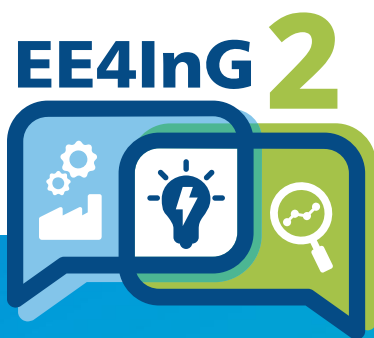




Industrielle Wärmepumpensysteme bis 100°C

Technikanalyse im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2

EE4InG2

Begleitforschung für
Energieeffizienz in
Industrie und Gewerbe 2.0

ee4ing2.de

Bensheim
20. Juli 2026

Präambel

Energie- und Ressourceneffizienz leisten wichtige Beiträge zur Minderung der Treibhausgasemissionen und dämpfen die im Trend steigenden Ressourcenkosten der Unternehmen. So tragen sie dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu sichern. Die **Forschungsförderung zur Steigerung der Energieeffizienz** für und mit der deutschen Industrie und dem Gewerbe hat zum Ziel, Innovationen und technischen Fortschritt voranzubringen und so neue technisch-wirtschaftliche Effizienzpotenziale zu erschließen.

Das BMW-geförderte Verbundvorhaben EE4InG2 wurde konzipiert als **Begleitforschungsprojekt** für das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (FN IuG)**. Ein zentrales Projektziel ist die **wissenschaftliche Querauswertung der angewandten Energieeffizienzforschung und -förderung** durch das Energieforschungsprogramm im Hinblick auf Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Ein weiteres Projektziel ist die **Förderung des Austausches zwischen relevanten Akteuren des Innovationssystems** (Industrie, Wissenschaft, Politik), koordiniert durch eine im Projekt zu schaffende Koordinierungsstelle für das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe. Das Projekt knüpft an die inhaltlichen Vorarbeiten des vorausgegangenen Verbundvorhabens „EE4InG: Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe – Vernetzung und Begleitung der FuE-Aktivitäten sowie Beschleunigung der Ergebnisverbreitung“ (FKZ: 03ET1630A-B) an.

Hinweise zur Zitation und Weiterem

ETA-Solutions GmbH (Hrsg.) (2026): Technikanalyse im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2. Industrielle Wärmepumpensysteme bis 100°C. Bensheim.

Alle zitierten Grafiken unterliegen dem Urheberrecht des jeweiligen Autors. Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr und wurden nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet. Aufgrund des dynamischen Umfelds und fortlaufend neuer Erkenntnisse kann keine Gewähr für die Vollständigkeit und Aktualität übernommen werden. Die Erstellung des Manuskripts erfolgte unter Zuhilfenahme von KI-gestützten Werkzeugen zum Umformulieren und Paraphrasieren von Texten, zur Erstellung und Optimierung von Gliederungen sowie zur Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung von Recherchen [1].

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 03EN2107A-C

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung.....	5
2.	Hintergrund, Zielsetzung & methodisches Vorgehen.....	7
2.1	Hintergrund.....	7
2.2	Zielsetzung.....	7
2.3	Abgrenzung des Analysegegenstands.....	8
2.4	Methodisches Vorgehen.....	9
3.	Darstellung der untersuchten Technik und möglicher Wettbewerber.....	11
3.1	Kurzbeschreibung der Technik	11
3.2	Reife und Entwicklung der Technik.....	14
3.3	Absehbare Anwendungsbereiche und weitere Potenziale.....	17
3.3.1	Industrie	18
3.3.2	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)	21
3.3.3	Nah-/Fernwärme	22
3.4	Internationaler Wettbewerb in Forschung und Entwicklung	23
3.5	Konkurrenztechniken.....	24
4.	Relevanz in Forschung und Entwicklung.....	27
4.1	Forschung und Entwicklung in Deutschland.....	27
4.1.1	Stichprobensuche mittels EnArgus-Datenbank	27
4.1.2	Stichprobensuche in einer Projektdatenbank des PtJ für die Förderbereiche ESN2 und ESN4	32
4.2	Verankerung der Technik im 8. Energieforschungsprogramm	36
5.	Energiewirtschaftliche Bedeutung und weitere Effekte	38
6.	Funktionalität des Innovationssystems in Deutschland.....	42
7.	Erforderlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	45
7.1	Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	45
7.1.1	Anwendung: Industrie und Gewerbe	45
7.1.2	Anwendung: Fernwärme	47
7.1.3	Anwendung: Haushalte	47
7.2	Strategische Entwicklungsziele für FuE.....	47
7.2.1	Anwendung: Industrie und Gewerbe	47

7.2.2	Anwendung: Fernwärme	48
7.2.3	Anwendung: Haushalte	48
7.2.4	Adressierung im 8. EFP	49
8.	Hemmnisse und fördernde Faktoren	50
8.1	Hemmnisse in Einführung und Marktdiffusion.....	50
8.2	Ungenutzte fördernde Faktoren.....	54
9.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	58
9.1	Schlussfolgerungen.....	58
9.2	Empfehlungen	59
9.3	Fazit	62
	Literaturverzeichnis	63
	Abkürzungen.....	70
	Abbildungsverzeichnis	71
	Tabellenverzeichnis	72

1. Zusammenfassung

Wärmepumpensysteme besitzen ein erhebliches Potenzial zur Substitution fossiler Energieträger in der Bereitstellung von Niedertemperaturwärme bis 100°C, einem Temperaturbereich, der bislang überwiegend von konventionellen, fossil betriebenen Techniken dominiert wird [2]. Das technisch erschließbare Wärmeerzeugungspotenzial industrieller Wärmepumpenanwendungen bis 100°C wird für Deutschland auf 86 TWh geschätzt, was etwa 23 % des industriellen Nutzwärmebedarfs entspricht. Besonders hohe Potenziale bestehen in der Nahrungsmittelindustrie (18,4 %), der Papierindustrie (17,7 %) und der chemischen Industrie (12,8 %). [4]

Im Wohngebäudesektor besteht ebenfalls ein erhebliches Anwendungspotenzial: Der dena-Gebäudereport 2026 weist für das Jahr 2024 einen Endenergieverbrauch von 513 TWh für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden aus; beide Anwendungen liegen typischerweise im für Wärmepumpen geeigneten Temperaturbereich bis 100°C. [5]

Trotz des hohen Substitutionspotenzials verläuft der Markthochlauf in den verschiedenen Anwendungsbereichen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Im Neubausektor für Wohngebäude sind Wärmepumpen breit etabliert und die dominante Technologie mit 69,4 % im Jahr 2024. Die Integration in den Bestand gestaltet sich aufgrund der Heterogenität des Gebäudebestandes und schlechteren baulichen Voraussetzungen herausfordernder. 4,3 % des Wohnungsbestands wurden 2024 mit Wärmepumpen, solarthermischen oder geothermischen Anlagen geheizt. Ungeachtet der derzeit noch geringen Marktdurchdringung im Bestand weist die Wärmepumpe über die vergangenen 25 Jahre das stärkste relative Wachstum unter allen Heiztechnologien auf. [5]

Die industrielle Wärmepumpentechnik steht vor hochkomplexen Herausforderungen: Ihre Integration in bestehende Prozesse erfordert oft individuelle, anwendungsspezifische Lösungen. Gleichzeitig bremsen die niedrigen spezifischen Kosten fossiler Energieträger und der starke internationale Wettbewerbsdruck die Investitionsbereitschaft der Unternehmen. Erschwerend kommen hohe Anfangsinvestitionen, lange Amortisationszeiten und ein ungünstiges Strom-/Gaspreis-Verhältnis hinzu. Bei Großwärmepumpen stehen verstärkt Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen durch Standardisierung im Vordergrund, um Produktions- und Installationsprozesse zu vereinfachen und die Implementierung zu beschleunigen. [4, S. 3, 6, S. 4]

Deutschland verfügt im internationalen Vergleich über eine hohe technische Kompetenz und eine ausgeprägte industrielle Wertschöpfungstiefe. Im Bereich der Wärmepumpentechnologie deuten die verfügbaren Indikatoren auf eine vergleichsweise starke technologische Position Deutschlands gegenüber China und den USA hin. In einer Patentanalyse zu 19 Technologiebereichen der industriellen Energieeffizienz im Zeitraum 2020 – 2022 zeigte sich, dass Deutschland nur im Bereich der Wärmepumpentechnik eine überdurchschnittliche Patentwachstumsrate aufweist [7, S. 29]. Deutsche Hersteller wie Everllence

(ehemals MAN Energy Solutions) nehmen im Segment der Großwärmepumpen eine führende Position ein, wenngleich die Installationszahlen im internationalen Vergleich noch niedrig sind.

Im Rahmen des IEA HPT Annex 48 wurden bis 2020 international 342 industrielle Wärmepumpenanwendungen identifiziert. Davon entfielen 23 Anwendungen auf Deutschland, 24 auf die Schweiz, 33 auf Frankreich, 69 auf Österreich, 74 auf Dänemark und 101 auf Japan. Die Zahlen sind als identifizierte Anwendungsfälle und nicht als vollständige amtliche Bestandsstatistik zu verstehen. Für Großwärmepumpen im engeren Sinne, definiert als Anlagen mit mehr als 500 kW_{th}, waren in Deutschland im Jahr 2023 mindestens 45 Anlagen mit zusammen mindestens 130 MW_{th} installiert. Weitere rund 1.000 MW_{th} befinden sich derzeit in Planung oder Bau. [8, 9]

Um die bestehende technologische Stärke Deutschlands weiter auszubauen und den Markthochlauf zu beschleunigen, setzt das 8. Energieforschungsprogramm gezielt auf Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie der Wärmewende. Im Förderzeitraum 2020 – 2024 wurden 25 einschlägige Projekte bewilligt, die sich auf Hochtemperaturanwendungen, die Entwicklung zukunftsicherer Kältemittel, die Standardisierung sowie die Lebensdauerverlängerung von Systemen konzentrieren. Zudem wird die Kopplung mit thermischen Speichern untersucht, um einen flexiblen und netzdienlichen Betrieb zu ermöglichen (siehe Kapitel 4.1.2). Die Kombination aus technischer Weiterentwicklung, regulatorischen Anpassungen und gezielten Fördermaßnahmen ist entscheidend, um den Markthochlauf sowohl im Gebäudesektor als auch in der Industrie zu beschleunigen und das erhebliche Dekarbonisierungspotenzial von Wärmepumpen zu realisieren. Daher bleibt eine langfristig angelegte und planbare Förderung von Forschung und Entwicklung eine zentrale Voraussetzung für den nachhaltigen Erfolg dieser Technologie.

2. Hintergrund, Zielsetzung & methodisches Vorgehen

2.1 Hintergrund

Die Wärmepumpe gilt als Schlüsseltechnologie der Energiewende, was sich in der umfassenden Forschungsförderung durch die Bundesregierung widerspiegelt. Bereits seit dem Start des ersten Energieforschungsprogramms (EFP) 1977 spielen Wärmepumpen eine bedeutende Rolle, da sie als vielversprechende Lösung zur Nutzung erneuerbarer Energien und zur Steigerung der Energieeffizienz angesehen werden. Seitdem werden sie kontinuierlich weiterentwickelt und durch nachfolgende Programme gefördert, insbesondere hinsichtlich ihrer Anwendung im Gebäudebereich und in industriellen Prozessen zur Erzielung von Energieeinsparungen und CO₂-Reduktionen. Angesichts wachsender Anforderungen an den Klimaschutz und die Dekarbonisierung von Prozessen hat die Bedeutung von Wärmepumpen in der Energieforschung weiter zugenommen. Im Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (FN IuG) wird die Wärmepumpen- und Kältetechnik aufgrund ihrer Relevanz daher als eigenständiges Forschungsfeld betrachtet [10].

Bereits im Vorgängerprojekt EE4InG wurden erste Technikanalysen zu diesem Bereich durchgeführt [11]. Die aktuelle Technikanalyse zielt nun darauf ab, diese Untersuchungen zu vertiefen und die Potenziale der Wärmepumpentechnologie noch umfassender zu beleuchten.

2.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Technikanalyse ist es, Wärmepumpensysteme bis 100°C im Kontext industrieller und gewerblicher Anwendungen systematisch einzuordnen. Im Mittelpunkt stehen der technische Reifegrad, die absehbaren Einsatzbereiche sowie die Rolle der Technologie für die Substitution fossiler Wärmeherzeugung im Niedertemperaturbereich.

Die Analyse betrachtet dabei sowohl bereits marktverfügbare Anwendungen als auch Entwicklungs- und Optimierungsbedarfe, die für eine breitere Nutzung relevant sind. Neben technischen Aspekten werden auch Fragen der Systemintegration, Standardisierung, Wirtschaftlichkeit, Marktverbreitung und regulatorischen Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Der Schwerpunkt liegt auf industriellen und gewerblichen Wärmepumpenanwendungen. Ergänzend werden Gebäude-/Haushaltswärmepumpen sowie Großwärmepumpen in Nah- und Fernwärmenetzen einbezogen.

Auf dieser Grundlage sollen Entwicklungsbedarfe, Hemmnisse und fördernde Faktoren herausgearbeitet werden, um daraus Ansatzpunkte für künftige Forschungs- und Fördermaßnahmen abzuleiten.

2.3 Abgrenzung des Analysegegenstands

Im Rahmen der vorliegenden Technikanalyse wird der Schwerpunkt auf Wärmepumpentechnologie bis zu einer Prozesstemperatur von 100°C für industrielle Anwendungen gelegt. Neben der vorliegenden Technikanalyse zu Wärmepumpensystemen mit Vorlauftemperaturen bis 100°C mit Fokus auf industrielle und gewerbliche Anwendungen wurde im Rahmen der Begleitforschung EE4InG2 eine ergänzende Technikanalyse zur Hochtemperatur-Wärmepumpentechnologie (HTWP) mit Zieltemperaturen über 100°C erstellt (Aktueller Stand der Forschung und Entwicklung zur Hochtemperatur-Wärmepumpe in Deutschland, 25.11.2025). Die Trennung in zwei Analysen erfolgt aufgrund deutlich divergierender Förderbedarfe. Wärmepumpen bis 100°C sind marktverfügbar und benötigen Förderung in Forschungsthemen, welche begünstigend auf die Diffusion im Markt wirken. HTWP sind Gegenstand der Forschung und Entwicklung (FuE) und erreichen noch nicht die in der breiten Industrie erforderlichen Anforderungen. Inhaltliche Schnittmengen zwischen den Technikanalysen sind unvermeidbar. Die Kernaussagen der Dokumente beziehen sich jedoch auf die jeweils betrachteten Einzeltechniken und sind somit unabhängig voneinander zu betrachten.

Die im Fokus dieser Analyse stehenden Wärmepumpenanwendungen mit einer Vorlauftemperatur bis maximal 100°C lassen sich in Segmente unterteilen. Die Abgrenzungskriterien erfolgen anhand der Leistungen und Anwendungsgebiete.

1. **Gebäude-/Haushaltswärmepumpen:** Gebäude- und Haushaltswärmepumpen werden zur Beheizung und Warmwasserbereitstellung in Wohn- und Nichtwohngebäuden eingesetzt. Es handelt sich um kleine, standardisierte Anlagen im Leistungsbereich von Einzelgebäuden (3 – 23 kW_{th}) oder Mehrfamilienhäuser (< 200 kW_{th})[12].
2. **Industriewärmepumpen:** Charakteristisch ist ihre Anwendung in industriellen Prozessen zur Wärmerückgewinnung, Prozesswärmebereitstellung sowie zur Kühlung und Klimatisierung. Ab einer Leistung von 100 kW_{th} wird in diesem Rahmen von industriellen Wärmepumpen gesprochen [13, 14]. In dem hier vorliegenden Fall werden auch gewerbliche Wärmepumpen einbezogen, solange sie nicht in die Kategorie der Großwärmepumpe fallen.
3. **Großwärmepumpen:** Diese Systeme kommen vorrangig in der Fernwärmeversorgung zum Einsatz. Ihre Wärme wird meist in ein Netz eingespeist, typische Leistungen liegen zwischen 0,3 MW_{th} – 60 MW_{th} [6].

Es sei darauf hingewiesen, dass eine klare technische Abgrenzung zwischen Wärmepumpen im Gewerbe- oder Mehrfamilienhaus-Einsatz nicht möglich ist. Die Begriffe Industrie-, Groß- und Gebäudewärmepumpe sind nicht geschützt und werden in der Literatur folglich nicht konsistent angewendet.

Fokus der Technikanalyse: Der Schwerpunkt der vorliegenden Technikanalyse liegt auf Industriewärmepumpen. Dies folgt aus der thematischen Ausrichtung des Forschungs-

netzwerks Industrie und Gewerbe, dessen Aktivitäten primär auf Anwendungen im industriellen Umfeld ausgerichtet sind. Zwar werden Wärmepumpentechnologien grundsätzlich im gesamten Netzwerk entwickelt und diskutiert, doch finden Industrierärmepumpen hier ihre wesentliche Anwendung und sind daher von besonderer Relevanz für die Arbeit des Netzwerks. Die weiteren Anwendungssegmente werden im Rahmen dieser Technikanalyse nur verkürzt betrachtet.

Die Integration industrieller Wärmepumpen ist zudem mit deutlich höheren technischen und ökonomischen Anforderungen verbunden als in anderen Wärmepumpensegmenten. Prozessspezifische Auslegungen, die Integration in bestehende, oftmals prozesskritische Systeme, fehlende Standardisierung sowie lange Planungs- und Entwicklungszeiten stellen wesentliche Hemmnisse für den Markthochlauf dar. Um diese Herausforderungen zu überwinden, sind zielgerichtete Forschungs- und Fördermaßnahmen sowie eine strategisch abgestimmte Vorgehensweise notwendig.

2.4 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen zur vorliegenden Technikanalyse und damit auch die Berichtsstruktur orientieren sich am EDUAR&D-Prozess [15, 16], der in Abbildung 2-1 dargestellt ist.

In Kapitel 3 erfolgt eine Einführung in das Funktionsprinzip und die wesentlichen Eigenschaften der Technik, gefolgt vom aktuellen Reifegrad und den potenziellen Anwendungsbereichen der Technik. Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die ausgewählte Effizienztechnologie und bildet die Basis für die vertiefende Analyse.

Kapitel 4 beschreibt die Relevanz der Technik im Bereich Forschung und Entwicklung. Zunächst erfolgt eine Betrachtung der FuE-Projekte auf nationaler Ebene mithilfe der EnArgus-Datenbank. Darauf folgt eine Analyse der im Rahmen des EFP durchgeführten Aktivitäten. Die abschließende Einordnung der Technologie in das 8. EFP des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) zeigt ihre Stellung innerhalb der aktuellen Forschungslandschaft auf.

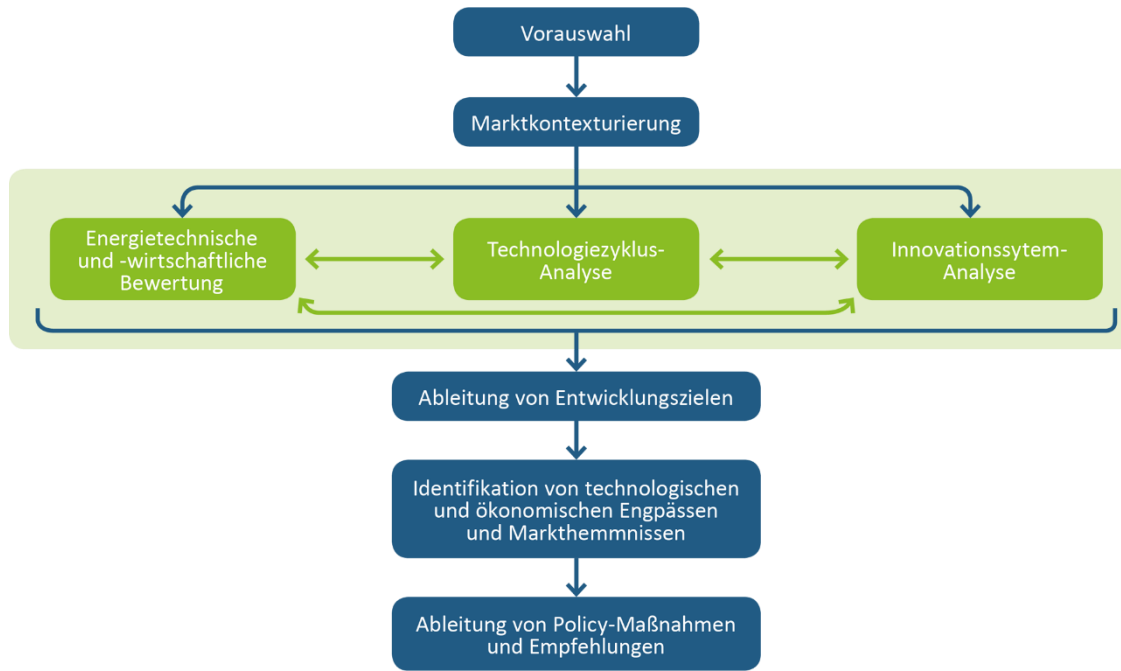


Abbildung 2-1 Typische Struktur des EDUAR&D-Prozesses [11]

Die Untersuchung der energiewirtschaftlichen Relevanz ist in Kapitel 5 dargestellt. Der betroffene Endenergiebedarf in Deutschland sowie die damit verbundenen Einsparpotenziale werden dabei analysiert. Die Bewertung der theoretischen, technischen und wirtschaftlichen Potenziale steht im Zentrum dieser Betrachtung. Der Fokus liegt auf dem Status quo, während in nachfolgenden Projektphasen auch mögliche zukünftige Energiesystem-Szenarien betrachtet werden, um eine Fortschreibung der technikspezifischen Potenziale zu ermöglichen.

