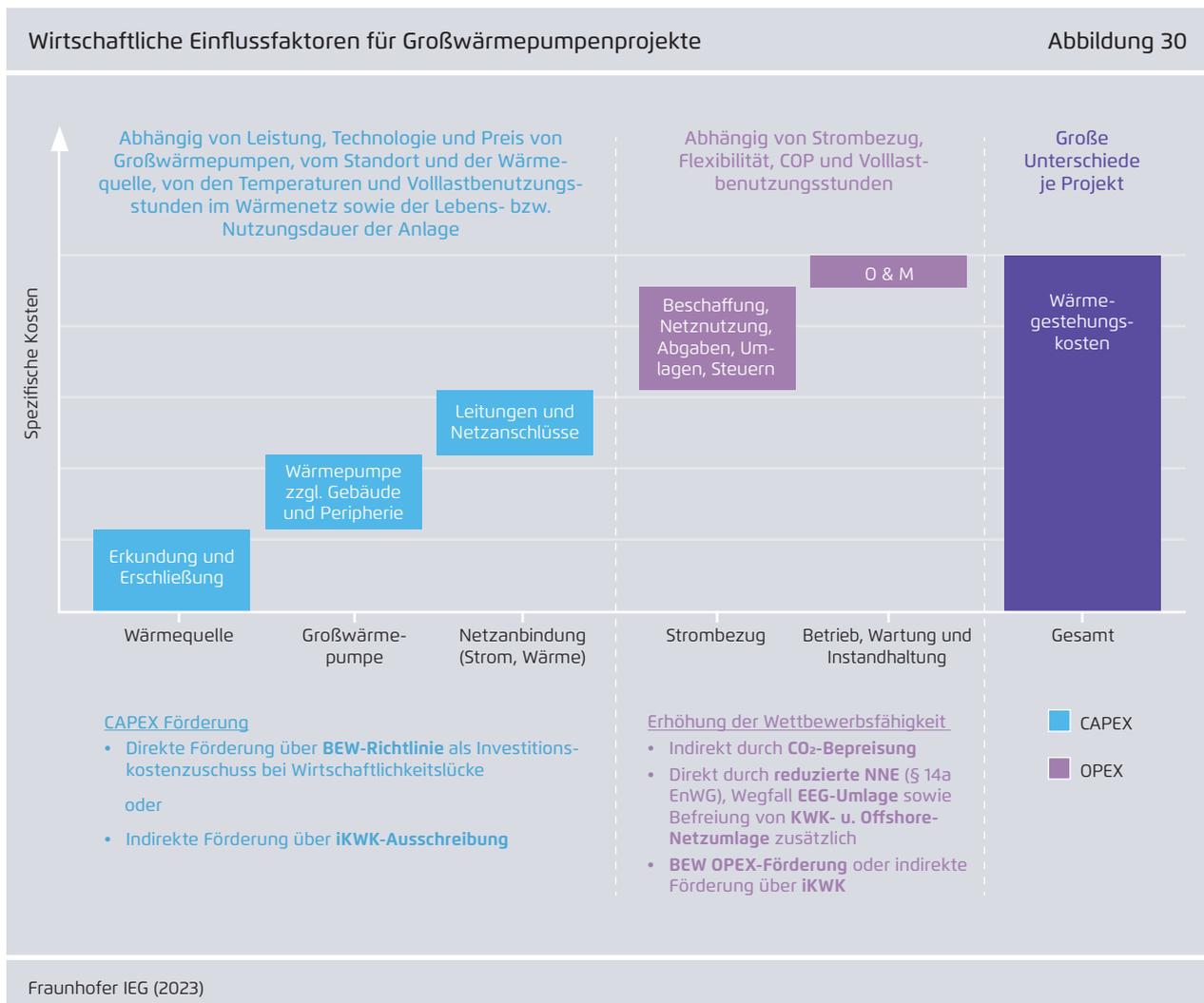
7 Regulatorischer und wirtschaftlicher Rahmen, Anreizsysteme und Fördermöglichkeiten in Deutschland

7.1 Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Großwärmepumpenprojekten

Die Investitionsanreize für Großwärmepumpen und deren Wirtschaftlichkeit hängen von vielen Faktoren ab. Im Hinblick auf die verschiedenen

Kostenelemente eines Großwärmepumpenprojekts sind vor allem folgende Einflussfaktoren von Relevanz (siehe Abbildung 30):

- Investitionsausgaben (CAPEX) sind abhängig von:
 - Art, Quelltemperatur, Lage und Erschließungsaufwand der Wärmequelle



- Leistung, Technologie und Preis, Standort der Großwärmepumpe (inklusive Grundstück, Gebäude, Peripherie, Planung und Errichtung)
- Temperaturniveau und Vollbenutzungsstunden der Wärmesenke
- Aufwand für die Netzanbindung an Strom- und Wärmenetze
- Lebens-/Nutzungsdauer der Großwärmepumpenanlage

→ Betriebskosten (OPEX) sind abhängig von:

- Effizienz bzw. COP sowie Vollbenutzungsstunden der Großwärmepumpe
- Lastprofil des Betriebs (systemdienlicher Einsatz in Zeiten niedriger Strompreise)
- Strombeschaffungsstrategie, zum Beispiel Netzstrombezug und Beschaffung am Großhandelsmarkt, langfristiger Grünstromliefervertrag (PPA) oder Eigenstromversorgung
- Netznutzungsentgelte sowie sonstige anfallende Umlagen, Abgaben und Steuern

Wie in Abbildung 30 aufgelistet, wurden in jüngster Zeit in Deutschland bereits einige Maßnahmen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Großwärmepumpen umgesetzt. Diese Maßnahmen hatten und haben vor allem die Senkung der Betriebsausgaben zum Ziel – indirekt durch die Einführung der CO₂-Bepreisung auf fossile Energieträger in den nicht vom Emissionshandel erfassten Sektoren sowie direkt durch den Wegfall der EEG-Umlage und die Befreiung von der KWK- und Offshore-Netzumlage.

Um unter den heutigen Rahmenbedingungen einen wirtschaftlichen Betrieb von Großwärmepumpen in Deutschland zu ermöglichen und Investitionen zur Dekarbonisierung der Wärmenetze anzureizen, ist dennoch weiterhin eine Investitions- und Betriebskostenförderung erforderlich. Dies wird unter anderem in der Begründung im Rahmen der beihilferechtlichen Genehmigung der BEW-Richtlinie durch die Europäische Kommission (EK 2022) und in Billerbeck et al. (2023) erörtert. Die finanzielle

Förderung soll dazu beitragen, Wettbewerbsnachteile im Vergleich zum Erdgas-Benchmark zu verringern und das Fernwärmepreisniveau auf einem für die Wärmekunden akzeptablen Niveau zu halten. Weiter steigende CO₂-Preise oder verbraucherseitige Entlastungen bei den Wärmepreisen können die Wirtschaftlichkeitslücke und damit den Fördermittelbedarf verringern.

Folgende Förderinstrumente stehen zur Schließung der verbleibenden Wirtschaftlichkeitslücke und zur Vermeidung zu hoher Fernwärmepreise derzeit hauptsächlich zur Verfügung:¹¹

- Investitions- und Betriebskostenförderung über die BEW (siehe Kapitel 7.3)
- Teilnahme an der iKWK-Ausschreibung oder Erhalt eines Bonus für innovative erneuerbare Wärme im Rahmen des KWKG (siehe Kapitel 7.4)

Mit der Novelle des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) soll für neu zu errichtende Wärmenetze vorgeschrieben werden, dass sie zu mindestens 65 Prozent aus Erneuerbaren Energien und Abwärme gespeist werden. Nach dem im April 2023 veröffentlichten Gesetzentwurf soll dies bei Baubeginn ab dem 1. April 2024 gelten. Für bestehende Wärmenetze und Netzerweiterungen soll bis zum 31. Dezember 2026 ein Transformationsplan aufgestellt werden mit dem Ziel, bis 2030 auf mindestens 50 Prozent Erneuerbarer Energien und Abwärme umzusteigen und bis zum 31. Dezember 2044 die Wärmeversorgung vollständig zu dekar-

11 Darüber hinaus existieren auf Bundes- und Landesebene weitere Förderprogramme, die ebenfalls Großwärmepumpen fördern. Diese sind aber für den Fernwärmesektor und den bundesweiten Roll-out von Großwärmepumpen nicht oder nur von untergeordneter Bedeutung und werden daher in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

bonisieren.¹² Dies schränkt die Handlungsoptionen für auf fossilen Energien basierende Wärmeversorgungsoptionen weiter ein, erhöht die Planungssicherheit für CO₂-freie Alternativen und verbessert dadurch die Wettbewerbssituation von Großwärmepumpen zusätzlich.

Die Wirtschaftlichkeit von Industrie-Wärmepumpen unterscheidet sich von in Wärmenetzen eingesetzten Großwärmepumpen durch eine Reihe von Faktoren. Den größten Einfluss haben die höhere Senktemperatur und die mit durchschnittlich 6.000 Vollbenutzungsstunden wesentlich höhere Auslastung. Die Wirtschaftlichkeit von Industrie-Wärmepumpen wurde in der Studie „Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie“ von Agora Industrie und FutureCamp untersucht (Agora Industrie und FutureCamp 2022). Über die hier dargestellten Fördermöglichkeiten hinaus existieren für die Industrie weitere Optionen zur Förderung, insbesondere die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW).

Wettbewerbsfähigkeit von Großwärmepumpen im Vergleich zu anderen Wärmeversorgungsoptionen

Die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz eines Großwärmepumpenprojekts hängt neben den Wärmeherstellungskosten alternativer Technologien zur CO₂-freien oder klimaneutralen Wärmeherzeugung überdies auch von den bisherigen (Fern-)Wärmebezugspreisen – welche neben der Erzeugungskomponente auch die Netzkosten enthalten – ab.

Da der Fokus dieser Studie auf der Transformation der Fernwärmeerzeugung mittels Großwärmepumpen liegt, werden die in den Fernwärmepreisen enthaltenen Netzkosten hier nicht betrachtet. Ebenso wenig werden die Wärmeherstellungskosten anderer Technologien (wie beispielsweise Erdgas, Solarthermie, Biomasse oder grüner Wasserstoff) für die zentrale oder dezentrale Wärmeversorgung im Rahmen dieser Studie untersucht und mit jenen der Großwärmepumpen verglichen. Dazu liegen bereits zahlreiche wissenschaftliche und privatwirtschaftliche Untersuchungen vor, zum Beispiel: Billerbeck et al. (2023); UBA (2023a); Gerhardt et al. (2021); Agora Industrie und FutureCamp (2022). Prinzipiell lassen sich die Kernaussagen dieser Arbeiten wie folgt zusammenfassen:

- Die Standortvoraussetzungen und Netzbedingungen im (Fern-)Wärmesektor sind so vielfältig, dass es nicht die eine beste Lösung für alle Anwendungsfälle gibt.
- Aufgrund der in der Vergangenheit geringeren Aufmerksamkeit für diese Technologie, ihrer höheren technischen Komplexität, ihres geringeren Standardisierungsgrads und der noch sehr geringen Stückzahlen in der Produktion weisen Großwärmepumpen spürbar höhere Investitionskosten als konventionelle, auf Erdgas basierende Wärmeherzeugungstechnologien auf.
- Es gibt zwischen einer auf grünem Strom basierenden, klimaneutralen Wärmeherzeugung und einer auf Erdgas basierenden, CO₂-Emissionen verursachenden Wärmeversorgung in Deutschland immer noch kein *Level-Playing-Field*. Die Wettbewerbsfähigkeit von Großwärmepumpen ist umso besser, je höher die CO₂-Bepreisung ist und je kleiner das Verhältnis der Endkundenpreise von Strom zu Gas ist.
- Solange es kein *Level-Playing-Field* oder andere Anreize für die klimaneutrale Transformation der Fernwärmenetze gibt, ist es daher erforderlich, die entstehende Wirtschaftlichkeitslücke von Großwärmepumpenprojekten durch Fördermittel zu schließen. Die Wirtschaftlichkeitslücke ist dabei wiederum abhängig von der Höhe eines sozialverträglichen Fernwärmepreisniveaus und den Kosten

12 § 71b GEG-Entwurf, siehe: Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes, zur Änderung der Heizkostenverordnung und zur Änderung der Kehr- und Überprüfungsordnung, abgerufen unter: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/Downloads/kabinettsfassung/geg-20230419.pdf;jsessionid=E3E7FA71D3250342C67F-80F2A57E2AFF.1_cid364?__blob=publicationFile&v=1.

einer alternativen Wärmeversorgung im jeweiligen Wärmeversorgungsgebiet.

- Steigende CO₂-Preise werden dazu führen, dass der derzeit noch weitgehend auf Erdgas basierende Wärmekosten-Benchmark von Jahr zu Jahr steigt. Für sich allein genommen sollte diese Entwicklung dazu führen, dass die Wirtschaftlichkeitslücke der Großwärmepumpen nach und nach kleiner wird und damit auch der Fördermittelbedarf sinkt.

Diese Studie baut auf diesem Wissen auf und konzentriert sich daher im Folgenden allein auf die Analyse der Wärmegestehungskosten verschiedener Anwendungsfälle für Großwärmepumpenprojekte. Zweck dieser Betrachtung ist es, die verschiedenen Wärmequellen, Auslegungsvarianten, Kostenannahmen und Werttreiber beurteilen und untereinander vergleichen zu können. Auf diese Weise sollen potenzielle Investoren, Anlagenbetreiber und die Energiepolitik mehr Orientierung für ihre Projektbewertung und Entscheidungsfindung erhalten.

7.2 Wärmegestehungskosten von Großwärmepumpenprojekten ohne Fördermitteleinfluss für verschiedene Wärmequellen

Dimensionierung und Anwendungsbereich führen zu projektspezifischen Investitionskosten. Der Investitionsaufwand eines Großwärmepumpenprojekts setzt sich zusammen aus den Kosten für die Großwärmepumpe, die Erschließung und Anbindung der Wärmequelle, die Baumaßnahmen und die Medienanbindung, welche die elektrische Anbindung sowie die Mess- und Regelungstechnik umfassen. Die vielfältigen Auswahl- und Konfigurationsmöglichkeiten der Wärmepumpentechnologie spiegeln sich dabei auch in der Höhe und Aufteilung der Investitionskosten – und infolgedessen auch der Betriebskosten – wider.

Den größten Einfluss auf die spezifischen Investitionskosten eines Großwärmepumpenprojekts haben

dabei die Wärmequelle und die individuellen Standortvoraussetzungen. Ebenfalls von Bedeutung ist die Leistungsklasse der Großwärmepumpe. Daraus resultieren wiederum spezielle kostenrelevante Anforderungen an die Auswahl und Auslegung der kritischen Komponenten wie Verdichter und Wärmeübertrager sowie die jeweiligen Verschaltungsvarianten.

Zusätzlich sind die Kosten für den Wärmespeicher sowie für die Planung zu berücksichtigen. Für die für einen systemdienlichen Betrieb erforderliche Wärmespeicherkapazität wird für alle Wärmequellen ein identischer Investitionsaufwand angenommen. Der Kostenkalkulation liegt dabei der Bedarf an Wärmespeicherkapazität im T45-Stromszenario für das Jahr 2030 (bei 3.500 Vollbenutzungsstunden jährlich) und die Investitionskostenangaben in Grosse et al. (2017) zugrunde.

Bedingt durch die geringe Anzahl bisher in Deutschland umgesetzter Großwärmepumpenprojekte und die wenigen zugänglichen Informationen zu den Investitionskosten dieser Projekte sind die nachfolgenden Kostenangaben als indikative Orientierungswerte zu verstehen. Für eine höhere Kostentransparenz und konkretere Kosteninformationen ist der Markt für Großwärmepumpen in Deutschland noch zu jung und zu klein.

Abbildung 31 stellt für die verschiedenen Wärmequellen die Bandbreite der auf die Heizleistung bezogenen spezifischen Investitionskosten auf Basis des Preisstands des Jahres 2022 dar. Um den Einfluss der Anlagenleistung auf die Höhe der Kosten aufzuzeigen, enthält die Abbildung sowohl Angaben für Großwärmepumpen mit 1 MW thermischer Leistung (= künftiger Massenmarkt) als auch für Anlagen mit 10 MW thermischer Leistung.

Neben den spezifischen Kostenvorteilen von Wärmepumpen mit größeren Leistungen wird aus der Abbildung auch ersichtlich, dass die tiefe, mitteltiefe und oberflächennahe Geothermie die höchsten spezifischen Investitionskosten von 2.200 bis

3.600 Euro pro kW aufweist. Im Vergleich dazu sind die spezifischen Investitionskosten bei der Nutzung von Gewässerthermie (Fokus auf Fluss- und Seewasser), Abwasser, Abwärme und Umgebungsluft aufgrund des geringeren Erschließungsaufwands der Wärmequellen mit 700 bis 1.600 Euro pro kW deutlich geringer.

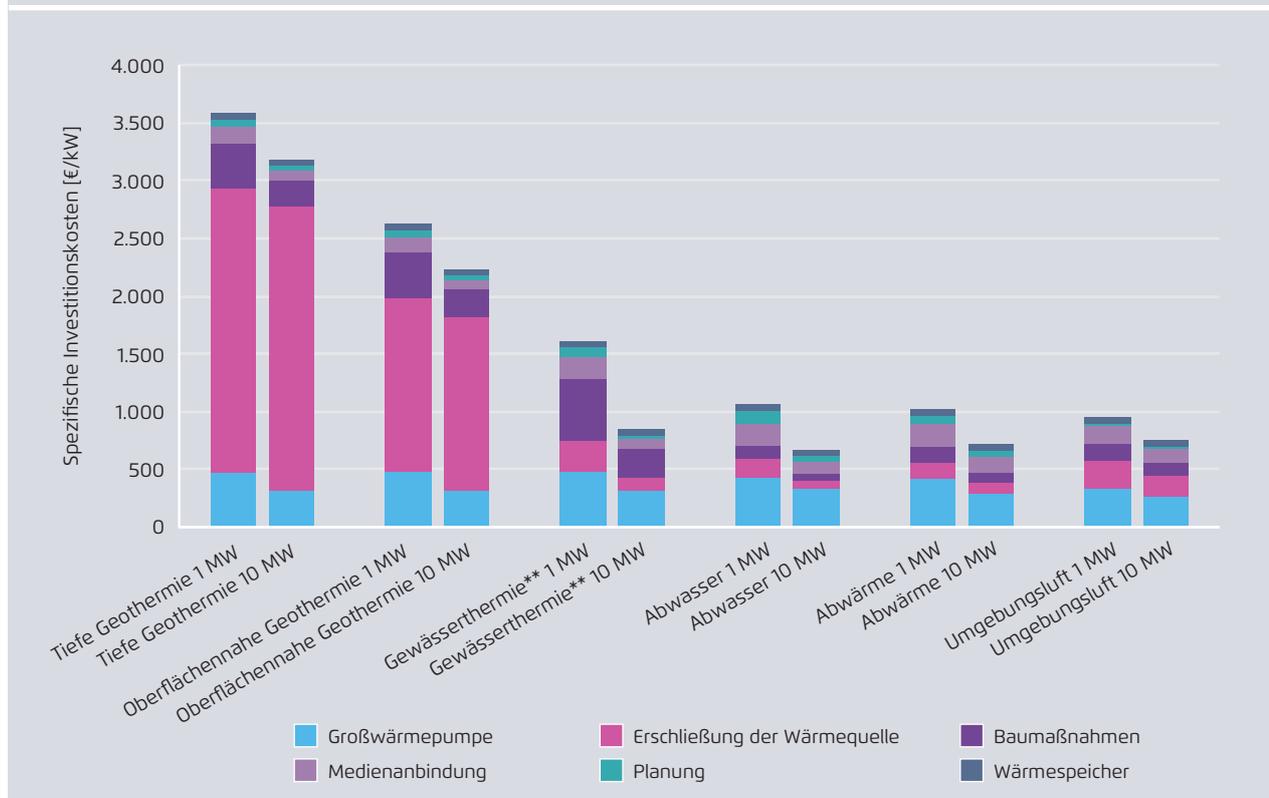
Der Aufwand und die Kosten für die Erschließung und Anbindung von Wärmequellen gehen weit auseinander.

Bei tiefer und oberflächennaher Geothermie belaufen sich die Kosten für die Erschließung der Wärmequelle beispielsweise auf etwa 1.500 bis 2.450 Euro pro kW, was etwa 60 bis 80 Prozent der

gesamten Investitionskosten ausmacht. Die spezifischen Kosten für die Erschließung basieren dabei auf der Annahme eines COPs von 5,4 für die tiefe Geothermie und 2,0 für die oberflächennahe Geothermie sowie mittleren Bohrungskosten von 3.000 Euro pro kW (bezogen auf die Umweltwärme, das heißt ohne die Antriebsenergie der Wärmepumpe). An Standorten mit guten geologischen Bedingungen und niedrigem Fündigkeitsrisiko können die Kosten für die Bohrungen mit etwa 1.800 bis 2.200 Euro pro kW auch deutlich darunter liegen (Bracke et al. 2022).

Der Nachteil der hohen Anfangsinvestitionen bei der Geothermie wird dabei jedoch durch eine sehr

Einfluss der Wärmequelle und der übrigen Anlagenkomponenten auf die Investitionskosten von Großwärmepumpenprojekten* Abbildung 31



Fraunhofer IEG basierend auf Pieper et al. (2018), Grosse et al. (2017) und eigener Datenerhebung. * Die Analyse der Investitionskosten stützt sich dabei auf eine begrenzte Anzahl an Projekten. Dies ist zum einen auf die vergleichsweise geringe Anzahl bisher umgesetzter Großwärmepumpenprojekte und zum anderen auf die wenigen zugänglichen Informationen zu den Investitionskosten dieser Projekte zurückzuführen. ** Der dargestellte Anteil für die Erschließung der Wärmequelle bei Fluss- und Seewasser ist als niedrig einzustufen, da dieser auf einem Projekt basiert, bei dem die Wärmequelle bereits teilweise erschlossen war.

hohe Lebensdauer der Bohrungen kompensiert, welche jene der Großwärmepumpenaggregate oder auch anderer Wärmequellen um ein Vielfaches übersteigt.

Auch bei den anderen Wärmequellen können sich die Kosten für die Erschließung der Wärmequelle von Projekt zu Projekt stark unterscheiden. Eine Rolle spielt beispielsweise die Entfernung der Wärmequelle vom Standort der Wärmepumpe. Außerdem kann die Wärmequelle bereits erschlossen sein, zum Beispiel bei einer Flusswasserwärmepumpe an einem Kraftwerksstandort. Auch die Kosten für die Baumaßnahmen hängen von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten ab, wobei die Baukosten bei der Gewässerthermie und der Geothermie tendenziell höher sind.

Der Verdichter ist die teuerste Komponente einer Großwärmepumpe. Die Investitionskosten sinken mit steigender thermischer Leistung. In Abhängigkeit von der Konfiguration der Wärmepumpe gestaltet sich auch die Kostenzusammensetzung der Kompressionswärmepumpeneinheit, wobei der Verdichter als Kernkomponente mit Abstand die teuerste Komponente darstellt. Der Verdampfer und der Kondensator haben ebenfalls große Anteile an den Kosten. Die Kosten für Bauteile wie interne Wärmeübertrager, Verrohrungen sowie Messtechnik und Sensorik ergeben sich je nach gewählter Verschaltungsvariante. Insgesamt ergeben sich daraus für ein Großwärmepumpenaggregat in Summe Investitionskosten zwischen 250 und 330 Euro pro kW bei einer thermischen Leistung von etwa 10 MW und zwischen 320 und 500 Euro pro kW bei 1 MW (siehe Abbildung 31). Auch in den dem Fraunhofer IEG bekannten Listenpreisen mehrerer Hersteller zeigen sich abnehmende Investitionskosten mit zunehmender thermischer Leistung. Im Durchschnitt sinken die spezifischen Investitionskosten für eine Großwärmepumpe mit 10 MW um etwa ein Drittel im Vergleich zu einer Einheit mit 1 MW.

Bei Großwärmepumpen sehr hoher Temperaturklassen sind in der Regel höhere spezifische Investiti-

onkosten anzunehmen. Dies lässt sich insbesondere auf die höheren technischen Anforderungen kritischer Komponenten und zusätzlich erforderliche Bauteile zurückführen sowie auf die damit einhergehenden komplexeren und weniger erprobten technischen Systeme.

Mittelfristig ist von einer Kostenreduktion infolge wachsender Marktreife und steigender Nachfrage auszugehen. Dies ist insbesondere bei standardisierten Anlagenkonzepten und daher für Großwärmepumpen kleinerer Leistungsklassen anzunehmen. Grosse et al. (2017) gehen von einem Rückgang der spezifischen Gesamtkosten um etwa 18 Prozent bis 2050 im Vergleich zu 2020 aus.

Vollbenutzungsstunden und Strombezugskosten beeinflussen maßgeblich die wirtschaftliche Nutzung der Wärmequelle.

Der systemdienliche Betrieb von Großwärmepumpen im zukünftigen Energiesystem führt zu einer niedrigeren Zahl an Vollbenutzungsstunden als bei einer Integration heutiger Anlagen in bestehende Wärmeerzeugungsportfolios und -netze. Je flexibler der Einsatz sein soll, desto größer sind die benötigte vorzuhaltende Wärmespeicherkapazität und der damit verbundene zusätzliche Investitionsbedarf für das Gesamtsystem. Bei einer sehr hohen Zahl an Vollbenutzungsstunden ist kein Wärmespeicher erforderlich. Gleichzeitig hat eine Veränderung der Betriebsweise und der Zahl der Vollbenutzungsstunden auch Auswirkungen auf die erzielbaren Strombezugskosten und die Netznutzungsentgelte. Während die erzielbaren Strompreise mit einer sinkenden Zahl an Vollbenutzungsstunden ebenfalls deutlich sinken, führt die bestehende Netzentgelt-systematik dazu, dass sich die Netznutzung verteuert (siehe Tabelle 3).

Welchen Einfluss dies auf die Wärmegestehungskosten einer Großwärmepumpe für die unterschiedlichen Wärmequellen jeweils hat, wird nachfolgend mittels einer Sensitivitätsanalyse für das Jahr 2030 untersucht.

Entsprechend der Richtlinie VDI 2067 werden zur Ermittlung der jährlichen Wärmegegostehungskosten die kapitalgebundenen Kosten (Investition), die betriebsgebundenen Kosten (Betrieb, Wartung und Instandhaltung) und die verbrauchsgebundenen Kosten (Strombezugskosten) betrachtet. Die Kostenzusammensetzung variiert hierbei einerseits mit der Wärmequelle und andererseits mit den kalkulierten Vollbenutzungsstunden. In Anhang A.4, Abbildung 44 werden die für verschiedene Sensitivitäten berechneten Kosten für die verschiedenen Wärmequellen einander gegenübergestellt.