Die Identifikation der zentralen Akteure im Innovationssystem in Kapitel 6 bildet einen weiteren wesentlichen Bestandteil der Analyse. Wissenschaftliche Einrichtungen, Industrieunternehmen, Anwender sowie intermediäre Organisationen werden hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Entwicklung und Verbreitung der Technologie untersucht. Strukturelle Herausforderungen und bestehende Defizite innerhalb des Innovationssystems lassen sich auf diese Weise ermitteln.

Der erforderliche Entwicklungsbedarf sowie potenzielle technische Fortschritte stehen im Fokus von Kapitel 7. Technische und wirtschaftliche Hemmnisse werden anschließend in Kapitel 8 identifiziert, um darauf basierend konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Besonders für die zukünftige Energieforschung des Bundes liefern diese Erkenntnisse wertvolle Impulse.

Die Technikanalyse schließt mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Kapitel 9.

3. Darstellung der untersuchten Technik und möglicher Wettbewerber

Im Folgenden wird die untersuchte Technologie zunächst hinsichtlich ihrer Funktionsweise und technischen Merkmale beschrieben. Daran anschließend erfolgt eine Bewertung des Entwicklungsstands und der Reife sowie eine Einordnung aktueller und potenzieller Anwendungsbereiche. Ergänzend werden der internationale Forschungs- und Entwicklungsstatus, konkurrierende Ansätze sowie der Beitrag der Technik zur industriellen Transformation betrachtet.

3.1 Kurzbeschreibung der Technik

Die Wärmepumpentechnologie ist eine Querschnittstechnologie, die auf dem Prinzip des Carnot-Prozesses basiert. Sie entzieht einem Medium mit niedrigem Exergieanteil (z. B. Umgebungswärme oder industrieller Abwärme) thermische Energie und hebt diese, je nach Technologie, mittels mechanischer Arbeit oder sorptionsgestützter thermischer Prozesse, auf ein höheres Temperaturniveau. Dadurch steigt der Exergiegehalt der bereitgestellten Wärme, sodass sie für Anwendungen mit höheren Temperatur- und Qualitätsanforderungen nutzbar wird. Eine derartige Maschine kann nach dem Kaltdampfkompressionsverfahren (Kompressionswärmepumpe) arbeiten oder auch nach dem Absorptionsprinzip (Sorptionswärmepumpe)¹. Anstelle von Brennstoff wird elektrischer Strom oder mechanische Energie aufgewandt, um die für den Prozess notwendige technische Arbeit verrichten zu können. Im Hinblick auf den Kälteprozess² ist das Funktionsprinzip dasselbe, jedoch wird die Nutzseite gewechselt. [18, S. 166]

Wärmepumpen können nach verschiedensten Merkmalen klassifiziert werden (vgl. Tabelle 3-1).

¹ Eine detaillierte Betrachtung von Sorptionswärmepumpen ist nicht Bestandteil des vorliegenden Berichts. Entsprechende Anschlussaktivitäten sind vorgesehen.

² Für weitere Ausführungen zur Kühl- und Kältetechnik sei beispielhaft auf [17] verwiesen.

Tabelle 3-1 Typologie und Differenzierungsmerkmale von Wärmepumpen [19, 20]

Art des Verfahrens • Kompression • Sorption ○ Absorption ○ Adsorption • Dampfstrahl-Wärmepumpe • Stirling-Wärmepumpe • Festkörperbasierte Prozesse ○ Thermoelektrischer Prozess (Peltier-Effekt) ○ Thermomagnetischer Prozess ○ Thermoelastischer Prozess	Art der Wärmesenke • Wasser • Luft
	Art der Wärmenutzung • Kühlen • Gefrieren • Warmwasser • Heizen
Art der Wärmequelle • Außenluft • Abluft • Grundwasser • Oberflächenwasser • Erdwärme • Abwärme von industriellen Anlagen/Prozessen • Abwasserwärmerückgewinnung • Solarthermie	Betriebsweise • Monovalent (alleiniger Betrieb) • Bivalent (Alternativ-, Parallelbetrieb)
	Leistungsklasse • Kleinst- und Kleinwärmepumpen • Groß- und Industrierwärmepumpen
	Temperatur-Anwendungsbereich • Niedertemperatur-Wärmepumpen • Hochtemperatur-Wärmepumpen

Kompressionswärmepumpen stellen die derzeit am weitesten verbreitete und technisch ausgereifteste Wärmepumpentechnologie dar und werden daher im Folgenden vertieft betrachtet [12]. Kompressionswärmepumpen bestehen grundlegend aus vier Bauteilen:

- Verdampfer
- Mechanischer Verdichter
- Kondensator
- Drossel

Im Verdampfer nimmt das Kältemittel bei niedrigem Druck Wärme aus einer Wärmequelle (z. B. Umgebungsluft oder Abwärme) auf und gelangt dadurch in den gasförmigen Zustand. Anschließend wird das gasförmige Kältemittel im Verdichter komprimiert, wodurch Druck und Temperatur steigen. Im Kondensator gibt das heiße Kältemittel seine Wärme an eine Wärmesenke (z. B. ein Heizkreislauf) ab und verflüssigt sich. Über die Drossel wird der Druck wieder abgesenkt, bevor das Kältemittel erneut dem Verdampfer zugeführt wird und der Kreisprozess von vorne beginnt. [21]

Es ist zu beachten, dass in der Fachliteratur unterschiedliche Klassifikationen und Grenzwerte für die Temperaturbereiche existieren. Zur Vereinheitlichung und besseren Vergleichbarkeit wird im Folgenden auf die Nomenklatur des IEA Annex 58 zurückgegriffen. Diese definiert Hochtemperatur-Wärmepumpen als Systeme, die Versorgungstemperaturen von über 100°C bereitstellen können [22, S. 16].

Das Maß für die Effizienz einer Wärmepumpe wird durch die Leistungszahl bzw. den Coefficient of Performance (COP) angegeben. Er beschreibt das Verhältnis der abgegebenen thermischen Heizleistung im Kondensator $\dot{Q}_H$ zur aufgebrauchten elektrischen Arbeit im Verdichter P_{el} .

$$COP_{real} = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} > 1$$

Der COP stellt keinen klassischen Wirkungsgrad (0–100%) dar und nimmt typischerweise Werte zwischen 2 und 6 an.

Verdichter – Da die Leistungszahl (COP) einer Kompressionswärmepumpe wesentlich von der Druck- und Temperaturerhöhung im Kreisprozess abhängt, kommt dem Verdichter eine zentrale Rolle zu. Er bestimmt maßgeblich die thermodynamische Effizienz, die erreichbaren Temperaturniveaus sowie die Betriebskosten. Während die übrigen Hauptkomponenten (Verdampfer, Kondensator und Drossel) in ihrer Funktionsweise vergleichsweise standardisiert sind und nur begrenzte Variantenvielfalt aufweisen, existiert bei Verdichtern eine große Bandbreite an Bauarten und Auslegungen (Scroll-, Schrauben-, Hubkolben- und Turboverdichter). Die vier dominierenden Verdichterbauarten sowie ihre charakteristischen Eigenschaften sind in Tabelle 3-2 systematisch dargestellt.

Tabelle 3-2 Verdichterbauarten im Vergleich [2, S. 60, 23, 8ff., 24, 14f., 25, 26]

Bauform	Eigenschaften	Eignung
Hubkolbenverdichter (Verdrängermaschine)	+ breites Anwendungsspektrum + effizient im Teillastbereich + höchste Druckdifferenz + Leistungsregelung von 5 – 100% - geringe Volumenströme	Kleine und mittlere Leistungen
Schraubenverdichter (Verdrängermaschine)	+ vibrationsarm + hohe Leistung + niedriges Gewicht + einfache Montage + kompakte Bauweise + geeignet für hohe Drehzahlen + gute Möglichkeit der Leistungsanpassung	Mittlere und große Leistungen
Scrollverdichter (Verdrängermaschine)	+ einfache Konstruktion + geringe Geräuschentwicklung + Leistungsregelung von 10 – 100%	Kleine und mittlere Leistungen
Turboverdichter (Strömungsmaschine)	+ ölfreier Betrieb + stufenlose Drehzahlregelung + niedrige Kondensations- und hohe Verdampfungstemperaturen + geringes Gewicht + schwingungsfrei + nahezu reibungsfreier Betrieb (Magnetlagerung)	Große Leistungen

3.2 Reife und Entwicklung der Technik

Der Reifegrad neuer Techniken wird anhand des Technology Readiness Level (TRL) bewertet, der von grundlegender Forschung (TRL 1) bis zur erfolgreichen Markteinführung (TRL 9) reicht [27]. Dabei bezieht sich die Bewertung in der Regel auf konkrete technologische Anwendungen oder Systeme. Wärmepumpensysteme mit Vorlauftemperaturen bis zu 100 °C sind bereits seit einigen Jahren kommerziell verfügbar und werden in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt, etwa in der Gebäudebeheizung, der Warmwasserbereitstellung sowie in industriellen Prozessen. Für diese etablierten Anwendungen kann daher von einem hohen technologischen Reifegrad bis hin zu TRL 9 ausgegangen werden, auch wenn einzelne Systemausprägungen weiterhin Gegenstand von Forschung und Entwicklung sind.

Die drei Wärmepumpensegmente der vorliegenden Technikanalyse (vgl. Abschnitt 2.3) können unterschiedlichen Phasen des Technikzyklus zugeordnet werden (siehe Abbildung 3-1). Diese Einordnung basiert auf einer qualitativen Bewertung technologischer Reifegrade und Marktdurchdringung und ist daher als heuristische Einschätzung zu verstehen. Die farblichen Markierungen kennzeichnen die Positionen der Großwärmepumpe

(blau), der Industriewärmepumpe (grün) und der Haushaltswärmepumpe (rot).

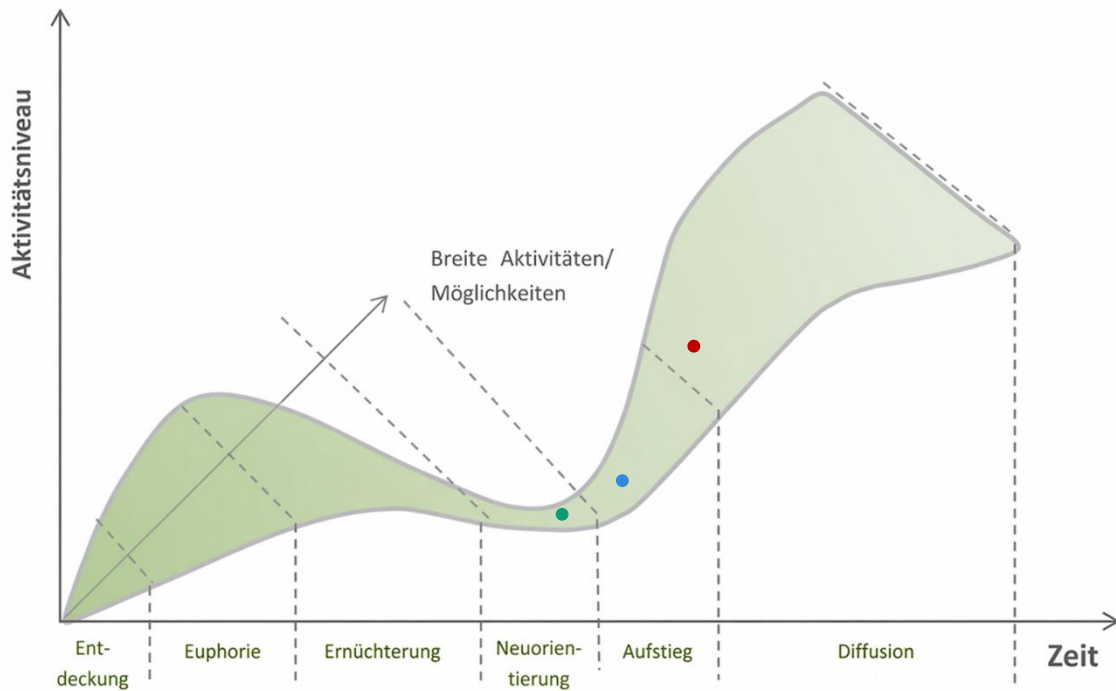


Abbildung 3-1 Einordnung von Wärmepumpensegmenten im Technikzyklus ([7], eigene Ergänzung)

Industriewärmepumpen

Industriewärmepumpen lassen sich gegenwärtig näherungsweise an der Schnittstelle zwischen der Neuorientierungsphase (Phase 4) und der Aufstiegsphase (Phase 5) einordnen. Diese Einordnung deutet darauf hin, dass sich die Technologie in einem Übergang von der Demonstrations- zur breiteren Markteinführungsphase befindet.

In dieser Phase kommt anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung eine zentrale Bedeutung zu, um bestehende technische Konzepte weiter zu optimieren und wirtschaftlich skalierbare Lösungen zu ermöglichen.

Die beobachtbare Vielfalt hinsichtlich Verfahren, eingesetzter Kältemittel sowie Leistungsklassen (Tabelle 3-3 & Tabelle 3-4) kann als Indikator für eine zunehmende Diversifizierung der Anwendungsfelder interpretiert werden. Die Literatur weist darauf hin, dass insbesondere Anwendungen im Temperaturbereich bis etwa 100°C bereits weit entwickelt sind und ein wachsender Einsatz in industriellen Prozessen erwartet wird [21, S. 9].

Tabelle 3-3 Hersteller industrieller Wärmepumpen bis 100°C [28]

Name	Untere Wärmeleistung	Obere Wärmeleistung	Vorlauftemperatur [°C]
2G Energy AG	150 kW	3,06 MW	95
AERMEC Deutschland GmbH	125,4 kW	2,64 MW	65
Advansor A/S	45 kW	1,6 MW	95
Araner Global DMCC	1,56 MW	44,55 MW	95
Buderus (Bosch Thermotechnik GmbH)	16 kW	1,42 MW	60
CIAT Deutschland/Carrier Klimatechnik GmbH	178 kW	2,02 MW	65
Carrier Kältetechnik Deutschland GmbH	95 kW	2,06 MW	95
Clade Engineering Systems Ltd	200 kW	500 kW	80
Copeland Europe GmbH	1,45 MW	5,92 MW	95
EQUANS Kältetechnik GmbH	500 kW	25 MW	95
Engie Refrigeration GmbH	130 kW	3,1 MW	90
Euroklimat S.p.A.	173 kW	710 kW	70
FENAGY A/S	600 kW	3 MW	95
FläktGroup Deutschland GmbH	445,5 kW	1,03 MW	55
Friotherm Deutschland GmbH	300 kW	20 MW	92
GEA Refrigeration Germany GmbH	205 kW	3 MW	95
KKT Chillers	200 kW	1 MW	70
Rhoss Deutschland GmbH / Rhoss S.p.a.	350 kW	1,31 MW	85
SKADEC GmbH	60 kW	3,2 MW	90
Swegon Germany GmbH	70 kW	1,78 MW	80
Systemair GmbH	140 kW	900 kW	55
Thermia AB	88 kW	1,41 MW	65
Thermocold	37 kW	837 kW	80
Trane Deutschland GmbH	104,4 kW	2,02 MW	85
Viessmann Climate Solutions SE	133,3 kW	351,5 kW	90

Großwärmepumpen

Großwärmepumpen befinden sich in Deutschland derzeit in der Aufstiegsphase des Technikzyklus. Die Technologie ist technisch ausgereift und hat sich in anderen Ländern (z. B. Schweden, Dänemark und Japan) bereits als zuverlässig und effizient in der Anwendung bewährt. In Deutschland ist die Anwendungserfahrung mit Großwärmepumpen bislang noch begrenzt: Bis Ende 2023 waren lediglich etwa 45 Großwärmepumpen mit zusammen 130 MW_{th} in Betrieb, weitere 1.000 MW_{th} befinden sich in Planung oder Bau. Im Gegensatz zur geringen Anlagenerfahrung ist die Angebotsseite in Deutschland bereits deutlich weiterentwickelt. Tabelle 3-4 gibt einen Überblick über ausgewählte deutsche Hersteller von Großwärmepumpen und ermöglicht damit einen Einblick in die Struktur dieses Marktsegments. So bietet Siemens Energy Wärmepumpen mit Heizleistungen im

zweistelligen Megawattbereich an, die insbesondere für die Integration in Fernwärmenetze ausgelegt sind. [2]

Tabelle 3-4 Großwärmepumpen deutscher Hersteller bis 100°C [2, S. 130]

Hersteller	Max. Vorlauf- temperatur [°C]	Heizleistung [MW]	Verdichtertyp	Kältemittel
Combitherm	80°C	0,1 – 5 MW	Schrauben- und Kolbenverdichter	diverse
Engie Refrigeration (ehemals Cofely)	90°C	0,2 - 3 MW	Kolben- und Turboverdichter	diverse
GEA-Refrigeration	95°C	0,2 – 3 MW	Schrauben- und Kolbenverdichter	R717
Siemens Energy	100°C	15 – 40 MW	Turboverdichter	R1234ze u.a.
Viessmann (bis 2023)	73°C	0,3 - 0,6 MW	Schraubenver- dichter	R513a
KKT Chillers	70°C	0,2 – 1 MW	Schraubenver- dichter	diverse
Everllence (früher MAN Energy Solutions)	60–100°C	10 – 100 MW	Turboverdichter	diverse

Gebäude-/Haushaltswärmepumpen

Gebäude-/Haushaltswärmepumpen können der Phase 6 (Diffusion) des Technikzyklus zugeordnet werden. Im Neubausektor sind sie breit etabliert und stellen mit einem Anteil von 69,4 % im Jahr 2024 die dominierende Heiztechnologie dar. [5]

Im Gebäudebestand gestaltet sich die Integration hingegen aufgrund der Heterogenität der Bestandsgebäude sowie teilweise ungünstiger baulicher Voraussetzungen deutlich herausfordernder. Im Jahr 2024 wurden rund 4,3 % des Wohnungsbestands mit Wärmepumpen sowie solarthermischen bzw. geothermischen Anlagen beheizt. [5]

Ungeachtet dieser bislang vergleichsweise geringen Marktdurchdringung im Bestand weist die Wärmepumpentechnologie über die vergangenen 25 Jahre das stärkste relative Wachstum unter den Heiztechnologien auf. [5]

3.3 Absehbare Anwendungsbereiche und weitere Potenziale

Nach der Betrachtung des technischen Reifegrads der einzelnen Wärmepumpensegmente richtet sich der Fokus nun auf die absehbaren Anwendungsfelder und das weiter-

gehende Potenzial dieser Technik im Kontext der sektorübergreifenden Wärmewende. Während im Bereich der Wohngebäude standardisierte Anwendungen bereits etabliert und breit verfügbar sind, stellen sich die Potenziale im industriellen Sektor komplexer dar. Die Einsatzmöglichkeiten industrieller Wärmepumpen sind weniger klar umrissen und sichtbar. Gerade deshalb besteht ein besonderer Bedarf, diese Anwendungsbereiche systematisch zu analysieren und hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Voraussetzungen zu bewerten.

3.3.1 Industrie

Wärmepumpen sind in Industriebetrieben heute bereits zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser zunehmend etabliert. Der Einsatz zur Prozesswärmeversorgung ist dagegen noch selten und beschränkt sich vielfach auf Pilotprojekte. Eine systematische Erhebung im Rahmen des IEA HPT Annex 48 dokumentierte im Jahr 2020 insgesamt 342 Industrieanwendungen (Abbildung 3-2). Der Schwerpunkt lag dabei in der Lebensmittelindustrie, was auf die Kombination aus moderaten Temperaturanforderungen und gleichzeitig hohen Jahresbedarfen zurückzuführen ist. Darüber hinaus wurden 22 Anwendungen im Maschinenbau (darunter 6 in der deutschen Metallverarbeitung) sowie 20 Anwendungen in der chemischen Industrie erfasst. [8, S. 25]

Arpagaus (2023) hebt anhand von fünf Fallbeispielen aus der Schweizer Lebensmittelindustrie (u. a. Käserei, Schokoladenfabrik, Essigherstellung, Schlachtereier, Getränkehersteller) hervor, dass Wärmepumpen dort Leistungen bis 800 kW und Prozesstemperaturen bis 95°C bereitstellen [29, S. 32-34].

Wolf (2017) hat den industriellen Prozesswärmebedarf nach Temperaturklassen differenziert [4]. Abbildung 3-3 zeigt, dass insbesondere die Nahrungsmittel-, Papier- und Chemieindustrie günstige Einsatzbedingungen für Wärmepumpen aufweisen [4, S. 118]. Diese Einschätzung wird durch Riedel (DLR) bestätigt [30, S. 4]. Ergänzend ist das Druckgewerbe hervorzuheben [2, S. 23]. Demgegenüber sind die Branchen Metallerzeugung, Glas- und Keramikindustrie zwar sehr wärmeintensiv, liegen jedoch überwiegend in Temperaturbereichen deutlich über 100°C [31, S. 12].