Die mögliche Inanspruchnahme einer Kapitalkosten- und/oder einer Betriebskostenförderung wird in dieser Sensitivitätsanalyse nicht betrachtet. Das

heißt, sämtliche Ergebnisse zeigen die Wärmegegostehungskosten, die sich ohne entsprechende Förderung für das Jahr 2030 unter den getroffenen Prämissen ergeben würden.

Die zur Bestimmung der Wärmegegostehungskosten getroffenen Annahmen sind Tabelle 3 zu entnehmen. Die COPs (siehe Legende in Abbildung 32) der betrachteten Wärmequellen ergeben sich auf Basis von Abbildung 22 aus gemittelten Annahmen für die Senkentemperatur (100 °C), die jeweiligen Quellentemperaturen und den Gütegrad der Großwärmepumpe (50 Prozent). Im Anhang ist zusätzlich eine Version dieser Sensitivitätsanalyse für eine Senkentemperatur von 80 °C enthalten (siehe Anhang A.4, Abbildung 45).

Annahmen für die Sensitivitätsanalyse der Wärmegegostehungskosten von Großwärmepumpen mit 1 MW versus 10 MW

Tabelle 3

Wärmeleistung	Einheit	1 MW			10 MW		
		1.247	3.500	6.000	1.247	3.500	6.000
Vollbenutzungsstunden	h/a	1.247	3.500	6.000	1.247	3.500	6.000
Wärmespeicherbedarf	kWh _{Speicher} pro kW _{Großwärmepumpe}	9 ¹	5 ²	0 ³	9 ¹	5 ²	0 ³
Strombezugskosten	€/MWh ¹¹	120	126	140	117	123	139
Beschaffung	€/MWh ¹¹	32 ⁴	58 ⁵	86 ⁶	32 ⁴	58 ⁵	86 ⁶
Netzentgelt ⁷	€/MWh ¹¹	62	43	30	62	43	30
Sonstige Stromnebenkosten ⁸	€/MWh ¹¹	26	25	24	23	22	22
Investitionskosten	€/kW	Siehe Abbildung 30					
Wartungskosten ⁹	Prozent	3					
Kapitalzins ¹⁰	Prozent	8					
Kalkulatorische Lebensdauer ⁹	Jahre	20					

Quellen:

- ¹ Investition in Wärmespeicher pro Wärmeleistung der Großwärmepumpe aus Szenario T45-Strom im Jahr 2030
- ² Lineare Interpolation der Wärmekapazität zwischen 1.247 h/a und 6.000 h/a
- ³ Keine Investition in einen Wärmespeicher bei inflexibler Betriebsweise
- ⁴ Wärmemengengewichteter Strompreis der Großwärmepumpe des Szenarios T45-Strom im Jahr 2030
- ⁵ Lineare Interpolation der Beschaffungskosten zwischen 1.247 h/a und 6.000 h/a
- ⁶ Strompreis für inflexiblen Betrieb der Großwärmepumpe, welcher sich an der direkten Wärmenachfrage orientiert
- ⁷ Eigene Berechnung auf Basis von Preisblättern von 20 repräsentativen Verteilnetzbetreibern für das Jahr 2023
- ⁸ Stromsteuer, Umlagen und Konzessionsabgabe: eigene Berechnung auf Basis von www.netztransparenz.de und unter Berücksichtigung aktueller Reformen des Abgaben- und Umlagesystems in Bezug auf Großwärmepumpen, siehe Billerbeck et al. (2023)
- ⁹ Basierend auf VDI-Richtlinie 2067
- ¹⁰ Basierend auf Brunner und Kruppenacher (2017)
- ¹¹ Bezieht sich auf MWh elektrisch

Es wird zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher Heizleistungen und damit einhergehender unterschiedlicher spezifischer Investitionskosten (siehe Abbildung 31) auf die Wärmegestehungskosten der Großwärmepumpen untersucht. Zu diesem Zweck werden sowohl Großwärmepumpenanlage mit 1 MW als auch mit 10 MW Heizleistung betrachtet. Die Variation der Strombezugskosten ist zudem für unterschiedliche Vollbenutzungsstunden abgebildet, um eine Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit bei heutigen Betriebsweisen (3.500 h pro Jahr) und zukünftig netzdienlichen Betriebsweisen (1.500 h pro Jahr) zu ermöglichen.

Abbildung 32 zeigt als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse die Verläufe der spezifischen jährlichen Wärmegestehungskosten für verschiedene Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden und der Strombezugskosten für das Jahr 2030.

Die geringeren Investitionskosten für Anlagen mit höherer Heizleistung wirken sich erkennbar auf die Wärmegestehungskosten aus. Dies gilt verstärkt für einen Betrieb mit geringen Vollbenutzungsstunden.

Es ist des Weiteren ein deutlicher Anstieg der Wärmegestehungskosten mit sinkenden Vollbenutzungsstunden vor allem bei Wärmequellen mit hohen CAPEX-Anteilen zu erkennen. Folglich spielen bei geringen Vollbenutzungsstunden niedrige Investitionskosten eine entscheidende Rolle, wogegen geringere Betriebskosten infolge hoher COPs bei kurzen Einsatzdauern naturgemäß weniger stark ins Gewicht fallen.

Innerhalb der Sensitivitätsanalyse wird einschließlich der Bohrinvestitionen eine Abschreibungsdauer von 20 Jahren angesetzt. Mögliche Kostenvorteile aus der bereits erwähnten Langlebigkeit von Geothermiebohrungen werden in dieser Kalkulation somit nicht berücksichtigt, spielen für diese Form der Wärmegewinnung aber dennoch eine wichtige Rolle.

Bei der Kombination von Großwärmepumpen mit der tiefen Geothermie als Wärmequelle zeigt sich am deutlichsten, dass selbige bei niedrigen Jahresbenutzungsdauern vergleichsweise hohe Wärmegestehungskosten aufweist, mit steigender Betriebsauslastung aber immer konkurrenzfähiger wird. Hinsichtlich des großen Potenzials der tiefen Geothermie sind daher zwei Aspekte hervorzuheben:

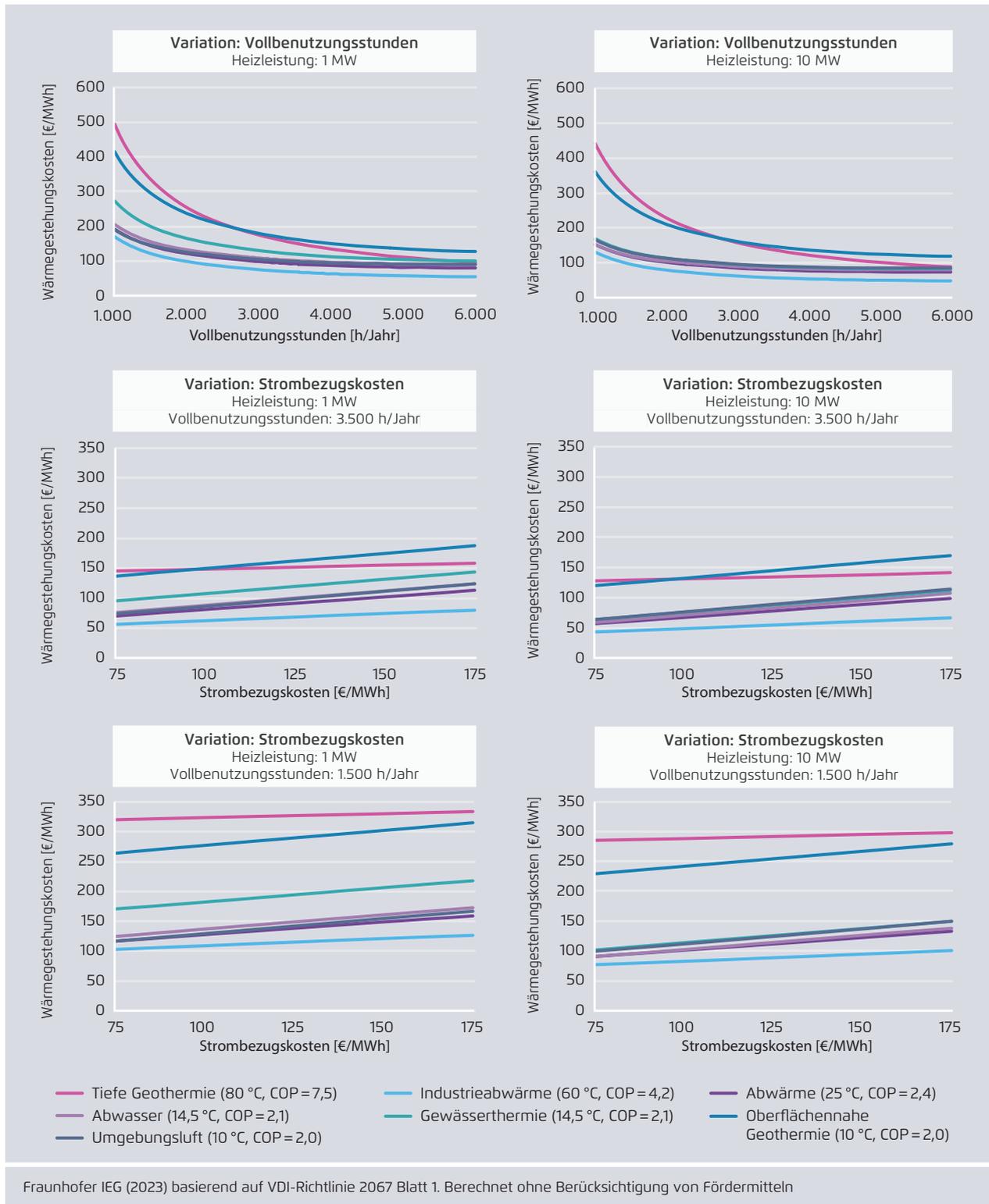
- Fernwärme: Für den Einsatz in der Fernwärme ist die direkte Nutzung der tiefen Geothermie, das heißt ohne Großwärmepumpen, in vielen Fällen die erste Wahl. Eine weitere Temperaturerhöhung der Quelltemperatur mit Großwärmepumpen ist häufig gar nicht erforderlich. Und falls doch, geht dies auch tendenziell mit einer geringeren Bohrtiefe und einem geringeren Investitionsaufwand einher.
- Prozesswärme: Die Kombination von Hochtemperatur-Großwärmepumpen mit der tiefen Geothermie ist sehr gut zur Bereitstellung von Prozesswärme mit hohen Vollbenutzungsstunden geeignet. Das Potenzial der tiefen Geothermie mit sehr hohen Quelltemperaturen sollte daher vorrangig und so weit wie möglich zur Dekarbonisierung der Prozesswärme und industriellen Wärmebedarfe genutzt werden.¹³

Im Hinblick auf die Relevanz der Strombezugskosten bestätigt die Analyse die bekannte Tatsache, dass die Wärmegestehungskosten für Wärmequellen mit hohen COPs (Industrieabwärme und tiefe Geothermie) am robustesten gegenüber schwankenden Strombezugskosten sind. Die Variation der Strombezugskosten fällt demnach vor allem bei niedrigen COPs ins Gewicht. Überdies zeigt sich anhand der Analyseergebnisse und mit Blick auf die getroffenen Annahmen (siehe Tabelle 3) auch, welche Bedeutung

¹³ Dies erfordert zusätzlich eine abgestimmte Standortentwicklung und kommunale Wirtschaftsförderung, welche Unternehmenserweiterungen und Neuansiedlungen mit hohen Temperaturbedarfen zielgerichtet in die Nähe potenzieller Standorte für die tiefe Geothermie lenkt.

Spezifische Wärmegestehungskosten im Jahr 2030 für unterschiedliche Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden und der Strombezugskosten jeweils für Anlagen mit 1 MW und 10 MW Heizleistung bei einer Senktemperatur von 100 °C

Abbildung 32



die Stromnetzentgelte auf die künftigen Wärmege-
stehungskosten haben und wie wichtig es ist, dass die
künftige Netzentgeltsystematik einen systemdien-
lichen Betrieb der Großwärmepumpen anreizt.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt deutlich den Einfluss
unterschiedlicher Betriebsmodi auf die Wärmege-
stehungskosten verschiedener Wärmequellenvarianten
und ermöglicht somit dem Fernwärmeversorger eine
Orientierung zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit
zur Verfügung stehender Wärmequellen.

7.3 BEW-Förderung als zentrales Instrument zur Transformation der Wärmenetze

Fördergegenstand und Höhe der Förderung

Ziel der am 15. September 2022 in Kraft getretenen
BEW-Richtlinie ist es, durch die Förderung der Pla-
nung und Realisierung energieeffizienter Wärme- und
Kältenetzen einen Beitrag zur Dekarbonisierung zu
leisten. Voraussetzung für den Großteil der Förderung
sind Transformationspläne, die jeweils den Umbau des
Wärmenetzes zum treibhausgasneutralen Wärmenetz
aufzeigen und den dafür vorgesehenen Transformati-
onspfad verdeutlichen. Dabei sind für Bestandwär-
menetze ansteigende indikative Anteile Erneuerbarer
Energien und Abwärme an der Wärmeerzeugung für
die Wegmarken 2030, 2035 und 2040 anzugeben und
mit der Umsetzung der geförderten Maßnahmen zu
realisieren. Neubaunetze müssen Machbarkeitsstu-
dien vorlegen, nach denen von Beginn an ein Anteil
Erneuerbarer Energien und Abwärme an der Wär-
meerzeugung von mindestens 75 Prozent erreicht
wird. Die BEW fördert auch die Erstellung dieser
Transformations- und Machbarkeitsstudien. Die
Richtlinie gilt für Wärmenetze mit mehr als 16 Gebä-
uden oder mehr als 100 Wohneinheiten.

Die BEW-Richtlinie ist in der Fassung vom 1. August
2022 sechs Jahre gültig und bietet somit eine Grund-
lage für Wärmenetzplanungen sowie den Netzausbau
in Deutschland bis zum Jahr 2028 (BAFA 2022b).

Die BEW unterscheidet vier Module. Die Planung
von Wärme- und Kältenetzen in Anlehnung an die
Leistungsphasen 1–4 der Honorarordnung für
Architekten und Ingenieure (HOAI) wird unter
Modul 1 gefördert. Dabei wird zwischen dem
Neubau und der Transformation von Wärmenetz-
systemen unterschieden, wodurch entweder die
Erstellung einer Machbarkeitsstudie oder eines
Transformationsplans gefördert wird. Die Förder-
quote beläuft sich auf maximal 50 Prozent mit einer
maximalen Förderhöhe für Modul 1 von 2 Mio. Euro
je Antrag (BAFA 2022b).

Bei Modul 2 handelt es sich um die systemische
Förderung der Realisierung des Neubaus oder der
Transformation ganzer Wärme- und Kältenetze. Für die
Antragstellung der systemischen Förderung (Modul 2)
ist eine Machbarkeitsstudie beziehungsweise ein
Transformationsplan vorzulegen, welcher den Anfor-
derungen des Moduls 1 entspricht (BAFA 2022a).

Modul 3 fördert Investitionskosten von Einzelmaß-
nahmen für Wärmenetze, wie beispielsweise zentrale
Wärmeerzeuger. Falls noch kein Transformationsplan
existiert, müssen mindestens ein Zielbild des dekar-
bonisierten Wärmenetzes sowie eine Einsparprog-
nose vorgelegt werden.

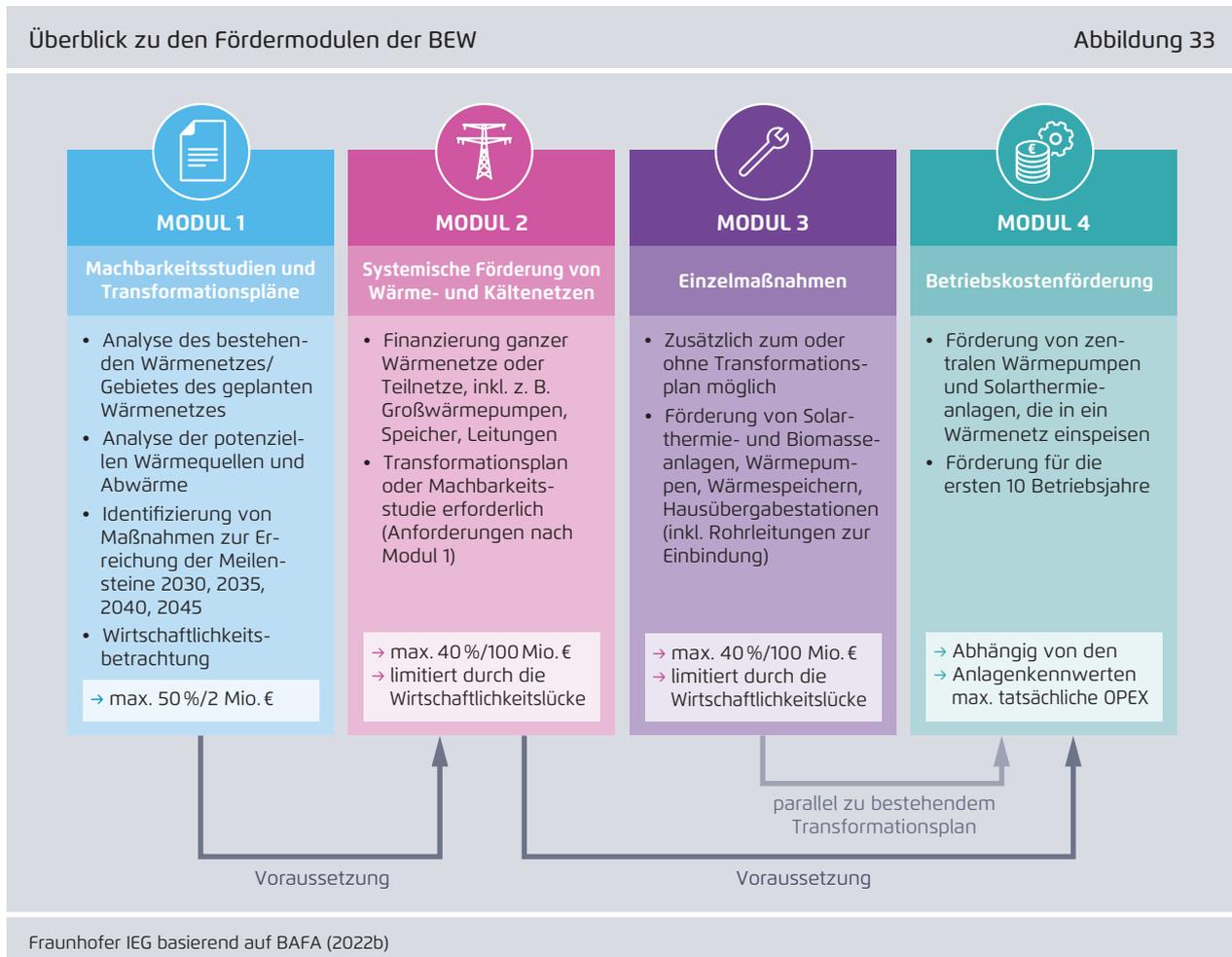
Unter Modul 2 und 3 werden die Leistungsphasen
5–8 nach HOAI gefördert. Die maximale Förder-
höhe für beide Module beträgt 100 Mio. Euro mit
einer maximalen Förderquote von 40 Prozent und
ist auf die Höhe der Wirtschaftlichkeitslücke
beschränkt (BAFA 2022b).

Für Großwärmepumpen und zentrale Solarthermie-
anlagen, welche im Rahmen von Modul 2 gefördert
werden, kann in Modul 4 zusätzlich eine Betriebskos-
tenförderung über einen Zeitraum von zehn Jahren
beantragt werden. Zweck dieser Förderung ist es, eine
gegebenenfalls verbleibende Wirtschaftlichkeitslücke
zu schließen, die ohne diese Förderung unter der
Annahme entstünde, dass die höheren Kosten nicht an
die Wärmekunden weitergegeben werden können.

Die Höhe der Betriebskostenförderung berechnet sich in Abhängigkeit bestimmter Anlagenparameter, welche in der Richtlinie sowie den Merkblättern zu den Fördermodulen spezifiziert sind (BAFA 2022b). Bei der Förderung nach Modul 3 kann Modul 4 allerdings nur beantragt werden, wenn bereits ein Transformationsplan nach den Anforderungen unter Modul 1 existiert. Das heißt, wenn unter Modul 3 eine Großwärmepumpe als Einzelmaßnahme realisiert wird, ohne dass solch ein Transformationsplan vorliegt, erhält dieses Projekt keine Betriebskostenförderung und wäre gegenüber den nach Modul 2 geförderten Projekten wirtschaftlich benachteiligt. Der Anreiz, das Modul 3 zu nutzen, um Großwärmepumpen schneller in bestehende Wärmenetze zu integrieren, sinkt dadurch. Die Erstellung von Transformationsplänen ist

jedoch häufig sehr zeit- und personalintensiv, vor allem, wenn dazu vorher Fördermittel beantragt werden. Dass manche Fernwärmeversorger gar nicht auf solche Transformationspläne angewiesen sind, um eine fundierte Entscheidung zur Errichtung einer zukunftsfähigen Großwärmepumpe treffen zu können, legen zumindest die über die iKWK-Ausschreibungen realisierten Projekte und die in Kapitel 3 und 4 beschriebenen Sachverhalte nahe. Eine zu restriktive Auslegung dieser Förderbedingungen für das BEW-Modul 4 würde der gewünschten Beschleunigung des Ausbaus von Großwärmepumpen daher tendenziell entgegenstehen.

Eine zusammenfassende Übersicht zu den Modulen der BEW findet sich in Abbildung 33.



Mit der Betriebskostenförderung unter Modul 4 setzt die BEW wichtige Anreize für den Einsatz von Großwärmepumpen in Wärmenetzen. Es bestehen jedoch Anforderungen an die Anlagenkennwerte der eingesetzten Wärmeerzeugung. Bis zum 14. Februar 2023 wurde für Großwärmepumpen für die Förderung unter Modul 4 durch die BEW eine Jahresarbeitszahl von mindestens 2,5 gefordert. Die Anforderung wurde kritisiert, da sie ein Hemmnis für die Transformation von Fernwärmenetzen darstellen kann, beispielsweise wenn keine zeitnahe Absenkung der Netzvorlauftemperatur realisiert werden kann und ein hoher Temperaturhub notwendig ist (Billerbeck et al. 2023). Weiterhin zeigen Szenarioanalysen eine hohe Relevanz der Betriebskostenförderung, da Großwärmepumpen ohne selbige erst nach dem Jahr 2030 geringere spezifische Kosten erreichen als Erdgasanlagen (Billerbeck et al. 2023).

In der neuen Version 1.1 des Merkblatts für technische Anforderungen der Module 1 bis 4 wurde die ursprünglich vorgegebene Jahresarbeitszahl von 2,5 für Anlagen mit einer Austrittstemperatur von über 65 °C oder für Anlagen mit einer thermischen Leistung von über 400 kW nun durch den Gütegrad ersetzt, welcher sich anteilig durch die vom Hersteller ermittelte effektive Leistungszahl berechnet (BAFA 2022b).

Vor dieser Anpassung bestehende Nachteile bei der Betriebskostenförderung für Großwärmepumpenprojekte mit Niedertemperaturwärmequellen oder hohen Netzvorlauftemperaturen und einem daraus resultierenden schlechteren SCOP-Wert (seasonal COP, entspricht JAZ) wurden dadurch beseitigt. Die sehr stark vom Standort abhängigen Einsatzbedingungen der Wärmepumpe führen mit der neuen Regelung nun nicht mehr dazu, dass Standorte mit schlechteren Wärmequellen bei der Betriebskostenförderung gegenüber solchen Standorten mit besseren Wärmequellen benachteiligt werden.

Aufstockungsbedarf der BEW

Für den notwendigen jährlichen Zubaubedarf an Großwärmepumpen reicht das bisher bis 2026 veranschlagte BEW-Fördervolumen nicht aus. In verschiedenen Szenarioanalysen zur Marktdurchdringung von Großwärmepumpen wurde der Einfluss des Förderrahmens im deutschen Wärmesektor untersucht. Wie in Kapitel 3 beschrieben entspräche der sich aus den T45-Szenarien ergebende Zubaubedarf in Höhe von rund 4,5 GW pro Jahr einem Investitions-/Marktvolumen von rund 2,7–3,6 Mrd. Euro pro Jahr. Weitere circa 0,4–0,8 Mrd. Euro pro Jahr Investitionsvolumen resultieren aus dem Bedarf zum Ausbau der Verteilnetzinfrastuktur im Fernwärmesektor (in den T45-Szenarien auf rund 800 km pro Jahr beziffert, siehe Kapitel 3.1).

Das dafür nötige privatwirtschaftliche Kapital ist durch die Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen zu mobilisieren. Dazu gehören neben der nötigen Planungssicherheit und wirtschaftlichen Anreizen auch die Bereitstellung ausreichender Haushaltsmittel für die Förderprogramme. Im Wärmesektor wird von (Gerhardt et al. 2021) für die Förderung ein Fördervolumen von 3 Mrd. Euro pro Jahr für die nächste Dekade veranschlagt. Anteilig werden dem Fernwärmenetzausbau zwei Drittel und für Großwärmepumpen ein Drittel dieses Betrags zugeordnet.

Demgegenüber beträgt das Fördervolumen der BEW bis zum Jahr 2026 nur knapp 3 Mrd. Euro insgesamt (BEE 2022). Unter der vereinfachten Annahme, dass nur Maßnahmen nach Modul 2 und 3 gefördert würden, ergibt sich daraus bei einer Förderquote von maximal 40 Prozent ein maximal förderfähiges Investitionsvolumen in Höhe von 7,5 Mrd. Euro über die Jahre 2023 bis 2026. Das daraus folgende jährlich förderfähige Investitionsvolumen von durchschnittlich rund 1,9 Mrd. Euro pro Jahr für Großwärmepumpen und Wärmenetze liegt somit deutlich unter dem im Rahmen dieser Studie sowie durch Gerhardt et al. (2021) ermittelten jährlichen

Investitionsbedarf, welcher für die schnelle Marktdurchdringung von Großwärmepumpen im Fernwärmesektor notwendig wäre.

7.4 Förderung im Rahmen des KWKG über iKWK-Ausschreibungen und EE-Bonus

Bis zum Inkrafttreten der BEW-Richtlinie war die Förderung von Großwärmepumpen in Deutschland im Wesentlichen nur als Bestandteil eines innovativen KWK-Systems (iKWK) nach dem KWKG möglich. Einige der in Kapitel 2.4 (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5) in Deutschland bereits errichteten und derzeit im Bau befindlichen oder geplanten Großwärmepumpen konnten nur dank dieses Förderinstruments realisiert werden. Daran, dass es in Deutschland im Jahr 2023 bereits ein grundlegendes Wissen und wertvolle Erfahrungen zur Realisierung und zum Betrieb von Großwärmepumpen gibt, hat das KWKG folglich einen entscheidenden Anteil.

iKWK bezeichnet gemäß KWKG Wärmeerzeugungssysteme, die aus drei wärmetechnisch miteinander verbundenen und gemeinsam geregelten und gesteuerten Komponenten bestehen müssen: einer KWK-Anlage, einem Wärmeerzeuger auf Basis Erneuerbarer Energien und einer *Power-to-Heat*-Anlage. Die Komponente zur Bereitstellung erneuerbarer Wärme ist so zu dimensionieren, dass in einem Kalenderjahr mindestens 30 Prozent der Referenzwärme (Gesamtwärmebereitstellung des iKWK-Systems) als innovative erneuerbare Wärme erzeugt werden können (BAFA 2018).

Mangels einer Definition Erneuerbarer Energien im KWKG selbst wird eine entsprechende Definition aus dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) herangezogen. Nach § 3 Abs. 2 GEG gelten unter anderem Geothermie, Umweltwärme und Wärme aus Biomasse als erneuerbare Wärmequellen. Dementsprechend dürfen tiefen- und oberflächennahe Geothermiean-

lagen, elektrisch angetriebene Wärmepumpen sowie mit Biogas betriebene Wärmepumpen¹⁴ Teil geförderter iKWK sein. Weiterhin ist die Verwendung von Energie aus dem gereinigten Wasser von Kläranlagen erfasst.¹⁵ Die Nutzung von Abwärme ist dagegen im Rahmen von iKWK ausgeschlossen (BAFA 2018).

In den iKWK-Ausschreibungen wird nicht die Großwärmepumpe gefördert, sondern die KWK-Anlage als Kernkomponente eines iKWK-Systems.

Die Förderung von iKWK erfolgt durch einen Zuschlag zum Preis für den KWK-Strom und existiert in zwei Varianten. Der Zuschlag

- wird entweder durch Ausschreibungen für iKWK nach § 8b KWKG ermittelt
- oder besteht aus dem Grundzuschlag nach § 8a KWKG (Ausschreibung für reguläre KWK-Anlagen) zuzüglich eines Bonus für innovative erneuerbare Wärme nach § 7a KWKG (EE-Bonus).

Während die iKWK-Ausschreibungen für Systeme mit KWK-Anlagen im Größensegment 1–10 MW elektrischer Leistung durchgeführt werden, gilt der EE (Erneuerbare Energien)-Bonus für KWK-Anlagen in iKWK-Systemen mit einer elektrischen Leistung ab 10 MW. Die gleichzeitige Inanspruchnahme der finanziellen Förderung nach § 8b KWKG (iKWK-Ausschreibung) und des EE-Bonus ist ausgeschlossen.

14 Anmerkung: Biogas als Antriebsenergie für Wärmepumpen wird in dieser Studie nicht betrachtet. Die Eigenschaften von Biogas sprechen aus Sicht der Autoren und Autorinnen dafür, diesen Energieträger sparsam und vor allem zur Energieerzeugung in Spitzenlastzeiten und in Phasen geringer Stromeinspeisungen aus Windenergie- und Solaranlagen einzusetzen. Die Optimierungsergebnisse der T45-Szenarien bestätigen diesen Ansatz (siehe Kapitel 3.1).

15 § 2 Nr. 9a KWKG. Siehe dazu auch: BT-Drs. 19/17342 vom 24. Februar 2020, S. 158.

Beide Ausschreibungstypen sind in der KWK-Ausschreibungsverordnung (KWKAusV) näher geregelt.¹⁶ Die anlagenspezifische Zuschlagshöhe wird in beiden Fällen durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) auf „pay as bid“-Basis bestimmt. Der zulässige Höchstwert für iKWK beträgt 12 Cent pro kWh und liegt somit deutlich höher als der Höchstwert für KWK von 7 Cent pro kWh (§ 5 Nr. 2 bzw. 1 KWKAusV). Nach Bekanntgabe der Zuschläge beträgt die Umsetzungsdauer bis zur Inbetriebnahme des gesamten iKWK-Systems maximal 54 Monate.

Pro iKWK-System wird der Zuschlag für 45.000 Vollbenutzungsstunden gezahlt – im Gegensatz zu den 30.000 Vollbenutzungsstunden für KWK-Anlagen. Die jährliche Grenze liegt für beide Ausschreibungstypen bei 3.500 Vollbenutzungsstunden (§ 19 Abs. 2 KWKAusV).

Diese Systematik zeigt, dass in den iKWK-Ausschreibungen nicht die Großwärmepumpe gefördert wird, sondern dass vielmehr die KWK-Anlage dafür einen höheren KWK-Zuschlag erhält, dass sie mithilfe eines erneuerbaren Wärmeerzeugers und einer *Power-to-Heat*-Komponente flexibler und mit geringeren Emissionen Wärme bereitstellen kann.

Über das KWKG geförderte Großwärmepumpen können auch einen Bonus für innovative erneuerbare Wärme (sogenannter EE-Bonus) erhalten. Die Förderung von iKWK-Systemen über den Grundzuschlag zuzüglich des EE-Bonus soll laut Gesetzesbegründung „die Mehrkosten der Errichtung und des

Betriebs von innovativen erneuerbaren Wärmeerzeugern in innovativen KWK-Systemen im Vergleich zu reinen KWK-Anlagen abdecken“. Dabei wird berücksichtigt, dass diese Mehrkosten mit einem zunehmenden Wärmeanteil aus Erneuerbaren Energien steigen und die KWK-Wärmeerzeugung infolge des steigenden Anteils erneuerbarer Wärme sinkt.¹⁷

Die Höhe des EE-Bonus ist gesetzlich festgelegt und variiert je nach dem Anteil von Wärme aus Erneuerbaren Energien zwischen 0,4 Cent pro kWh bei mindestens 5 Prozent erneuerbarer Wärme und 7,0 Cent pro kWh bei mindestens 50 Prozent erneuerbarer Wärme (§ 7a Abs. 1 KWKG).

Die wesentlichen Kriterien der iKWK-Förderung und des EE-Bonus im KWKG werden nachfolgend in den Kontext dieser Studie eingeordnet (siehe Tabelle 4).

7.5 Bedarf zur Weiterentwicklung des KWKG

Großwärmepumpenprojekte sind derzeit durch umfangreiche Abwägungs- und Entscheidungsprozesse (siehe auch Kapitel 8) sowie begrenzte personelle und finanzielle Mittel bei allen Stakeholdern gekennzeichnet. Diese Tatsache wird noch dadurch verschärft, dass Großwärmepumpen in Wärmenetzen derzeit sowohl über die BEW-Richtlinie als auch über das KWKG förderfähig sind. Die Existenz verschiedener Fördermöglichkeiten mit unterschiedlichen Fördertöpfen, Förderquoten und Bewertungsparametern ist jedoch unnötig und ineffizient – sowohl aus Sicht der antragstellenden Unternehmen als auch aus Sicht des Bundes als Fördermittelgeber.

Das KWKG war für die Förderung der hocheffizienten und hochflexiblen Kraft-Wärme-Kopplung von zentraler Bedeutung. In der aktuellen Phase der Energiewende – in welcher der systemdienliche

16 Für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung zwischen 500 kW und 50 MW wird die Zuschlagshöhe in einem Ausschreibungsverfahren bestimmt. Dabei wird zwischen Ausschreibungen für KWK-Anlagen nach § 8a KWKG und Ausschreibungen für iKWK-Systeme nach § 8b KWKG unterschieden. Es wird davon ausgegangen, dass KWK-Anlagen, die nach den beschriebenen Vorgaben mit einer Großwärmepumpe in einem iKWK-System kombiniert werden könnten, üblicherweise im ausschreibungspflichtigen Leistungsbereich liegen.

17 Ebenda, S. 161.

Betrieb von Großwärmepumpen immer wichtiger wird – gilt es nunmehr jedoch sicherzustellen, dass die KWKG-Förderung auch vollständig im Einklang mit den beschlossenen Klimazielen und -maßnahmen Deutschlands steht.

Es ist daher dringend erforderlich, dass auch – beziehungsweise gerade – die Fördermittellandschaft für

die Wärmewende klare Prioritäten setzt und damit sowohl Planungssicherheit schafft als auch Komplexität reduziert. Die Erreichung dieses Idealzustands wird durch die weiterhin vorhandene Option der iKWK-Förderung für Großwärmepumpen erkennbar erschwert (siehe Kapitel 7.4 und 8). Beispielsweise sind über die iKWK-Ausschreibungen auch Anlagenkonfigurationen förderfähig, bei denen die Abwärme

Einordnung der iKWK-Förderung in den Kontext des notwendigen Roll-outs von Großwärmepumpen Tabelle 4	
Kriterien für iKWK und EE-Bonus laut KWKG	Einordnung in den Kontext dieser Studie
Anteil innovativer erneuerbarer Wärme mindestens 30 Prozent in iKWK-Systemen (bis zu 50 Prozent beim EE-Bonus)	<p>Die KWKG-Förderung muss zur Einhaltung der Vorgaben des Klimaschutzgesetzes und zur Erreichung der BEW-Ziele beitragen. Neue Wärmenetze müssen mindestens 75 Prozent Anteil Erneuerbarer Energien oder Abwärme an der Wärmeerzeugung erreichen und Bestandsnetze einen klar definierten Pfad zur Treibhausgasneutralität bis 2045 nachweisen. Für volkswirtschaftlich effiziente Minderungspfade geben die T45-Szenarien Orientierung (siehe Kapitel 3).</p> <p>Werden Großwärmepumpen flexibel und systemdienlich betrieben, erreichen sie sehr schnell sehr niedrige CO₂-Emissionsfaktoren und leisten einen großen Beitrag zur Dekarbonisierung (siehe Kapitel 3.2).</p> <p>Der flexible und systemdienliche Einsatz der Großwärmepumpen ist ein Schlüsselfaktor für die erfolgreiche Energiewende (siehe Kapitel 3.2).</p> <p>Die Erfüllung dieses Kriteriums ist für Großwärmepumpen kein Problem (siehe Kapitel 6.1).</p> <p>Den Ergebnissen der T45-Szenarien folgend müssen KWK-Anlagen in Zukunft zunehmend die Rolle als Spitzenlast- und Backupkapazitäten für den Strom- und Wärmesektor übernehmen und dabei vorrangig Biomasse, Ersatzbrennstoffe oder grünen Wasserstoff verbrennen (siehe Kapitel 3). Die KWKG-Förderung sollte diesen Erkenntnissen Rechnung tragen.</p>
Großwärmepumpen müssen zu einer Treibhausgasminderung und Nutzung Erneuerbarer Energien in der Wärmeversorgung beitragen.	
Einsatz in bestehenden oder neuen Wärmenetzen ¹	
Ermöglichung einer stärkeren Flexibilisierung ² und zeitlichen Entkopplung der Wärme- und Stromerzeugung (zusammen mit der <i>Power-to-Heat</i> -Komponente)	
Innovative Wärmeerzeuger aus Erneuerbaren Energien müssen eine Jahresarbeitszahl von mindestens 1,25 erreichen. ³	
Bei der KWK-Komponente sollte es sich um eine neue oder modernisierte Anlage handeln.	
Fraunhofer IEG (2023) ¹ BT-Drs. 18/10209 vom 7.11.2016, Seite 3. ² Laut Gesetzesbegründung soll perspektivisch sichergestellt werden, dass iKWK-Systeme „im Strommarkt und im Redispatch flexibel reagieren können, zu keiner Mindenerzeugung führen und keine erneuerbaren Energien in der Stromproduktion verdrängen“. Siehe: BT-Drs. 619/16 vom 20.10.2016, Seite 4. ³ § 2 Nr. 12 lit. a) KWKAusV.	

einer auf Erdgas basierenden KWK-Anlage als Wärmequelle für eine Großwärmepumpe fungiert. Hier besteht ein Risiko, dass derartige Förderanreize dazu führen, dass fossile KWK-Anlagen länger als nötig in Betrieb bleiben und die Transformation der Wärmenetze ausgebremst wird.

In dieser Hinsicht kommt beispielsweise auch eine aktuelle, im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellte Studie zu dem Schluss, dass das KWKG „für die Transformation von Wärmenetzen falsche Anreize [setzt], die auch der CO₂-Preis nicht auszugleichen vermag“ (UBA 2023a).

Die Förderung des Ausbaus erneuerbarer Wärme und die Dekarbonisierung der Wärmenetze – und damit auch der Ausbau der Großwärmepumpen in Wärmenetzen – werden mittlerweile durch die BEW-Richtlinie und durch die bevorstehende GEG-Novelle deutlich zielgenauer als beim KWKG adressiert (siehe UBA 2023a). Das Instrument der iKWK-Förderung im KWKG ist in seiner aktuellen Form daher nicht mehr notwendig und wäre in manchen Fällen sogar kontraproduktiv. Auch für neue Wärmenetze kommt es seit dem Inkrafttreten der BEW-Richtlinie kaum noch in Frage, außer wenn der geforderte Anteil

erneuerbarer Wärme zu wesentlichen Teilen aus unvermeidbarer Abwärme und/oder in KWK-Anlagen aus erneuerbaren Brennstoffen gedeckt werden kann.

Wichtig ist auch, dass mit den über das KWKG derzeit weiterhin förderfähigen Investitionen in KWK-Anlagen keine Lock-in-Effekte für fossile Brennstoffe geschaffen werden, welche die Dekarbonisierung weiter verzögern könnten. Ein durch das KWKG geförderter Ausbau neuer Erdgas-KWK-Anlagen sollte daher unbedingt vermieden werden. Stattdessen könnte der Fokus der KWKG-Förderung künftig auf die notwendige Flexibilisierung des KWK-Anlagenbestands sowie die Bereitstellung der bis 2045 benötigten, hochflexiblen KWK-Kapazitäten auf Basis von Biomasse, Ersatzbrennstoffen und grünem Wasserstoff gelegt werden (siehe T45-Szenarien in Kapitel 3).

In diesem Zusammenhang ist daher zu prüfen, wie das KWKG mit angemessenen Übergangsfristen – zum Beispiel in Richtung eines Sektorenkopplungsgesetzes – zügig reformiert werden kann, damit es der künftigen Rolle der KWK im Energiesystem bis in die Jahre 2030 und 2045 gerecht wird.

8 Planung und Entwicklung von Großwärmepumpenprojekten für Wärmenetze: Perspektive der Fernwärmeversorger

8.1 Leistungsfähige Stadtwerke und Fernwärmeversorger als Schlüsselakteure

Für den Markthochlauf der Großwärmepumpen im Fernwärmesektor nehmen die Stadtwerke und Fernwärmeversorger neben den Herstellern naturgemäß die Schlüsselposition ein. Daher ist die Perspektive dieser Stakeholdergruppen zentral, um die aktuellen Herausforderungen und Einflussfaktoren zu identifizieren, die für einen beschleunigten Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland entscheidend sind.

Die T45-Szenarien zeigen, dass der Ausbau der (Fern-)Wärmenetze Voraussetzung für eine erfolgreiche Wärmewende in Deutschland ist. Die Dekarbonisierung der Fernwärme ist in den letzten Jahren jedoch nicht so weit vorangekommen wie nötig (siehe Kapitel 2.1). Gleichzeitig waren die Fernwärmeversorger gefordert und bestrebt, die Effizienz ihrer Wärmenetze durch Maßnahmen zur Netzverdichtung und zur Temperaturabsenkung zu erhöhen sowie den Primärenergiefaktor ihrer Wärmeversorgung zu verringern. Letzteres erfolgte vor dem Hintergrund der damaligen energiewirtschaftlichen und -politischen Rahmenbedingungen vor allem durch den Ersatz von Kohle und Heizöl durch hocheffiziente und flexible Erdgas-KWK-Anlagen.

Das Voranschreiten der Klimakrise, die fossile Energiepreiskrise in Deutschland und Europa und die damit einhergehenden Bestrebungen, so schnell wie möglich aus fossilen Energien auszuweichen, führen dazu, dass nun sehr viele politische Weichenstellungen und Transformationsmaßnahmen gleichzeitig durchgeführt werden müssen. Wärmenetze haben dabei als effiziente Möglichkeit, Erneuerbare Energien zu nutzen, an Aufmerksamkeit gewonnen.

Alle Stadtwerke und Fernwärmeversorger stehen daher aktuell vor der Frage, wie sie ihre Wärmenetze möglichst effizient bis spätestens 2045 vollständig dekarbonisieren können. Die Umstellung auf Großwärmepumpen ist aufgrund fehlender Erfahrungswerte dabei häufig noch mit Skepsis behaftet.

Vorgehen innerhalb der Studie: Erfahrungsaustausch mit den Vorreitern in Deutschland

Die nachfolgenden Informationen – insbesondere jene zu den groben Bearbeitungszeiträumen, zu aktuellen Herausforderungen und zu wichtigen Erfolgsfaktoren – sowie deren Würdigung im Kontext dieser Studie basieren dabei zum Großteil auf aktuellen Angaben aus der Praxis.

Dazu hat das Fraunhofer IEG im Rahmen der Erarbeitung dieser Studie im ersten Schritt öffentlich verfügbare Informationen zu den derzeit in Deutschland in Betrieb oder im Bau befindlichen, geplanten und angekündigten Großwärmepumpenprojekten ausgewertet (siehe Kapitel 2.4).

In einem zweiten Schritt hat das Fraunhofer IEG auf Basis dieser Informationen Kontakt zu den Investoren, Betreibern und Planern von rund 20 Projekten sowie zum AGFW aufgenommen. Dies diente neben der Verifizierung der technologischen Eckdaten der Projekte insbesondere dazu, die Perspektive der Vorreiter im deutschen Großwärmepumpenmarkt besser zu verstehen und die vorliegende Studie aus erster Hand mit qualitativen Informationen zu den Erfolgsfaktoren und Herausforderungen bei der Projektrealisierung anzureichern. Im Anhang A.1 sind Projekte, welche eine solche Vorreiterrolle einnehmen, beschrieben.

In einem dritten Schritt wurde im Februar 2023 eine Online-Umfrage zu den Themenfeldern dieser Studie durchgeführt und anonymisiert ausgewertet. Dazu wurden Vertreter von 32 Stadtwerken, Fernwärmeversorgern, der Wohnungswirtschaft und Kommunen sowie der AGFW angeschrieben, die bereits Erfahrungen mit Großwärmepumpenprojekten gesammelt haben oder sich derzeit mit dieser Thematik befassen.

Als vierter Schritt wurde im März 2023 ein Erfahrungsaustausch mit 26 Teilnehmenden der vorgeannten Stakeholdergruppen sowie einem im Bereich der Großwärmepumpenprojekte tätigen Planungs- und Ingenieurbüro durchgeführt. Die Teilnehmenden des Erfahrungsaustausches können daher eher der Vorreiterkategorie zugeordnet werden. Das heißt, die daraus abgeleiteten Stimmungsbilder und Erkenntnisse repräsentieren nicht den gesamten Fernwärmesektor, sind für die Beurteilung der Erfolgsfaktoren und Herausforderungen für den Roll-out von Großwärmepumpen aber aufschlussreich.

Herausforderungen und Handlungsbedarf aus Sicht der Fernwärmeversorger

Aktuelle Herausforderungen betreffen vor allem die Genehmigungsverfahren, Wärmequellen, Wärmesenken und die Technologie. Die Umfrage bestätigt, dass der Genehmigungsprozess mit seinen unbekannten Variablen und dem damit verbundenen Arbeits- und Zeitaufwand für die Stadtwerke und Fernwärmeversorger besonders herausfordernd ist. Auch die Auswahl der Technologie und Kältemittel sowie die langen Lieferzeiten und die kurze Preisbindung für die Großwärmepumpen stellen die befragten Akteure derzeit vor besondere Herausforderungen. Die Schwierigkeit, genügend erneuerbaren Strom zu wettbewerbsfähigen Konditionen für den Betrieb der Großwärmepumpen bereitzustellen, wurde ebenfalls mehrfach adressiert (Mediananbindung, Strompreis).

Mehrfach in unterschiedlicher Ausprägung genannte Herausforderungen betreffen überdies die Wärmequelle (Erschließungsaufwand, Leistung, Temperatur, Kooperationsbereitschaft potenzieller Abwärmelieferanten) und die Wärmesenke (Temperatur des Wärmenetzes).

Als Erfolgsfaktoren für Großwärmepumpenprojekte wurden eine frühzeitige und enge Zusammenarbeit mit (Genehmigungs-)Behörden und das Stakeholdermanagement am häufigsten genannt. Daher erhoffen sich die Fernwärmeversorger für ihre Investitionsvorhaben ähnliche Maßnahmen zur Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsprozesse, wie es im Jahr 2022 bei den neuen LNG-Terminals in Deutschland der Fall war und wie es zwischenzeitlich auch für den Windenergie- und Solaranlagen ausbau beschlossen worden ist. Dafür spricht, dass auch die Transformation der Wärmenetze von überragendem Interesse für die Allgemeinheit ist und Großwärmepumpen im Vergleich zu konventionellen zentralen Wärmeerzeugungsanlagen eher konfliktarme Infrastrukturmaßnahmen darstellen.¹⁸

Ebenfalls mehrfach adressiert wurden die Qualität der Wärmequelle (standortabhängig und kaum beeinflussbar) und die Fördermöglichkeiten (politisch beeinflussbar).

Der hohe Aufwand für die Temperaturabsenkung in bestehenden Wärmenetzen steht dem Roll-out von Großwärmepumpen nicht entgegen. Auch bei den heute üblichen Netztemperaturen können Großwärmepumpen je nach Wärmequelle bereits gute bis sehr gute COP-Werte erreichen (siehe Kapitel 4). Nichtsdestoweniger ist es aus Effizienzgründen erforderlich, dass die Vor- und Rücklauftemperaturen in den Wärmenetzen schrittweise weiter abgesenkt werden. Dies gestaltet sich nach Ansicht der befragten Akteure jedoch schwierig. Auf die Fragen „Welche

18 In Bezug auf die mitteltiefe und tiefe Geothermie und die Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequellen gilt diese Aussage nur eingeschränkt.

Potenziale zur Temperaturabsenkung im Fernwärmenetz erachten Sie bis 2045 realistischerweise als erreichbar? Welche Herausforderungen/Probleme sehen Sie dabei?“ haben 13 Teilnehmer beispielsweise folgende Aspekte benannt (Auszug):

- Hoher finanzieller und personeller Aufwand bei Immobilieneigentümern und Wärmenetzbetreibern für nötige Umstellungen bei den an bestehende Wärmenetze angeschlossenen Kundenanlagen.
- Netzausbau mit größerer Wärmeabnahme steht Temperaturabsenkung teilweise entgegen.
- Notwendige Maßnahmen zur Optimierung des Wärmenetzes, der Netzregelung zur Bereitstellung der notwendigen Transportkapazitäten und Temperaturdifferenzen zwischen dem Vor- und Rücklauf.

Dennoch gehen die Umfrageteilnehmer davon aus, dass in ihren Bestandsnetzen in den nächsten rund zwanzig Jahren Temperaturabsenkungen von mindestens 5 Kelvin und bis zu 30 Kelvin bis 2045 möglich sind. Insofern werden sich die Anforderungen der Wärmesenken und die wachsenden technischen Möglichkeiten der Großwärmepumpen in den nächsten Jahren stetig weiter annähern.

Dass die Strategien zur Auslegung und Einbindung der Großwärmepumpen in bestehende Wärmenetze derzeit allerdings noch sehr unterschiedlich sind, zeigen die Antworten auf die Frage, wie die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Gebäudesanierung und der Netztemperaturabsenkung bei der Planung und Auslegung von Großwärmepumpen zu berücksichtigen sind.

Für die komplexen Abwägungs- und Entscheidungsprozesse bei Großwärmepumpenprojekten können Fernwärmeversorger von den Erfahrungen mit KWK-Anlagen profitieren. Die Stadtwerke und Fernwärmeversorger, die ein Großwärmepumpenprojekt prüfen und vorantreiben, sind in der Planungs- und Umsetzungsphase mit zahlreichen neuen und bekannten Fragestellungen und (Abwägungs-)Entscheidungen konfrontiert. Einige davon

kennen sie bereits von der Investition in KWK-Anlagen, andere sind technologie- oder wärmequellenspezifisch. Eine Übersicht der wichtigsten Fragestellungen liefert Tabelle 9 im Anhang A.5.

8.2 Potenziale zur Prozessbeschleunigung aus Sicht der Fernwärmeversorger

Prozessschritte eines Großwärmepumpenprojektes für Fernwärmeversorger

Zur Realisierung eines Großwärmepumpenprojektes müssen die Fernwärmeversorgungsunternehmen

- die Transformationsziele für ihre Wärmenetze (= Wärmesenken) zeitlich und hinsichtlich der Dekarbonisierungsfortschritte definieren (siehe Kapitel 3),
- die verfügbaren Wärmequellenpotenziale identifizieren und bewerten (siehe Kapitel 4 und 7),
- die Maßnahmen zur Erschließung der Wärmequellen und zur Integration der Großwärmepumpen in ihr Wärmeezeugerportfolio und ihr Wärmenetz entwickeln (siehe Kapitel 5),
- die Finanzierung der Maßnahmen sicherstellen und die Fördermöglichkeiten im Rahmen der BEW-Richtlinie und des KWKG prüfen (siehe Kapitel 7),
- die Großwärmepumpen einschließlich aller Peripheriesysteme (Bauwerke, Wärmespeicher, Anbindung an das Strom- und das Wärmenetz, Wärmenetzausbau etc.) technisch planen und auslegen (siehe Kapitel 5 und 6),
- vom Anfang bis zum Ende des Projekts im engen und regelmäßigen Austausch mit der Kommune, den Wärmekunden, den Genehmigungsbehörden und der Öffentlichkeit stehen,
- das Genehmigungsverfahren vorbereiten und konstruktiv begleiten,
- die Liefer- und Bauleistungen für die Großwärmepumpenanlage über wettbewerbliche Vergabeverfahren ausschreiben,
- die Ausführung der Baumaßnahmen begleiten, überwachen und abnehmen und

→ die Großwärmepumpen über rund 20 Jahre wirtschaftlich und systemdienlich betreiben (siehe Kapitel 7).

In Abbildung 34 sind die wesentlichen Aufgaben eines Großwärmepumpenprojekts und deren zeitliche Abfolge in Anlehnung an die Leistungsphasen der HOAI dargestellt.