Industry	Application	Total	Austria	Denmark	France	Japan	Switzerland	UK	Germany	Netherlands
Total		342	69	74	33	101	24	10	23	8
Agriculture/Fishing		12		1	1	7	1		1	1
Food:		88	17	8	9	40	5	1	4	4
	Brewery	7	2			3			1	1
	Malt	3			2				1	
	Beverage	4				4				
	Fruit juice	3	3							
	Winery	1				1				
	Dairy	9		6		2			1	
	Milk processing	2	2							
	Cheese	4			2	1	1			
	Cream ice	1				1				
	Bakery	2	2							
	Chocolate	6				5	1			
	Slaughter house	4			1		1		1	1
	Meat processing	5	3		2					
	Deep freeze	3	3							
	Noodle	5				5				
	Sugar	1				1				
	Tabacco	1				1				
	Others	27	2	2	2	16	2	1		2
Chemicals		20		2		14			3	1
Pharmaceutical		4	2				2			
Electronics		16	5	0		10			1	
Machinery:		22				22				
	Automotive	3	2						1	
	Glass	1							1	
	metal processing	6							6	
	plastic	1	1							
	Others	4					1		3	
Metal industry		12	11				1			
Plastics industry		7	3		4					
Rubber		1			1					
Paper/Pulp		5	1	0	1	3			0	
Wood industry		2	2							
Textile		4		2					1	1
Commercial Misc.		1							1	
Utility		11	11							
District heating		69		47	15		6		1	
Warehouse		2		1						1
Large Buildings		27	7	8	1		2	9		
Health, tourism		10	7		1		2			
Others		14		5		5	4			

Abbildung 3-2 Industrielle Wärmepumpenanwendungen nach Annex 48 [8, S. 25]

Eine detaillierte Prozessbetrachtung liefert Abbildung 3-4 aus einer Studie der Universität Stuttgart (2014). Hier zeigt sich ein signifikantes Potenzial sowohl in der Lebensmittelverarbeitung als auch in der Metallverarbeitung. Während die konkreten Energieverbräuche der Metallverarbeitung nicht quantifiziert wurden, werden dort relevante Anwendungen in den Bereichen Reinigung, Beschichtung und Trocknung sichtbar. [32, S. 20]

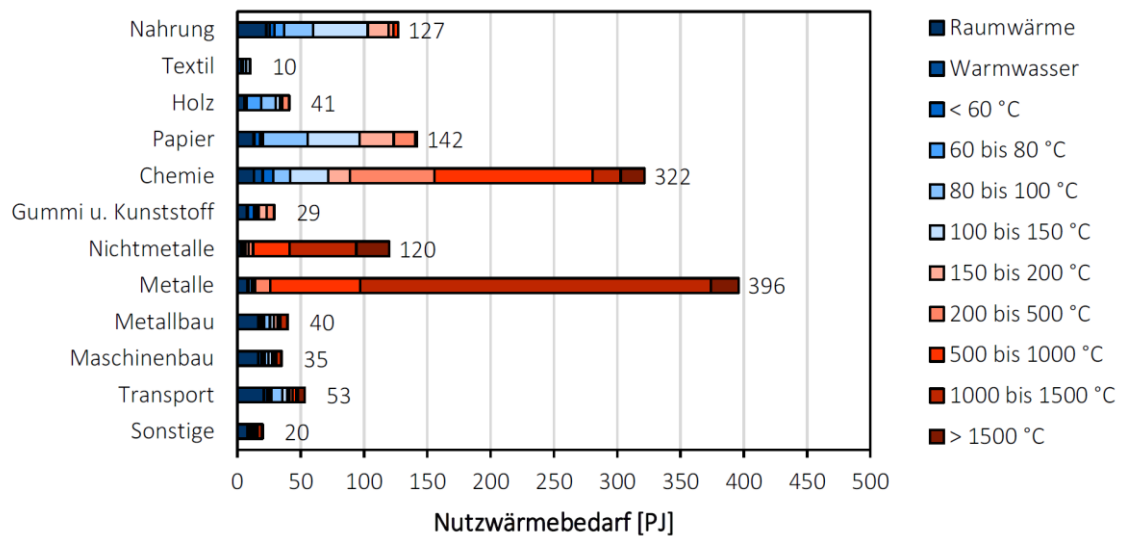


Abbildung 3-3 Prozesswärmebedarf nach Branche und Temperaturniveau [4, S. 118]

Auf europäischer Ebene schätzen Nellissen und Wolf (2015) das technische Wärmepumpenpotenzial für Europa bis 100°C auf 510 PJ (142 TWh). [29, 33] Neuere Studien wie das SINTEF-Whitepaper (2020) bestätigen steigende Werte und quantifizieren ein Potenzial von 799 PJ (222 TWh), was etwa 11 % des industriellen Prozesswärmebedarfs entspräche [34]. Dies deutet auf eine zunehmende Relevanz des Temperaturbereichs bis 100°C hin. Da überwiegend erdgasbasierte Bereitstellung substituiert würde, ergibt sich eine THG-Minderung von rund 55 Mio. t CO₂ pro Jahr. Die größten Potenziale liegen in den Sektoren Zellstoff und Papier, Lebensmittel und Getränke, Chemie, nichtmetallische Mineralien und Maschinenbau. [34]

Die analysierten Studien weisen teils erhebliche Unterschiede in den Ergebnissen auf, zeigen jedoch übereinstimmend einen Trend zu steigenden Potenzialabschätzungen. Besonders deutlich wird dabei, dass der Temperaturbereich bis 100°C künftig eine zentrale, tendenziell sogar wachsende Bedeutung erlangen wird. Unternehmen stellen ihre Prozesse zunehmend auf niedertemperaturfähige Systeme um, um Effizienzgewinne zu realisieren und Dekarbonisierungspotenziale zu erschließen. Parallel treiben Elektrifizierung und politische Rahmenbedingungen – etwa der European Green Deal – die Verbreitung entsprechender Lösungen weiter voran. Auch die erwartete Absenkung von Fernwärmepertemperaturen (derzeit häufig noch bei rund 120°C) unterstützt diesen Wandel. In Verbindung mit expandierenden Branchen wie der Lebensmittelindustrie ist daher künftig von einem deutlich steigenden Bedarf an Nutzenergie im Niedertemperaturbereich auszugehen.

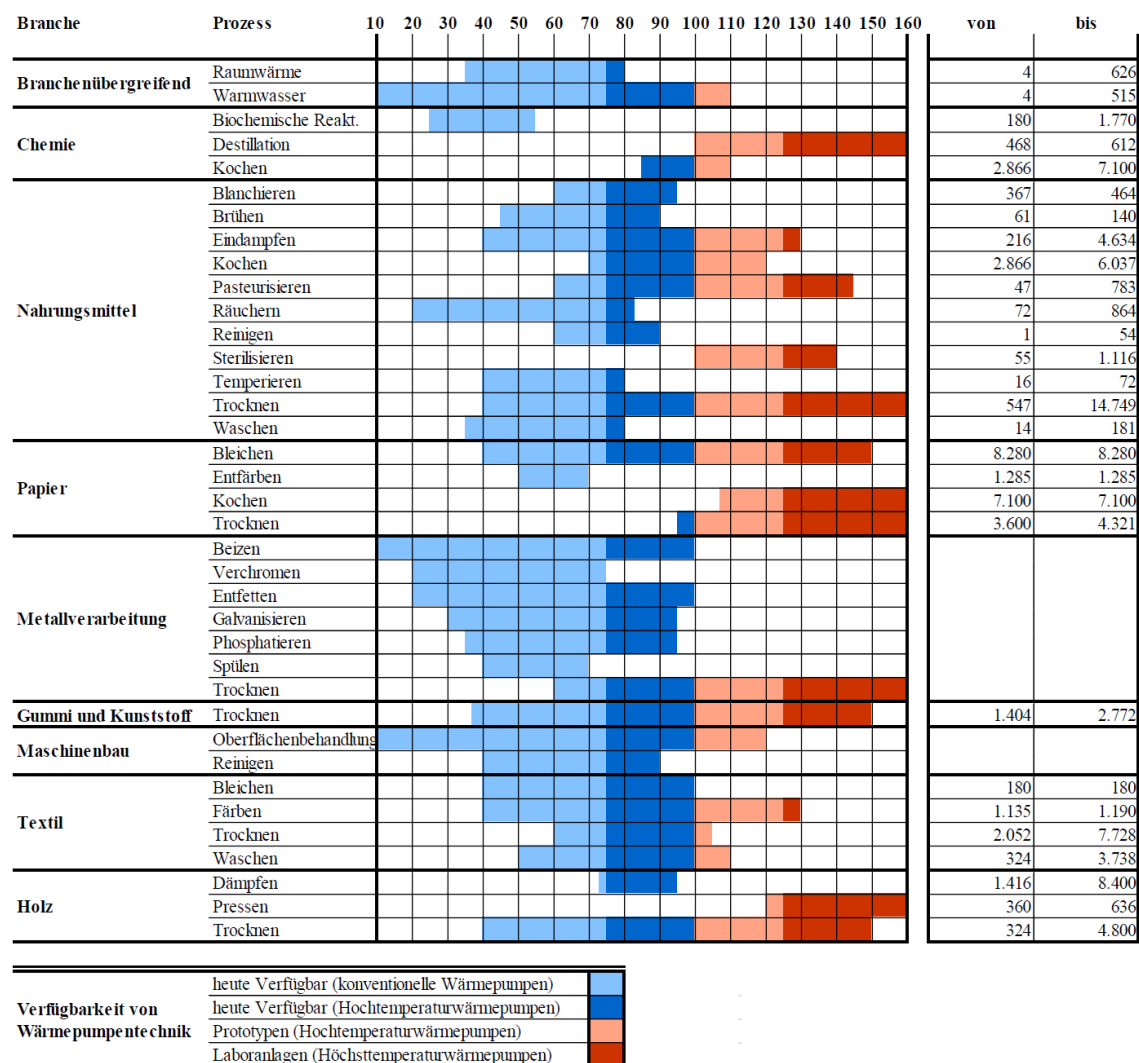


Abbildung 3-4 Versorgungstemperaturen und Wärmeverbräuche (rechts in PJ) industrieller Prozesse [32, S. 20]

3.3.2 Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)

Im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) entfällt der größte Teil des Energieverbrauchs auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Die erforderlichen Leistungen liegen üblicherweise über denen privater Haushalte, jedoch unter dem Niveau industrieller Anwendungen. Bereits im Jahr 2020 wurden laut Annex 48 mehrere Großgebäude (27), Tourismus- und Erholungseinrichtungen (10, darunter Thermen) sowie Lagerhallen (2) mit Wärmepumpen beheizt, jedoch keines dieser Beispiele in Deutschland [8, S. 25]. Ein Beispiel für eine fortschrittliche Lösung findet sich an der italienischen Riviera: Ein Hotel mit 120 Zimmern, Konferenzräumen und Spa wird durch eine Wärmepumpe der Firma Trane versorgt, die jeweils 1.000 kW Heiz- und Kühlleistung bereitstellt und dank 4-Leiter-Technik raumspezifische Wärmerückgewinnung ermöglicht [35].

Für die Einschätzung des Wärmepumpenpotenzials im GHD-Sektor ist insbesondere der Bestand an Nichtwohngebäuden – Verwaltungsgebäude, Produktionshallen sowie Lager-

und Logistikgebäude – relevant. Die verfügbare Datengrundlage in diesem Bereich ist jedoch als unzureichend einzustufen [36]. Produktions- und Lagerhallen weisen vergleichsweise niedrige spezifische Heizlasten auf, erfordern jedoch oft großvolumige Temperierung. Häufig genügen Heizungssysteme mit niedrigeren Vorlauftemperaturen ($<55^{\circ}\text{C}$), was den Einsatz von Wärmepumpen technisch begünstigt [37]. Im Vorhaben „ENOB: dataNWG“ wurde ermittelt, dass knapp 2 Mio. thermisch relevante Nichtwohngebäude in den Anwendungsbereich des GEG fallen (2021), die wesentliches Teilpotenzial für Wärmepumpen im GHD-Sektor darbieten. [38, S. 18]

AGEB-Daten von 2023 erlauben eine differenziertere Betrachtung des Potenzials im GHD-Sektor [39]. Der Endenergieverbrauch für Raumwärme beträgt 551 PJ ($\approx 153\text{ TWh}$), davon sind bereits 170 PJ ($\approx 47\text{ TWh}$) durch Fernwärme, erneuerbare Energien und Strom abgedeckt. Somit verbleiben rund 380 PJ ($\approx 106\text{ TWh}$) als erschließbares Potenzial für Wärmepumpen. Zusätzlich zu dem durch fossile Energieträger versorgten Raumwärmepotenzial ergibt sich für die Warmwasserbereitstellung ein energetisches Potenzial von 56,6 PJ ($\approx 15,7\text{ TWh}$). Damit ergibt sich ein technisches Maximum von rund 436 PJ ($\approx 121\text{ TWh}$). Das tatsächliche Potenzial kann jedoch durch Energieeinsparmaßnahmen kleiner ausfallen. Verbesselter Wärmeschutz verringert insbesondere den Bedarf an Raumwärme, wobei dieser Effekt durch den Flächenzuwachs im GHD-Sektor teilweise wieder kompensiert wird. Zudem lässt sich durch die Umstellung von zentraler auf dezentrale Warmwasserversorgung zusätzlicher Energieeinsatz vermeiden.

3.3.3 Nah-/Fernwärme

Das Wärmeplanungsgesetz ist am 1. Januar 2024 (gemeinsam mit der Novellierung des GEG) in Kraft getreten und schreibt die Defossilisierung aller Wärmenetze bis 2045 vor. Derzeit sind etwa 14 % der deutschen Haushalte an ein Wärmenetz angeschlossen; dieser Anteil soll sich bis 2045 verdreifachen [40]. Im Jahr 2021 deckten Fernwärmesysteme rund 9,5 % des bundesweiten Wärmebedarfs ab, was 134 TWh entspricht. Davon stammten etwa 29 TWh aus erneuerbaren Energien, überwiegend aus Biomasse, deren Klimaneutralität in Szenarien jedoch nicht immer anerkannt wird [2, S. 22].

Die Rolle von Wärmepumpen in Wärmenetzen gewinnt zunehmend an Bedeutung. International zeigt vor allem Dänemark, wie der großflächige Einsatz funktioniert: Dort werden Wärmepumpen systematisch in Fernwärmenetze integriert, etwa in Esbjerg, wo mit 75 MW_{th} die derzeit weltweit größte Wärmepumpe von Everllence (früher MAN Energy Solutions) betrieben wird [41]. Auch in Deutschland schreitet die Entwicklung voran. Im Rahmen des vom BMWI initiierten Projekts Reallabor Großwärmepumpe wurden mehrere Anlagen zur Einspeisung in öffentliche Netze errichtet. Die derzeit größte deutsche Anlage befindet sich in Mannheim: eine Flusswärmepumpe von Siemens Energy mit 20 MW_{th} , betrieben von der MVV Energie AG. Sie speist Wasser mit $83\text{--}99^{\circ}\text{C}$ in das Fernwärmenetz ein und versorgt damit rund 3.500 Haushalte mit Wärme [42]. Ziel des Projekts ist es, Hemmnisse in Planung und Umsetzung zu identifizieren und zu überwinden.

Technisch ist die Integration von Wärmepumpen in bestehende Netze möglich, sofern geeignete Wärmequellen verfügbar sind. Rund 900 Wärmenetze in Deutschland, mit einer durchschnittlichen Leitungslänge von 13 km, arbeiten derzeit mit Vorlauftemperaturen zwischen 90 und 110°C [2, S. 23]. Diese Temperaturbereiche sind prinzipiell mit modernen Großwärmepumpen kompatibel. Hinzu kommt, dass die thermischen Leistungen der bestehenden Wärmeerzeuger gut in die Leistungsspanne typischer Wärmepumpen passen: Heizwerke lagen 2020 im Durchschnitt bei 9,3 MW, KWK-Anlagen bei 5,2 MW [2, S. 24]. Damit eröffnen sich insbesondere in kleineren, dezentralen Netzen, die bislang oft von KWK-Anlagen dominiert werden, erhebliche Potenziale für den Einsatz von Wärmepumpentechnologien.

3.4 Internationaler Wettbewerb in Forschung und Entwicklung

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Patentanalyse zur industriellen Energieeffizienz durchgeführt. Die Untersuchung umfasst sowohl Patentanmeldungen aus den Jahren 2020 bis 2022 als auch die Wachstumsraten der Patentanmeldungen in 19 Technologiebereichen im Zeitraum von 2015 bis 2022. Dabei wurden die Anmeldezahlen aus Deutschland mit denen der USA und Chinas verglichen. Ein bemerkenswertes Ergebnis dieser Analyse ist, dass China in 18 der 19 untersuchten Produktgruppen ein höheres Wachstum an Patentanmeldungen verzeichnet als Deutschland oder die USA. Dies unterstreicht Chinas erfolgreiche Aufholjagd in technischen Innovationen. Lediglich im Bereich der Erhitzer und Wärmepumpen weist Deutschland eine ausgeprägte Spezialisierung auf und übertrifft mit einer Wachstumsrate von 1,5 % die beiden Vergleichsnationen. Nach den Patentanmeldungen zählt dieser Bereich zu den am zweitschnellsten wachsenden Technologiefeldern in Deutschland, ein Feld, in dem derzeit noch ein technischer Vorsprung gegenüber den internationalen Wettbewerbern besteht. [7]

Auf europäischer Ebene wird diese technische Position durch ein vielschichtiges und strategisch ausgerichtetes Förderumfeld flankiert. Die Europäische Union verfügt über ein breit gefächertes und zielgerichtetes Förderinstrumentarium zur Unterstützung der Entwicklung, Skalierung und Marktdurchdringung von Wärmepumpentechnologien, sowohl im privaten Wohnbereich als auch in industriellen Anwendungen. Durch die Kombination aus direkten Forschungszuschüssen, strategischen Investitionsprogrammen sowie regionalen Strukturförderungen wird ein innovationsfreundliches Umfeld geschaffen, das zentrale Beiträge zur Dekarbonisierung des Wärmesektors ermöglicht. Ein zentrales Element stellt das Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe dar, das mit einem Budget von 93,5 Milliarden Euro technische Innovationen in den Bereichen Energieeffizienz, Systemintegration und klimaneutrale Wärmebereitstellung fördert. Besonders Industriewärmepumpen profitieren im Rahmen interdisziplinärer Projekte zur Ressourceneffizienz und industriellen Symbiose von dieser Förderkulisse. Ein weiteres bedeutendes Finanzierungsinstrument ist der Innovation Fund, dessen Gesamtvolumen, abhängig vom CO₂-Preis, bis zum Jahr 2030 auf bis zu 40 Milliarden Euro anwachsen kann. Dieser Fonds

adressiert vorrangig großtechnische Anwendungen, die sich bislang noch nicht unter Marktbedingungen amortisieren, wie etwa Hochtemperatur-Wärmepumpen für Prozesswärme und Fernwärmesysteme. Ergänzt wird die europäische Förderlandschaft durch InvestEU sowie das Binnenmarktprogramm (Single Market Programme, SMP). InvestEU unterstützt im Förderzeitraum 2021–2027 Investitionen unter anderem in nachhaltige Infrastruktur, Forschung, Innovation und Digitalisierung und knüpft an den früheren Europäischen Fonds für strategische Investitionen (EFSl) an. Das SMP stärkt insbesondere die Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen und führt wesentliche Maßnahmen des früheren COSME-Programms fort. Mit einem Gesamtvolumen von 577 Milliarden Euro stellt die Recovery and Resilience Facility (RRF) das größte einzelne EU-Finanzinstrument dar. Es dient ebenfalls der Unterstützung nachhaltiger Infrastrukturen, einschließlich des Ausbaus klimafreundlicher Wärmeversorgung. Auch auf nationaler Ebene zeigen Länder wie Frankreich, Österreich, Schweden und die Niederlande beachtliche Investitionen in industrielle Wärmepumpenanwendungen. Förderprogramme wie der französische Fonds Chaleur bieten dabei Investitionszuschüsse von bis zu 65 %, was insbesondere für kapitalintensive Großwärmepumpenprojekte von hoher Relevanz ist. Die europäische Industrie ist technisch gut positioniert. Unternehmen wie Siemens Energy, GEA Refrigeration, Everllence (früher MAN Energy Solutions) und Engie Refrigeration verfügen über hohe technische Kompetenz, langjährige Erfahrung und internationale Exportfähigkeit im Bereich großskaliger Wärmepumpensysteme. Die Stärke Europas zeigt sich auch in der Patentaktivität und einer dominanten Marktstellung innerhalb des Kontinents.

Die europäischen Förderprogramme tragen maßgeblich zur technischen Weiterentwicklung von Wärmepumpensystemen bei, insbesondere in anspruchsvollen Anwendungen wie Industrie und Fernwärme. Sie fördern gezielt Forschung, Pilotprojekte und Demonstrationen, um technische Hürden zu überwinden und Marktbarrieren abzubauen. Damit verfolgt Europa eine strategisch koordinierte Linie, Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie der Wärmewende auch jenseits des Gebäudesektors zu etablieren.