Der Aufwand und die Umsetzungsdauer der in Abbildung 34 beschriebenen Leistungsphasen hängen ab von der jeweiligen Wärmesenke und Wärmequelle, vom Standort, von der Leistung und der Auslegung der Großwärmepumpe, von den Lieferfristen für die Anlagen sowie vom Umfang der sonstigen projektbezogenen Baumaßnahmen. Je nach Projekt kann die Zeitdauer vom Beginn der Grundlagenermittlung bis zur Inbetriebnahme bei den heutigen Rahmenbedingungen rund vier bis sechs Jahre betragen.¹⁹

Die „schnellen“ Projekte profitieren dabei üblicherweise von mehreren der folgenden Aspekte:

- geringer Aufwand für die Grundlagenermittlung durch vorhandene Zielbilder, Wärmestrategie und/oder Transformationsplanung sowie zügige Bearbeitung der Fördermittelanträge,
- gute Standortbedingungen, wie zum Beispiel geringer Aufwand zur Erschließung der Wärmequelle, vorhandenes Kraftwerksgelände, geringe Distanzen zwischen Wärmequelle und -senke und ausreichende Stromnetzanschlusskapazitäten,
- geringe Leistung der Großwärmepumpe sowie geringer Bedarf an peripheren Baumaßnahmen – und infolgedessen gegebenenfalls auch keine Notwendigkeit für ein EU-weites Vergabeverfahren,²⁰

- gute Zusammenarbeit mit Abwärmelieferanten, der kommunalen Verwaltung und mit Genehmigungsbehörden, zügiges Genehmigungsverfahren,
- kein Fachkräfteengpass bei Projektentwicklern, Behörden und Bauunternehmen sowie kurze Lieferzeiten der Großwärmepumpe und dazugehöriger Komponenten und
- Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten.

Zur weiteren Beschleunigung der Projektrealisierung gibt es darüber hinaus neben dem üblichen Lernprozess aller beteiligten Akteure aus heutiger Sicht mehrere Stellschrauben.

Potenziale zur Prozessbeschleunigung aus Sicht der Fernwärmeversorger

Fachübergreifende Stärkung der personellen Ressourcen, insbesondere durch:

- Beseitigung des Fachkräftemangels bei Herstellern, Energieversorgern, Projektplanungsbüros und -dienstleistern, Bauunternehmen sowie Genehmigungsbehörden und Fördermittelgebern, zum Beispiel durch
 - klare Priorisierung transformations-, klimaschutz- und versorgungssicherheitsrelevanter Aufgaben bei der internen Allokation eigener personeller und finanzieller Ressourcen dieser Akteure (gegebenenfalls durch indirekte Anreize und Pflichten aus der Klimaschutzgesetzgebung),
 - Anerkennung der Relevanz dieser Wertschöpfungskette für die nachhaltige Sicherung zukunftsfähiger Arbeitsplätze und des Wohlstands in Deutschland und
 - mehr Aus- und Weiterbildungsangebote für diesen Bereich sowie Umschulungsangebote für Branchen mit vergleichbaren Qualifikationsanforderungen (zum Beispiel Automobilsektor und Verbrennungskraftmaschinenbereich).
- stärkere Digitalisierung der Prozesse und der fachübergreifenden Zusammenarbeit.

19 Ohne Berücksichtigung des Aufwands gegebenenfalls zusätzlich erforderlicher Investitionen in die Erweiterung und den Ausbau des Wärmenetzes.

20 Nach EU-Vergaberecht sind Bauaufträge ab Erreichen eines bestimmten Auftragswertes EU-weit auszu-schreiben. Dies erhöht den Wettbewerb und bietet die Chance, stärker von potenziellen Erfahrungsvorsprüngen ausländischer Bieter zu profitieren, verlängert aber auch die Zeitdauer des Verfahrens. Im Jahr 2023 liegt dieser Schwellenwert bei 5,38 Mio. Euro (netto). Das betrifft je nach Wärmequelle und Auslegung der Großwärmepumpenanlage Projekte im Bereich ab knapp 2 MW (bei der tiefen Geothermie) bis rund 9 MW (bei Abwasserwärmepumpen, siehe Kapitel 7.2).

Verkürzung der Phase der Grundlagenermittlung**vor allem durch:**

- klarere politische Leitplanken und regulatorische Rahmenbedingungen, welche die Entscheidungsprozesse für die Großwärmepumpentechnologie vereinfachen,
- Erhöhung der Bekanntheit der Ergebnisse der T45-Szenarien, des Stands der Technik von Großwärmepumpen und von Best-Practice-Beispielen aus Deutschland und Europa,
- standardisierte Großwärmepumpenprojekte, mehr Modularität und mehr Wissen zu den optimalen Einsatzbereichen verschiedener Großwärmepumpenprodukte,
- mehr digitale Transparenz zu deutschlandweit verfügbaren Wärmequellenpotenzialen und zu vorhandenen Wärmebedarfen und Energieinfrastrukturen (Wärmekataster und digitale Zwillinge),
- beschleunigte Bearbeitung der Fördermittelanträge sowie weitere Vereinfachung des Zugangs zu Fördermitteln für die Projektrealisierung (zum Beispiel BEW-Betriebskostenförderung auch für Einzelmaßnahmen nach Modul 3).

Beschleunigung des gesamten Planungs- und Genehmigungsverfahrens durch:

- Einbindung von Generalunternehmern/-übernehmern,
- (Praxis-)Leitfäden²¹ mit spezifischen Informationen zum Umgang mit verschiedenen Wärmequellen und Großwärmepumpentechnologien für Investoren, Planer und Behörden,
- gesetzliche Verankerung auf Bundes- und Länderebene, dass Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Wärmenetze von „überragendem öffentlichen Interesse“ sind, einschließlich der Anpassung zum Teil konkurrierender Gesetze

(zum Beispiel Raumordnung, Bodenrecht, Wasserrecht, BbergG, BauGB, UVPG),

- Fortführung der Maßnahmen zur beschleunigten Genehmigungserteilung für Großwärmepumpen, welche im Rahmen der im Dezember 2022 in Kraft getretenen und auf 18 Monate befristeten EU-Notfallverordnung eingeführt worden sind,²² und
- zügige Einführung einer verbindlichen kommunalen Wärmeplanung und Ausweisung von Vorzugsflächen in der Flächennutzungsplanung. Die Transformation der Wärmenetze kann beschleunigt werden, wenn künftig bei jeder (innerstädtischen) Tiefbaumaßnahme vorausschauend geprüft wird, ob proaktive Maßnahmen zur vorsorglichen Erschließung von Wärmequellen oder zur Verlegung von Wärmetrassen vorgenommen werden können.

Verkürzung der Vergabeverfahren durch:

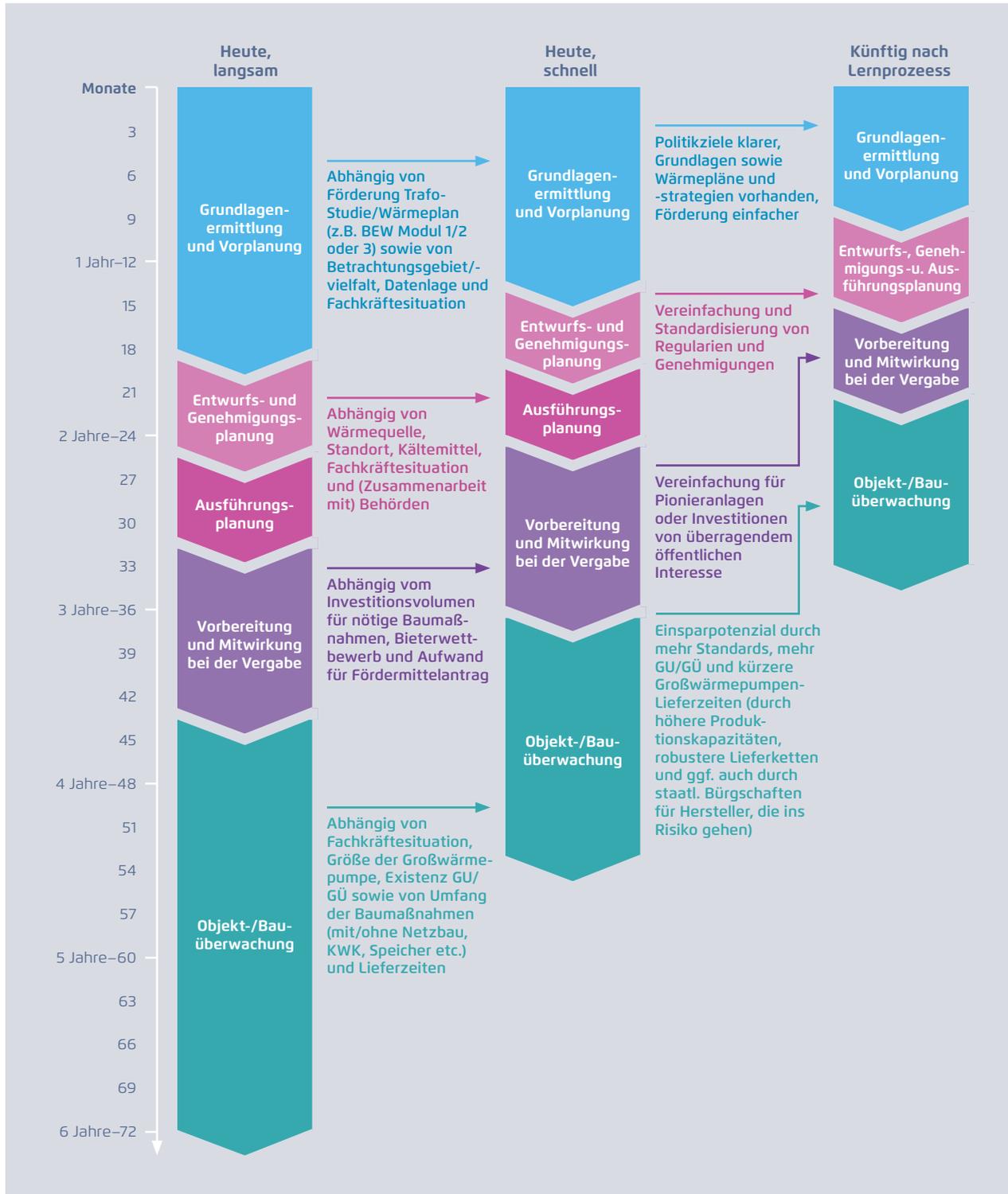
- verbesserte Vergabeunterlagen, mehr Bieterwettbewerb und bessere Angebote als Ergebnis des Lernprozesses und der Verbesserungen in den vorherigen Leistungsphasen,
- schrittweise Planung mehrerer kleinerer Einzelanlagen/-projekte anstelle eines Großprojektes oder Aufteilung auf verschiedene Lose und
- Prüfung der rechtlichen Möglichkeiten zur Verkürzung der Ausschreibungsverfahren für Maßnahmen mit „Pilotcharakter“ beziehungsweise Maßnahmen von „überragendem öffentlichen Interesse“.

21 Der AGFW hat bereits einen solchen Praxisleitfaden für Großwärmepumpen erstellt. Dieser ist hier verfügbar: <https://www.agfw.de/praxisleitfaeden> (Stand: Juni 2020; letzter Zugriff am 28. März 2023).

22 In der Verordnung (EU) 2022/2577 des Rates vom 22. Dezember 2022 zur Festlegung eines Rahmens für einen beschleunigten Ausbau der Nutzung Erneuerbarer Energien (OJ L 335, 29. Dezember 2022, p. 36-44) heißt es in Absatz 1, Artikel 7 zur Beschleunigung des Ausbaus der Nutzung von Wärmepumpen: „Das Verfahren zur Genehmigungserteilung für die Installation von Wärmepumpen mit einer elektrischen Leistung von unter 50 MW darf nicht länger als einen Monat dauern, während das Verfahren zur Genehmigungserteilung bei Erdwärmepumpen nicht länger als drei Monate dauern darf.“

Möglichkeiten zur Beschleunigung der Planung, Genehmigung und Realisierung von Großwärmepumpenprojekten

Abbildung 35



Fraunhofer IEG (2023) basierend auf Daten aus der Praxis und der geltenden Rahmenbedingungen sowie der identifizierten Handlungsfelder

Verkürzung der Lieferfristen für Großwärmepumpen und deren Komponenten sowie Beschleunigung der Bauphase durch:

- größere politische Planungssicherheit für Hersteller, damit diese frühzeitig ihre Produktionskapazitäten ausbauen und gegen Lieferengpässe vorsorgen können,
- weitere Standardisierung der Komponenten von Großwärmepumpen im Bereich von 1–10 MW, was einen modularen Einsatz für breitere Anwendungsbereiche ermöglichen würde, und
- Einführung staatlicher Garantien (Bürgschaften) zur Absicherung der Produktionsrisiken der Hersteller in der Markthochlaufphase, in welcher sich die steigende Nachfrage noch nicht in Aufträge verwandelt.²³

23 Dieses Instrument wurde beispielsweise im „Entwurf einer industriepolitischen Strategie für Erneuerbare Energien und Stromnetze“ (dena 2022) auf Basis der Erkenntnisse aus dem „Stakeholderdialog industrielle Produktionskapazitäten für die Energiewende

Bei Betätigung der vorgenannten Hebel erscheinen damit Projektlaufzeiten für kleinere Großwärmepumpenprojekte von rund drei Jahren im Bereich des Möglichen (siehe Abbildung 35).

Fest steht: Der Markt für Großwärmepumpenprojekte in Deutschland steht in Bezug auf deren Herstellung, Planung, Errichtung und den Betrieb am Anfang einer steilen Lernkurve. Für den schnellen Roll-out sind Planungssicherheit und beschleunigte und vereinfachte Genehmigungsverfahren sowie der Aufbau der Produktionskapazitäten der Hersteller entscheidend.

(StiPE)“ mit Bezug auf den Ausbau der Windenergie an Land vorgeschlagen. Derartige Bürgschaften sollen es den Herstellern ermöglichen, ihre Bestell- und Produktionsprozesse zeitlich deutlich vor möglichen Auftragseingängen zu starten, indem der Staat damit verbundene finanzielle Risiken der Hersteller absichert.

9 Handlungsfelder für den beschleunigten Roll-out von Großwärmepumpen in der Fernwärme

Bis zum Jahr 2045 müssen im Durchschnitt jedes Jahr weit über 300 Einzelprojekte mit einer neuen Großwärmepumpenleistung von über 4 GW sowie 800 km neue Wärmetrassen geplant, finanziert und errichtet werden. Dies ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die seitens der Politik eine klare Prioritätensetzung und bei Herstellern und Fernwärmenetzbetreibern ein hohes Maß an Innovation und Effizienz erfordert. Dabei ist entscheidend, dass durch einen zeitlich klug gestaffelten Mix aus Preissignalen, Fördermaßnahmen und ordnungsrechtlichen Vorgaben ein schneller Hochlauf gelingt und gleichzeitig Lieferketten und Umsetzungskapazitäten ohne problematische Engpässe mitwachsen können.

Die notwendigen Maßnahmen lassen sich entlang von drei zentralen Handlungsfeldern kategorisieren. Es gilt erstens, einen stimmigen Gesamtrahmen zu setzen, der ein klares strategisches Zielbild mit konsistenten Preissignalen für die Nutzung von Energieträgern und Infrastrukturen kombiniert. Zweitens müssen seitens der Hersteller Innovations-, Skalierungs- und Kostensenkungspotenziale konsequent und schnell gehoben werden. Drittens muss die Transformation der Wärmenetze durch eine Reform der Förderkulisse und ein Maßnahmenbündel zur Umsetzungsvereinfachung auch strukturell beschleunigt werden. Die konkreten Maßnahmen innerhalb dieser drei Handlungsfelder werden im Folgenden genauer beschrieben.

9.1 Gesamtrahmen: klare Ziele, effiziente Energiepreise und reformierte Netzentgelte

Hersteller und Anwender müssen sich auf den Hochlaufpfad verlassen können, Marktkräfte den Hochlauf durch effiziente Preissignale unterstützen. Nur so kann das Potenzial von Großwärmepumpen

und Wärmenetzen für eine klimaneutrale Energieversorgung schnell und umfassend gehoben werden. Neben einer klar artikulierten glaubhaften Zielvision für den Hochlaufpfad sind in diesem Zusammenhang vor allem die relativen Preise verschiedener Energieträger und die Nutzungsentgelte für Infrastrukturen die wichtigsten Stellschrauben.

Um für Hersteller und Anwender Zielklarheit zu schaffen, sollte ein Stakeholder-Prozess auf Bundesebene (Großwärmepumpengipfel) eine langfristige Zielvision mit ambitionierten Zwischenzielen entwickeln. Diese Zielvision muss einen ebenso glaubhaften wie ambitionierten Markthochlauf beschreiben und mit wirksamen Politikinstrumenten unterlegt werden (siehe folgende Punkte). Soweit möglich sollten vergleichbare Dialogprozesse auf Landes- und Gemeindeebene stattfinden.

Die Wirtschaftlichkeit von Großwärmepumpen in Planung und Betrieb hängt entscheidend vom Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen ab – aktuell erzeugen Steuern, Abgaben und Umlagen Fehlanreize. Erdgas ist der fossile Energieträger, gegen den Wärmepumpen bei Neubauprojekten und absehbar auch im Betrieb konkurrieren. In diesem Zusammenhang kommt der CO₂-Bepreisung eine zentrale Bedeutung zu. Aktuell ergibt sich für Wärmepumpen – sowohl als Einzellösung als auch wärmenetzgebunden – ein wichtiger Nachteil: Ihr Strombezug am Großhandelsmarkt ist den hohen CO₂-Preisen aus dem europäischen Emissionshandel (ETS) ausgesetzt.²⁴ Bei der Verbrennung von Erdgas in Anlagen und Sektoren, welche nicht Teil

²⁴ Grund für die (indirekte) Belastung des Strombezugs mit den ETS-Kosten ist die Preisbildung am Strommarkt: preisbildend ist das sogenannte Grenzkraftwerk, das heute noch in der Regel fossil befeuert ist.

des ETS sind, schlägt hingegen lediglich der deutlich niedrigere Preis nach dem deutschen BEHG zubuche.

Das auf europäischer Ebene geplante neue Emissionshandelssystem (ETS2) für den Gebäude- und Verkehrssektor bzw. eine Erhöhung der Preise im BEHG können die aktuelle Schiefele korrigieren:

Eine über die Zeit ansteigende Preisuntergrenze könnte hier die nötige Investitions- und Planungssicherheit unterstützen. Dagegen würde eine derzeit ebenfalls diskutierte mögliche Preisobergrenze im ETS2 die Wirkung dieses Instruments wieder begrenzen, Investitionsanreize für Großwärmepumpen abschwächen und die Erreichung der Klimaziele im Wärmesektor weiter gefährden (MCC 2023). Darüber hinaus ist Strom gegenüber Gas weiterhin mit höheren Steuern, Abgaben und Umlagen belegt. Ein weiterer Abbau dieser Fehlanreize, beispielsweise durch eine Senkung der Stromsteuer auf das europäische Mindestniveau, kann hier Abhilfe und damit ein *Level Playing Field* schaffen.

Die Einführung von zeitvariablen Netzentgelten ist unerlässlich, damit Wärmepumpen erneuerbaren Strom systemdienlich und netzschonend einsetzen.

Deutschland gehört zu den wenigen Ländern in Europa, in denen es noch keine zeitvariablen Netzentgelte gibt (Acer, 2023). Darüber hinaus werden Entgelte für größere Kunden (mit Lastgangmessung) ausschließlich an der Jahreshöchstlast des Kunden bemessen – unabhängig davon, ob zu diesem Zeitpunkt das Netz überhaupt ausgelastet war oder nicht. Dies ist ein entscheidendes Flexibilitätshemmnis, da der Betrieb von Wärmepumpen unter diesen Umständen nicht auf den aktuellen Netzzustand hin optimiert werden kann. Zum Beispiel ist ein besonders hoher Leistungsabruf bei einem starken, lokalen Aufkommen von erneuerbarem Strom systemisch sinnvoll und sollte dementsprechend günstig möglich sein.

9.2 Großwärmepumpen: schnelle Kostensenkung, weitere Performancesteigerung und höhere Fertigungskapazitäten

Großwärmepumpen bergen erhebliche Potenziale für Leistungssteigerungen bei gleichzeitiger Kostenreduktion – Herstellungsunternehmen müssen diese Potenziale konsequent heben und sollten hierbei zielgerichtet unterstützt werden.

Das technische Grundprinzip und die einzelnen Komponenten von Wärmepumpen sind seit Jahrzehnten bekannt und marktgängig. Vor allem in Nordeuropa sind Großwärmepumpen bereits viele Jahre im Einsatz und haben sich im Betrieb bewährt. In Bezug auf die sich mit der bevorstehenden Vervielfachung des künftigen Marktvolumens in Wärmenetzen stark verändernden Kundenbedürfnisse steckt hingegen die industrielle und skalierbare Großfertigung leistungsfähiger Großwärmepumpen aufgrund mangelnder Nachfrage noch in den Kinderschuhen. Eine vorausschauende und zügige Ausweitung des Angebots ist daher unerlässlich, damit bei schnell anziehender Nachfrage keine Lieferengpässe beziehungsweise starke Kostensteigerungen bei Großwärmepumpen auftreten.

Niedrigere Kosten und höhere Stückzahlen durch Standardisierung und Modularisierung im Leistungsbereich bis 10 MW sollten im Fokus des Markthochlaufs stehen. Lediglich für den Leistungsbereich bis 1 MW Wärmeleistung sind am Markt aktuell Standardprodukte verfügbar. Eine Ausweitung von Standardlösungen auf Leistungsbereiche bis 10 MW sollte prioritär vorangetrieben werden. Erstens können die spezifischen Investitionskosten (Euro pro kW) durch größere Anlagen gesenkt werden. Zweitens erlaubt eine Standardisierung höhere Stückzahlen und Skaleneffekte bei der Fertigung und Projektumsetzung. Jenseits einer Größe von 10 MW werden absehbar weiterhin hochgradig kundenspezifische Lösungen erforderlich bleiben. Für den Markthochlauf kann eine Fokussierung auf zahlreiche Projekte in diesem mittleren Leistungsbe-

reich – statt weniger Projekte mit Leistungen deutlich oberhalb 10 MW – daher gerade in den kommenden Jahren förderlich sein.

Die Weiterentwicklung von Verdichtern birgt erhebliche Potenziale für eine höhere Performance von Großwärmepumpen und für die Verwendung natürlicher Kältemittel. Verdichter (Kompressoren) bilden das technische Herzstück der Wärmepumpen. Sie haben den größten Anteil am Stromverbrauch von Wärmepumpen und bestimmen maßgeblich deren technische Eigenschaften und Betriebsverhalten. Außerdem müssen Verdichter an neue Kältemittel beziehungsweise an im Einsatzbereich neu verwendete Kältemittel angepasst werden. Technische Innovationen bei Verdichtern und Kältemitteln erlauben Leistungssteigerungen entlang drei zentraler Kriterien: Erstens können höhere Zieltemperaturen und Temperaturhübe erzielt werden. Zweitens sind teils erhebliche Effizienzsteigerungen möglich, das heißt eine Verbesserung des COP. Drittens kann eine höhere Flexibilität erreicht werden, indem der Betrieb in breiteren Leistungsbereichen und mit schnelleren Lastwechseln sowie An- und Abfahrbefehlen ermöglicht wird. Dies unterstützt eine systemdienliche Betriebsweise.

In Bezug auf Kältemittel sollte auf europäischer Ebene die Zulässigkeit des Einsatzes von Per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) schnell geklärt werden. Für bestehende bzw. bereits in Bau befindliche Herstellungskapazitäten, die auf die Nutzung von PFAS-haltigen Kältemitteln ausgerichtet sind, sollte ein Bestandsschutz erwogen werden.

Der Aufbau von industriellen Fertigungskapazitäten sollte ein industriepolitischer Fokus sein. Nur mit einer deutlichen Ausweitung der globalen und europäischen Fertigungskapazitäten kann das Potenzial von Großwärmepumpen voll ausgeschöpft werden. Vor dem Hintergrund einer stärkeren Betonung resilienter Lieferketten kommt gerade dem Aufbau europäischer Herstellungskapazitäten eine zentrale Rolle zu: Wärmepumpen zählen neben

Photovoltaik, Windenergieanlagen, Elektrolyseuren und Batterien zu den von der Europäischen Kommission als strategisch relevant eingestuften Dekarbonisierungstechnologien.²⁵ Vor diesem Hintergrund sollte die Ansiedlung von neuen Produktionskapazitäten in Europa, kombiniert mit Instrumenten zur langfristigen Abnahmesicherung, prioritär vorangetrieben werden.

9.3 Wärmenetze: bereinigte Förderlandschaft, verbindliche Planung und vereinfachte Umsetzung

Der Aus- und Neubau von Wärmenetzen sowie deren Ertüchtigung sind wesentlicher Taktgeber für den Markthochlauf von Großwärmepumpen – derartige Maßnahmen müssen daher einfach, zügig und ökonomisch attraktiv umsetzbar sein. Um dieses Ziel zu erreichen, sind teils grundsätzliche Anpassungen im Hinblick auf drei Bereiche erforderlich. Erstens müssen Fördersysteme verbessert beziehungsweise besser aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere die Parallelführung von Förderungen nach dem bestehenden KWKG und der neuen BEW führt aktuell zu Fehlanreizen. Zweitens muss die kommunale Wärmeplanung verbindlich eingeführt und zu einer integrierten Energiesystemplanung (kommunale Energie-Verteil-Strategie) weiterentwickelt werden. Aus dieser geht hervor, in welchen Gebieten eine netzgebundene Wärmeversorgung prioritär zum Einsatz kommen sollte. Drittens gilt es durch ein Bündel von Anpassungen und Vereinfachungen bei Genehmigungs- und Umsetzungsverfahren die erforderliche Projektlaufzeit von aktuell bis zu sechs Jahren auf rund drei Jahre ungefähr zu halbieren.²⁶

25 European Commission (2023): Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age.

26 Durchschnittswerte. Die tatsächliche Projektlaufzeit ist abhängig von vielen Faktoren, unter anderem von der Größe der Anlage und dem Umfang der Baumaßnahmen.

Fehlanreize durch das KWKG gegenüber der BEW-Richtlinie müssen durch die Bereinigung der Förderlandschaft abgebaut werden. Neben der BEW-Richtlinie besteht das alte Fördersystem für Kraft-Wärme-Kopplung über das KWKG weiter. Dies führt aktuell zu starken Fehlanreizen, insbesondere einer zu kleinen Auslegung von Wärmepumpen und einem aus Stromsystemensicht hochproblematischem wärmegeführten Dauerbetrieb von KWK-Anlagen und Wärmepumpen. Dies sollte über eine grundsätzliche Reform des KWKG behoben werden.