3.5 Konkurrenztechniken

Strombetriebene Wärmepumpen stellen eine zentrale Option zur Defossilisierung der Wärmeherzeugung dar. Neben diesen existieren weitere Alternativtechnologien, die sowohl auf fossilen als auch auf erneuerbaren Energieträgern basieren und zur Bereitstellung von Wärme bis 100°C genutzt werden. Konservativ betrachtet, liegt der Fokus in diesem Kontext auf dem Warmwasserverbrauch und dem Raumwärmebedarf, da diese Wärmebereiche unter 100°C bereitgestellt werden. Auch im Bereich der Prozesswärme gibt es Prozesse, die Wärme unter 100°C erfordern. Da diese jedoch nicht separat erfasst werden, wird an dieser Stelle nicht darauf eingegangen.

Im Jahr 2024 wurde die Raumwärme in der Industrie zu 16,3 % aus erneuerbaren Energien bereitgestellt, während die Warmwasserbereitstellung zu 14,9 % aus erneuerbaren

Energien erfolgte. Im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor (GHD-Sektor) lagen die entsprechenden Anteile bei 21,7 % für die Raumwärme und 13,6 % für die Warmwasserbereitstellung. Diese Daten deuten darauf hin, dass die größte Konkurrenz im Bestandssystem weiterhin mit fossilen Energieträgern betrieben wird. [39]

Vor diesem Hintergrund bietet Tabelle 3-5 einen Überblick über mögliche Konkurrenztechniken zur Wärmepumpe bei Vorlauftemperaturen bis 100°C. Dazu zählen verschiedene konventionelle, biogene sowie strombasierte Ansätze.

Tabelle 3-5 Konkurrenztechnologien zu Wärmepumpen bis 100°C ([29], [31], [43], [44], [45], Eigene Einschätzung)

Kriterium	Großspeicher/ P2H	Biomassekessel	Brennstoffzelle (SOFC)	Wasserstoffkessel	Elektroden- kessel	KWK (BHKW/ Gasturbine)	Fossile Kessel (Gas/Öl)	Wärmepumpe
Spez. Investition	hoch (500–1500 €/kW)	mittel (300–600 €/kW)	hoch (1500–3000 €/kW)	mittel (300–600 €/kW, stark variabel)	sehr niedrig (50–150 €/kW)	mittel (600–1200 €/kW)	niedrig (100–250 €/kW)	100 – 2000 €/kW _{th}
Wärmeentste- hungskosten	stark strompreisab- hängig	variabel, oft günstig bei loka- ler Verfügbarkeit	sehr hoch (H ₂ + Investment)	hoch (H ₂ -Kosten aktuell dominierend)	hoch bei üblichen Strompreisen	mittel, gekoppelt an Gas- und Strompreise	niedrig-mit- tel, abhängig von Brenn- stoff	48 – 117 €/MW _{th}
Effizienz/Wirk- ungsgrad	40–70 % (Umwandlungsket- ten)	75–90 %	50–60 % elektrisch + nutzbare Wärme (Gesamt ~85–90 %)	85–95 %	~100 % (direkt elektrisch)	80–90 % (bezogen auf Brennstoff, plus Strom)	85–95 %	Hier 370 %
Senken- temperatur	flexibel, je nach Auslegung	flexibel, <150°C	<100°C (Abwärme)	flexibel, bis ~200°C	flexibel, typ. <120°C	flexibel, bis >200°C	flexibel, bis 200°C	<100°C
Reifegrad (TRL)	6–8 (Pilot bis Demonst- ration)	9 (kommerziell etabliert)	6–7 (Demonstrations- phase)	6–7 (Pilot bis frühe Kom- merzialisierung)	9 (kommerziell etabliert)	9 (kommerziell etabliert)	9 (kommerziell etabliert)	9 (kommerziell etabliert)
Eignung flexibler Betrieb	hoch (mit Speicher)	mittel (brennstofflogis- tisch bedingt träge)	mittel (Start/Stop träge, Teillast begrenzt)	hoch (Laständerungen mög- lich, Brennstoffabhän- gig)	sehr hoch (schnell re- gelbar)	mittel (gekoppelt an Stromproduk- tion)	hoch (träge bei Lastwechsel)	mittel
Besonderheiten	ermöglicht zeitliche Entkopplung, Sekto- renkopplung	CO ₂ -arm, abhän- gig von Rohstoff- verfügbarkeit	liefert gleichzeitig Strom + Wärme, hohe Investition	CO ₂ -freier Betrieb, bei grünem H ₂ , hohe Brennstoffkosten	einfach, ge- ringe CAPEX, hohe OPEX	gekoppelte Strom-Wärme- Erzeugung	etabliert, niedrige CAPEX, CO ₂ - intensiv	Beidseitige Nut- zung steigert Effi- zienz

4. Relevanz in Forschung und Entwicklung

Dieses Kapitel untersucht die Relevanz von Wärmepumpensystemen bis 100°C in der deutschen Forschungs- und Entwicklungslandschaft. Im Fokus stehen zum einen Umfang und thematische Schwerpunkte der öffentlichen Energieforschungsförderung des Bundes (Abschnitt 4.1) sowie zum anderen die qualitative Verankerung der Wärmepumpentechnologie im Energieforschungsprogramm (Abschnitt 4.2). Die projektbezogene Auswertung ist aufgrund der Suchmethodik als indikative Analyse und nicht als vollständige Förderstatistik zu verstehen.

4.1 Forschung und Entwicklung in Deutschland

Zur Einordnung der FuE-Aktivitäten in Deutschland werden im Folgenden zwei ergänzende Auswertungen herangezogen. Erstens wird die öffentlich zugängliche EnArgus-Datenbank genutzt, um einen breiten Überblick über geförderte Energieforschungsvorhaben mit Bezug zur Wärmepumpentechnologie zu gewinnen. Zweitens wird eine PtJ-Projektdatenbank für die Förderbereiche ESN2 (Energieeffizienz für Industrie: Prozesse) und ESN4 (Energieeffizienz für Industrie: Technologien) ausgewertet, die einen stärker fachbereichsbezogenen Blick auf Vorhaben im Bereich der industriellen Energieeffizienz ermöglicht. Beide Datenzugänge unterscheiden sich damit in Reichweite und Zuschnitt: Während EnArgus eine übergreifende Recherche innerhalb der Energieforschungsförderung erlaubt, fokussiert die PtJ-Auswertung auf ausgewählte, durch den Projektträger Jülich betreute Förderbereiche. Die Ergebnisse werden daher nicht additiv interpretiert, sondern dienen der gegenseitigen Plausibilisierung und Ergänzung.

4.1.1 Stichprobensuche mittels EnArgus-Datenbank

Der folgende Abschnitt analysiert die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Bereich der Wärmepumpentechnologie in den vergangenen 25 Jahren. Grundlage der Untersuchung ist die Förderdatenbank EnArgus, die einen umfassenden Überblick über geförderte Energieforschungsprojekte in Deutschland bietet.

Im Fokus der Analyse stehen Projekte der letzten zehn Jahre, die systematisch erfasst und ausgewertet wurden. Zwar lässt sich aus der Häufigkeit von Begriffsnennungen in Projektbeschreibungen oder Forschungsberichten ein erstes Bild thematischer Schwerpunkte ableiten, jedoch erlaubt diese Methode nur eingeschränkte Rückschlüsse auf die tatsächliche Relevanz spezifischer Forschungsthemen im Kontext der Wärmepumpe. Die Ergebnisse sind daher als explorative Einordnung und nicht als belastbare Förderstatistik zu verstehen.

Zur gezielten Filterung relevanter Verbundvorhaben wurden themenspezifische Schlagwörter in die Suchmaske der EnArgus-Datenbank eingegeben. Die verwendeten Suchbegriffe lauteten:

- „Wärmepumpe“
- „Hochtemperatur Wärmepumpe“
- „Sorptionswärmepumpe“³

Später bei der Diskussion der Ergebnisse wird exemplarisch aufgezeigt, welche Unsicherheiten mit dieser Form der Suchtreffer-Analyse einhergehen. Dabei wird deutlich, dass die resultierenden Trefferzahlen nur eingeschränkt als belastbare Indikatoren für die Relevanz bestimmter Forschungsthemen herangezogen werden können.

Die Anzahl der geförderten Vorhaben stieg von rund 20 Anfang der Nuller Jahre auf über 260 in der ersten Hälfte der 2020er Jahre (türkiser Balken, vgl. Abbildung 4-1). Die Auswertung in EnArgus umfasst die gelisteten Suchtreffer zu den Suchbegriffen „Wärmepumpe“, „Sorptionswärmepumpe“, „Hochtemperatur-Wärmepumpe“ im Zeitraum 2000 – 2024⁴. Es ist ein stetiger Zuwachs an Aktivität im Bereich der Hochtemperatur-Wärmepumpen zu verzeichnen. Demgegenüber ist bei den Sorptionswärmepumpen zunächst ein Anstieg bis zum Zeitraum 2010–2014 erkennbar, gefolgt von einem rückläufigen Trend in den darauffolgenden Jahren. Eine analoge Entwicklung zeigt sich bei der aggregierten Fördersumme über die jeweiligen Vorhaben-Gruppen hinweg (gestrichelte Linien). Der Rückgang der Förderung von Sorptionswärmepumpen lässt sich durch mehrere zusammenwirkenden Faktoren erklären. Sorptionswärmepumpen weisen im Vergleich zu elektrischen Kompressionswärmepumpen häufig niedrigere erreichbare COP-Werte, eine geringere Wirtschaftlichkeit sowie ein engeres Anwendungsspektrum auf. Systeme zur Gebäudebeheizung bedürfen zudem einen Gasanschluss. Da elektrische Kompressionswärmepumpen technisch ausgereifter und flexibler einsetzbar sind, erscheint der rückläufige Trend der Vorhaben- und Fördersummen bei Sorptionswärmepumpen in Verbindung mit der förderpolitischen Priorisierung elektrischer Wärmepumpen sowohl technologisch als auch marktseitig nachvollziehbar. [46]

Nach Definition der Internationalen Energieagentur (IEA) handelt es sich bei HTWP um Systeme, die ihre nutzbare Energie bei Vorlauftemperaturen über 100°C bereitstellen (vgl. Abschnitt 3.1). Damit lässt sich die Entwicklung der Fördervorhaben zur Wärmepumpe (bis 100°C) aus der Differenz der allgemeinen Wärmepumpenförderung und der Förderung für HTWP abschätzen. Die in Abbildung 4-1 dargestellten Daten differenzieren nicht ausdrücklich zwischen Wärmepumpentechnologien mit Senktemperaturen unter bzw. über 100°C, verdeutlichen jedoch einen kontinuierlichen und deutlichen Anstieg der Förderaktivitäten im Zeitraum 2000–2024.

³ Suchbegriffe wurden nicht kombiniert. Kein Einfluss durch Groß-/Kleinschreibung.

⁴ Die Suche unterscheidet nicht zwischen Projekten und Teilvorhaben. Teilvorhaben werden als einzelnes Projekt gewertet.

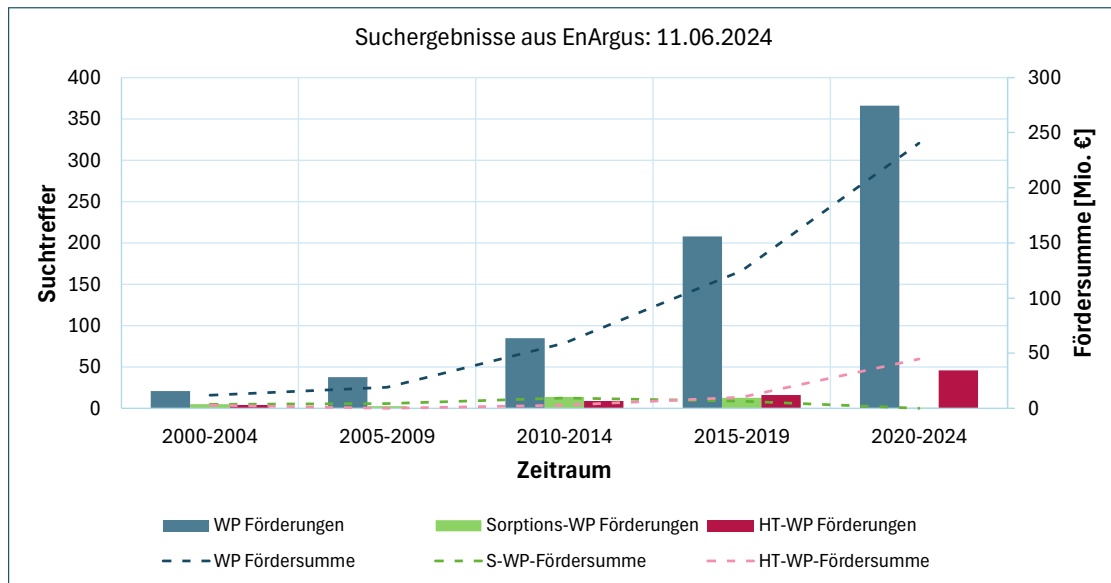


Abbildung 4-1 EnArgus-Auswertung zu Wärmepumpenvorhaben [Stichtag der Auswertung: 11.06.2024, eigene Darstellung]

Abbildung 4-1 zeigt die Auswertung der in EnArgus gelisteten Energieforschungsvorhaben, wobei die Balken die Anzahl der Suchtreffer beziehungsweise Vorhaben je Zeitintervall und die gestrichelte Linie die aggregierte Fördersumme darstellen; Stichtag der Auswertung ist der 11.06.2024. Eine ergänzende Auswertung von Google-Scholar-Suchtreffern zeigt ebenfalls eine zunehmende Publikationsaktivität. Bereits in den frühen 2000er-Jahren erreichten Suchtreffer zu Wärmepumpen bis 100°C eine vergleichbare Größenordnung wie solche zur HTWP zwischen 2010 und 2014 (siehe Tabelle 4-1, WP <100°C = 34, HTWP = 35). Zugleich lässt sich auch im Bereich der Wärmepumpen bis 100°C bis heute ein kontinuierlich starkes Wachstum der Anzahl der Suchtreffer beobachten, was darauf hinweist, dass in diesem Segment nach wie vor erhebliche Forschungsaktivität stattfindet. Der Unterschied zeigt sich vor allem in den thematischen Schwerpunkten der Förderprojekte, die sich je nach Temperaturniveau unterschiedlich entwickeln.

Tabelle 4-1 Suchergebnisse Google Scholar (absolute, nicht kumuliert), 11.06.2024

Suchbegriffe	WP-Typ	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024
"Industrial applications" "heat pumps"- "industrial application" "heat pump" "high temperature"	WP <100°C	34	59	116	380	886
"Industrial application" "heat pump" "high temperature"	HTWP	4	9	35	78	176

Zur Identifikation von Entwicklungsschwerpunkten wurden stichprobenartig aktuelle Forschungsthemen renommierter Forschungseinrichtungen herangezogen (u. a. Fraunhofer ISE, IEA-Annexe). Aus den gesammelten Forschungsthemen wurden übergeordnete Technologieaspekte definiert. Diese sind in die Gruppen untergliedert:

- **Komponentenoptimierung:** Befasst sich mit der Forschung unmittelbar an den Bauteilen der Wärmepumpe.

- **Systemintegration:** Zeichnet sich durch die Forschung an der Peripherie aus und zielt auf die Optimierung des Betriebsverhaltens ab.

Die identifizierten Forschungsthemen dienen als Suchbegriffe/Schlagworte zur Ermittlung der Anzahl an Verbundvorhaben, die ein oder mehrere der Forschungsthemen behandeln. Zur Bestimmung der Häufigkeit der Forschungsthemen in geförderten Forschungsprojekten, wird das vom BMWF zur Verfügung gestellte Internet-Portal EnArgus verwendet. Folgende Suchbegriffe wurden angewendet:

1. „Wärmepumpe Kältemittel“
2. „Wärmepumpe Schall“
3. „Wärmepumpe Regelung“
4. „Wärmepumpe Wärmeübertrager“
5. „Wärmepumpe Flexibilisierung“
6. „Wärmepumpe Speicher“
7. „Wärmepumpe Energieeffizienz“
8. „Wärmepumpe Design“
9. „Wärmepumpe Hybrid“⁵

Tabelle 4-2 fasst die Trefferanzahl je Forschungsthema und Zeitperiode zusammen.

Tabelle 4-2 Suchtreffer zu Technologieaspekten in der EnArgus-Datenbank (absolute, nicht kumuliert), 20.06.2024

Technologieaspekte		2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2020-2024	Prozentuale Häufigkeit
Komponenten-optimierung	Kältemittel	4	2	6	10	56	11,5 %
	Schall	0	0	0	3	10	1,9 %
	Regelung	5	6	21	44	68	21,1 %
	Wärmeübertrager	0	1	4	7	29	6 %
System-integration	Flexibilisierung	0	0	1	3	18	3,2 %
	Speicher	9	13	41	96	156	45,5 %
	Energieeffizienz	1	5	6	19	42	10,7 %
	Design	1	1	11	6	11	4,4 %
	Hybrid	0	0	4	12	25	6 %
Suchergebnisse		Total	20	28	94	200	410

⁵ Suchbegriffe wurden nicht kombiniert. Kein Einfluss durch Groß-/Kleinschreibung.

Sowohl in der Komponentenoptimierung als auch in der Systemintegration ist eine deutliche Steigerung der Anzahl geförderter Projekte zu verzeichnen. Im Zeitverlauf ist das Verhältnis von Projekten zur Komponentenoptimierung zu Projekten zur Systemintegration konstant bei 1 zu 2. Während sich Themenfelder wie „Schall“, „Flexibilisierung“ und „Hybridtechnologien“ erst ab den Jahren 2010 bzw. 2015 in nennenswerter Anzahl in den Projektdaten wiederfinden, sind Aspekte wie „Energieeffizienz“, „Speicher“, „Regelung“ sowie „Kältemittel“ bereits seit den frühen 2000er-Jahren regelmäßig vertreten. So wird das Thema „Schall“ beispielsweise erst seit dem Jahr 2020 mit zehn Treffern in der EnArgus-Datenbank verzeichnet – eine Entwicklung, die möglicherweise mit verschärften gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie mit zunehmenden Akzeptanzproblemen in dicht besiedelten Wohngebieten zusammenhängt. Auch der Begriff „Flexibilisierung“ weist einen sprunghaften Anstieg ab 2020 auf. Dies kann interpretiert werden, als Reaktion auf die Notwendigkeit, Wärmepumpensysteme in übergeordnete Energiesysteme integrierbar zu gestalten. Ähnliches gilt für das gestiegene Auftreten sogenannter Hybridsysteme, deren zunehmende Nennung in den Jahren seit 2015 auf einen wachsenden Bedarf an Systemflexibilisierung und die verstärkte Integration erneuerbarer Energiequellen hinweisen könnte.

Gleichzeitig bleiben Themen wie „Energieeffizienz“, „Regelung“ und „Kältemittel“ durchgehend präsent und deuten damit auf eine langfristige technische Kontinuität in der Effizienzsteigerung hin. Die derzeit hohe Anzahl an Treffern im Bereich „Speichertechnologien“ (156 Treffer) scheint diese Entwicklung zu bestätigen, unterstützt jedoch auch die Theorie einer gestiegenen Forderung nach Betriebsflexibilisierung. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese Häufung teilweise darauf zurückzuführen ist, dass Speicherkomponenten häufig in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben erwähnt werden, ohne dabei zwingend das primäre Innovationsobjekt zu sein. In vielen Fällen fungieren sie als integraler, aber begleitender Bestandteil umfassender Systemkonzepte, was die Aussagekraft der reinen Quantität in diesem Bereich zusätzlich relativiert.

Es ist zu betonen, dass alle genannten Zahlen und zeitlichen Trends mit erheblicher methodischer Vorsicht zu interpretieren sind. Bei der Auswertung der Suchtreffer handelt es sich um eine vereinfachte, semantische Methodik, die zwar Anhaltspunkte für thematische Schwerpunkte liefert, jedoch nicht die inhaltliche Tiefe oder strategische Relevanz einzelner FuE-Projekte vollständig abbildet. Vielmehr können Zufälligkeiten in der Formulierung, unterschiedliche Berichtstiefen sowie projektspezifische Terminologien die Ergebnisse erheblich verzerren. Insgesamt lassen sich aus der Analyse daher keine kausalen Aussagen über die tatsächliche Relevanz oder Priorisierung bestimmter Forschungsthemen ableiten.

Diskussion der Suchergebnisse

Die in Tabelle 4-2 zusammengefassten Suchtreffer umfassen nicht ausschließlich Teilvorhaben oder Einzelprojekte mit explizitem Bezug zur Industrie oder dem jeweiligen Tech-

nologieaspekt. So umfassen die Suchtreffer auch eine hohe Zahl an Vorhaben, welche auf die Anwendung in Gebäudebereich, Quartierslösungen oder Wärmenetzen ausgerichtet sind. Dies soll nachfolgend am Beispiel thermischer Speicher erläutert werden, welche im Zusammenhang mit Wärmepumpen-FuE-Vorhaben angepasst oder entwickelt werden.