Die Finanzmittel der BEW müssen aufgestockt werden. Mit mehrjähriger Verspätung markierte das Inkrafttreten der BEW zum 15. September 2022 einen entscheidenden Schritt zur Transformation der Wärmenetze hin zu einer klimaneutralen Versorgung auf Basis von Erneuerbaren Energien. In Anbetracht des in dieser Studie aufgezeigten notwendigen Markthochlaufs von Großwärmepumpen sind die derzeit bis zum Jahr 2026 vorgesehenen Finanzmittel von 3 Mrd. Euro viel zu knapp bemessen. Allein für den jährlichen Zubaubedarf an Großwärmepumpen mit rund 4,5 GW Wärmeleistung (inkl. Wärmespeicher) und von rund 800 km neuen Wärmetrassen würden bis 2026 rund 1,8–3,9 Mrd. Euro an zusätzlichen Fördermitteln benötigt (vgl. Kapitel 7.3). In dieser überschlägigen Rechnung sind jedoch weder die Betriebskostenförderung gemäß BEW-Modul 4 noch der Ausbau der Solarthermie und der tiefen Geothermie berücksichtigt – der Finanzmittelbedarf ist also nochmals deutlich höher. Eine Analyse von Agora Energiewende (2022) empfahl vor diesem Hintergrund eine Aufstockung der Mittel um weitere 8 Mrd. Euro auf insgesamt 11 Mrd. Euro.²⁷ Mit der Transformation der Wärmenetze einher muss auch die Sanierung der an diese Netze angeschlossenen Gebäude und

Wärmeübergabestationen gehen. Bei der Weiterentwicklung der BEW-Richtlinie ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

Die Betriebskostenförderung für BEW-Einzelmaßnahmen darf nicht zu restriktiv ausgelegt werden. Großwärmepumpenprojekte, die als Einzelmaßnahme über das Modul 3 der BEW-Richtlinie realisiert werden und damit zum beschleunigten Markthochlauf beitragen, sollten möglichst keine wirtschaftlichen Nachteile gegenüber jenen Großwärmepumpen haben, welche als Teil einer systemischen Maßnahme über das Modul 2 gefördert werden. Das heißt, die Anforderungen an den Anspruch auf die Betriebskostenförderung nach Modul 4 – also die Existenz eines Transformationsplans, der den Anforderungen aus Modul 1 genügt – sollten für BEW-Einzelmaßnahmen nicht zu restriktiv ausgelegt werden.

Für die tiefe Geothermie sind Explorationskampagnen und die Absicherung des Fündigkeitsrisikos wichtig. Es bestehen weiterhin Lücken in der Kartierung von Potenzialen der tiefen Geothermie in Deutschland. Darüber hinaus fehlt ein Absicherungsinstrument für das Fündigkeitsrisiko bei Bohrungen. Es bedarf daher Maßnahmen zur Finanzierung einer Explorationskampagne sowie eines Mechanismus zur Absicherung des Fündigkeitsrisikos.

Die kommunale Wärmeplanung muss verbindlich eingeführt und zu einer integrierten Energieinfrastrukturplanung (kommunale Energie-Verteil-Strategie) weiterentwickelt werden. Über den Erfolg der Wärmewende entscheidet die Umsetzung vor Ort – dafür ist eine flächendeckende kommunale Wärmeplanung entscheidend. Es gilt auf Bundesebene hierfür verbindliche Regelungen aufzustellen, sodass verlässliche und vergleichbare Wärmepläne in allen Kommunen entstehen – vor allem, was die Zielerreichung und die begrenzte Nutzung von Wasserstoff und Biomasse angeht. Kommunen brauchen insbesondere Unterstützung bei der Datenbeschaffung (rechtliche Klarstellung) und bei der Personalausstattung. Damit die Ergebnisse der Wärmepläne auch

27 Eine ähnliche Größenordnung geben Gerhardt et al. (2021) an, die auf ein notwendiges Fördervolumen von 3 Mrd. Euro pro Jahr kommen, davon zwei Drittel für den Fernwärmenetzausbau und ein Drittel für Großwärmepumpen.

umgesetzt werden können, müssen sie rechtlich verbindlich werden. Darüber hinaus sollte die kommunale Wärmeplanung zu einer kommunalen Energie-Verteil-Strategie weiterentwickelt werden, die eine abgestimmte Planung und Entwicklung der Strom-, Gas-, Wasserstoff- und Wärmenetze ermöglicht.

Großwärmepumpenprojekte können durch schlankere Planung, vereinfachte Genehmigungen und stärkere Umsetzungskapazitäten deutlich beschleunigt werden. Die Verkürzung von Projektlaufzeiten von aktuell bis zu sechs Jahren auf rund drei Jahre erfordert ein Bündel an Einzelmaßnahmen, die für sich genommen nur einen begrenzten Beitrag leisten können, im Rahmen eines Gesamtpakets aber eine starke Wirkung entfalten. Diese sind in Kapitel 8 umfassend dargestellt; im Folgenden werden die wichtigsten Einzelmaßnahmen nochmals kurz aufgelistet:

- **Einstufung des Ausbaus klimaneutraler Wärmenetze als „Maßnahme von überragendem öffentlichem Interesse“.** Analog zum Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Stromnetze hilft deren rechtlicher Status dabei Abwägungsentscheidungen zugunsten von Wärmenetzen schneller und zuverlässiger herbeizuführen.
- **Verstetigung der Maßnahmen zur beschleunigten Genehmigungserteilung für Großwärmepumpen,** welche im Rahmen der im Dezember 2022 in Kraft getretenen und auf 18 Monate befristeten EU-Notfallverordnung eingeführt worden sind.²⁸

28 In der Verordnung (EU) 2022/2577 des Rates vom 22. Dezember 2022 zur Festlegung eines Rahmens für einen beschleunigten Ausbau der Nutzung Erneuerbarer Energien (OJ L 335, 29. Dezember 2022, p. 36–44) heißt es in Absatz 1, Artikel 7 zur Beschleunigung des Ausbaus der Nutzung von Wärmepumpen: „Das Verfahren zur Genehmigungserteilung für die Installation von Wärmepumpen mit einer elektrischen Leistung von unter 50 MW darf nicht länger als einen Monat dauern, während das Verfahren zur Genehmigungserteilung bei Erdwärmepumpen nicht länger als drei Monate dauern darf.“

- Vereinfachung der Genehmigungsverfahren bei **Nutzung von Oberflächengewässern und Abwasser als Wärmequelle.** Bei risikoarmen und standardisierten Projekten können nicht zwingend benötigte Prüf- und Nachweispflichten entfallen, sodass ohne Einbußen beim Gewässerschutz eine schnellere Projektumsetzung ermöglicht wird.
- **Stromnetzausbau und schnellere Netzanschlüsse für Wärmepumpen.** Je nach Region ist für den Netzanschluss von Wärmepumpen in Deutschland einer der über 800 verschiedenen Stromnetzbetreiber zuständig. Diese haben jeweils eigene Netzanschlussbedingungen, Antragsverfahren und Prüfmethode. Dies führt zu einem hohen administrativen Mehraufwand und teils hohen Wartezeiten für einen Netzanschluss. Klare Vorgaben für Anschlusspflicht und -fristen werden umso wichtiger, je stärker der Markthochlauf von Wärmepumpen und der Elektromobilität voranschreitet.
- **Bereitstellung von Praxisleitfäden** für Investoren, Genehmigungsbehörden und Planer und Planerinnen, um Best-Practice-Erfahrungen schnell zugänglich zu machen und den Ablauf von Genehmigungs- und Planungsprozessen effizient zu gestalten.
- **Flächendeckende Wärmequellen- und -potenzialkataster entwickeln und öffentlich bereitstellen.** Die schnelle, digitale und unbürokratische Verfügbarkeit dieser Daten trägt erheblich zur Projektbeschleunigung bei und ist in anderen europäischen Ländern bereits gängige Praxis.
- **Anschluss- bzw. Nutzungspflicht industrieller Abwärme nach Deckung des Eigenbedarfs.** Durch eine rechtliche Klarstellung können aufwändige Verhandlungen für einzelne Projekte vermieden werden und Wärmepotenziale schneller und kostengünstig gehoben werden.
- **Verkürzung der (EU-)Ausschreibungsverfahren für Großwärmepumpenprojekte in der Markthochlaufphase.** Um einen Anspruch auf Förderung zu sichern, müssen Komponenten und Dienstleistungen für Projekte europaweit ausgeschrieben werden. Die Umstellung auf ein vereinfachtes Verfahren – bei gleichzeitiger Absicherung einer

Handlungsprioritäten für klimaneutrale Wärme bis 200 °C

Tabelle 5

Gesamtrahmen: klare Ziele, effiziente Energiepreise und reformierte Netzentgelte	Stakeholder-Prozess für Zielklarheit (Großwärmepumpengipfel)
	Wirtschaftlichkeit von Strom gegenüber Gas; CO ₂ -Bepreisung
	Energiesystemdienliche Netzentgelte und schnellere Netzanschlüsse
Großwärmepumpen: schnelle Kostensenkung, weitere Performancesteigerung und höhere Fertigungskapazitäten	Standardisierung, Modularisierung und Skalierung der Produkte und Prozesse
	Innovationsschwerpunkte: Temperaturhübe, Effizienzsteigerungen und flexibler Betrieb; breiterer Einsatz natürlicher Kältemittel
	Aufbau von Fertigungskapazitäten
Wärmenetze: bereinigte Förderlandschaft, verbindliche Wärmeplanung und vereinfachte Umsetzung von Großwärmepumpenprojekten	Aufstockung von Fördermitteln und Beseitigung von Fehlanreizen
	Verbindliche kommunale Wärmeplanung und Weiterentwicklung zur kommunalen Energie-Verteil-Strategie
	Beschleunigte Planung, Genehmigung und Umsetzung von Großwärmepumpenprojekten

Agora Energiewende und Fraunhofer IEG (2023)

kostengünstigen Beschaffung – kann Projektlaufzeiten verkürzen.

- **Abbau des Fachkräftemangels** bei Herstellern, Energieversorgern, Projektplanungsbüros und -dienstleistern, Bauunternehmen sowie Genehmigungsbehörden und Fördermittelgebern. Erforderlich sind zum Beispiel eine klare Priorisierung transformations-, Klimaschutz- und versorgungsrelevanter Aufgaben, stärkere Aus- und Weiterbildungsangebote sowie Umschulungsangebote für Branchen mit vergleichbaren Qualifikationsanforderungen (zum Beispiel Automobilsektor und Verbrennungskraftmaschinenbereich).

Die im Rahmen dieser Studie vorgelegten Handlungsempfehlungen stellen ein in sich schlüssiges und umfassendes Gesamtpaket dar, mit dem der ambitionierte Hochlauf von Großwärmepumpen und Wärmenetzen gelingen kann. Dabei ist klar, dass in vielen Bereichen weitere Analysen und Präzisierungen erfolgen müssen. Gleichzeitig unterstreicht die Studie, welchen Beitrag innovative Ansätze in der Wärmebereitstellung für eine erfolgreiche Transformation zur Klimaneutralität leisten können – vorausgesetzt, sie werden zügig und ambitioniert umgesetzt.

Literaturverzeichnis

50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (2022): *Modalitäten für Regelreserveanbieter*. Hg. v. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH. Online verfügbar unter <https://www.regelleistung.net/ext/static/market-information>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2023.

Acer (2023): *Report on Electricity Transmission and Distribution Tariff Methodologies in Europe*. Online verfügbar unter https://www.acer.europa.eu/Publications/ACER_electricity_network_tariff_report.pdf.

AGO Energie (2023): *Industrie-, Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen*. Online verfügbar unter <https://www.ago-energie.de/thermotechnik/ago-calora-industriewaermepumpe/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Agora Energiewende, Prognos, Consentec (2022): *Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann*. Online verfügbar unter <https://www.ago-energie.de/veroeffentlichungen/klimaneutraler-stromsektor-2035/>.

Agora Energiewende (2022): *Volle Leistung aus der Energiekrise. Mit Zukunftsinvestitionen die fossile Inflation bekämpfen*. Online verfügbar unter: <https://www.ago-energie.de/veroeffentlichungen/volle-leistung-aus-der-energiekrise>

Agora Energiewende (2023): *Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023*. Online verfügbar unter <https://www.ago-energie.de/veroeffentlichungen/die-energie-wende-in-deutschland-stand-der-dinge-2022/>.

Agora Industrie; FutureCamp (Hg.) (2022): *Power-2-Heat. Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie*. Online verfügbar unter <https://www.ago-energie.de/veroeffentlichungen/power-2-heat-1/>.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) (Hg.) (2022a): *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2021*. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/>.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB) (2022b): *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2020 und 2021*. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/>.

Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE) (2022): *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html.

Arpagaus, Cordin (2019): *Hochtemperatur-Wärmepumpen. Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale*. Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH.

Arpagaus, Cordin (2020): *Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel*. Hg. v. NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs.

Bacquet, Alexandre; Galindo Fernández, Marina; Oger, Alexis; Themessl, Niko; Fallahnejad, Mostafa; Kranzl, Lukas; Popovski, Eftim; Steinbach, Jan; Burger, Veit; Köhler, Benjamin; Braungardt, Sibylle; Billerbeck, Anna; Breitschopf, Barbara; Winkler, Jenny (2022): *District heating and cooling in the European Union: overview of markets and regulatory frameworks under the revised Renewable Energy Directive*. Hg. v. European Commission, Directorate-General for Energy. Luxembourg.

BASF (2022): *BASF und MAN Energy Solutions vereinbaren Zusammenarbeit für den Bau einer der weltgrößten Wärmepumpen in Ludwigshafen*. Online verfügbar unter <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2022/07/p-22-278.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Billerbeck, Anna; George, Jan Frederick; Müller, Paul Viktor; Winkler, Jenny; Timofeeva, Elena; Weidinger, Lisa; Greitzer, Maria; Hanßke, Anja; Nolden, Christoph; Jentsch, Andrej; Sercan-Çalışmaz, Kibriye (2023): *Analyse aktueller ökonomischer Rahmenbedingungen für Großwärmepumpen. Bericht Arbeitspaket 1*. Hg. v. Fraunhofer ISI, Fraunhofer IEG und Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW).

Boer, Robert de; Marina, Andrew; Zühlsdorf, Benjamin; Arpagaus, Cordin; Bantle, Michael; Wilk, Veronika; Elmegaard, Brian; Corberán, José; Benson, Jessica (2020): *Strengthening Industrial Heat Pump Innovation: Decarbonizing Industrial Heat*. Hg. v. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Danish Technological Institute, NTB – Die Interstaatliche Hochschule für Technik, Austrian Institute of Technology (SINTEF), Research Institutes of Sweden (RISE) und Polytechnic University of Valencia.

Born, Holger; Bracke, Rolf; Eicker, Timm; Rath, Michael (2022): *Roadmap Oberflächennahe Geothermie. Erdwärmepumpen für die Energiewende – Potenziale, Hemmnisse und Handlungsempfehlungen*. Hg. v. Fraunhofer IEG.

Boston Consulting Group (BCG); Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) (2021): *Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*.

Bracke, Rolf; Bussmann, Gregor; Eicker, Timm; Ignacy, Roman; Jagert, Felix; Danowski-Buhren, Christian; Schmidt, Benno (2018): *Potenzialstudie Warmes Grubenwasser*. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV).

Bracke, Rolf; Ernst, Huenges; Acksel, Daniel; Amann, Florian; Bremer, Judith; Bruhn, David et al. (2022): *Roadmap tiefe Geothermie für Deutschland. Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende. Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft*. Hg. v. Fraunhofer IEG und Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungszentrum (GFZ), Fraunhofer IEG, Fraunhofer IBP, Fraunhofer UMSICHT.

Breitschopf, Barbara; Wohlfarth, Katharina; Schломann, Barbara; Billerbeck, Anna; Preuß, Sabine; Bagheri, Mahsa; Berger, Frederic; Schmidt, Ralf-Roman; Stefanica, Dan; Muinzer, Thomas L. (2022): *Overview of heating and cooling. Perceptions, markets and regulatory frameworks for decarbonisation: final report*. Hg. v. European Commission. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2833/962558>, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Brunner, Florian; Krummenacher, Pier (2017): *Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode. Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen*. Zweite Auflage. Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Sektion Industrie und Dienstleistungen. Schweiz.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hg.) (2018): Merkblatt für innovative KWK-Systeme zur Darlegung der Zulassungsvoraussetzungen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) i. V. m. der KWK-Ausschreibungsverordnung (KWKAusV).

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hg.) (2022a): Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW). Modul 3: Antragstellung und Verwendungsnachweis. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/Effiziente_Waermenetze/effiziente_waermenetze_node.html, zuletzt geprüft am 15.03.2023.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Hg.) (2022b): Bundesförderung für effiziente Wärmenetze: technische Anforderungen der Module 1 bis 4. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/Effiziente_Waermenetze/effiziente_waermenetze_node.html, zuletzt geprüft am 12.12.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hg.) (2023): Wohlstand klimaneutral erneuern. Werkstattbericht des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/werkstattbericht-des-bmwk.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt geprüft am 30.03.2023.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hg.) (2023a): Marktstammdatenregister. Online verfügbar unter <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/>, zuletzt aktualisiert am 10.01.2023.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (Hg.) (2023b): Monitoringbericht 2022. Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i.V.m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i.V.m. § 53 Abs. 3 GWB. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Monitoringberichte/start.html>.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW) (Hg.) (2022): Die Energieversorgung 2022. Jahresbericht.

Bundesverband Erneuerbare Energien e. V. (BEE) (03.08.2022): BEW kann starten. Wichtiger erster Schritt für grüne Wärmenetze. Online verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/51135/5288415>, zuletzt geprüft am 13.10.2022.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2019): Gewerbeobjekte und Industrieanlagen mit Wärmepump. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/gewerbeobjekte-industrieanlagen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2020): Gienger: ein Unternehmen mit Geschichte und Vision. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/pressefahrten/rhein-neckar-kreis-2020/bibliothek-in-historischem-gebäude-heizt-und-kühlt-mit-geothermie0/#content>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2022a): Energiekonzept für Münchens Werksviertel. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/pressefahrten/raum-muenchen-2022/energiekonzept-fuer-muenchens-werksviertel/#content>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2022b): Innovative Heiztechnik. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/pressefahrten/raum-muenchen-2022/innovative-heiztechnik/#content>, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2022c): Wärme- und Kältekonzepte mit Großwärmepumpen. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/grosswaermepumpen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2023a):

AGO Calora Stadtwerke Neuburg. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-datenbank>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) (2023b):

Referenzobjekte. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-datenbank/>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Carrier (2023): *Klimatisierung & Heizung.* Online verfügbar unter <https://www.carrier.com/commercial/de/de/produkte/klimatisierung-und-heizung/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Combitherm (2023): *Wärmepumpen.* Online verfügbar unter <https://www.combitherm.de/produkte-und-loesungen/waermepumpen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Danish Energy Agency (Hg.) (2022): *Energy Statistics 2021.* Online verfügbar unter <https://ens.dk/en/our-services/statistics-data-key-figures-and-energy-maps/annual-and-monthly-statistics>.

Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2020): *Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung.* Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energiewende_Politik/agfwleitfaden_ansicht_es.pdf.

Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2022): *AGFW Hauptbericht 2021.* Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>.

Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW), Andrej Jentsch (2023a), 13.02.2023. *E-Mail an Fraunhofer IEG.*

Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2023b): *Reallabor der Energiewende: Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen.* Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/reallabor-gwp/>, zuletzt aktualisiert am Januar 2023, zuletzt geprüft am 09.03.2023.

Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2023c): *Bau eines iKWK-Systems in Lemgo.* Online verfügbar unter <https://www.gruene-fernwaerme.de/praxisbeispiele/lemgo>, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2021): *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe.* Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2022): *Abschlussbericht: Erkenntnisse aus dem Stakeholderdialog industrielle Produktionskapazitäten für die Energiewende (StiPE). Entwurf einer industriepolitischen Strategie für Erneuerbare Energien und Stromnetze.* Unter Mitarbeit von Philine Wedell, Joscha Müller, Shervin Balali, Philipp Barthel, Mirko Bolsenbroek, Tibor Fischer et al.

Dierks, Stefanie (2022): *Ostsee soll Wärme für neues Quartier liefern.* Hg. v. energate messenger. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/228893/ostsee-soll-waerme-fuer-neues-quartier-liefern>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft, Sabine Tiepelmann (2023), 23.02.2023. *E-Mail an Fraunhofer IEG.*

Ecke, Julius; Göke, Leonard (2017): *Energie aus Abwasser: Das bislang unbekanntes Potential für die Wärmewende.* Hg. v. enervis energy advisors GmbH.

enercity (2022): *Enercity stellt Anlagen für Wärme-wende vor und ruft Hannover zum Energiesparen auf.* Online verfügbar unter <https://www.enercity.de/presse/pressemitteilungen/2022/enercity-stellt-anlagen-fuer-waermewende-vor-und-ruft-hannover-zum-energiesparen-auf>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

energie.de (2021): *Großwärmepumpen zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung.* Online verfügbar unter <https://www.energie.de/euroheatpower/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/gross-waermepumpen-zur-dekarbonisierung-der-waermeversorgung/np/2>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

energie-experten (2023a): *Dettenhauseneer Wärmenetz nutzt BHKW-Abwärme.* Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/projekte/dettenhausener-waermenetz-waermepumpe-nutzt-bhk-w-abwaerme>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

energie-experten (2023b): *Spatenstich für iKWK in Stein.* Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/projekte/spatenstich-fuer-ikwk-in-stein>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Energiewendebauen (2023): *Start Reallabor der Energiewende GWP.* Online verfügbar unter <https://www.energiewendebauen.de/projekt/neu-gross-waermepumpen-in-deutschen-fernwaermenetzen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

enertime (2023): *Very High Temperature Heat Pump and Steam Generation Heat Pump.* Online verfügbar unter <https://www.enertime.com/en/solutions/heat-pumps>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Engie Refrigeration (2023): *ENGIE Refrigeration in Zahlen.* Online verfügbar unter <https://www.engie-refrigeration.de/de>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Euroheat & Power (2022): *Large Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems.* Online verfügbar unter <https://www.euroheat.org/resource/report-large-heat-pumps-in-district-heating-and-cooling-systems.html>.

Europäische Kommission (EK) (Hg.) (2022): *5548 final, 2.8.2022, State Aid SA.63177 (2022/N). Germany Federal support for efficient heat networks.* Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/competition/elojade/isef/case_details.cfm?proc_code=3_SA_63177.

European Commission (2023): *Communication: A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age.* Online verfügbar unter https://commission.europa.eu/document/41514677-9598-4d89-a572-abe21cb037f4_en. European Chemicals Agency (ECHA) (2023): *Annex XV RESTRICTION REPORT. PROPOSAL FOR A RESTRICTION.* Online verfügbar unter www.echa.europa.eu/.

European Chemicals Agency (ECHA) (2023): *Annex XV RESTRICTION REPORT. PROPOSAL FOR A RESTRICTION.* Online verfügbar unter www.echa.europa.eu/.

Fédération des opérateurs d'efficacité énergétique et de chaleur renouvelable (FEDENE); Syndicat National du Chauffage Urbain et de la Climatisation Urbaine (SNCU) (Hg.) (2022): *Enquête des Réseaux de Chaleur et de Froid. Édition 2022.* Online verfügbar unter <https://reseaux-chaleur.cerema.fr/espace-documentaire/enquete-nationale-annuelle-des-reseaux-chaleur-et-froid>.

Fenagy (2023): *Heat Pumps.* Online verfügbar unter <https://www.fenagy.dk/en/products-heat-pumps>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Fischer, Dennis (2022): *Energiepark Tiefstack soll Hamburger Kohleausstieg vollenden.* Hg. v. energate messenger. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/223279/energie-park-tiefstack-soll-hamburger-kohleausstieg-vollenden>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin E&R (2021): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. TN-Szenarien.* Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/>.

Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin E&R (2022a): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland.* Webinar zum Energieangebot / Umwandlungssektor.

Fraunhofer ISI; Consentec; ifeu; TU Berlin E&R (2022b): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. T45-Szenarien.* Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/>.

Friotherm (2023): *Produkte: Unitop® – dauerhaft und effizient.* Online verfügbar unter <https://www.friotherm.de/produkte/unitop/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Fritz, Sara; Pehnt, Martin (2018): *Kommunale Abwässer als Potenzial für die Wärmewende?* Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Online verfügbar unter <https://www.ifeu.de/publikation/kommunale-abwaesser-als-potenzial-fuer-die-waermewende/>.

Gaudard, Adrien; Schmid, Martin; Wüest, Alfred (2018): *Thermische Nutzung von Seen und Flüssen. Potenzial der Schweizer Oberflächengewässer.* In: Aqua & Gas N°2.

GEA (2023): *Wärmepumpen.* Online verfügbar unter <https://www.gea.com/de/products/refrigeration-heating/heat-pumps/index.jsp?i=refrigeration-heating>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Gerhardt, Norman; Ganal, Irina; Jentsch, Mareike; Rodriguez, Juan; Stroh, Kilian; Buchmann, Elisabeth Klara (2019): *Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 Prozent THG Klimazielszenarien.* Fraunhofer IEE.

Gerhardt, Norman; Zimmermann, Britta; Ganal, Irina; Pape, Angela; Giron, Pedro; Ghosh, Debraj; Dörre, Elias; Kallert, Anna; Yu, Young-Jae (2021): *Transformationspfade im Wärmesektor – Betriebs- und volkswirtschaftliche Betrachtung der Sektorkopplung mit dem*

Fokus Fernwärme mit hohen Anteilen konventioneller KWK-Erzeugung und Rückkopplung zum Gesamtenergieversorgungssystem. Online verfügbar unter <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/transformationspfade-im-waermesektor.html>, zuletzt geprüft am 01.08.2022.

Government Offices of Sweden (2023): *Sweden's carbon tax. Government Offices of Sweden.* Online verfügbar unter <https://government.se/government-policy/swedens-carbon-tax/swedens-carbon-tax/>, zuletzt aktualisiert am 2023, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Grosse, Robert; BinderChristopher; Wöll, Stefan; Geyer, Roman; Steffen, Robbi (2017): *Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU.* EUR 28859 EN. Publications Office of the European Union. Luxembourg.

Heaten (2023): *The HeatBooster.* Online verfügbar unter <https://www.heaten.com/product/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Hochmuth, Sebastian (2022): *Großwärmepumpen Rosenheim.* Hg. v. Stadtwerke Rosenheim (SW.aktiv).

Holdingshausen, Heike (2022): *Wärmewende aus der Tiefe. Der Clou von Schwerin.* Online verfügbar unter <https://taz.de/Waermewende-aus-der-Tiefe/!5883053/>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Hybrid Energy (2023): *Products.* Online verfügbar unter <https://www.hybridenergy.no/products/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

International Energy Agency (IEA) (Hg.) (2018-2024): *Annex TS4. Digitalisation of District Heating and Cooling.* Online verfügbar unter <https://www.iea-dhc.org/the-research/annexes/2018-2024-annex-ts4>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

International Energy Agency (IEA) (2021-2025a): *Annex TS6. Status Assessment, Ageing, Lifetime Prediction and Asset Management of District Heating Pipes.* Online verfügbar unter <https://www.iea-dhc.org/the-research/2021-2025-annex-ts6>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

International Energy Agency (IEA) (2021-2025b): *Annex TS7. Industry-DHC Symbiosis.* Online verfügbar unter <https://www.iea-dhc.org/2021-2025-annex-ts7>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

International Energy Agency (IEA) (2022a): *Annex 58. High-Temperature Heat Pumps. Cascade Heat Pump System for District Heating.* Online verfügbar unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/johnsonhthpannex58.pdf>.