In den fünf Jahren zwischen 2020 und 2024 identifiziert EnArgus für die Schlagwörter „Wärmepumpe“ und „Speicher“ 156 Suchtreffer. Wird zusätzlich das Schlagwort „Industrie“ ergänzt, so reduzieren sich die Suchtreffer auf 35. Diese 35 Vorhaben greifen das Wort „Industrie“ im Vorhabentitel oder der Beschreibung auf, weshalb davon auszugehen ist, dass das ein direkter Industriebezug besteht.

Aus der vergleichsweise niedrigen Anzahl an Forschungsvorhaben mit Industriebezug kann jedoch nicht geschlussfolgert werden, dass ein geringeres Interesse an der Entwicklung oder Anwendung der Technologie im industriellen Umfeld besteht. Viele Anbieter von industriellen Wärmepumpen haben schon im Vorfeld, historisch und technisch bedingt, Wärmepumpen für den Gebäudeeinsatz (Raumwärme und Trinkwarmwasser) im Portfolio. Die Entwicklung von industriell eingesetzten Wärmepumpen profitieren somit direkt von der vorangegangenen Forschung für Gebäude. Trotz der unterschiedlichen Einsatzbereiche bestehen technische Synergien zwischen industriellen und gebäudetechnischen Wärmepumpen. Dies betrifft insbesondere zentrale Komponenten wie Speicher sowie Aspekte der Steuerungs- und Regelungstechnik.

4.1.2 Stichprobensuche in einer Projektdatenbank des PtJ für die Förderbereiche ESN2 und ESN4

Zur weiteren Analyse der FuE-Aktivität wurde eine Projektdatenbank des PtJ mit Projekten aus den Förderbereichen ESN2 und ESN4 ausgewertet. ESN steht dabei für „Energiesystem: Nutzung“; ESN2 adressiert Energieeffizienz in industriellen Prozessen, ESN4 energieeffiziente industrielle Technologien. Im Unterschied zur breit angelegten EnArgus-Recherche ermöglicht diese Datenbasis einen stärker fachbereichsbezogenen Blick auf industriebezogene FuE-Vorhaben. Eine teilweise Überschneidung mit EnArgus ist zu erwarten, da öffentlich geförderte Energieforschungsvorhaben, die durch den PtJ betreut werden, grundsätzlich auch in EnArgus dokumentiert sein können. Die PtJ-Auswertung ist daher nicht als zusätzliche, von EnArgus vollständig unabhängige Projektmenge zu verstehen, sondern als ergänzende Vertiefung ausgewählter Förderbereiche.

Die Analyse zeigt eine deutliche Zunahme der Forschungsaktivität mit Bezug zur Wärmepumpentechnologie über die letzten 25 Jahre. Unter Aktivität wird in diesem Zusammenhang die Häufigkeit der Suchtreffer der genannten Schlagworte innerhalb der Projektdatenbank des PtJ, verstanden. Auch unter Ausschluss der Hochtemperatur-Wärmepumpen-Suchtreffer ist ein anhaltender Anstieg der Aktivität zu verzeichnen, diese lassen sich der Kategorie Wärmepumpen bis 100°C zuweisen. Die Gesamtfördermittel für Wärmepumpen-Projekte (Projekte mit dem Begriff „Wärmepumpe“ im Titel) haben sich im Zeitraum 2020-2024 gegenüber 2015-2019 verdoppelt und belaufen sich nun auf über 40

Millionen Euro. Dabei zeigt sich, dass die Fördermittel für Sorptionswärmepumpen-Projekte (Projekte mit dem Begriff „Wärmepumpe“ und „Sorption“ im Titel) rückläufig sind. Diese Entwicklung korreliert mit den Ergebnissen einer im Vorhaben durchgeführten Patent- und Publikationsanalyse (unveröffentlicht), die eine aktuelle Sättigung der Forschungsaktivitäten der Absorptionstechnik andeutet. Die Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Patente in diesem Bereich stagnierte zuletzt und begann sogar leicht zu sinken. Ein ähnliches Muster spiegelt sich in der Fördermittelvergabe wider (siehe Abbildung 4-2). Die Einordnung dieses Rücklaufs ist in Kapitel 4.1.1 zu finden.

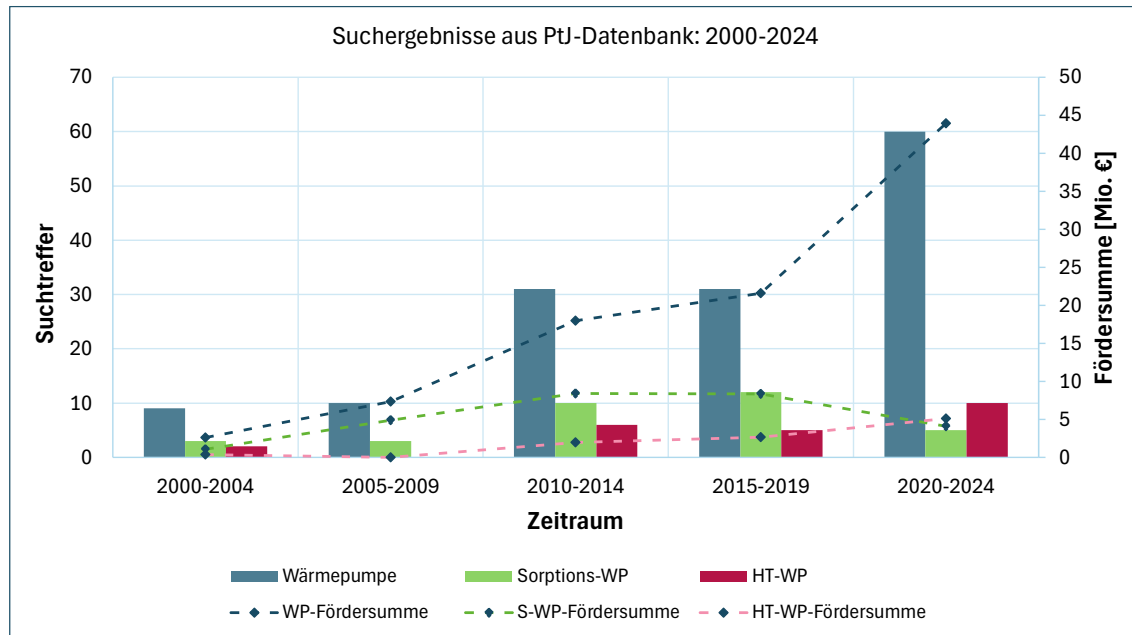


Abbildung 4-2 Auswertung zu vom PtJ geförderten Wärmepumpenvorhaben [Stichtag der Auswertung: 01.01.2025, eigene Darstellung]

Die Grafik zeigt die Auswertung der vom PtJ geförderten Verbundvorhaben in den Förderbereichen ESN2 und ESN4, wobei die Balken die Anzahl der Suchtreffer beziehungsweise Vorhaben je Zeitintervall und die gestrichelte Linie die aggregierte Fördersumme darstellen; Stichtag der Auswertung ist der 01.01.2025. Im Förderzeitraum 2020 bis 2024 wurden darüber hinaus insgesamt 47 Vorhaben mit dem Begriff „Wärmepumpe“ im Projekttitel bewilligt. Diese lassen sich in 25 Projekte zusammenführen. Die zugehörigen Zuwendungsempfänger erhielten insgesamt 37.894.763 € an Fördermitteln. Pro Projekt wurden im Mittel 1.515.791 € bereitgestellt.

Von den 25 identifizierten Vorhaben adressieren ca. ein Viertel der Projekte vorrangig industrielle bzw. gewerbliche Anwendungen. Ein Ausschnitt der Projekte mit industriellem Fokus wird im folgenden Abschnitt tabellarisch dargestellt und näher erläutert. Tabelle 4-3 gibt Aufschluss über die geförderten Vorhaben, die entsprechenden Fördersummen, die jeweiligen Themenschwerpunkte sowie über die Ziele und die Zuwendungsempfänger des jeweiligen Vorhabens.

Tabelle 4-3 Ausgewählte PtJ-geförderte Wärmepumpenprojekte (Projektbeginn 2020–2024) [Projektträger Jülich]

Hersteller/ Zuwendungs- empfänger	Projekttitel Laufzeit FS	Themen	Ziele
Johnson Controls Systems & Service GmbH	<i>FernWP</i> 01.10.2021 - 30.09.2025 302.831 €	Das Verbundvorhaben FernWP untersucht Großwärmepumpen als Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung und zur Bereitstellung systemischer Flexibilität im Energiesystem. Thermodynamische Konzepte und Komponenten werden entwickelt, im Labor getestet und in einem realen Fernwärmenetz als Pilotanlage erprobt.	Ziel ist es, Großwärmepumpen als flexible Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung und Systemintegration weiterzuentwickeln und ihre Praxistauglichkeit nachzuweisen.
Ventury GmbH	<i>LoCarDi</i> 01.12.2022 - 30.11.2025 544.394 €	Im Projekt werden praxisnahe Wärmepumpenkonzepte zur nachhaltigen und wirtschaftlichen Versorgung von Quartieren entwickelt, besonders für Bestandsgebäude. Der Fokus liegt auf großen Anlagen (>500 kW) mit umweltfreundlichem Kältemittel und flexibler Anbindung per Solekreis. Technische Konzepte mit hohem Temperaturhub und kaskadierten Verdichtern werden simuliert, getestet und durch Betriebsmodelle ergänzt.	Ziel ist die Entwicklung nachhaltiger Wärmepumpenkonzepte für bestehende Quartiere mit großen, flexibel einsetzbaren Anlagen zur schnellen Transformation der Wärmeversorgung.
PEWO Energietechnik GmbH	<i>Flex-WP</i> 01.12.2022 - 30.11.2025 344.199 €	Entwickelt wird eine Flex-Wärmepumpe mit natürlichen zeotropen Kältemittelgemischen und hohem Temperaturgleit zur effizienten Nutzung großer Temperaturspreizungen, v. a. in kalten Netzen. Im Fokus stehen Wärmeübertragerdesign, Sicherheit bei brennbaren Kältemitteln und die Einhaltung der F-Gase-Verordnung.	Ziel ist die Förderung flexibler, effizienter Wärmelösungen durch anpassungsfähige Wärmepumpentechnologien mit zeotropen Kältemitteln.
Ratiotherm GmbH & Co. KG	<i>WP2Q</i> 01.07.2023 - 30.06.2024 132.004 €	Entwickelt wird die WP2Q-Wärmepumpe mit kombinierter Nutzung von Direktverdampfung aus Luft und kompaktem Eisspeicher im Solekreis, inklusive aktiver Regeneration im Heizbetrieb.	Ziel ist eine effiziente Zweiquellen-Verschaltung mit minimiertem Flächenbedarf, reduzierten Betriebsmodi und optimierter Öl-/Kältemittelverteilung.

Die vier Projekte adressieren zentrale Herausforderungen der Wärmewende wie die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung, die Erhöhung der Systemflexibilität und die technische Umsetzung effizienter, kältemittelarmer Wärmepumpentechnologien. Das Projekt *LoCarDi* konzentriert sich auf umsetzungsnahe Konzepte für Bestandsquartiere mit kas-

kadierten Großwärmepumpen (> 500 kW), flexibler Anbindung per Solekreis und hohem Temperaturhub (Technik auch auf Industrieanwendungen übertragbar). Das Projekt *Flex-WP* verfolgt die Entwicklung einer anpassungsfähigen Wärmepumpe für kalte Netze (Wärmenetze mit Übertragungstemperaturen zwischen 10°C und 25°C) auf Basis zeotroper Kältemittelgemische mit hohem Temperaturschritt, wobei der Fokus auf Effizienz, Wärmeübertragerdesign und Sicherheit bei brennbaren Medien im Kontext der F-Gase-Verordnung (Verordnung (EU) 2024/573 und Richtlinie 2006/40/EG) liegt. Mit *WP2Q* wird eine kompakte Zweiquellen-Wärmepumpe realisiert, die Luft-Direktverdampfung mit einem Eisspeicher kombiniert und durch aktive Regeneration im Heizbetrieb einen hohen Wirkungsgrad bei minimalem Flächenbedarf ermöglicht. Übergreifend behandeln die Projekte die Themen Dekarbonisierung, Systemflexibilität, natürliche Kältemittel, Temperaturspreizung, Komponenteoptimierung und urbane Integration. Auf den vorangegangenen Seiten wird bereits ein Einblick in das Projekt *FernWP* gegeben.

Die Analyse der Förderprojekte der größten Wärmepumpenhersteller zeigt, dass alle betrachteten Unternehmen in verschiedenen Phasen des Förderprogramms unterstützt wurden (siehe Abbildung 4-3). Ab 2014 steigt die Förderintensität deutlich an, mit einer höheren Anzahl an Projekten in kürzerer Zeit. Inhaltlich sind die geförderten Themen breit gestreut. Jedoch zeigt sich eine klare thematische Häufung in den Bereichen natürliche Kältemittel, Akustik (Schallreduktion) und Effizienzsteigerung. Diese Aspekte wurden über mehrere Förderperioden hinweg kontinuierlich erforscht, was auf ihren hohen Stellenwert in der Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie hindeutet. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Nutzung von Wärmepumpen in Gebäuden, insbesondere in Bestandsgebäuden. In diesem Kontext rücken Aspekte wie Regelung, Sicherheit, Schallminimierung und vor allem Kältemitteloptimierung zunehmend in den Fokus. Die Analyse der Förderprojekte im Energieforschungsprogramm zeigt eine Fokussierung auf Wärmepumpenanwendungen im Gebäudebereich. Industrielle Anwendungen spielen bislang eine untergeordnete Rolle, nur rund ein Viertel der Projekte von 2020 bis 2024 adressiert diesen Bereich. Angesichts des hohen Potenzials zur Dekarbonisierung in der Industrie besteht hier erheblicher Nachholbedarf in der Forschungsförderung.

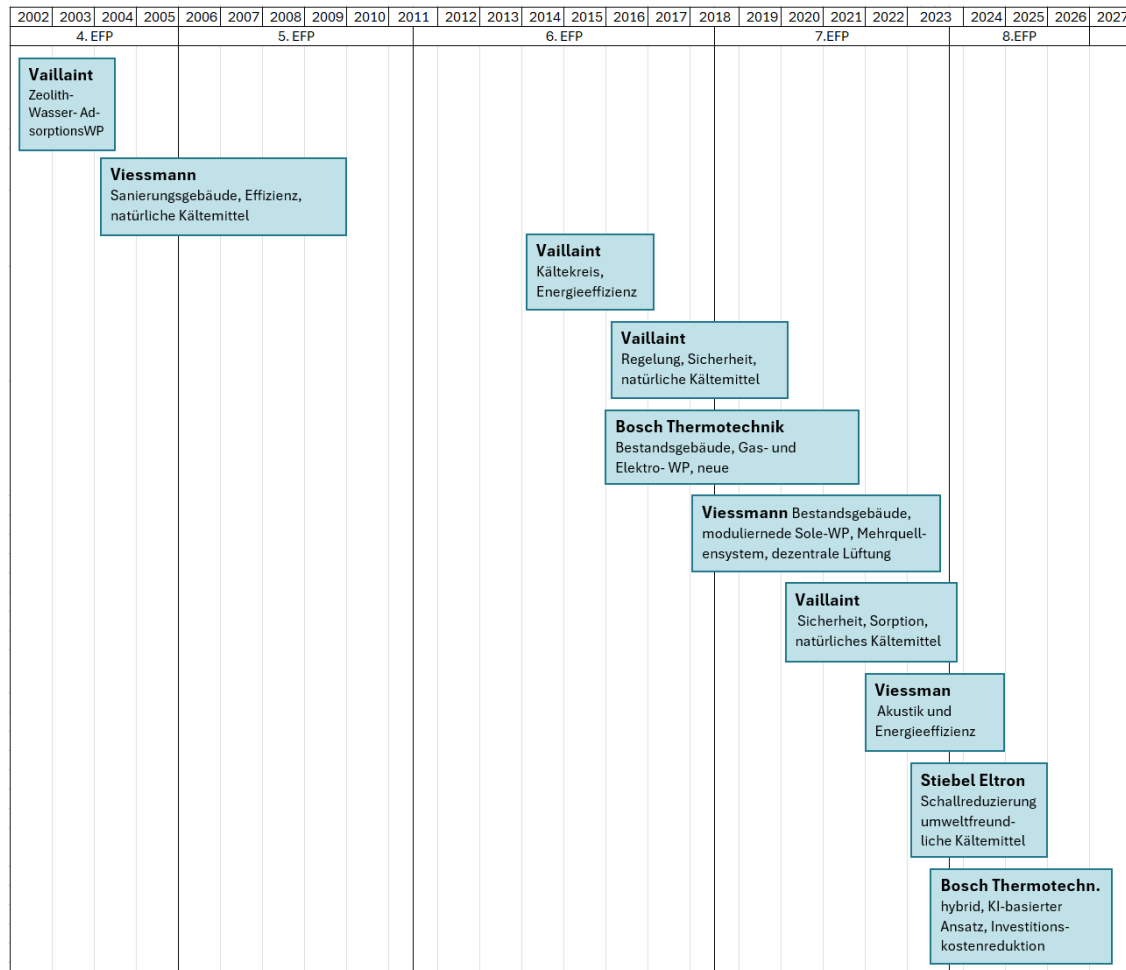


Abbildung 4-3 Auswahl geförderter FuE-Vorhaben im Energieforschungsprogramm mit Beteiligung ausgewählter großer Wärmepumpenhersteller in Deutschland (eigene Darstellung)

4.2 Verankerung der Technik im 8. Energieforschungsprogramm

Das 8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung [47] sowie die zugehörige Förderbekanntmachung (FBK) [48] weisen in mehreren Missionszielen explizit und implizit auf den zentralen Beitrag von Wärmepumpen hin. Insbesondere Industriewärmepumpen und Großwärmepumpen spielen dabei eine wesentliche Rolle, die im Programm konkret verankert ist und vielfältige Anwendungsfelder umfasst. Im Folgenden wird erläutert, an welchem Missions- und Programmzielen Industriewärmepumpen, Großwärmepumpen und Gebäudewärmepumpen mitwirken.

Das Programmziel 1 fordert die klimaneutrale und nachhaltige Deckung des Wärme- und Kältebedarfs in Gebäuden. Die Mission Wärmewende 2045 zielt im Programmziel 2 auf die Defossilierung der Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe ab. Wärmepumpen spielen für die Erreichung beider Ziele eine zentrale Rolle. Die Technologie wird explizit genannt im Kapitel 2.1.4 der FBK. Hier wird der Wärmepumpentechnologie

eine herausragende Rolle in der Elektrifizierung der Wärmeversorgung von Gebäuden, Wärmenetzen und Industriebetrieben zugesprochen.

Der Einsatz von Großwärmepumpen zielt auf die Defossilisierung der Fernwärmenetze ab. Die Forschungsförderung innerhalb des 8. EFP zielt auf die Weiterentwicklung der Temperaturbereiche, den Einsatz klima- und umweltfreundlicher Kältemittel, der Skalierung und damit Standardisierung der Fertigungsprozesse und Verlängerung der Lebensdauer von Großwärmepumpen. In Kombination mit Speichern soll zudem ein flexibler und netzdienlicher Betrieb realisiert werden, welcher durch Lastmanagement zur Betriebskostenoptimierung oder als Systemdienstleistung genutzt werden kann.

Industriewärmepumpen können Prozesswärme bereitstellen und dabei z. B. auf betriebs-eigene Abwärme zurückgreifen. Die Forschung zielt auf die Entwicklung von Methoden und Standardlösungen zur Vereinfachung der Auslegung, Planung und Investitionsentscheidung für die individuellen Prozessbedingungen und Standortgegebenheiten.

Zusätzlich werden in der FBK Wärmepumpen in Kombination mit anderen Förderbereichen erwähnt, wie der Geothermie und der Solarthermie, um deren Anwendungsmöglichkeiten zu erweitern und breitere Temperaturbereiche für Prozesswärme zu erfassen, auch in Kombination mit Wärmespeichersystemen. Letztere werden ebenfalls häufig in Verknüpfung mit Wärmepumpen genannt, auch um ein Flexibilitätspotenzial im Wärmesektor durch Wärmespeicher und -pumpen zu schaffen. Die Funktion der Wärmepumpe in der Entladung des Wärmespeichers wird auch im zweiten Sprinterziel 2030 zur Wärmewende 2045 erwähnt, um Überschussenergie nicht nur zu speichern, sondern auch preislich konkurrenzfähig zu nutzen. Dadurch ergibt sich ein Dreiklang aus nicht fossilen Energiequellen (z. B. Abwärme, Solarthermie, Geothermie), Wärmeausnutzung und Temperaturanhebung durch WP und Wärmespeicher. Eine klimaneutrale und langfristige Wärmeversorgung wird nur mit allen drei Komponenten gelingen, sodass FuE von integrierten und kombinierten Wärmenutzung und -speicherung erforderlich ist. Des Weiteren wird der Einsatz von Wärmepumpen unterschiedlicher Temperatur- und Leistungsbereiche in Bezug auf Energienutzung und -effizienz in Industrie und Gewerbe gefördert, um fossile Energieträger durch alternative Energietechniken zu ersetzen und so die Transformation der Industrie zu fördern.

Die wichtige Rolle der Wärmepumpentechnologie in der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung sowie das Potenzial zur Stabilisierung des Stromnetzes werden deutlich angesprochen. Die Erreichung des ambitionierten Sprintziels (300°C Vorlauftemperatur) setzt gezielte und planbare Förderung voraus, um die Komplexität des zukünftigen Energiesystems beherrschbar zu machen.