International Energy Agency (IEA) (2022b): *High-Temperature Heat Pumps – IEA HPT TCP ANNEX58.* Unter Mitarbeit von Benjamin Zühlsdorf und Jonas Lundsted Poulsen. Online verfügbar unter www.heatpumpingtechnologies.org/annex58.

International Energy Agency (IEA) (2023a): *Annex 58. High-Temperature Heat Pumps.* Online verfügbar unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/mvr-hp-epcon-evaporation-technology.pdf>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

International Energy Agency (IEA) (2023b): *Annex 58. Task 1: Technologies – State of the art and ongoing developments for systems and components.* Online verfügbar unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>, zuletzt geprüft am 13.04.2023.

International Energy Agency (IEA) (2023c): *Annex 59. Heatpumps for drying.* Online verfügbar unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex59/>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Jakobs; Stadtländer (2020): *Industrial Heat Pumps, Second Phase.* Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter <https://waermepumpe-izw.de/wp-content/uploads/2021/04/IEA-HPT-TCP-Annex-48.pdf>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Jakobs, Rainer (2017): *Annex 35 + 48. Heat Pump Applikation in Commercial and Industrial Processes.* Hg. v. International Energy Agency (IEA). Online verfügbar unter https://waermepumpe-izw.de/wp-content/uploads/2020/05/2017_09_-WS_HTHP_IEA-HPT-A48_Jakobs.pdf, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Johnson Controls (2023). *Wärmepumpenlösungen.* Online verfügbar unter https://www.johnsoncontrols.com/de_de/hvac/waerme-pumpen-loesungen, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

K21 media GmbH (Hg.) (2023): *Kooperation zur Abwärmenutzung.* Online verfügbar unter https://www.stadt-und-werk.de/meldung_40399_Kooperation+zur+Abw%C3%A4rmenutzung.html, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Kammer, Henriette (2018): *Thermische Seewassernutzung in Deutschland. Bestandsanalyse, Potential und Hemmnisse seewasserbetriebener Wärmepumpen.* Wiesbaden: Springer Fachmeien Wiesbaden.

Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA-BW) (2022): *Technikkatalog zur kommunalen Wärmeplanung in Baden-Württemberg.* Online verfügbar unter <https://www.kea-bw.de/waermewende/wissensportal/technik-katalog>, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

KKT Chillers (2023): *Hochleistungswärmepumpe – Magma.* Online verfügbar unter <https://www.kkt-chillers.com/prozesskuehlung/thermodynamix/magma.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Kreiskrankenhaus Freiberg (2023): *Silberbergwerk als energetische Goldgrube*. Online verfügbar unter <https://www.kkh-freiberg.com/ueber-uns/gute-gruende-fuer-uns/energetische-optimierung/>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Mateu-Royo, Carlos; Arpagaus, Cordin; Mota-Babiloni, Adrián; Navarro-Esbrí, Joaquín; Bertsch, Stefan S. (2021): *Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study*. In: *Energy Conversion and Management* 229, S. 113752. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113752.

Mayekawa (2023): *Produkte*. Online verfügbar unter <http://www.mayekawa.eu/de/produkte>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Mellwig, Peter (2022): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Energienachfrage Gebäudesektor*. Folien zum Webinar. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>.

Mellwig, Peter; Lempik, Julia; Blömer, Sebastian; Pehnt, Martin (2021): *Langfristszenarien 3. Modul Gebäude*. Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS-Gebaeude.pdf>.

Menzel, Nora (2022): *Großwärmepumpe bei Evonik in Herne erzeugt Fernwärme fürs Ruhrgebiet*. Hg. v. Chemie Technik. Online verfügbar unter <https://www.chemietechnik.de/energie-utilities/grosswaermepumpe-bei-evonik-in-herne-erzeugt-fernwaerme-fuers-ruhrgebiet-841.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) (2023): *CO₂-Bepreisung zur Erreichung der Klimaneutralität im Verkehrs- und*

Gebäudesektor: Investitionsanreize und Verteilungswirkungen. Unter Mitarbeit von Matthias Kalkuhl, Maximilian Kellner, Tobias Bergmann und Karolina Rütten.

Mitsubishi (2023): *Water to Water. Centrifugal Heat Pump*. Online verfügbar unter <http://mitsubishivrf.net/katalog/mitsubishi-heavy-industries-etw-sudan-suya-isi-pompasi.pdf>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

MVV Umwelt GmbH (2023): *R(h)ein mit der Wärme. MVV installiert eine der größten Flußwärmepumpen Europas*. Online verfügbar unter <https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/mvv-flusswaermepumpe?category=0&question=1996>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Nekså, Petter; Bantle, Michael; Schlemminger, Christian; Bamigbetan, Opeyemi (2019): *High temperature industrial heat pumps utilising natural working fluids*. Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montréal, Canada, August 24-30, 2019. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.18462/iir.icr.2019.1253>

Norsk Fjernvarme (2023): *Energikilder*. Online verfügbar unter <https://www.fjernvarme.no/fakta/energikilder>, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Ochsner (2023a): *Höchsttemperatur-Baureihen (IWWDS, ISWDS, IWWDSS)*. Online verfügbar unter <https://ochsner-energietechnik.com/hoechsttemperatur-waermepumpen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Ochsner (2023b): *Ochsner Energietechnik Referenzprojekte*. Online verfügbar unter <https://ochsner-energietechnik.com/referenzen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Oilon (2023): *Industrielle Wärmepumpen und Wasserkühler. ChillHeat*. Online verfügbar unter <https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/11/Oilon-ChillHeat-DE.pdf>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Olvondo (2023): *The Technology. What is a high temperature heat pump and how does it work?* Online verfügbar unter <https://www.olvondotech.no/the-technology/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Pachai, Alexander; Normann, Jeannett; Arpagaus, Cordin; Hafner, Armin (2021): *Screening of Future-Proof Working Fluids for Industrial High-Temperature Heat Pumps up to 250 °.* In: 9th IIR Conference: Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies.

Pieper, Henrik; Ommen, Torben; Buhler, Fabian; Paaske, Bjarke Lava; Elmegaard, Brian; Markussen, Wiebke Brix (2018): *Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating.* In: Energy Procedia 147, S. 358–367. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.104.

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2021): *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich (Kopernikus-Projekt Ariadne).* Online verfügbar unter <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>.

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2022): *Kopernikus-Projekt Ariadne. Szenarienvergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien.* Unter Mitarbeit von Luderer, Kost und Sörgel. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/>.

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.* Hg. v. Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-vollversion/>.

Sachverständigenrat für Verbraucherfragen (SVRV) (2022): *Eine faire CO₂-Bepreisung macht es Verbraucher*innen leicht, sich klimafreundlich zu*

entscheiden. Unter Mitarbeit von Christian Gross, Veronika Grimm und Gert G. Wagner.

Seipp, Allegra; Grüning, Christine; Moslener, Ulf (2016): *Absicherung von Fündigkeitsrisiken bei Geothermieprojekten.* Report Nr. 01/2016. Hg. v. Frankfurt School – UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance.

Siemens Energy (2021): *Vattenfall und Siemens Energy treiben mit Großwärmepumpe die klimafreundliche Wärmeversorgung Berlin voran.* Online verfügbar unter <https://press.siemens-energy.com/global/de/pressemitteilung/vattenfall-und-siemens-energy-treiben-mit-grosswaermepumpe-die-klimafreundliche>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Siemens Energy (2023a): *Heat Pumps. Proven high and low temperature heat pumps for up to 150°C and 70 MWth.* Online verfügbar unter <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/heat-pumps.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Siemens Energy (2023a): *Large-scale Industrial Heat Pumps.* Online verfügbar unter <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/heat-pumps.html>.

Soroka, Bohdan (2015): *Application Note – Industrial Heat Pumps.* Hg. v. European Copper Institute.

SRM (2023): *SRMTEC Group.* Online verfügbar unter <https://www.srmtec.group/index-2.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Stadt Heidelberg (2022): *Flusswärmepumpe wird künftig Baustein für klimaneutrale Wärmeversorgung sein, zuletzt aktualisiert am* https://www.heidelberg.de/hd/HD/service/24_05_2022+flusswaermepumpe+wird+kuenftig+baustein+fuer+klimaneutrale+warmerversorgung+sein.html, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Stadtwerke Cottbus, Patrik Hillwig (2023), 27.03.2023. *E-Mail an Fraunhofer IEG.*

Stadtwerke Heidelberg, Tobias Enders (2023), 27.02.2023. *E-Mail an Fraunhofer IEG.*

Stadtwerke Kiel (2023): *Dekarbonisierung der Kieler Fernwärme.* Online verfügbar unter <https://www.stadtwerke-kiel.de/privatkunden/angebote-tarife/waerme/waermewende-kiel/dekarbonisierung-der-kieler-fernwaerme>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Stadtwerke Münster (2023): *Erster Baustein für grüne Wärme entsteht im Hafen.* Online verfügbar unter <https://www.stadtwerke-muenster.de/presse/pressemitteilungen/gesamt/nachricht/artikel/erster-baustein-fuer-gruene-waerme-entsteht-im-hafen.html>.

Stadtwerke Schwerin (2022): *Geothermie in Schwerin: Wärmepumpen wurden geliefert.* Online verfügbar unter <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/stadtwerke-schwerin-gmbh/geothermie-in-schwerin-waermepumpen-wurden-geliefert/boxid/1126438>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Stadtwerke Stuttgart (2023): *Klimaneutral: Quartier am Neckarpark.* Online verfügbar unter <https://www.stadtwerke-stuttgart.de/partner-der-energiewende/neckarpark/>, zuletzt geprüft am 17.01.2023.

Star Refrigeration (2023): *Water Source Heatpump.* Online verfügbar unter <https://www.star-ref.co.uk/products/heat-pumps/water-source-heat-pump-heatpump/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Stathopoulos, Panos (2022): *Wärmepumpen als eine Option zur Elektrifizierung und Dekarbonisierung des Industriellen Wärmebedarfs – Die neuartigen DLR-Hochtemperatur-Wärmepumpen.* DLR, 2022.

Statistisches Amt der Europäischen Kommission (Eurostat) (2023a): *Elektrizitätspreiskomponenten für Nichthaushaltskunde, ab 2007 – jährliche Daten.* Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205_c/default/table, zuletzt aktualisiert am 02.02.2023, zuletzt geprüft am 22.02.2023.

Statistisches Amt der Europäischen Kommission (Eurostat) (2023b): *Gaspreiskomponenten für Nichthaushaltskunden – jährliche Daten.* Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_203_c/default/table, zuletzt aktualisiert am 02.02.2023, zuletzt geprüft am 22.02.2023.

Statistisches Amt der Europäischen Kommission (Eurostat) (2023c): *Preise Elektrizität für Nichthaushaltskunde, ab 2007 – halbjährliche Daten.* Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205/default/table, zuletzt aktualisiert am 24.01.2023, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Statistisches Amt der Europäischen Kommission (Eurostat) (2023d): *Preise Gas für Nichthaushaltskunde, ab 2007 – halbjährliche Daten.* Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_203/default/table, zuletzt aktualisiert am 01.02.2023, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Statistiska centralbyrån (SCB) (2022): *District heating (GWh).* Online verfügbar unter <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/energy-supply-and-use/annual-energy-statistics-electricity-gas-and-district-heating/pong/tables-and-graphs/district-heating-gwh/>, zuletzt aktualisiert am 27.10.2022, zuletzt geprüft am 16.03.2023.

Stobbe, Lutz; Proske, Marina; Zedel, Hannes; Hintemann, Ralph; Clausen, Jens; Beucker, Severin (2015): *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland.* Fraunhofer IZM; Borderstep Institut.

Swegon (2023): *Luft Luft Wärmepumpe & Co.: Wärmepumpen und Kaltwassererzeuger zum Heizen und Kühlen.* Online verfügbar unter <https://www.swegon.com/de/produkte/kuhlen--heizen/>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Teuffer, Mareike (2022): *Hamburg plant 60 MW-Abwasser-Wärmepumpe.* Hg. v. energate messenger. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/226723/hamburg-plant-60-mw-abwasser-waermepumpe>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

The World Bank (Hg.) (2022): *Carbon Pricing Dashboard.* Online verfügbar unter https://carbonpricing-dashboard.worldbank.org/map_data, zuletzt aktualisiert am 01.04.2022.

Tix, Michaela (2022a): *Ibbenbüren: Luftwärmepumpe halbiert den Primärenergiefaktor.* Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/220415/ibbenbueren-luftwaermepumpe-halbiert-den-primaeerenergiefaktor>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Tix, Michaela (2022b): *Stadtwerke Gotha prüfen zwei Optionen zur Großwärmepumpe.* Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/226563/stadtwerke-gotha-pruefen-zwei-optionen-zur-grosswaermepumpe>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Tix, Michaela (2022c): *Stadtwerke Münster bauen Groß-Wärmepumpe am Kanal.* Hg. v. energate messenger. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/225036/stadtwerke-muenster-bauen-gross-waermepumpe-am-kanal>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Tix, Michaela (2023): *Bad Salzuflen plant drei Wärmepumpen am Klärwerk.* Hg. v. energate messenger. Online verfügbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/229573/bad-salzuflen-plant-drei-waermepumpen-am-klarwerk>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Turboden (2023): *Large Heat Pump.* Online verfügbar unter <https://www.turboden.com/solutions/2602/large-heat-pump>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Umweltbundesamt (UBA) (2017): *Prognos AG, Fraunhofer ISI, TU München im Auftrag des Umweltbundesamtes: Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005–2014.* Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-01-09_cc_01-2017_endbericht-datenbasis-energieeffizienz.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2022): *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid – Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2020.* Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-8>.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2023a): *Dekarbonisierung von Energieinfrastrukturen. Ein politischer Unterstützungsrahmen für das Beispiel Wärmenetze.* Unter Mitarbeit von Sara Ortner, Martin Pehnt, Margarete Over, Sebastian Blömer, Susanne Ochse, Ziegler, Roland, Bohm, Kerstin et al. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dekarbonisierung-von-energieinfrastrukturen>.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2023b): *Öffentliche Abwasserentsorgung.* Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-abwasserentsorgung#rund-10-milliarden-kubikmeter-abwasser-jahrlich>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2023c): *Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2022 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Begleitender Bericht.* Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/vjs_2022_-_begleitbericht_final_kurzfassung.pdf.

umweltwirtschaft.com (2023): *Berlin steckt voller Energie. Erstes Flusswasser-Kraftwerk in Berlin.* Online verfügbar unter <https://www.umweltwirtschaft.com/news/energie/Berlin-steckt-voller-Energie-Erstes-Flusswasser-Kraftwerk-in-Berlin--28131>.

Vattenfall (2022): *Neue Wärmepumpe für das Stadtwärmenetz in Berlin Buch.* Online verfügbar unter <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/news/2022/neue-waermepumpe-stadtwaerme-berlin>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Viessmann (2023a): *Wärmepumpe.* Online verfügbar unter <https://www.viessmann.de/de/wissen/technik-und-systeme/waermepumpe.html>, zuletzt geprüft am 05.04.2023.

Viessmann (2023b): *Referenzen.* Online verfügbar unter <https://www.viessmann.de/de/referenzen.html>, zuletzt geprüft am 06.01.2023.

VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 (2012): *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.*

Wolf, Stefan (2017): *Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme. Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung.* Universität Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER).

Zeitung für kommunale Wirtschaft (Hg.) (2022): *Stadtwerke Flensburg bauen Großwärmepumpe bis 2025.* Online verfügbar unter <https://www.zfk.de/energie/waerme/stadtwerke-flensburg-bauen-gwp-bis-2025-klimaneutralitaet-grosswaerme-pumpe>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

A.1 Übersicht Großwärmepumpenprojekte und detaillierte Beschreibung ausgewählter Projekte

Übersicht Großwärmepumpenprojekte in Wärmenetzen							Tabelle 6
Wärmequelle	Status	Thermische Leistung	Temperatur Wärmequelle	Vorlauf-temperatur	COP	Quellen	
Abwärme	in Betrieb	0,5 MW	–	–	–	BWP (2022c)	
Abwärme (Industriell)	geplant	≥ 0,5 MW	–	bis zu 130 °C	–	Menzel (2022)	
Abwärme (Kältemaschine)	in Betrieb	8,0 MW	32 °C	85–120 °C	ca. 3,0	Siemens Energy (2021)	
Abwärme (Kältemaschine)	in Betrieb	1,2 MW	–	–	–	BWP (2022a)	
Abwärme (Kraftwerk)	in Bau	2,0 MW	–	120 °C	–	Stadtwerke Münster (2023)	
Abwärme (Kraftwerk)	in Bau	20,5 MW	7,5–28 °C Winter: 7,5–20 °C	90 °C	2,8	Energiewendebauen (2023); AGFW (2023a)	
Abwärme (Kraftwerk)	in Bau	1,2 MW	38–48 °C	80 °C	5,4	AGFW (2023a); Energie-wendebauen (2023)	
Abwärme (Kraftwerk)	in Betrieb	≥ 0,5 MW	–	–	–	energie-experten (2023a)	
Abwärme (Kraftwerk)	in Betrieb	0,7 MW	40 °C	65 °C	6,4	Vattenfall (2022)	
Abwasser und Kläranlagen	geplant	0,5 MW	–	–	–	Tix (2023)	
Abwasser und Kläranlagen	geplant	4,0 MW	10–25 °C	75–85 °C	2,5–3,3	Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft (2023)	
Abwasser und Kläranlagen	geplant	60 MW	ca. 14 °C	85 °C	ca. 3	Teuffer (2022)	
Abwasser und Kläranlagen	in Betrieb	2,4 MW	13 °C (mittlere Temperatur)	90 °C	2,7	energie.de (2021)	
Abwasser und Kläranlagen	in Betrieb	3,0 kW	–	–	–	Stadtwerke Stuttgart (2023)	
Außenluft	geplant	0,8 MW	–	–	–	Tix (2022a)	
Außenluft	in Bau	1,4 MW	Betrieb ab 13 °C	85 °C	2,8	Stadtwerke Heidelberg (2023)	
Außenluft	in Bau	0,9 MW	–	–	–	energie-experten (2023b)	
Außenluft	in Betrieb	1,4 MW	–	–	–	BWP (2022c)	

Wärmequelle	Status	Thermische Leistung	Temperatur Wärmequelle	Vorlauf-temperatur	COP	Quellen
Flusswasser	geplant	230 MW	–	–	–	Fischer (2022)
Flusswasser	geplant	≥ 0,5 MW	–	–	–	Stadt Heidelberg (2022)
Flusswasser	geplant	2,0 MW	–	–	–	Tix (2022c)
Flusswasser	in Bau	20,5 MW	3–25°C Winter: 3–12°C	83–99°C	2,5–3,0	MVV Umwelt GmbH (2023)
Flusswasser	in Bau	4,7 MW	3–21°C Winter: 3–12°C	88°C	2,5–2,8	Hochmuth (2022)
Flusswasser	in Bau	7,0 MW	Betrieb ab 8°C	95°C	ca. 2,5	umweltwirtschaft.com (2023)
Flusswasser	in Betrieb	1,0 MW	–	–	–	AGFW (2023c)
Grubenwasser	geplant	3,0 MW	18°C	48°C	–	Fraunhofer IEG
Grubenwasser	in Bau	0,5 MW	60°C	80–120°C	–	IEA (2022a)
Grundwasser	in Betrieb	2,0 MW	–	–	4	BWP (2023b)
Meereswasser	geplant	≥ 0,5 MW	–	60–85°C	–	Zeitung für kommunale Wirtschaft (2022)
Meereswasser	geplant	0,7 MW	min. 4°C	–	–	Dierks (2022)
Meereswasser	geplant	50–80 MW	2–25°C	80–115°C	–	Stadtwerke Kiel (2023)
Oberflächennahe Geothermie	in Betrieb	0,8 MW	–	–	–	BWP (2023b)
Seewasser	geplant	35 MW	4–15°C	95–125°C	> 2,5	Stadtwerke Cottbus (2023)
Server und Rechenzentren	geplant	20,0 MW	–	–	–	K21 media GmbH (2023)
Tiefe Geothermie	geplant	7,4 MW	56°C	75–80°C	–	Holdingshausen (2022); Stadtwerke Schwerin (2022)
Grundwasser und Abwärme (Kältemaschine)	in Betrieb	1,2 MW	40°C	60°C	3,6	BWP (2023b)
Umgebungsluft oder oberflächennahe Geothermie	geplant	1,2 MW	–	–	–	Tix (2022b)
Mehrere Wärmequellen	geplant	1,2 MW	–	–	–	Energiewendebauen (2023)
keine Angabe	in Bau	≥ 0,5 MW	–	–	–	enercity (2022)

Fraunhofer IEG basierend auf Quellen (siehe letzte Spalte)

Übersicht Großwärmepumpenprojekte in der dezentralen Wärmeversorgung und in industriellen Prozessen

Tabelle 7

Wärmequelle	Status	Thermische Leistung	Temperatur Wärmequelle	Vorlauf-temperatur	COP	Quellen
Abwärme	in Betrieb	3,5 MW	–	58 °C	–	Jakobs (2017)
Abwärme	in Betrieb	1,7 MW	26–29 °C	75 °C	5,6	Jakobs und Stadtländer (2020)
Abwärme	in Betrieb	0,8 MW	–	90 °C	–	Jakobs und Stadtländer (2020)
Abwärme (Industriell)	geplant	120 MW	–	–	–	BASF (2022)
Abwärme (Industriell)	in Betrieb	3,3 MW	23 °C	35 °C	6,3	Jakobs und Stadtländer (2020)
Abwärme (Kraftwerk)	in Betrieb	10 MW	39 °C	78 °C	4,5	Jakobs und Stadtländer (2020)
Abwärme (Wärmenetz)	in Betrieb	1,0 MW	–	–	4,5	BWP (2023a)
Abwasser und Kläranlagen	in Betrieb	1,5 MW	10 °C	40 °C	–	Ochsner (2023b)
Außenluft	in Betrieb	1,4 MW	–	–	–	BWP (2020)
Grubenwasser	in Betrieb	0,9 MW	14 °C	bis zu 70 °C	–	Kreiskrankenhaus Freiberg (2023)
Grundwasser	in Betrieb	1,3 MW	–	–	–	BWP (2023b)
Grundwasser	in Betrieb	4,9 MW	–	–	–	BWP (2019)
Grundwasser	in Betrieb	4,5 MW	10 °C	50 °C	4,7–5,8	BWP (2019)
Grundwasser	in Betrieb	0,9 MW	10–12 °C	–	–	BWP (2022b)
Grundwasser	in Betrieb	1,6 MW	10 °C	55 °C	5,6	Viessmann (2023b)
Oberflächennahe Geothermie	in Betrieb	1,7 MW	–	–	4,2	BWP (2023b)
Oberflächennahe Geothermie	in Betrieb	1,0 MW	–	–	–	BWP (2023b)
Oberflächennahe Geothermie	in Betrieb	1,4 MW	–	–	3	BWP (2023b)

Fraunhofer IEG basierend auf Quellen (siehe letzte Spalte)

Steckbrief Duisburg

Abwasser-Wärmepumpe Duisburg

Betreiber	Stadtwerke Duisburg AG	
weitere Projektbeteiligte	Wirtschaftsbetriebe Duisburg AöR	
Standort	Duisburg-Huckingen (DE)	
Objekttyp	Abwasserwärmepumpe für Fernwärme	
Inbetriebnahme	geplant 1. Quartal 2025	
Wärmequelle	Abwasser (Reinwasser Kläranlage), Volumenstrom stark schwankend	
	Temperatur Wärmequelle: 10–25 °C	
Wärmesenke	Fernwärme (Vorlauftemperatur Wärmenetz: 75–130 °C)	
	Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 75–85 °C	
COP	2,5–3,3	

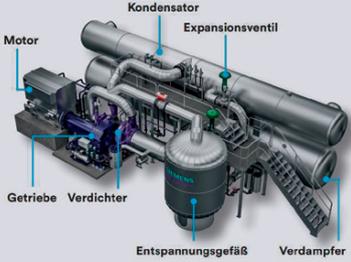
Technische Daten

Hersteller Wärmepumpe	noch offen		
Fabrikat	noch offen		
Thermische Leistung	Wärme: 2 x 2 MW		
Elektrische Leistung	noch offen (Lastbereich: noch offen)		
Kompressor	noch offen		
Kältemittel	R717 (Ammoniak, natürliches Kältemittel)		
Abmessungen	noch offen	Gewicht	noch offen
Schalldruckpegel	noch offen		
Betriebsstunden	geplant 4.000 h pro Jahr		
Zusätzliche Systeme	Gasmotor (2 x 4,5 MW), Elektrokessel (30 MW) an anderem Standort		
Wärmespeicher	nein		

CO₂-Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung

CO ₂ -Vermeidung	noch offen
Investitionsvolumen	noch offen
Förderung	iKWK-Zuschlag, Zuschlag Juni 2021

Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft; Tiepelmann, Sabine (2021): iKWK-Stadtwerke Pitch. Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=0HTHmZuSakQ>, zuletzt geöffnet am 24.01.2023. Duisburger Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft (2023); Korrespondenz zw. S. Tiepelmann und Fraunhofer IEG energie.de (2021): Stadtwerke Duisburg errichten größte iKWK-Anlage Deutschlands an einer Kläranlage. Online verfügbar unter <https://www.energie.de/euroheatpower/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/stadtwerke-duisburg-errichten-groesste-ikwk-anlage-deutschlands-an-einer-klaeranlage>, zuletzt geöffnet am 24.01.2023.

Steckbrief Flusswasser-Wärmepumpe Mannheim		
Reallabor – Mannheim		
Betreiber	MVV AG	
Weitere Projektbeteiligte	IER Universität Stuttgart, Fraunhofer ISE, AGFW	
Standort	Mannheim (DE)	
Objekttyp	Flusswärmepumpe für Fernwärmenetz	
Inbetriebnahme	geplant in 2023	
Wärmequelle	Flusswasser	
	Temperatur Wärmequelle: 3–25 °C; während Heizperiode: 3–12 °C	
Wärmesenke	Fernwärme (Vorlauftemperatur Fernwärmenetz: 83–129,9 °C)	
	Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 83–99 °C	
COP	2,5–3,0 (JAZ geplant 2,7)	
Technische Daten		
Hersteller Wärmepumpe	Siemens Energy	
Fabrikat	SHP 600	
Thermische Leistung	Wärme: 20,5 MW	
Elektrische Leistung	7 MW (Lastbereich: 65–100 Prozent)	
Kompressor	Radialverdichter	
Kältemittel	R1234ze(E) (HFO, synth. Kältemittel), ~12.000kg	
Abmessungen	18 x 8,8 x 5,3 m	Gewicht: 142 t
Schalldruckpegel	(1 m) 97 dB(A)	
Betriebsstunden	2.000 h pro Jahr	
Zusätzliche Systeme	4 Steinkohle-Heizkraftwerksblöcke (insgesamt 1.500 MW)	
Wärmespeicher	43.000 m ³ , 1.500 MWh	
CO ₂ -Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung		
CO ₂ -Vermeidung	10.000 t pro Jahr	
Investitionsvolumen	800 €/kW, gesamt 15 Mio. €	
Förderung	BMWK Reallabor	
<p>MVV Umwelt GmbH (2023): Grüne Wärme aus dem Rhein. Von der Idee zur Planung der MVV-Flusswärmepumpe, im Rahmen der AG-FW-Veranstaltung SW.aktiv am 04.10.2022. MVV: R(h)ein mit der Wärme. MVV installiert eine der größten Flusswärmepumpen Europa. Online verfügbar unter https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/mvv-flusswaermepumpe?category=0&question=1996, zuletzt geöffnet am 24.01.2023. AGFW (2022): Korrespondenz zw. Dr. A. Jentsch (AGFW) und Fraunhofer IEG</p>		

Steckbrief Flusswasserwärmepumpe Rosenheim

Reallabor-Rosenheim

Betreiber	Stadtwerke Rosenheim	
Weitere Projektbeteiligte	IER Universität Stuttgart, Fraunhofer ISE, AGFW	
Standort	Rosenheim (DE)	
Objekttyp	Bachwasserwärmepumpe für Fernwärmenetz	
Inbetriebnahme	geplant in 2022/2023	
Wärmequelle	Flusswasser, gereicht und gesiebt	
	Temperatur Wärmequelle: 3–21°C; während Heizperiode: 3–12°C	
Wärmesenke	Fernwärme	
	Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 88°C, anschließend Temperaturerhöhung auf 90–120°C durch Dampf-Wärmeübertrager aus Müllverbrennungsanlage	
COP	2,5–2,8	

Technische Daten

Hersteller Wärmepumpe	Johnson Controls	
Fabrikat	SaBROE/NS-DualPAC	
Thermische Leistung	Wärme: 3 x 1.566 kW; Kälte: 3 x 1.105 kW	
Elektrische Leistung	3 x 628 kW (Lastbereich: 40–100 Prozent)	
Kompressor	Doppelstufiges Aggregat aus Schrauben- und Kolbenverdichter	
Kältemittel	R717 (Ammoniak, natürliches Kältemittel), ca. 3 x 260 kg	
Abmessungen	6,7 x 4,0 x 2,6 m je WP	Gewicht: 19 t je WP
Schalldruckpegel	108,9 dB(A)	
Betriebsstunden	4.000 h pro Jahr	
Zusätzliche Systeme	iKWK: Gasmotor (4,5 MW), Elektrokessel (1,8 MW)	
Wärmespeicher	1.000 m ³	

CO₂-Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung

CO ₂ -Vermeidung	noch offen
Investitionsvolumen	3,8 Mio. € (Wärmepumpen), 8,5 Mio. € (inkl. Gebäude u. Anbindung)
Förderung	iKWK-Zuschlag, BMWK-Reallabor

Stadtwerke Rosenheim; Hochmuth, Sebastian (2022): Großwärmepumpen Rosenheim. Bau- und Betriebserfahrungen drei baugleicher Großwärmepumpen im Rahmen von iKWK-Systemen, im Rahmen der AGFW-Veranstaltung SW.aktiv am 04.10.2022. ENERGIEWENDEBAUEN (2022): Neu: Großwärmepumpen in deutschen Fernwärmenetzen. Online verfügbar unter <https://www.energiewendebauen.de/projekt/neu-grosswaermepumpen-in-deutschen-fernwaermenetzen/>, zuletzt geöffnet am 24.01.2023. AGFW (2022); Korrespondenz zw. Dr. A. Jentsch (AGFW) und Fraunhofer IEG

Steckbrief tiefe Geothermie mit Wärmepumpe Schwerin	
Tiefe Geothermie – Schwerin	
Betreiber	Stadtwerke Schwerin
Weitere Projektbeteiligte	keine Angabe
Standort	Schwerin (DE)
Objekttyp	Tiefe Geothermie mit Wärmepumpe für Fernwärme
Inbetriebnahme	noch offen
Wärmequelle	Tiefe Geothermie (1.235 m)
	Temperatur Wärmequelle: ca. 54 °C
Wärmesenke	Fernwärmeverlauftemperatur: 80/130 °C
	Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 75–80 °C
COP	noch offen
Technische Daten	
Hersteller Wärmepumpe	Carrier
Fabrikat	Typ 61XWHHZE15 und 61XWHHZE10, insgesamt 4 WP
Thermische Leistung	7,35 MW
Elektrische Leistung	noch offen (Lastbereich: noch offen)
Kompressor	noch offen
Kältemittel	R134a (HFKW, synth. Kältemittel), R1234ze (HFO, synth. Kältemittel)
Abmessungen	noch offen Gewicht: 9,5 bzw. 7,3 t
Schalldruckpegel	noch offen
Betriebsstunden	noch offen
Zusätzliche Systeme	noch offen
Wärmespeicher	noch offen
CO ₂ -Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung	
CO ₂ -Vermeidung	noch offen
Investitionsvolumen	Gesamtanlage 20 Mio. €
Förderung	Mittel des EFRE-Fonds und der KfW
<p>Stadtwerke Schwerin (2023) Geothermie. Online verfügbar unter: https://www.stadtwerke-schwerin.de/home/ueber_uns/geothermie/ zuletzt geöffnet (30.03.2023). Stadtwerke Schwerin (2022) Geothermie in Schwerin: Wärmepumpen wurden geliefert. Online verfügbar unter: https://www.pressebox.de/pressemitteilung/stadtwerke-schwerin-gmbh/Geothermie-in-Schwerin-Waermepumpen-wurden-geliefert/boxid/1126438. Zuletzt geöffnet (01.02.2023). Holdinghausen, Heike (2022) Der Clou von Schwerin. Online verfügbar unter: https://taz.de/Waermewende-aus-der-Tiefe/!5883053/. Zuletzt geöffnet (01.02.2023). Carrier. AquaForce. Online verfügbar unter: https://www.carrier.com/commercial/de/de/produkte/heizung/wasser-wasserwaermepumpen/61xwhze/. Zuletzt geöffnet (01.02.2023). Carrier. 61 XW. Online verfügbar unter: https://www.carrier.com/commercial/en/cn/products/commercial-products/chillers/61xw/. Zuletzt geöffnet (01.02.2023). Stadtwerke Schwerin GmbH (2023); Korrespondenz zw. Rüdiger, René (Stadtwerke Schwerin GmbH) und Fraunhofer IEG</p>	



Steckbrief Abwärme-Wärmepumpe Stuttgart

Reallabor – Stuttgart

Betreiber	EnBW AG	
Weitere Projektbeteiligte	IER Universität Stuttgart, Fraunhofer ISE, AGFW, Mitsubishi	
Standort	Stuttgart (DE)	
Objekttyp	Abwärme Restmüllverbrennung für Fernwärme	
Inbetriebnahme	geplant in 2023	
Wärmequelle	Kühlwasserablauf Restmüllheizkraftwerk zum Neckar, Flusswasser gefiltert Temperatur Wärmequelle: 7,5–28 °C; während Heizperiode: 7,5–20 °C	
Wärmesenke	Fernwärmeverlauftemperatur: 93 °C (mittlere Temperatur) Vorlauftemperatur Wärmepumpe: 90 °C	
COP	2,8	

Technische Daten

Hersteller Wärmepumpe	Johnson Controls	
Fabrikat	noch offen	
Thermische Leistung	Wärme: 20,5 MW	
Elektrische Leistung	7.300 kW (Lastbereich: noch offen)	
Kompressor	noch offen	
Kältemittel	R1234ze (HFO, synth. Kältemittel), 20.000 kg	
Abmessungen	noch offen	Gewicht: noch offen
Schalldruckpegel	noch offen	
Betriebsstunden	ca. 3.000 h pro Jahr	
Zusätzliche Systeme	aktuell: 3 Müllkessel, 3 Kohlekessel (447 MW)	
Wärmespeicher	k. A.	

CO₂-Vermeidung, Investitionsvolumen und Förderung

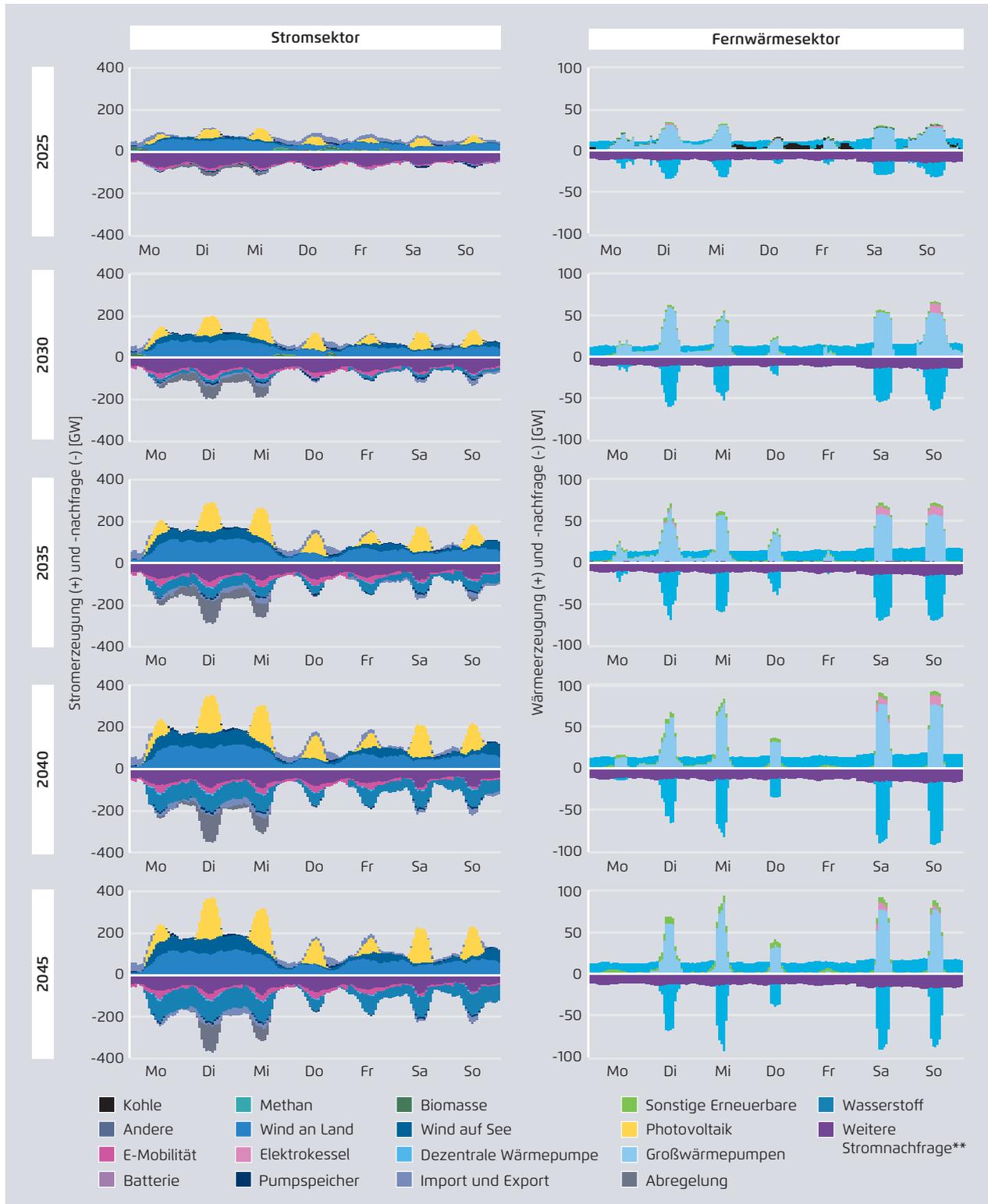
CO ₂ -Vermeidung	ca. 15.000 tCO ₂ pro Jahr
Investitionsvolumen	700–800 €/kW
Förderung	Reallabor (BMWK)

Quellen: Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg (2021): Webseminar: Großwärmepumpen – der nächste Schritt zur Wärmewende (Video). Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=Q370RjeAuDQ>, zuletzt geöffnet am 24.01.2023. ENERGIEWENDEBAUEN (2022): Neu: Großwärmepumpen in deutschen Fernwärmenetzen. Online verfügbar unter <https://www.energiwendebauen.de/projekt/neu-grosswaermepumpen-in-deutschen-fernwaermenetzen/>, zuletzt geöffnet am 24.01.2023. AGFW (2022); Korrespondenz zw. Dr. A. Jentsch (AGFW) und Fraunhofer IEG

A.2 Dispatch und Nachfrage im Strom- und Fernwärmesektor in allen Stützjahren der T45-Szenarien „Strom“ und „H₂“

Betrieb des Strom- und Fernwärmesektors in einer Sommerwoche* im Szenario T45-H₂

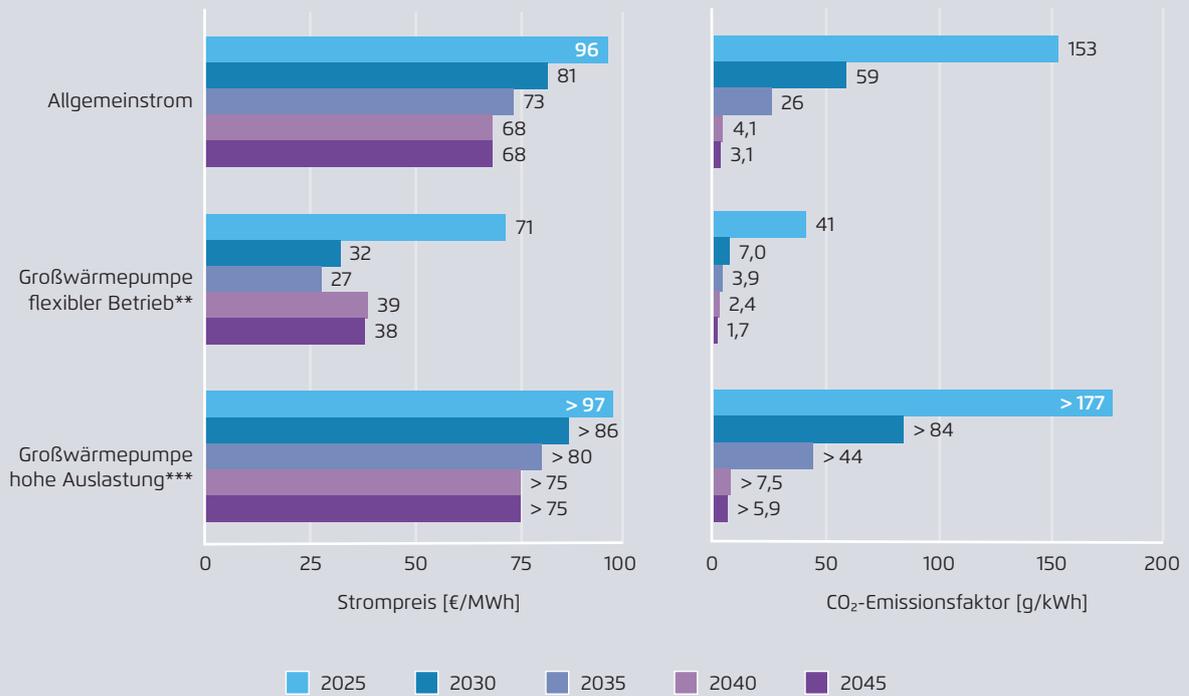
Abbildung 39



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b). * Ende August. ** inkl. Stromnachfrage aus Großwärmepumpen

Ökonomischer und ökologischer Mindestvorteil* eines flexiblen Betriebs der Großwärmepumpe im Szenario T45-Strom

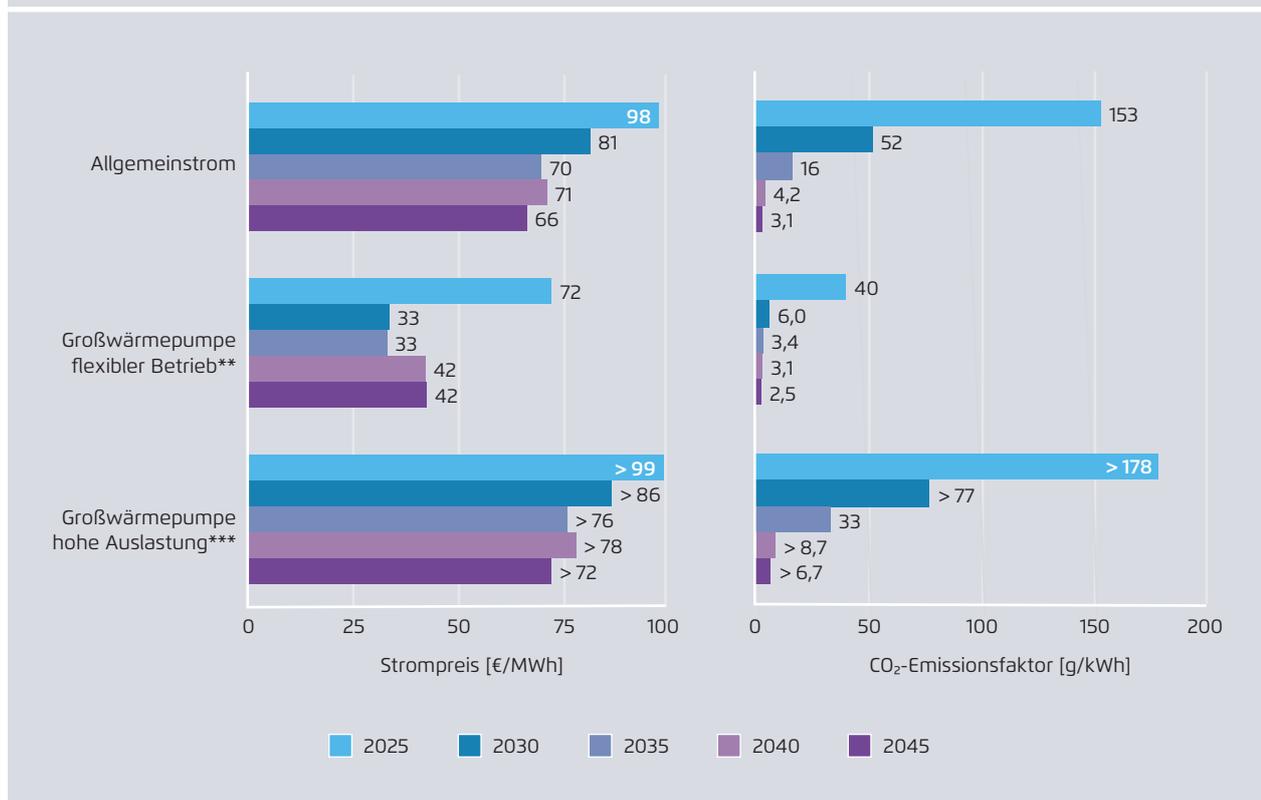
Abbildung 40



Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b) unter Annahme eines konstanten COP von 3,0. * Entspricht dem volkswirtschaftlich optimierten Betrieb mit niedrigen Vollbenutzungsstunden. ** Die Wärmeerzeugung der Großwärmepumpe folgt der direkten Wärmenachfrage (keine Nutzung eines Wärmespeichers). Die maximale Wärmeerzeugung der Großwärmepumpe ist soweit begrenzt, dass sich über das Jahr 6.000 Vollbenutzungsstunden ergeben. Unter der Annahme, dass sich die stündlichen Großhandelspreise- und CO₂-Emissionsfaktoren am Strommarkt durch den Wechsel des Betriebsmodus der Großwärmepumpe nicht verändern. *** Strompreis und CO₂-Emissionsfaktor für Betrieb unter hoher Auslastung gilt nur für die erste marginale Einheit. Mit jeder weiteren Einheit, die von einem flexiblen Betrieb auf einen Betrieb mit hoher Auslastung wechselt, steigt der Strompreis (und der CO₂-Emissionsfaktor) weiter an, da immer teurere (und CO₂-intensivere) Stromerzeugungsanlagen benötigt werden, um die zusätzliche Nachfrage zu bedienen.

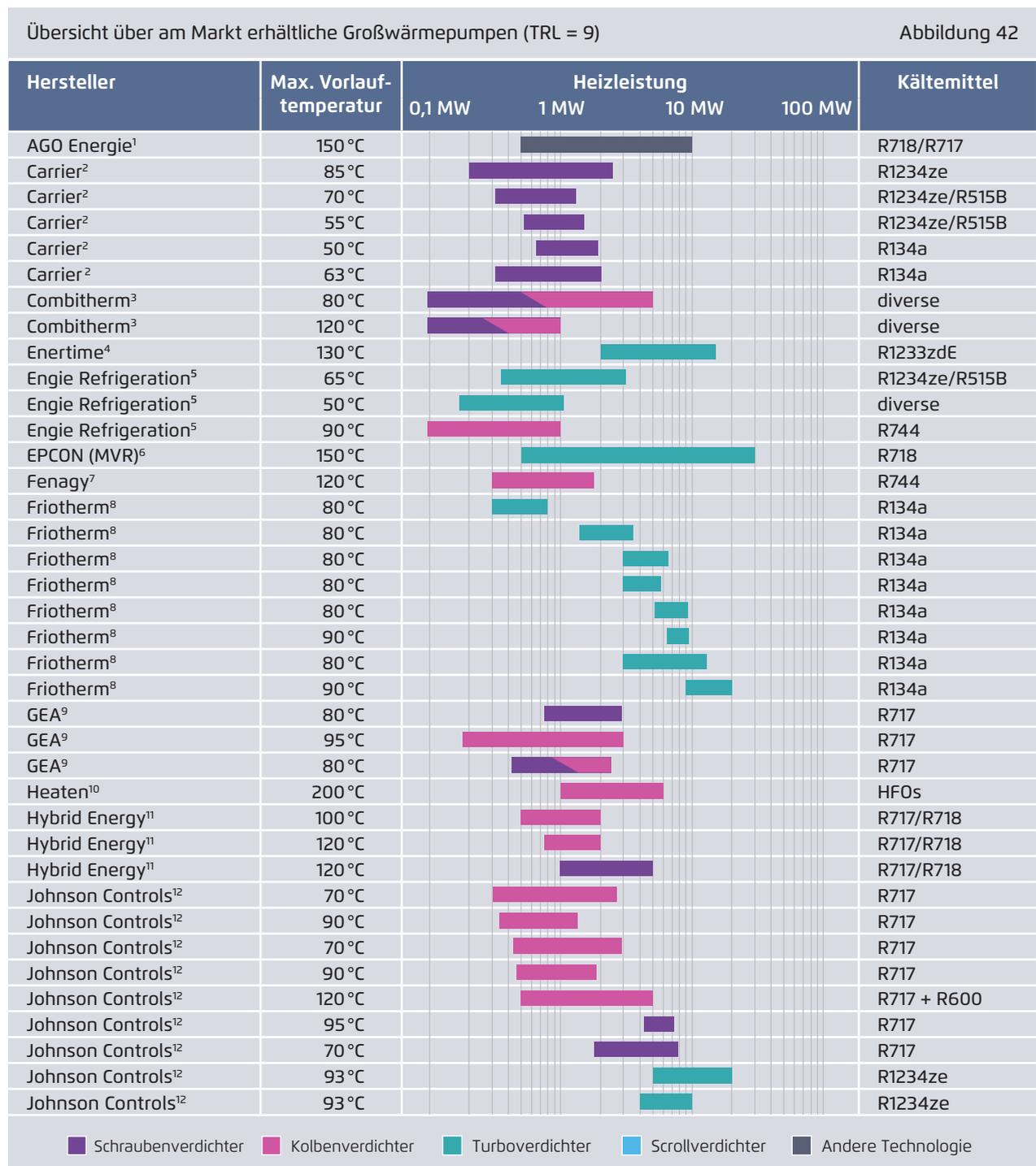
Ökonomischer und ökologischer Mindestvorteil* eines flexiblen Betriebs der Großwärmepumpe im Szenario T45-H₂

Abbildung 41



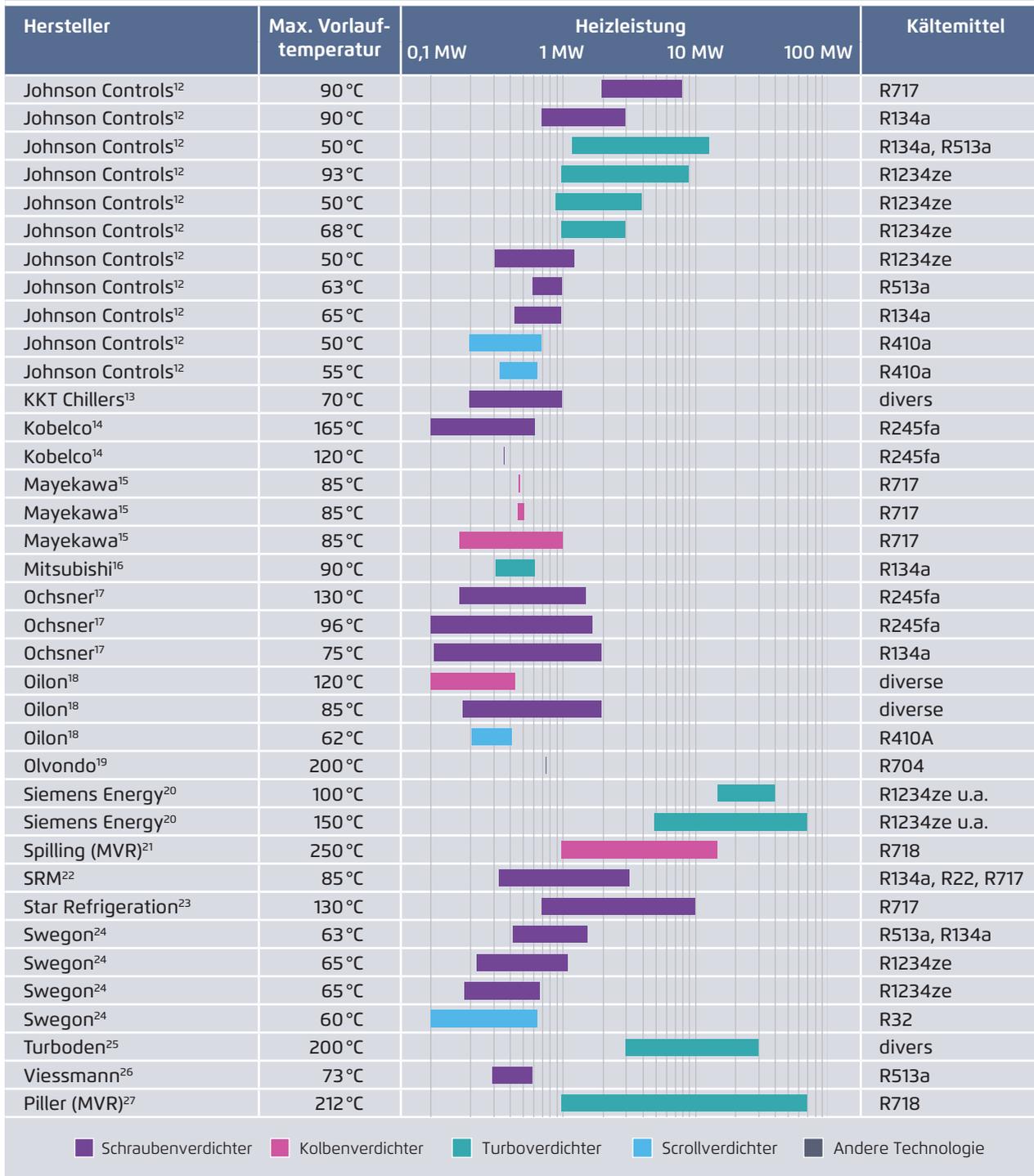
Fraunhofer IEG basierend auf Fraunhofer ISI et al. (2022b) unter Annahme eines konstanten COP von 3,0. * Entspricht dem volkswirtschaftlich optimierten Betrieb mit niedrigen Vollbenutzungsstunden. ** Die Wärmeerzeugung der Großwärmepumpe folgt der direkten Wärmenachfrage (keine Nutzung eines Wärmespeichers). Die maximale Wärmeerzeugung der Großwärmepumpe ist soweit begrenzt, dass sich über das Jahr 6.000 Vollbenutzungsstunden ergeben. Unter der Annahme, dass sich die stündlichen Großhandelspreise- und CO₂-Emissionsfaktoren am Strommarkt durch den Wechsel des Betriebsmodus der Großwärmepumpe nicht verändern. *** Strompreis und CO₂-Emissionsfaktor für Betrieb unter hoher Auslastung gilt nur für die erste marginale Einheit. Mit jeder weiteren Einheit, die von einem flexiblen Betrieb auf einen Betrieb mit hoher Auslastung wechselt, steigt der Strompreis (und der CO₂-Emissionsfaktor) weiter an, da immer teurere (und CO₂-intensivere) Stromerzeugungsanlagen benötigt werden, um die zusätzliche Nachfrage zu bedienen.