5. Energiewirtschaftliche Bedeutung und weitere Effekte

Ein Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW quantifiziert den Endenergieverbrauch der Bundesrepublik im Jahre 2020 auf 8.337 PJ (2.316 TWh). Hiervon werden 2.365 PJ (657 TWh) (28 %) dem Sektor Industrie und 1.274 PJ (354 TWh) (15 %) dem Sektor GHD zugeordnet [49, S. 2]. Des Weiteren entfallen auf den Sektor Haushalte 2.412 PJ (670 TWh) (29 %) zu, was zum größten Teil auf die Raumwärmebereitstellung zurückzuführen ist. Derzeit wird dieser Bedarf vorwiegend durch fossile Energieträger wie Erdgas, Kohle und Öl gedeckt. Nachfolgend wird das endenergetische Einsatzpotenzial von Wärmepumpen für diese Sektoren detaillierter betrachtet und quantifiziert.

Industrie

Von den 2.365 PJ (657 TWh) Endenergieverbrauch der Industrie im Jahre 2020 fielen 1584 PJ (440 TWh) auf die Erzeugung von Prozesswärme. Wiederum 72 % davon wurden mittels fossiler Energieträger bereitgestellt. [49, S. 2]

Einen detaillierten Blick in die Einsatzpotenziale der einzelnen Industriezweige liefert die Dissertation von Wolf (2017). Wolf identifiziert für die deutsche Industrie im Jahr 2013 ein theoretisches Potenzial zur Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen von 658 PJ (183 TWh), basierend auf der Annahme, dass mit Wärmepumpen Temperaturen bis zu 500°C erreicht werden können. Davon fallen etwa 311 PJ (86 TWh) auf Anwendungen bis 100°C, welche als technisch realisierbar eingeschätzt werden (siehe auch Abbildung 5-1). Das entspricht 23 % des Wärmebedarfs der betrachteten Industriezweige.

Die größten Potenziale entfallen auf [4, S. 120]:

- Nahrungsmittelindustrie: 55,4 PJ (15,8 TWh) (18,4 %)
- Papierindustrie: 54,7 PJ (15,2 TWh) (17,7 %)
- Chemische Industrie: 39,6 PJ (11,0 TWh) (12,8 %)

Von den 311 PJ (86 TWh) ließen sich zum Zeitpunkt der Einschätzung 45 PJ (12,5 TWh) wirtschaftlich lohnend mit Wärmepumpen umsetzen. Dieses wirtschaftliche Potenzial lässt sich zu großen Teilen auf die folgenden Industriezweige aufteilen: Die chemische Industrie (43,9 %), die Nahrungsmittelindustrie (18,4 %) und der Fahrzeugbau (11,9 %) [4, S. 122]. Aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Energie- und CO₂-Zertifikatspreise ist davon auszugehen, dass das wirtschaftliche Potenzial heute höher liegt. Die Übersicht der verschiedenen Potenzialbegriffe ist in Abbildung 5-1 dargestellt

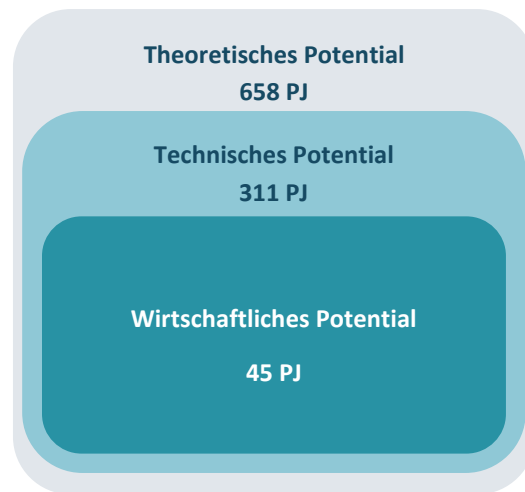


Abbildung 5-1 Definition Potenzialbegriffe [eigene Darstellung nach [4]]

Eine Studie des Fraunhofer ISI von 2017 prognostiziert die bereitgestellte thermische Energiemenge und Primärenergieeinsparung in der Industrie durch die Substitution fossiler Wärmeerzeuger durch Wärmepumpen, abhängig von zwei Szenarien der Energiepreise (DE_80% vs. DE_95%). Es sei darauf hingewiesen, dass die in der Studie ermittelten Werte auch HTWP einschließen. [50, S. 42]

Tabelle 5-1 fasst die Ergebnisse zusammen. Das DE_80%-Szenario nimmt eine Förderung der Regierung an, welche auf eine THG-Reduzierung um 80 % bis 2045 abzielt (gegenüber Bezugsjahr 1990). Das Szenario DE_95% zielt im gleichen Zeitraum auf eine THG-Reduzierung um 95 % ab.

Tabelle 5-1 Szenarioanalyse zur Primärenergieeinsparung durch Industrierärmepumpen [50, S. 42]

	bis 2030		bis 2040	
Szenario	DE_80% (Konservativ)	DE_95% (Ambitioniert)	DE_80% (Konservativ)	DE_95% (Ambitioniert)
Installierte Leistung (Thermisch)	2 GW	6,4 GW	3,3 GW	13,4 GW
Energiemenge	24,8 PJ (6,9 TWh)	80,6 PJ (22,4 TWh)	41,4 PJ (11,5 TWh)	168,5 PJ (46,8 TWh)
Primärenergie- einsparung	5,5 PJ (1,5 TWh)	18,3 PJ (5,1 TWh)	9,4 PJ (2,6 TWh)	40,4 PJ (11,2 TWh)

Die Studie kommt zum Schluss, dass die Dynamik des Energieeinsparpotenzials von HTWP in den 2040er Jahren eher stagnieren wird, da die potenziellen Anwendungen bereits in den 2030er größtenteils ausgeschöpft sein werden. Auch das THG-Minderungspotenzial wird bis dahin weitgehend erreicht sein und ist bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045 aus-

schließlich über die Stromerzeugung steuerbar. Zudem ist bei einer eher konstant bleibenden Bevölkerung mit regressivem Konsum und wachsender Circular Economy von wenigen neuen Anwendungspotenzialen auszugehen. Dennoch gibt es solche in Entwicklungs- und Schwellenländern, die eine wachsende Industrie und somit steigenden Prozesswärmebedarf aufweisen.

Es bleibt anzumerken, dass bei einer Substitution der fossilen Wärmeenergieerzeugung durch Wärmepumpen, zwangsläufig ein Anstieg im Strombedarf entstehen wird. Das DLR schätzt für die deutsche Industrie, dass eine Bereitstellung von 216 PJ/a (60 TWh/a) Prozesswärme (bis 100°C) mittels Wärmepumpen, einen zusätzlichen Strombedarf von 17 TWh/a bewirken würde [51, S. 21]. Dies erfordert eine Erhöhung der Erzeugungskapazitäten um 3,9 % gegenüber der Nettostromerzeugung im Jahr 2024 von 431,7 TWh. [52]

GHD

Die Anwendungsbilanz des Fraunhofer ISI quantifiziert für das Jahr 2022 einen Endenergieverbrauch des Sektors GHD auf 1168 PJ (324,5 TWh). Mit 576 PJ (160 TWh) fällt etwa die Hälfte des Energiebedarfs auf die Bereitstellung von Raumwärme. Weitere 11 TWh werden für die Warmwassererzeugung benötigt und 38,5 PJ (10,7 TWh) für die Erzeugung von Prozesswärme. Das Temperaturniveau der Prozesswärme ist nicht näher erläutert. Deshalb wird konservativ angenommen, dass die Prozesswärme nicht mithilfe von Wärmepumpen bedienbar ist. [53, S. 13]

Der Raumwärmebedarf wird mit fortschreitender energetischer Sanierung von Gebäuden (allen voran der Sanierung der Gebäudehülle) sinken. Folglich reduziert sich der Heizleistungsbedarf, und durch niedrigere Vorlauftemperaturen wird der Einsatz von Wärmepumpen noch wirtschaftlicher. Somit ist schon mit heutigem Stand der Technik ein signifikanter Anteil der in Summe 614,5 PJ (170,7 TWh) zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung durch Wärmepumpen bedienbar.

Haushalte

Das Umweltbundesamt veröffentlicht für das Jahr 2023 Zahlen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, welche Haushalten einen Endenergieverbrauch von 2.275 PJ (632 TWh) (27,8 %) zuweist. Mit 66,8 % für Raumwärme, 15,8 % für Warmwasser und 6,5 % für sonstige Prozesswärme ist die Wärmebereitstellung (zusammen 89,1 %) der dominierende Energieverbraucher.

Das Temperaturniveau der Prozesswärme ist nicht näher erläutert. Deshalb wird hier ebenfalls konservativ angenommen, dass die Prozesswärme nicht mittels Wärmepumpen bedienbar ist.

Auch hier wird der Raumwärmebedarf mit fortschreitender energetischer Sanierung von Gebäudehüllen sinken. Betrug 2008 der Anteil zur Raumwärmeversorgung noch 1900 PJ (528 TWh) (von insgesamt 2.617 PJ), so waren es 2023 noch 1519 PJ (422 TWh) (von ins-

gesamt 2.275 PJ), was ein Rückgang von etwa 20 % entspricht. Der Verbrauch für die anderen Anwendungsbereiche (Warmwasser, Prozesswärme & -kälte, Klimakälte, IKT, mechanische Energie und Beleuchtung) ist hingegen relativ konstant geblieben (+5 %). Mit heutigem Stand der Technik ist ein signifikanter Anteil der 1.879 PJ (522 TWh) zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung durch Wärmepumpen bedienbar. [54]

6. Funktionalität des Innovationssystems in Deutschland

Das Innovationssystem für industrielle Wärmepumpen bis 100°C umfasst eine Vielzahl von Akteuren, die für Entwicklung, Demonstration, Markteinführung und technische Weiterentwicklung der Technologie relevant sind. Dazu zählen Hersteller, wissenschaftliche Einrichtungen, Anwenderbranchen, Verbände, Normungs- und Prüforganisationen sowie öffentliche Fördermittelgeber. Während Wärmepumpen im Gebäudebereich bereits technisch ausgereift und breit etabliert sind, befindet sich der industrielle Einsatz weiterhin in einer Phase der verstärkten Markterschließung. Für industrielle Anwendungen bestehen daher weniger grundsätzliche technologische Unsicherheiten als vielmehr Herausforderungen in der Prozessintegration, Standardisierung, Wirtschaftlichkeit und Skalierung. [4, S. 133]

In Tabelle 6-1 wird das Innovationssystem der industriellen Wärmepumpen bis 100°C mit nationalem Fokus dargestellt. Dieses System setzt sich aus einer Vielzahl von Akteuren zusammen, die in einem komplexen Zusammenspiel miteinander agieren.

Tabelle 6-1 Beispielhafte Auswahl zentraler Akteure im Innovationssystem für Industriewärmepumpen [22, S. 162]

Forschungs- und Diffusionsförderung • IEA HPT Technology Collaboration Programme • Horizon Europe • European Heat Pump Association (EHPA) • BAFA (BEW, BEG-EM, EEW) • BMW (bspw. EFP) • KfW-Programm Erneuerbare Energien (Programm 271)	Wissenschaft und angewandte Forschung • Fraunhofer ISE & IEG • DLR • FZ Jülich • AGFW • Hochschule Karlsruhe IKKU • Leibniz Universität Hannover IFT • ILK Dresden
Hersteller von Industriewärmepumpen bis 100°C • Combitherm • Engie Refrigeration • GEA • Siemens Energy • Everllence (MAN Energy Solutions)	Intermediäre • Normung durch DIN, z. B. DIN EN 378 • Richtlinien durch VDI (z. B. VDI-Richtlinien 4646 und 4645) • TÜV
Anwenderbranchen für Wärmepumpen bis 100°C • Chemische Industrie • Nahrungsmittelindustrie • Papierherstellung • Metallverarbeitung • Energieversorger	

Das Innovationssystem lässt sich in fünf zentrale Akteursgruppen unterteilen: Hersteller, Wissenschaft und angewandte Forschung, Anwender, Intermediäre sowie Forschungs-

und Diffusionsförderung. Hersteller und Forschungseinrichtungen treiben die Weiterentwicklung von Komponenten, Anlagenkonzepten und Systemintegration voran. Anwenderbranchen sind entscheidend für die Erprobung unter realen Produktionsbedingungen und für die Identifikation übertragbarer Anwendungsmuster. Intermediäre wie Verbände, Normungsorganisationen und Prüfinstitutionen unterstützen Wissenstransfer, Standardisierung und Vertrauensbildung. Fördermittelgeber mindern das finanzielle Risiko für Hersteller und Anwender durch Forschungs-, Demonstrations- und Investitionsprogramme und schaffen damit eine wichtige Grundlage für technische Weiterentwicklung und Marktdiffusion.

Eine Stärke des deutschen Innovationssystems liegt in der vorhandenen industriellen und wissenschaftlichen Kompetenz. Deutschland verfügt über relevante Hersteller, spezialisierte Forschungseinrichtungen, anwendungsnahe Förderprogramme und etablierte Branchenverbände (siehe Tabelle 6-1). Zudem bestehen technische Synergien mit dem bereits weiter entwickelten Gebäudewärmepumpenmarkt, etwa bei Verdichtern, Kältemitteln, Regelungstechnik, Wärmeübertragern und Standardisierung. Diese Erfahrungen können teilweise auf größere gewerbliche und industrielle Anwendungen übertragen werden, ersetzen dort jedoch nicht die notwendige anwendungsspezifische Prozessintegration.

Gleichzeitig bestehen funktionale Defizite, die den Markthochlauf industrieller Wärmepumpen erschweren. Industrielle Anwendungen sind häufig standort- und prozessspezifisch, da Wärmequellen, Temperaturniveaus, Lastprofile und Integrationsbedingungen je nach Betrieb variieren. Dadurch sind Planung, Auslegung und Prozessintegration komplex und nur begrenzt standardisierbar. Ein wesentliches Defizit liegt in der begrenzten Zahl gut dokumentierter Referenzprojekte und übertragbarer Betriebserfahrungen. Dies erschwert die Bewertung von Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit und erhöht die wahrgenommenen Investitionsrisiken. Für wiederkehrende industrielle Anwendungsfälle fehlen bislang vielfach standardisierte Integrationskonzepte, belastbare Betriebsdaten und praxiserprobte Umsetzungsmuster. [8]

Der daraus folgende Forschungs- und Entwicklungsbedarf liegt weniger bei der Grundfunktion der Wärmepumpe als bei ihrer industriellen Anwendung und Skalierung. Relevante Themen sind insbesondere Prozessintegration, Standardisierung und Modularisierung, Betriebsoptimierung unter schwankenden Prozessbedingungen, Teillastverhalten, Regelungstechnik, Kopplung mit thermischen Speichern, netzdienliche Flexibilisierung sowie der Einsatz zukunftsicherer Kältemittel. Hinzu kommen Weiterentwicklungen bei Verdichtern und Wärmeübertragern, insbesondere mit Blick auf Effizienz, Betriebssicherheit, Temperaturhub und Wartungsaufwand. Diese Bedarfe werden in Kapitel 7 vertieft betrachtet.

Die Förderstruktur adressiert diese Herausforderungen zunehmend durch eine Kombination aus Forschungs-, Demonstrations- und Diffusionsförderung. Während das Energieforschungsprogramm vor allem FuE- und Demonstrationsvorhaben unterstützt, zielen

Programme wie die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft auf die Umsetzung industrieller Effizienzmaßnahmen. Für Großwärmepumpen in Wärmenetzen ist zudem die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze relevant. Damit existieren grundsätzlich geeignete Förderinstrumente entlang der Innovationskette; entscheidend bleibt jedoch, Forschungsergebnisse schneller in wiederholbare industrielle Anwendungskonzepte zu überführen.

Insgesamt ist das Innovationssystem für industrielle Wärmepumpen bis 100°C in Deutschland leistungsfähig, aber noch nicht ausreichend auf schnelle Marktdiffusion und Skalierung ausgerichtet. Die zentrale Herausforderung liegt weniger in fehlender technologischer Kompetenz als in der Überführung vorhandener Lösungen in standardisierte, wirtschaftlich planbare und betrieblich verlässliche Anwendungen. Für die weitere Entwicklung sind daher Demonstrationsprojekte, belastbare Betriebsdaten, Standardisierung, Wissenstransfer und anwendungsnahe Förderung besonders wichtig.

Abbildung 6-1 zeigt eine schematische Übersicht zentraler Akteursgruppen und ausgewählter Wechselbeziehungen im deutschen Innovationssystem für Wärmepumpen bis 100°C. Die Darstellung dient der Strukturierung der relevanten Akteure und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

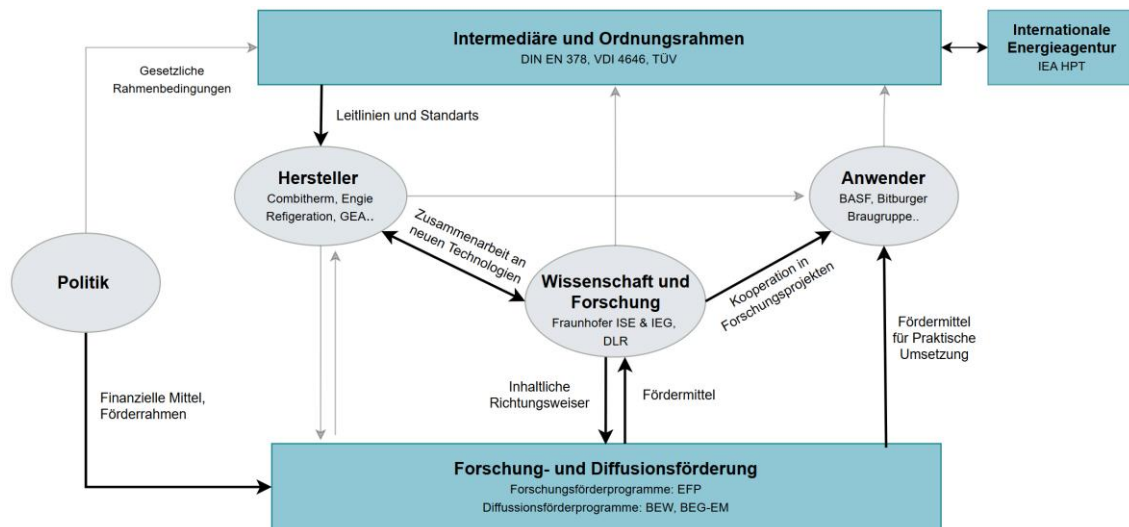


Abbildung 6-1 Schematische Darstellung zentraler Akteursgruppen und ausgewählter Wechselbeziehungen im deutschen Innovationssystem für Wärmepumpen bis 100°C (eigene Darstellung)

7. Erforderlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf

In diesem Kapitel werden die konkreten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe (FuE-Bedarfe) der Wärmepumpentechnologie bis 100°C zusammengefasst. Die identifizierten Bedarfe werden unterschieden zwischen den Anwendungen „Industrie und Gewerbe“, „Fernwärme“ sowie „Haushalte“. Weiter werden die aktuellen Ziele der Forschung zusammengefasst und mit den Zielen des 8. EFP verglichen. Im Gegensatz zu Hochtemperatur-Wärmepumpen über 100°C sind Wärmepumpensysteme bis 100°C technologisch weitgehend verfügbar. Der Reifegrad und die Marktdiffusion unterscheiden sich jedoch deutlich nach Anwendung: Während Gebäudewärmepumpen etabliert sind, befinden sich industrielle Wärmepumpen und Großwärmepumpen vielfach noch in einer frühen Diffusions- bzw. Skalierungsphase.

7.1 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die nachfolgenden Abschnitte differenzieren den Forschungs- und Entwicklungsbedarf nach spezifischen Anwendungsfeldern. Je nach Einsatzbereich, ob in Industrie und Gewerbe, in der Fernwärmeversorgung oder im Haushaltssektor, ergeben sich unterschiedliche technische Anforderungen, Herausforderungen und Prioritäten. Entsprechend variieren auch die Schwerpunkte der notwendigen Forschung. Die Systematik der Technikanalyse ermöglicht es, diese Bedarfe gezielt zu erfassen und in ihrer jeweiligen Relevanz zu bewerten.

7.1.1 Anwendung: Industrie und Gewerbe

Aufgrund der mangelnden Praxiserfahrung im industriellen Umfeld, sollten die identifizierten FuE-Bedarfe gezielt in Demonstrations- und Pilotprojekte aufgegriffen und gelöst werden. Demonstrations- und Pilotanlagen sind von zentraler Bedeutung, um kurz- und mittelfristig Vertrauen in die Wärmepumpentechnologie aufzubauen und ein möglichst breites Anwendungsspektrum (insbesondere bei KMUs⁶) anzusprechen. Die in dieser Analyse identifizierten FuE-Bedarfe lassen sich drei Kategorien zuordnen: Komponentenebene, Systemebene und Standardisierung. Die spezifisch anfallenden FuE-Bedarfe der jeweiligen Kategorie werden in dem Unterkapitel erläutert.