A.3 Großwärmepumpenprodukte am Markt (TRL = 9) und weitere Wärmepumpenprodukte und -technologien



Übersicht über am Markt erhältliche Großwärmepumpen (TRL = 9)

Abbildung 42



Fraunhofer IEG basierend auf (1) AGO Energie (2023), (2) Carrier (2023), (3) Combitherm (2023), (4) enertime (2023), (5) Engie Refrigeration (2023), (6) IEA (2023b), (7) Fenagy (2023), (8) Friotherm (2023), (9) GEA (2023), (10) Heaten (2023), (11) Hybrid Energy (2023), (12) Johnson Controls (2023), (13) KKT Chillers (2023), (14) IEA (2023b), (15) Mayekawa (2023), (16) Mitsubishi (2023), (17) Ochsner (2023a), (18) Oilon (2023), (19) Olvondo (2023), (20) Siemens Energy (2023a), (21) IEA (2023b), (22) SRM (2023), (23) Star Refrigeration (2023), (24) Swegon (2023), (25) Turboden (2023), (26) Viessmann (2023a), (27) IEA (2023b)

Übersicht über neu- oder weiterentwickelte Großwärmepumpen (TRL < 9) nach IEA HPT Annex 58

Abbildung 43

Hersteller	Max. Vorlauf-temperatur	Heizleistung				Kältemittel	TRL
		0,1 MW	1 MW	10 MW	100 MW		
Enerin	250 °C		■			R704	6
Piller (MVR)	212 °C			■	■	R718	8–9
Turboden	200 °C			■		diverse	7–9
Heaten	200 °C		■			HFOs	7–9
ToCircle	188 °C		■			R717/R718	6–7
spHeat	165 °C		■			HFOs	6–8
SRM	165 °C		■			R718	5
Simens Energy	160 °C				■	diverse	7–8
Enertime	160 °C			■		HFOs	4–8
Weel & Sandvig	160 °C			■		R718	4–9
Rank	160 °C	■				diverse	7
MAN	150 °C				■	R744	7–8
Ohmia Industy	150 °C		■			R717/R718	7–8
ecop	150 °C	■				Edelgas	6–7
Mayekawa	145 °C	■				R601	5
GEA	130 °C	■				R744	8
Johnson Controls	120 °C		■			R717 + R600	7–8
Fenagy	120 °C		■			R744	5–6
Mayekawa	120 °C	■				R600	7

■ Schraubenverdichter
■ Kolbenverdichter
■ Turboverdichter
■ Scrollverdichter
■ Andere Technologie

Fraunhofer IEG basierend auf IEA (2023b)

Überblick zu weiteren marktreifen und neuartigen Wärmepumpentechnologien

Tabelle 8

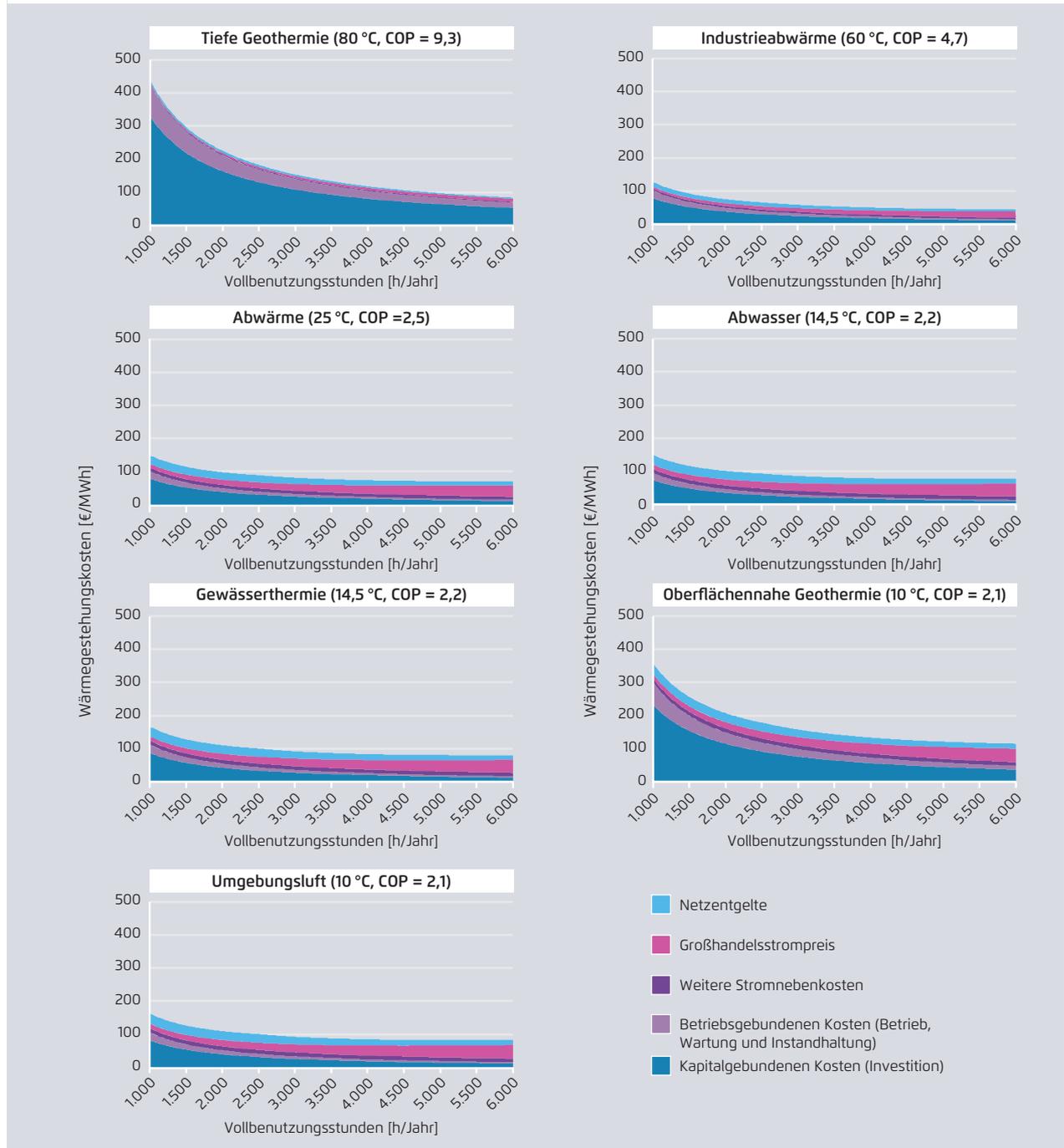
Technologie	Funktionsweise	Einsatzbereich	Vor-/Nachteile
Absorptions- und Adsorptionswärmepumpe TRL = 9	Temperaturerhöhung durch Absorption und Desorption eines Kältemittels mit thermischer Antriebsleistung	Raumwärme, Warmwasser, Fernwärme und Prozesswärme bis 150 °C	<ul style="list-style-type: none"> + Kein mechanischer Antrieb notwendig + COP weniger abhängig von Quellentemperatur – In der Regel fossiler Energieträger für Antriebswärme – In der Regel weniger effizient
Mechanische Dampfkompression (MVR) TRL = 9	Offene Kompressionswärmepumpe mit Prozessdampf als Kältemittel	Erzeugung auf Aufbereitung von Prozessdampf bis 280 °C bei energieintensiver Prozessindustrie	<ul style="list-style-type: none"> + Sehr hohe Senkentemperaturen möglich + Hoher COP – Hohe Quellentemperatur erforderlich – Eingeschränkter Einsatzbereich aufgrund offener Betriebsweise
Thermische Brüdenkompression TRL = 9	Offene Kompression mittels Dampfstrahlverdichter, angetrieben durch heißen Prozessdampf	Wärmebereitstellung für Destillations-, Koch-, Evaporations- und Stripingprozesse zur Effizienzsteigerung in verfahrenstechnische Prozesse der Lebensmittel-, Papier- und chemischen Industrie	<ul style="list-style-type: none"> + Kostengünstig – Eingeschränkter Temperatur- und Anwendungsbereich
Rotationswärmepumpe (ecop) TRL = 6 – 7	Rotierender Wärmepumpenkreislauf mit Kompression eines einphasigen Inertgas-Gemisches als Kältemittel durch Fliehkräfte	Prozess- und Fernwärme bis zu 150 °C und 700 kW	<ul style="list-style-type: none"> + Geringe Totaldruckverluste und somit hohe Effizienz + Hohen Flexibilität des Temperaturbereichs
Stirling-Wärmepumpe (Olvondo, Enerin) TRL = 6 – 9	Wärmepumpenkreislauf basierend auf linkslaufendem Stirling-Kreisprozess	Anwendungen mit großen Temperaturhüben und Senkentemperaturen bis 250 °C	<ul style="list-style-type: none"> + Umweltfreundliches Kältemittel (Helium) + Hohe Senkentemperaturen und große Temperaturhübe bei hohem COP
Hybrid-Wärmepumpe (AGO Energie, Hybrid Energy) TRL = 9	Hybrid aus Kompressions- und Absorptionswärmepumpe mit Ammoniak-Wasserlösung als Kältemittel	Prozess- und Fernwärmeanwendungen mit Senkentemperaturen bis 150 °C	<ul style="list-style-type: none"> + Aufgrund mechanischer Kompression keine Wärmezufuhr durch fossile Wärmeträger erforderlich + Flexible Betriebsweise durch Regulierung des Mischungsverhältnisses der Lösung
Brayton-Wärmepumpe (DLR) TRL = 4	Wärmepumpe basierend auf Brayton-Prozess mit Luft oder Argon als Kältemittel	Prozesswärme bis 500 °C	<ul style="list-style-type: none"> + Erschließung hoher Temperaturbereiche + COP-Steigerung durch Expander + Umweltfreundliches Kältemittel

Fraunhofer IEG basierend auf Wolf (2017); Soroka (2015); International Energy Agency (IEA) (2022b); Nekså et al. (2019); Stathopoulos (2022)

A.4 Analyse der Wärmegestehungskosten

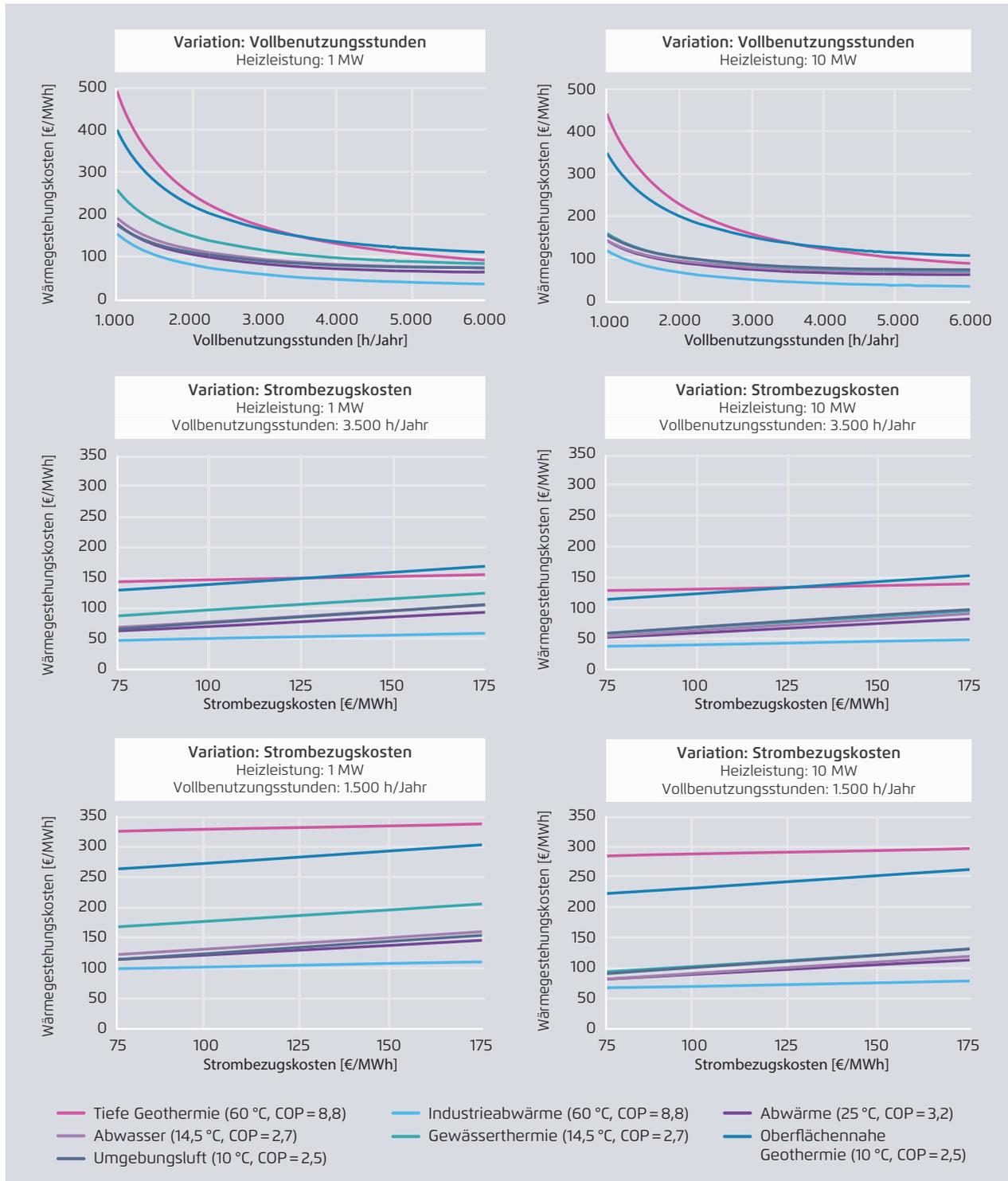
Zusammensetzung der Wärmegestehungskosten* für unterschiedliche Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden

Abbildung 44



Fraunhofer IEG (2023) basierend auf VDI-Richtlinie 2067. * Berechnet mit den in Abschnitt 5.5 getroffenen Annahmen für eine thermische Leistung von 10 MW

Spezifische Wärmegestehungskosten im Jahr 2030 für unterschiedliche Wärmequellen unter Variation der Vollbenutzungsstunden und der Strombezugskosten jeweils für Anlagen mit 1 MW und 10 MW Heizleistung bei einer Senkentemperatur von 80 °C Abbildung 45



Fraunhofer IEG basierend auf VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1. Berechnet ohne Berücksichtigung von Fördermitteln.

A.5 Checkliste für Fernwärmeversorger zur Planung und Realisierung von Großwärmepumpenprojekten

Checkliste wichtiger Fragestellungen bei Großwärmepumpenprojekten		Tabelle 9
Fragestellungen	Abwägungs-/Entscheidungsbedarf (Auswahloptionen)	
Finanzierung der Strategie- und Maßnahmenentwicklung?	Aus Eigenmitteln oder mit Förderung (z.B. BEW Modul 1)	
Konsistenz mit kommunaler Wärmeplanung?	Frühzeitige und regelmäßige Abstimmung mit der Kommune, Genehmigungsbehörden und weiteren Stakeholdern	
Unterstützung durch Planungs-/Beratungsbüros notwendig?	Höherer Aufwand für Ausschreibung und Vergabe der Planungs- und Beratungsleistungen vs. höhere Expertise, Qualität und Bearbeitungsgeschwindigkeit	
Beantragung von Fördermitteln zur anschließenden Umsetzung der Maßnahme?	Frühzeitige Entscheidung für den favorisierten Förderrahmen (BEW Modul 2–4 vs. iKWK-Ausschreibung und EE-Bonus) unter Berücksichtigung der damit verbundenen Fördervoraussetzungen, Förderhöhe und des zulässigen Durchführungszeitraums bis zur Inbetriebnahme.	
Welche Wärmequellen (-potenziale) können wo erschlossen werden?	Quellen- und entfernungsabhängiger Aufwand für Erschließung und Anbindung sollte erreichbare COP-Vorteile nicht übersteigen. Prinzipiell sollten aber alle verfügbaren Wärmequellen genutzt werden und möglichst jene mit dem besten Aufwand-Nutzen-Verhältnis zuerst. Frühzeitiger Abstimmungsbedarf mit potenziellen Abwärmelieferanten (z. B. Industrie, Klärwerke, Rechenzentren)	
Betrachtungsgebiet und relevanter Temperatur-/Lastbereich der Wärmesenke?	Welches (Netz-)Gebiet mit welchen Netz- und Leistungskennzahlen soll und kann von der Großwärmepumpe künftig versorgt werden?	
Vor- und/oder Rücklaufeinbindung ins Wärmenetz?	Wie wird sich der Wärmebedarf mit zunehmendem Fortschritt bei der Gebäudesanierung entwickeln? Sind kundenseitig technische Anpassungen bei den Wärmeübergabestationen geplant? (Abstimmungsbedarf mit großen Fernwärmekunden, z.B. Wohnungsgesellschaften)	
Höhere Temperatur vs. höherer COP als Optimierungsziel?	Sind zusätzlich auch Investitionen in das Wärmenetz (Temperatur, Hydraulik, Regelungsoptimierung, Trassenausbau und neue Netzanschlüsse) erforderlich? (Mindestnetzgröße für BEW-Modul 2 und 3 beachten) Sollte bei der Auslegung der Großwärmepumpe die Erreichung höherer Senktemperaturen oder ein höherer COP im Vordergrund stehen?	
Leistung, Wärmeerzeugung und Flexibilität der Großwärmepumpe? Welche Verdichtertechnologie?	Je nach Temperatur-, Leistungs- und Flexibilitätsanforderungen kommen für das Großwärmepumpenaggregat unterschiedliche Technologien, Kältemittel, Betriebs- und Verschaltungsvarianten in Betracht. Davon wird auch der Aufwand für die Betriebsführung, Wartung und Instandhaltung beeinflusst.	

Fragestellungen	Abwägungs-/Entscheidungsbedarf (Auswahloptionen)
Eine große Großwärmepumpe vs. mehrere kleine Großwärmepumpen?	Große Großwärmepumpen weisen deutliche spezifische Kostenvorteile gegenüber kleineren Großwärmepumpen auf. Letztere bieten jedoch den Vorteil standardisierter Planungs- und Genehmigungsverfahren und sind flexibler und variabler einsetzbar.
Konzept und Auslegung des Wärmespeicher?	Welche Leistungen und Zeiträume muss der Wärmespeicher abdecken und wie wird er realisiert (z.B. Tank, Erdbecken, Aquifer, Bohrloch, Grubenwasser)?
Auswahl des/der Standort(e)? Erfordernis für Grunderwerb und Bauleitplanung?	Welche Standorte kommen für die Errichtung der Großwärmepumpe in Frage bzw. bieten die besten Voraussetzungen? Müssen noch Baurecht geschaffen und Grundeigentum gesichert werden?
Anforderungen an die Stromversorgungsnetze und den Stromanschluss?	Ist ein Stromnetzanschluss vorhanden und leistungsfähig genug? Besteht die Möglichkeit Grünstrom aus erneuerbaren Energien aus lokaler Nähe bzw. über eine Direktleitung zu beziehen?
Relevante Regularien und zuständige Genehmigungsbehörden? Umfang und Dauer des Genehmigungsverfahrens?	Welche Regularien gelten für das Projekt? Welche Genehmigungsbehörden sind zuständig? Welche Fachgutachten sind erforderlich? Wie kann das Genehmigungsverfahren beschleunigt werden? Ist ein vorzeitiger Baubeginn notwendig oder sinnvoll, um Terminketten und die Klimaschutzziele einzuhalten?
Gesamter Investitionsbedarf und resultierende Wärmege-stehungskosten?	Wie hoch ist der gesamte Investitionsbedarf? Welche Wärmege-stehungskosten ergeben sich auf Basis verschiedener Szenarien zur Entwicklung der Strombezugskosten und des O&M-Aufwands?
Auswirkungen auf Fernwär-melieferverträge und -preise?	Welche Anpassungen an den Preisformeln und Lieferbedingungen in den Fernwärmelieferverträgen sind erforderlich (z.B. Indizes zur Kopplung an die Strombezugskosten)? Welche Auswirkungen hat die Maßnahme auf künftige Fernwärmepreise (auch im Vergleich zu anderen Handlungsalternativen, wie z. B. Business as usual oder grünem Wasserstoff)?
Finanzierung der Investition mit Fördermitteln (BEW oder iKWK)?	Wie hoch ist die eventuelle Wirtschaftlichkeitslücke, die mithilfe von Fördermitteln geschlossen werden muss (CAPEX- und/oder OPEX-Förderung gemäß BEW oder KWKG-Zuschlag über iKWK-Ausschreibungen)?
Umsetzung der Bauleistun-gen und Gestaltung des Vergabeverfahrens (EU-Ausschreibung)?	Ist die Einbindung bzw. Beauftragung eines Generalunter-/übernehmers möglich und sinnvoll (abhängig von der Komplexität und Größe des Vorhabens)? Überschreitet der Auftragswert die Schwelle für EU-Ausschreibungen? Entspricht das Ausschreibungsergebnis den Erwartungen?
Detailplanung, Lieferfristen, Objekt- und Bauüberwa-chung?	Welche Anpassungen ergeben sich aus dem Ausschreibungsergebnis für die Detailplanung zur Bauausführung? Welche Auswirkungen haben längere Genehmigungsverfahren und Lieferfristen sowie Personalengpässe auf die Projektrealisierung?

Fraunhofer IEG (2023)

Publikationen von Agora Energiewende

AUF DEUTSCH

Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung des Energiewirtschaftsrechts an unionsrechtliche Vorgaben

Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

Ein neuer Ordnungsrahmen für Erdgasverteilnetze

Analysen und Handlungsoptionen für eine bezahlbare und klimazielfunktionale Transformation

Rückenwind für Klimaneutralität

15 Maßnahmen für den beschleunigten Ausbau der Windenergie

Klimaneutrales Stromsystem 2035 (Zusammenfassung)

Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann

Stellungnahme zum Netzentwicklungsplan Gas 2022-2032 der Fernleitungsnetzbetreiber

Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2022

Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2023

Volle Leistung aus der Energiekrise

Mit Zukunftsinvestitionen die fossile Inflation bekämpfen

Durchbruch für die Wärmepumpe

Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand

Power-2-Heat

Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie

Schutz in der fossilen Energiekrise

Optionen für Ausgleich und Entlastung

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Stahl) – Update

Aktualisierte Analyse zur Stahlbranche

Klimaneutrales Stromsystem 2035 (Vollständige Studie)

Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann

Klimaschutzverträge für die Industrietransformation (Zement)

Analyse zur Zementbranche

12 Thesen zu Wasserstoff

Publikationen von Agora Energiewende

AUF ENGLISCH

Breaking free from fossil gas

A new path to a climate-neutral Europe

How Europe can make its power market more resilient

Recommendations for a short-term reform

Argentina as a hub for green ammonia

A forward-looking development strategy for addressing the global energy and climate crises

Overview of China's Energy Transition 2022

Chapter on Oil

Transforming industry through carbon contracts (Steel)

Analysis of the German steel sector

The driving forces behind the green transition in Europe and South Korea

A comparison between the European Green Deal and the Korean Green New Deal

Overview of China's Energy Transition 2022

Chapter on Natural Gas

Coal Phase-Out in Germany

The Multi-Stakeholder Commission as a Policy Tool

Powering the Future of the Western Balkans with Renewables

Climate-neutral power system 2035 (Full study)

How the German power sector can become climate-neutral by 2035

International climate cooperation for energy-intensive industry

A (realistic) proposal

Promoting regional coal just transitions in China, Europe and beyond

Europe-China dialogues on a just coal transition in 2021

Coal Phase-Out in Germany

The Role of Coal Exit Auctions

Delivering RePowerEU

A solidarity-based proposal for financing additional green investment needs

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-energiewende.de

Über Agora Energiewende

Agora Energiewende erarbeitet wissenschaftlich fundierte und politisch umsetzbare Wege, damit die Energiewende gelingt – in Deutschland, Europa und im Rest der Welt. Die Organisation agiert unabhängig von wirtschaftlichen und parteipolitischen Interessen und ist ausschließlich dem Klimaschutz verpflichtet.



Unter diesem QR-Code steht
diese Publikation als PDF zum
Download zur Verfügung.

Agora Energiewende

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de