FuE-Bedarf: Komponentenebene

Bei Herstellern und Anwendern besteht gleichermaßen der Wunsch nach dem Einsatz zukunftssicherer Kältemittel, weshalb der Trend zum Einsatz natürlicher Kältemittel (z. B. Propan, Isobutan, Ammoniak) geht (siehe auch Tabelle 4-2). Natürliche Kältemittel weisen ein niedriges Treibhauspotenzial auf, sind nicht ozonabbauend und bilden keine TFA.

⁶ KMU: Kleine und mittlere Unternehmen

Je nach Stoff bestehen jedoch unterschiedliche sicherheitstechnische Anforderungen, etwa hinsichtlich Toxizität, Brennbarkeit oder Betriebsdruck. Zudem kann Propan unter geeigneten Betriebsbedingungen hohe COP-Werte ermöglichen. Es besteht ein dringender Bedarf, Erfahrungen im Einsatz natürlicher Kältemittel zu sammeln und die Komponenten für diese Kältemittel zu ertüchtigen. Des Weiteren besteht für Sonderanwendungen auch der Bedarf zur Entwicklung zukunftsicherer synthetischer Kältemittel, die die ökologischen Anforderungen einhalten. Zur Steigerung der Effizienz von Wärmepumpenanlagen besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Verdichter [3, S. 17]. Während Turboverdichter bereits Gütegrade von über 70 % erreichen, liegen die Gütegrade von Hubkolben- und Schraubenverdichtern derzeit bei lediglich etwa 50 %. Weitere Effizienzpotenziale ergeben sich aus der Optimierung von Wärmeübertragern sowie der konstruktiven Auslegung der Gesamtanlage [50, 63ff.]. Zudem bietet die Entwicklung geregelter und ungeregelter Ejektoren für Kältemittel mit hohem und mittlerem Druckniveau ein bedeutendes Potenzial zur Reduzierung von Exergieverlusten bei der Drosselung [50, S. 64]. Auf diese Weise kann das thermische Potenzial der Wärmequelle besser genutzt und die internen Verluste innerhalb der Anlage können weiter minimiert werden.

FuE-Bedarf: Systemebene

Auf Systemebene werden Forschungs- und Entwicklungsbedarfe insbesondere in der Steuerung und Regelung von Wärmepumpenanlagen identifiziert, um eine flexible Betriebsweise zu ermöglichen oder zu verbessern. Ziel ist die Implementierung intelligenter Lastmanagementsysteme, welche einen energieeffizienten Betrieb fördern und zugleich die Lebensdauer von Wärmepumpen verlängern können [50, 63ff.]. Weiterhin besteht Entwicklungsbedarf, um die Modulationsfähigkeit von Wärmepumpensystemen zur Reaktion auf Strompreisentwicklungen zu verbessern [2, S. 97-98]. Hierdurch kann die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen gesteigert werden, bei gleichzeitiger Stabilisierung des Stromnetzes – ein Aspekt, der mit zunehmendem Anteil (volatiler) erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung an Bedeutung gewinnt.

FuE-Bedarf: Standardisierung

Der dringendste FuE-Bedarf besteht in der Reduzierung der Systemkosten [50, 63ff.]. Aktuell sind Wärmepumpenanlagen für Prozesswärme häufig Spezialanfertigungen für den jeweiligen Einsatzzweck, was zu langen Planungs- und Lieferzeiten und hohen Investitionssummen führt. Folglich sind die Wärmeerzeugungskosten oft nicht konkurrenzfähig. Um die Systemkosten zu senken, wird die Entwicklung modularer Standardlösungen empfohlen [2, S. 97-98]. Bei zielgerichteter Entwicklung könnten mehrere modulare Einheiten auch den Betrieb einer einzelnen Großwärmepumpen ersetzen.

7.1.2 Anwendung: Fernwärme

Für Großwärmepumpen, die zunehmend als Wärmequelle in Fernwärmenetzen eingesetzt werden, stehen vor allem der Wirkungsgrad sowie die Kosten für Fertigung, Betrieb und Wartung im Vordergrund. Eine hohe Effizienz ist entscheidend, um den wirtschaftlichen Betrieb bei unterschiedlichen Temperaturanforderungen sicherzustellen. [55]

Hersteller sehen weiterhin den Bedarf, die Senkentemperaturen zu steigern, um ein breiteres Spektrum an Wärmenetzen oder Anwendungen bedienen zu können. Eine Umfrage unter Schweizer Forschungseinrichtungen zeigt zudem die Notwendigkeit, zukunftsfähige Kältemittel zu entwickeln oder Anlagen und Komponenten für „Low-GWP“ Kältemittel zu ertüchtigen. [3, S. 17]

7.1.3 Anwendung: Haushalte

Für Wärmepumpen in Privathaushalten bestehen aktuell folgende Fokusthemen in der Forschung. So wird eine Reduzierung der Schallemissionen von vielen Herstellern verfolgt, wodurch eine erhöhte Akzeptanz beim Endkunden erwartet wird. Auch die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur vereinfachten Auslegung und Installation von Wärmepumpen wird verfolgt, wodurch die Diffusion durch geringere Planungs- und Installationszeiten beschleunigt wird. Weiterhin wird eine verbesserte Modulation angestrebt, wodurch ein effizienterer Betrieb über die Steuerungs- und Regelungsebene ermöglicht wird. Des Weiteren gewinnt der Einsatz natürlicher bzw. treibhausarmer Kältemittel an Bedeutung. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf insbesondere hinsichtlich Sicherheitskonzepten, Komponenteoptimierung und Betriebserfahrung, etwa beim Einsatz brennbarer Kältemittel wie Propan. [56]

7.2 Strategische Entwicklungsziele für FuE

Im Folgenden werden die strategischen Entwicklungsziele für Forschung und Entwicklung (FuE) in den drei zentralen Anwendungsfeldern der Wärmepumpentechnologie – Industrie und Gewerbe, Fernwärme sowie Haushalte – näher betrachtet. Dabei wird jeweils aufgezeigt, welche technischen, wirtschaftlichen und systemischen Prioritäten aktuell verfolgt werden, um die Marktdurchdringung der Wärmepumpe zu beschleunigen.

7.2.1 Anwendung: Industrie und Gewerbe

Die in Kapitel 7.1 identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe auf Komponenten-, System- und Standardisierungsebene spiegeln sich weitgehend in den strategischen Zielen wider, die in internationalen und nationalen Studien formuliert werden. Verdeutlicht wird dies durch den ANNEX 58 der IEA, der konkrete FuE-Prioritäten für Wärmepumpen definiert. Die Empfehlungen differenzieren nach Leistungsklasse und Temperaturniveau der Wärmepumpen. Für Anlagen mit Senkentemperaturen bis 120°C stehen aktuell die Erhöhung der Effizienz (COP) und Senkung der Kosten für Verdichter und Anlagen im Fo-

kus. Ab 2027 wird zusätzlich die Standardisierung von Komponenten und Anlagen als zentrales Ziel hervorgehoben [22, S. 162].

Diese Zielsetzungen decken sich sehr gut mit einer 2017 durchgeführten Umfrage von Wolf et al. Auf Herstellerseite haben nach dem Temperaturbereich (58 %) insbesondere die Kostenreduktion (42 %) und die Effizienzsteigerung (27 %) die höchste Priorität. Auf Seiten der Forschungseinrichtungen wurden am häufigsten Kältemittel (46%), Temperaturbereich (19%) und Komponentenoptimierung (15%) genannt [3, S. 17]. Der Technologiebericht des Fraunhofer ISI nennt neben der Senkung der Systemkosten und der Steigerung der Effizienz auch die Entwicklung neuer Kältemittel sowie die Flexibilisierung des Betriebs als zentrale Ziele [50, 63ff.]. Die AGORA-Studie priorisiert das Ziel der Kostenreduzierung und nennt die Standardisierung von Verdichter und Anlagen als Lösungsansatz [2, S. 97-98].

Der Politikbericht „Technologie für die Energiewende“ des Fraunhofer ISI empfiehlt für Kompressionswärmepumpen die Integration von selbstlernende / optimierende Prozessführung. Speziell für Außenluft-WP soll eine Verringerung der Schallemissionen angestrebt werden [57, S. 54].

Als weiteres Ziel, mit hohem Stellenwert, wird die Förderung des Wissenstransfers im ANNEX 58 und von Wolf et al. genannt. Wolf et al. empfiehlt eine gezielte Informationskampagne, da mangelndes Wissen als größtes Hemmnis (nach den Kosten) genannt wird [3, S. 19]. Die IEA definiert ein einheitliches Verständnis der Technologie im gesamten Innovationssystem (siehe auch Kapitel 6) als erforderlich, um das Potenzial und die Perspektive der Wärmepumpentechnologie auszuschöpfen [22, S. 162]. Somit sollte der Transfer ins gesamte Innovationssystem auch ein Ziel mit hoher Priorität sein.

7.2.2 Anwendung: Fernwärme

Für Großwärmepumpen bedarf es Standardisierung, um Produktions- und Installationskosten zu senken und eine schnellere Implementierung der Technologie zu ermöglichen. Zudem spielt eine verbesserte Kommunikation gegenüber Endkunden eine zentrale Rolle, um die weitere Diffusion zu fördern. Ein effektives Mittel ist auch hier das Einbetten von FuE-Tätigkeiten in Demonstrationsprojekten. [2, S. 69-71, 55]

7.2.3 Anwendung: Haushalte

Die zunehmende Verbreitung von „Smart-Home“ sowie die Option auf flexible Strompreistarife für Privatkunden (Anfang 2025 eingeführt) fordert die Integrationsfähigkeit von Wärmepumpen in Energiesystemen. Die Entwicklung intelligenter Wärmepumpen führt zu reduzierten OPEX-Kosten beim Endverbraucher und dient, durch Sektorenkoppelung, Integration in smarten Quartieren oder Reaktion auf Strompreissignale, der Stabilisierung des Stromnetzes. [56]

7.2.4 Adressierung im 8. EFP

Im 8. EFP wird das Anwendungs- und Entwicklungspotenzial der Wärmepumpe für industrielle Anwendungen erkannt. In der zugehörigen Förderbekanntmachung des 8. EFP wird, neben der Anlagenentwicklung zur Senkung der Kosten, auch die Bedeutung der methodischen Forschung erwähnt. Letzteres zielt auf eine vereinfachte Auslegung, Planung und Investitionsentscheidung ab. Weiter werden auch die Steigerung der Effizienz und der Einsatz klima- und umweltfreundlicher Kältemittel adressiert. [47, S. 22]

Mit Ausnahme des Informationstransfers, werden alle FuE-Bedarfe und Ziele im 8. EFP adressiert. Die Standardisierung sowie die damit verbundene Entwicklung modularer Einheiten werden dabei lediglich indirekt über das Ziel der Kostensenkung adressiert. Beide Aspekte gelten jedoch als zentrale Faktoren für eine zeitnahe und breitflächige Diffusion der Technologie in der Industrie. Eine gezielte Berücksichtigung dieser Bereiche im 8. EFP könnte die Diffusion der Technologie zusätzlich beschleunigen.

8. Hemmnisse und fördernde Faktoren

Für eine erfolgreiche Diffusion von Wärmepumpen bis 100°C ist die Identifizierung, Sichtbarmachung und zielgerichtete Lösung bestehender Hemmnisse von entscheidender Bedeutung. Dabei existieren Hemmnisse auf technischer, regulatorischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Ebene. Im folgenden Kapitel werden die Faktoren, die zur Verringerung der Hemmnisse genutzt werden können, sowie die Hemmnisse selbst erläutert.

8.1 Hemmnisse in Einführung und Marktdiffusion

Die Wärmepumpensegmente befinden sich in unterschiedlichen Phasen des Technologizeyklus, wodurch sich die Herausforderungen deutlich unterscheiden (vgl. Abbildung 3-1). Gebäudewärmepumpen (TRL 9) sind bereits weit verbreitet und erfordern vor allem eine kostengünstige Skalierung, eine standardisierte Installation im Gebäudebestand sowie gezielte Optimierungen, beispielsweise zur Lärmreduktion und Effizienzsteigerung. Großwärmepumpen stehen hingegen vor allem vor der Aufgabe, den Wirkungsgrad zu erhöhen und Produktions- sowie Installationskosten durch stärkere Standardisierung zu senken, um die Implementierung zu beschleunigen. Industrierärmepumpen befinden sich noch in einer frühen Phase und sind aufgrund standortspezifischer Integrationsanforderungen besonders komplex. Hier sind standardisierte Auslegungs- und Installationsmethoden sowie ein verbessertes Anwendungswissen entscheidend, um ihre Verbreitung zu erhöhen. Über alle Segmente hinweg gelten eine beschleunigte Umsetzung, Standardisierung und bessere Kommunikation als Schlüsselfaktoren für die Marktdiffusion.

Industrie, Gewerbe und Fernwärme

Die Ergebnisse des 2. Workshops „Industrie- und Großwärmepumpen“ des Forschungsfelds Wärmepumpen und Kältetechnik liefern eine aktuelle und praxisnahe Ergänzung zur Einordnung der Markthemmnisse. Das Ergebnispapier bezieht sich auf Industrie- und Großwärmepumpen in einem breiteren Temperatur- und Leistungsspektrum und ist daher nicht ausschließlich auf Anwendungen bis 100°C begrenzt. Gleichwohl sind die dort identifizierten Hemmnisse für die vorliegende Technikanalyse in hohem Maße relevant, da zentrale Hemmnisdimensionen insbesondere Wirtschaftlichkeit, Prozessintegration, Investitionsrisiken, regulatorische Planbarkeit, fehlende Referenzanlagen und begrenzte Umsetzungserfahrung auch für industrielle Wärmepumpenanwendungen bis 100°C maßgeblich sind. Die befragten Fachleute bewerteten finanzielle Aspekte als relevantestes Hemmnis: Über 60 % stuften finanzielle Hemmnisse als sehr hoch und weitere über 25 % als hoch ein. Regulatorische Aspekte wurden mehrheitlich als hoch bewertet, während technische Hemmnisse zwar weiterhin relevant sind, jedoch weniger eindeutig als dominierendes Haupthindernis erscheinen. Für die vorliegende Analyse folgt daraus, dass bei industriellen Wärmepumpenanwendungen bis 100°C insbesondere Wirtschaftlichkeit,

Investitionsrisiken, regulatorische Planbarkeit und belastbare Umsetzungserfahrung über die Geschwindigkeit der Marktdiffusion entscheiden. [55]

Die Nutzung von Wärmepumpen in der Industrie ist aufgrund komplexer technischer Rahmenbedingungen besonders anspruchsvoll. Die hohe Variabilität von Nicht-Wohngebäuden hinsichtlich Form, Größe und Funktion erfordert maßgeschneiderte Lösungen, was den Planungsaufwand und die Kosten erhöht. Die Implementierung industrieller Wärmepumpen erfordert daher umfassende Entscheidungsprozesse, bei denen Faktoren wie Nachrüsttiefe und Systemkombinationen zu berücksichtigen sind. Die Frage nach dem „Wie“ stellt Entscheidungsträger vor große Herausforderungen [6, S. 4] und wird durch den Mangel an Fachwissen, bzw. an geschultem Personal verstärkt [4, S. 133]

Ein zentrales Hemmnis besteht darin, dass Industrierärmepumpen standortspezifisch in bestehende Prozessumgebungen integriert werden müssen. Dies erfordert oft prozessuale Anpassungen sowie zusätzliche Komponenten wie Speicher und Wärmenetze. Ein Aspekt, der beim Großwärmepumpenworkshop (Mai 2025) von den Kuratoren des Forschungsfeldes *Wärmepumpen und Kältetechnik* insbesondere hervorgehoben wurde [55].

Für eine breite Anwendung der Industrierärmepumpe sind tiefgreifende Forschungsanstrengungen erforderlich, die sich auf standardisierte, praxisnahe und leicht umsetzbare Auslegungs- und Installationsmethoden konzentrieren.

Zu den wirtschaftlichen Hemmnissen zählt unter anderem das Verhältnis zwischen Strom- und Gaspreis. Laut der EHPA sollte der Strompreis maximal doppelt so hoch wie der Gaspreis sein, damit der Einsatz von Wärmepumpen wirtschaftlich attraktiv bleibt [58, S. 8]. Ein Preisanstieg der fossilen Energieträger kann eine Priorisierung der Wärmepumpentechnologie bewirken: So führten die Ölpreiskrisen von 1973 und 1979/80 zu verstärkten Bemühungen, Wärmepumpen in der Praxis zu etablieren. [4, S. 3]

Ein weiteres Hindernis stellt die ausgeprägte Fokussierung vieler Unternehmen auf kurze Amortisationszeiten dar. In Kombination mit den hohen Investitionssummen einer Wärmepumpe kann dies dazu führen, dass Unternehmen sich gegen diese Technologie entscheiden. [8, 3-27ff.]

Die Workshop-Ergebnisse weisen darüber hinaus auf weitere wirtschaftliche Hemmnisse hin, die für industrielle Anwendungen besonders relevant sind. Dazu zählen hohe CAPEX nicht nur für die Wärmepumpe selbst, sondern auch für Prozessintegration, Peripherie und vorgelagerte Effizienzmaßnahmen. Aufgrund der geringen Zahl an Referenzanlagen und begrenzter Betriebserfahrung werden zudem technische und wirtschaftliche Risiken eingepreist, was die Finanzierung zusätzlich verteuert. Fehlende Betreiber- und Investitionsmodelle erschweren es, Wärmepumpenprojekte als eigenständige Wärmeinfrastruktur zu entwickeln und externes Kapital zu mobilisieren. Hinzu kommt eine geringe finanzielle Planungssicherheit bezüglich zukünftiger CO₂-Preise, Netzentgelte, Anschlussleistung und Strompreisisiken. [55]

Abgesehen von den technischen und ökonomischen Barrieren existieren auch regulatorische Hindernisse, die zu einer Benachteiligung der Wärmepumpentechnologie im Vergleich zu anderen Techniken führen. Im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems (EU-ETS) erhalten bestimmte energieintensive Industriezweige bei der Nutzung von konventionellen Wärmeerzeugern eine kostenfreie Zuteilung von Emissionszertifikaten auf Basis des Wärmebenchmarks. Dies führt zu einem Wettbewerbsnachteil für Wärmepumpen, da fossile Wärmeerzeuger dadurch geringere CO₂-Kosten tragen müssen, während Wärmepumpen weiterhin vollständig mit den Kosten für den Strombezug belastet werden. Auch KWK-Anlagen profitieren von verschiedenen steuerlichen Begünstigungen, wie z. B. der Energiesteuerbefreiung für Brennstoffe (§ 53a EnStG) sowie von Netzentgeltreduzierungen und Einspeisevergütungen (§ 18 StromNEV). Diese Vorteile reduzieren die Betriebskosten von KWK-Systemen erheblich und verschärfen somit den wirtschaftlichen Nachteil von Wärmepumpen als alternative Technologie. Die aktuelle Struktur der Netzentgelte setzt Fehlanreize, da sie industrielle Verbraucher mit konstant hohem Stromverbrauch bevorzugt. Dadurch verliert ein flexibler, netzdienlicher Einsatz von Wärmepumpen erheblich an wirtschaftlicher Attraktivität. Statt die Laststeuerung und Netzentlastung zu fördern, begünstigt das bestehende System ineffiziente Verbrauchsmuster und erschwert die Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse. [31, S. 41-42]

Ein besonders konkreter regulatorischer Fehlanreiz betrifft die 7000-Stunden-Regel im Rahmen individueller Netzentgelte. Sie begünstigt einen möglichst gleichmäßigen Grundlaststrombezug und kann damit flexible, netzdienliche Fahrweisen industrieller Wärmepumpen wirtschaftlich benachteiligen. Aus Sicht des Workshop-Papiers sollte der Regulierungsrahmen stärker Anreize für netzdienlichen Betrieb statt für konstante Grundlastverbräuche setzen. Ergänzend werden unklare PFAS-Regularien, komplexe Förderprogramme mit kurzer Laufzeit, lange Bewilligungs- und Genehmigungszeiten sowie uneinheitliche Genehmigungsanforderungen auf Landes- und Kommunalebene als Hemmnisse genannt. [55]

Organisatorische Hemmnisse beim Einsatz von Industrierärmepumpen bis 100°C umfassen den hohen Platzbedarf, insbesondere in bestehenden Anlagen mit begrenztem Raum, sowie erhöhte Sicherheitsauflagen für brennbare und toxische natürliche Kältemittel wie Ammoniak (NH₃). Gleichzeitig führen strengere Umweltvorgaben für synthetische Kältemittel zu zusätzlichen regulatorischen Anforderungen und Kosten. Zudem besteht in vielen Industriebranchen eine mangelnde Produktakzeptanz, bedingt durch Unsicherheiten hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und fehlendes Erfahrungswissen im praktischen Einsatz. [3, S. 19]

Planerisch verstärken fehlende Referenzanlagen, fehlende Planungs- und Auslegungswerkzeuge sowie unzureichender Wissenstransfer die Zurückhaltung potenzieller Anwender. Besonders relevant ist dabei, dass Betriebsdaten bestehender Anlagen häufig nicht systematisch wissenschaftlich begleitet, ausgewertet oder geteilt werden. Dadurch fehlen belastbare Erfahrungswerte zu Betriebssicherheit, Wartung, Teillastverhalten, Prozessintegration und Wirtschaftlichkeit. Zusätzlich kann eine wirtschaftliche Integra-

tion häufig eine Absenkung von Prozesstemperaturen, den Austausch von Wärmeübertragern, die Einbindung thermischer Speicher oder Anpassungen bestehender Wärmeverteilnetze erfordern. Diese Eingriffe erhöhen die Planungskomplexität und werden von Anwendern vielfach kritisch bewertet. [55]

Tabelle 8-1 gibt eine kategorische Übersicht von Hemmnissen der Wärmepumpentechnologie bis 100°C in der Industrie.

Tabelle 8-1 Hemmnisse industrieller Wärmepumpen bis 100°C

Technische Hemmnisse	Quelle
Natürliche Kältemittel können komponentenseitige Anpassungen (Verdichter, Wärmeübertrager) erfordern	[59, S. 123]
Begrenzte Effizienz bei hohen Temperaturhüben	[2]
Einsatzbereiche entsprechen nicht den Anwendungsanforderungen (z. B. Anwendungsbegrenzung bei hohen erforderlichen VL-Temperaturen)	[3, S. 19]

Wirtschaftliche Hemmnisse	Quelle
Ungünstiges Strompreis-Gaspreis-Verhältnis	[58, S. 8]
Lange Amortisationszeiten	[8, 3-27ff.]
Geringes Bewusstsein für den Wärmeverbrauch des eigenen Unternehmens	[8, 3-27ff.]
Höhere Investitionsausgaben ggü. konventionellen Techniken	[4, S. 3]

Regulatorische Hemmnisse	Quelle
Fehlanreize für fossile Techniken teilweise noch aktiv (z. B. KWK-Anlagen: Profitieren von einer Reihe von Steuerbefreiungen; EU-ETS: Wärmeerzeuger erhalten kostenfrei Zuteilung auf Basis des Wärmebenchmarks)	[31, S. 41-42]
Mangelnde Anreize zur Flexibilisierung: Flexibler Stromeinsatz zur Stabilisierung des Stromnetzes häufig noch unwirtschaftlich (Netzentgeltverordnung)	[31, S. 42]
Fehlende Planungssicherheit (z. B. im Bereich Gesetzgebung aber auch energiemarktwirtschaftliche Risiken im Zusammenhang mit geopolitischen Entwicklungen, Unsicherheiten durch mögliche PFAS-Beschränkungen im Rahmen von REACH)	[60] [2, S. 69-71]

Organisatorische/Praktische Hemmnisse	Quelle
Mangelnde Betriebserfahrung (z. B. unbekannte Wartungsintervalle)	[8, S. 25]
Hohe Planungskomplexität, durch Breite der Anforderungen bei Nicht-Wohngebäude	[6, S. 3]
Mangelndes Fachwissen	[3, S. 7]
Erhöhter Platzbedarf ggü. konventionellen Techniken	Erfahrungswert
Erhöhte Sicherheitsauflagen durch brennbare und toxische (NH ₃) natürliche Kältemittel. Erhöhte Umweltauflagen durch synthetische Kältemittel.	[2, S. 64]
Mangelnde Produktakzeptanz	[3, S. 7]
Integration von Wärmepumpen in existierende Prozesse ist mit hohem Aufwand verbunden	[61]

Von den zahlreichen Hemmnissen für den Einsatz von Wärmepumpen in der Industrie bis 100°C ordnen Experten, die im Rahmen einer Schweizer Studie befragt wurden, folgende als die Relevantesten ein: Die Abhängigkeit vom Strom-/Gaspreis-Verhältnis (hohe Energiepreise), die hohen Erwartungen der Industrie an die Amortisationszeiten, mangelnde Produktakzeptanz, sowie das fehlende Wissen bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten. [4, S. 3]

Haushalte

Für Gebäudewärmepumpen liegen die zentralen Herausforderungen vor allem in der kostengünstigen Skalierung der Produktion, der Weiterentwicklung hinsichtlich Umweltfreundlichkeit sowie in der Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz. Zudem ist eine standardisierte und beschleunigte Installation im Gebäudebestand erforderlich, um die Diffusion weiter voranzutreiben. [55]

Der Bundesverband Wärmepumpe weist in seinem Positionspapier mehrere Ursachen auf, für eine gebremste Diffusion durch Verunsicherungen auf dem Wärmemarkt. So bewirkt das hohe Strom-/Gaspreis-Verhältnis hohe Amortisationszeiten bzw. geringe Rentabilität. Zudem wird durch staatliche Maßnahmen in Krisenzeiten (Maßnahmen 2022/2023, u. a. Umsatzsteuersenkung und Gaspreisbremse) Betreibern von Erdgasheizungen eine staatliche Absicherung suggeriert. Des Weiteren besteht phasenweise eine mangelnde Investitionsbereitschaft durch langanhaltende Haushaltsdebatten in der breiten Gesellschaft, da eine hinreichende Gegenfinanzierung der Förderprogramme nicht gesichert war. Auch mangelndes Fachwissen und fehlerhafte Berichterstattung begründen weiterhin Unsicherheiten und Zurückhaltung in der Gesellschaft. [60]

8.2 Ungenutzte fördernde Faktoren

Da das wirtschaftliche Potenzial von Wärmepumpenanwendungen bis 100°C noch nicht ausgeschöpft ist, bieten sich zahlreiche Möglichkeiten, diese Lücke in den kommenden Jahren zu schließen. Dafür müssen fördernde Faktoren gezielt verstärkt werden, um die Verbreitung und Akzeptanz der Technologie zu beschleunigen.

Industrie, Gewerbe & Großwärmepumpen

Ein entscheidender Hebel ist die Verbesserung der Wissensverfügbarkeit und Zugänglichkeit. Fortbildungsangebote, Netzwerke und Fachverbände können dazu beitragen, die bestehende Wissenslücke zu reduzieren, die von 19 % der befragten Experten einer Schweizer Studie zum Thema Industrie- und Großwärmepumpen als wesentliches Hemmnis für die Marktdiffusion von Wärmepumpen genannt wurde. Zudem können Demonstrationsprojekte als Best-Practice-Beispiele vorangehen und dazu beitragen, die technischen Möglichkeiten sichtbar zu machen und die Produktakzeptanz innerhalb relevanter Branchen zu stärken. [3, S. 19]

Ein weiteres zentrales Element ist das Vernetzen relevanter Akteure, da starke Partnerschaften, wie auch McKinsey betont, maßgeblich zum Erfolg neuer Techniken beitragen [13]. Dies kann beispielsweise durch Energieeffizienznetzwerke, Wirtschaftsverbände oder die Bündelung der Nachfrage innerhalb einer Branche geschehen. Solche Kooperationen ermöglichen nicht nur eine gemeinsame Durchführung von Pilotprojekten, sondern reduzieren auch Risiken und erhöhen den Marktdruck für eine breitere Einführung der Technologie. Darüber hinaus könnten standardisierte Lösungen und technische Leitfäden Unternehmen helfen, eine erste Einschätzung für den Einsatz von Wärmepumpen in ihren Betrieben zu treffen. Eine konsequente Kostenreduktion durch Standardisierung und Skaleneffekte würde die wirtschaftliche Attraktivität zusätzlich steigern. [3, S. 20]

Ein Fünf-Punkte-Plan, dessen Ziel die Förderung von Wärmepumpen und Elektrodenkesseln ist, wurde im Rahmen des Impulspapiers „Power-2-Heat: Erdgaseinsparungen und Klimaschutz in der Industrie“ entwickelt. Der dort betrachtete Temperaturbereich reicht über den Schwerpunkt der vorliegenden Technikanalyse hinaus, da Wärmepumpen bis 200°C sowie Elektrodenkessel für 200 – 500°C adressiert werden. Der Plan ist daher nicht als direkte Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands zu verstehen, sondern als übergeordneter industriepolitischer Kontext. Die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Minderung von Investitionsrisiken, zur Schaffung von Planungssicherheit, zur Flexibilisierung, zum Abbau fossiler Fehlanreize und zur Beschleunigung von Demonstrationsprojekten lassen sich jedoch in wesentlichen Teilen auf industrielle Wärmepumpenanwendungen bis 100°C übertragen. [31]

Für industrielle Wärmepumpenanwendungen bis 100°C sind aus diesem Maßnahmenpaket insbesondere fünf Ansatzpunkte relevant: Erstens die Verringerung von Investitionsrisiken durch Investitionszuschüsse, Betriebskostenförderung oder Differenzkosteninstrumente, um die Mehrkosten gegenüber fossilen Referenztechniken abzufedern. Zweitens die Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen und technischer Standards, damit Unternehmen Investitionen langfristig planen und wiederkehrende Anwendungsfälle schneller bewerten können. Drittens die gezielte Förderung systemdienlicher Flexibilität, beispielsweise durch angepasste Netzentgelte, flexible Stromtarife und die Kopplung mit thermischen Speichern. Viertens der Abbau fossiler Fehlanreize, etwa durch eine konsistentere CO₂-Bepreisung und die Überprüfung von Begünstigungen für konventionelle Wärmeerzeuger. Fünftens die Beschleunigung des Technologiehochlaufs durch Demonstrationsprogramme, standardisierte Integrationskonzepte und vereinfachte Genehmigungs- und Planungsprozesse. Diese Maßnahmen adressieren damit unmittelbar die in Kapitel 8.1 identifizierten Hemmnisse wie hohe Anfangsinvestitionen, Planungsunsicherheit, ungünstige Preisrelationen, fehlende Betriebserfahrung und mangelnde Produktakzeptanz.

Haushalte

Für Wärmepumpen in Privathaushalten stehen weniger grundsätzliche technologische Entwicklungsfragen als vielmehr Rahmenbedingungen für die weitere Marktdiffusion im Vordergrund. Der Bundesverband Wärmepumpe hebt in aktuellen Positionspapieren und Stellungnahmen insbesondere drei Handlungsfelder hervor: Erstens eine Entlastung des Strompreises für private Verbraucher, etwa durch eine Absenkung der Stromsteuer und eine Reform der Netzentgeltsystematik. Zweitens den Abbau verbraucherseitiger Unsicherheiten durch eine klare und konsistente Ausgestaltung des Gebäudeenergie- und Förderrahmens, insbesondere mit Blick auf europäische Vorgaben, CO₂-Bepreisung und nationale Gebäudepolitik. Drittens die verlässliche Fortführung der Heizungsförderung, um Investitionssicherheit zu schaffen und den Markthochlauf im Gebäudebestand zu unterstützen. [60, 62, S. 5-10, 63]

Tabelle 8-2 Fünf-Punkte-Plan für den Markthochlauf von Power-to-Heat [31]

Maßnahme	Beschreibung
1. Minderung von Investitionsrisiken und Schließen der Kostenlücke	Die anfänglich hohen Investitionen stellen für viele Unternehmen eine zentrale Hürde dar. Daher sind gezielte Fördermaßnahmen erforderlich, um die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenprojekten zu verbessern und die bestehenden Mehrkosten gegenüber fossilen Alternativen zu kompensieren.
2. Schaffung klarer Standards zur Priorisierung und Sicherstellung von Planungssicherheit	Eine einheitliche und verlässliche regulatorische Grundlage ist essenziell, um Investitionsentscheidungen zu erleichtern. Dies umfasst unter anderem die Einführung verbindlicher Technologiestandards sowie eine langfristige Strategie zur Dekarbonisierung industrieller Wärmeprozesse.
3. Anreize für systemdienliche Flexibilität	Die Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse erfordert eine flexible Nutzung, die sich an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien anpassen kann. Geeignete Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden, um eine netzdienliche Betriebsweise wirtschaftlich attraktiv zu gestalten.
4. Abbau von Fehlanreizen für fossile Techniken	Die bestehende Förder- und Regulierungslandschaft bevorzugt nach wie vor häufig konventionelle, fossile Wärmeerzeugung. Um eine echte Marktdurchdringung von Wärmepumpen zu ermöglichen, müssen diese strukturellen Hemmnisse identifiziert und gezielt abgebaut werden.
5. Umsetzungskampagne und Beschleunigung des Technologiehochlaufs	Die Marktdiffusion von Wärmepumpentechnologien kann durch gezielte Förderprogramme für Demonstrationsprojekte und die Standardisierung von Systemlösungen erheblich beschleunigt werden. Besonders erfolgversprechend ist dabei: • Die gezielte Förderung von Projekten bis 10 MW, um kostengünstige Standardlösungen für eine breitere industrielle Anwendung zu etablieren. • Die technische Weiterentwicklung von Verdichtern, um die Effizienz und Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen zu verbessern. • Eine Vereinfachung der Genehmigungsverfahren für Großwärmepumpenprojekte, um bürokratische Hürden zu minimieren und die Umsetzung zu beschleunigen.

9. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

In diesem Kapitel werden die erarbeiteten Erkenntnisse aus Kapitel 7 und Kapitel 8 zusammengefasst und in Schlussfolgerungen erläutert. Aus diesen werden schließlich konkrete Empfehlungen für die Gestaltung der Forschungsförderung abgeleitet.

9.1 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Kompressionswärmepumpen bis 100°C technologisch weitgehend ausgereift und in zentralen Anwendungen marktverfügbar sind. Der Reifegrad und die Marktdurchdringung unterscheiden sich jedoch deutlich nach Anwendungssegment: Während Gebäudewärmepumpen bereits breit etabliert sind, befinden sich industrielle Wärmepumpen und Großwärmepumpen vielfach noch in einer frühen Diffusions- bzw. Skalierungsphase. Deutsche Hersteller und Forschungseinrichtungen verfügen in diesem Technologiefeld über hohe technische Kompetenzen und relevante industrielle Wertschöpfungspotenziale. Im internationalen Vergleich, insbesondere mit China und den USA, scheint Deutschland derzeit einen technischen Vorsprung im Bereich der Wärmepumpentechnologie aufzuweisen. In einer Patentanalyse zu 19 Technologiebereichen der industriellen Energieeffizienz im Zeitraum 2020–2022 zeigte sich, dass Deutschland nur im Bereich der Wärmepumpentechnik eine überdurchschnittliche Patentwachstumsrate aufweist [7, S. 29]. Dennoch ist dieser Vorsprung nicht selbstverständlich, denn auch der europäische Markt ist stark umkämpft, insbesondere skandinavische Hersteller stellen eine wachsende Konkurrenz dar.

Ein genauer Blick auf die verschiedenen Wärmepumpensegmente zeigt, dass sich diese in unterschiedlichen Phasen des Technikzyklus befinden und somit differenzierte Herausforderungen und Hemmnisse überwinden müssen. Gebäude- und Haushaltswärmepumpen sind weit verbreitet und befinden sich in der Diffusionsphase. Um ihre Marktdurchdringung weiter zu beschleunigen, sind vor allem eine kostengünstige Skalierung der Produktion, eine standardisierte und beschleunigte Installation sowie gezielte Optimierungen, wie etwa die Reduktion von Schallemissionen, notwendig. Ebenso entscheidend ist es, bestehender Skepsis gegenüber der Integration von Wärmepumpen im Gebäudebestand aktiv zu begegnen.

Großwärmepumpen befinden sich hingegen noch im Aufstiegsstadium. Hier stehen vor allem Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen durch Standardisierung im Vordergrund, um Produktions- und Installationsprozesse zu vereinfachen und die Implementierung zu beschleunigen. Industriewärmepumpen wiederum befinden sich am Übergang von der Neuorientierungs- zur Aufstiegsphase des Technikzyklus. Die Integration in bestehende industrielle Prozesse ist komplex und erfordert standardisierte Auslegungs- und Installationsmethoden sowie verbessertes Anwendungswissen. Hinzu kommt, dass sich besonders Wärmepumpen in der Industrie gegen kostengünstige fossile Alternativen

durchsetzen müssen, was angesichts hoher Investitionen und langer Amortisationszeiten bzw. geringer Rentabilität die Zurückhaltung vieler Unternehmen verstärkt.

Besonders kritisch ist die derzeitige Umsetzungspraxis: Obwohl der Markt für Großwärmepumpen im Megawattbereich aktuell von deutschen Herstellern angeführt wird, erfolgt die Anwendung zu langsam, sodass wichtige Betriebserfahrungen fehlen, die für die Optimierung der Anlagen entscheidend wären [29, S. 19]. Ein Blick auf internationale Vergleichszahlen unterstreicht diese Problematik: Deutschland lag laut Annex 48 im Jahr 2020 mit nur 23 industriellen Wärmepumpen deutlich hinter Ländern wie der Schweiz (24), Frankreich (33), Österreich (69), Dänemark (74) und Japan (101). Ohne ein aktives Gegensteuern droht somit der Verlust des bestehenden technischen Vorsprungs.

Dabei sind Wärmepumpen für das Erreichen der nationalen Klimaziele unverzichtbar. Sie bieten ein erhebliches Potenzial zur Endenergieeinsparung und zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung in Haushalten sowie im gewerblichen und industriellen Bereich, insbesondere in der Nahrungsmittel-, Chemie- und Papierindustrie. Der Markthochlauf wird jedoch weiterhin durch hohe Investitionen, lange Lieferzeiten, geringe Betriebserfahrungen, niedrige Preise fossiler Energieträger und einen Fachkräftemangel gebremst [55].

Darüber hinaus besteht weiterhin hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Technologie zu standardisieren, zu flexibilisieren und hinsichtlich ihrer Effizienz zu optimieren. Besonders dringend ist der Erfahrungsgewinn im Einsatz natürlicher Kältemittel (insbesondere im Zuge der PFAS-Debatte) sowie hierfür die Ertüchtigung zentraler Komponenten wie Verdichter und Dichtungen. Für den Haushaltsbereich bleibt die Reduktion von Schallemissionen ein wichtiges Entwicklungsziel, um die Akzeptanz zu erhöhen.

Um den technischen Vorsprung zu sichern und die Marktdurchdringung zu beschleunigen, sind daher gezielte Maßnahmen erforderlich, auf die im folgenden Kapitel eingegangen wird.

9.2 Empfehlungen

Aus den zuvor identifizierten FuE-Bedarfen und Hemmnissen ergibt sich, dass die weitere Förderung nicht primär auf die grundsätzliche technische Verfügbarkeit von Wärmepumpen bis 100°C zielen sollte. Im Vordergrund steht vielmehr die beschleunigte Marktdiffusion, die Standardisierung wiederkehrender Anwendungen, die Verringerung wirtschaftlicher Risiken sowie der Aufbau belastbarer Betriebserfahrungen. Die folgenden Empfehlungen richten sich daher an Forschung und Hersteller, industrielle und gewerbliche Anwender, den Haushaltssektor sowie an die regulatorische Rahmensetzung.

Forschung & Hersteller

Für Forschungseinrichtungen und Hersteller sollte die Entwicklung modularer, skalierbarer Standardeinheiten für industrielle Wärmepumpenanwendungen bis 100°C prioritär gefördert werden. Im Fokus stehen wiederkehrende Anwendungsfälle, etwa in der Le-

bensmittel-, Papier-, Chemie- und Metallverarbeitung sowie im GHD-Bereich. Demonstrationsprojekte sollten so ausgestaltet werden, dass sie nicht nur Einzelanlagen erproben, sondern übertragbare Auslegungs-, Integrations- und Betriebskonzepte hervorbringen. Dadurch können Planungsaufwand, Lieferzeiten und Investitionsrisiken reduziert und die Voraussetzungen für Serien- bzw. Kleinserienlösungen verbessert werden.

Weitere FuE-Schwerpunkte sollten anwendungsnah bearbeitet werden. Besonders relevant sind Effizienzsteigerungen bei Verdichtern und Wärmeübertragern, der sichere Einsatz zukunftsicherer Kältemittel, flexible Betriebsweisen sowie die Kopplung mit thermischen Speichern. Entscheidend ist, Betriebsdaten, Wartungsaufwand, Teillastverhalten und Wirtschaftlichkeit systematisch zu dokumentieren, damit belastbare Grundlagen für Standardisierung und breitere Marktdiffusion entstehen.

Anwender: Industrie und GHD

Für industrielle und gewerbliche Anwender sollten vorhandene Demonstrations- und Referenzprojekte gezielt sichtbar gemacht werden, um Produktakzeptanz und Vertrauen in die Technologie zu erhöhen. Neben technischen Kenndaten sind dabei insbesondere Informationen zu Integrationsaufwand, Betriebsstabilität, Wartung, Wirtschaftlichkeit und organisatorischen Anforderungen relevant. Ergänzend sollten praxisnahe Beratungsangebote, Leitfäden und Bewertungswerkzeuge bereitgestellt werden, mit denen geeignete Prozesse, Wärmequellen, Temperaturniveaus und Lastprofile frühzeitig eingeordnet werden können.

Zur Beschleunigung der Diffusion ist eine gezielte Förderung erforderlich, die Mehrkosten gegenüber fossilen Referenztechniken mindert und Investitionsrisiken reduziert. Geeignet sind insbesondere Investitionszuschüsse, befristete Betriebskostenförderungen oder Differenzkosteninstrumente für industrielle Wärmepumpen im Leistungsbereich von etwa 100 kW bis 10 MW. Gleichzeitig sollten Strompreis-, Gaspreis- und CO₂-Rahmenbedingungen so ausgestaltet werden, dass effiziente elektrische Wärmeerzeugung nicht systematisch benachteiligt wird.

Langfristig benötigen Unternehmen verlässliche Rahmenbedingungen für Strompreise, Förderprogramme, CO₂-Bepreisung und regulatorische Anforderungen. Betreiber- und Investitionsmodelle wie Contracting, Wärme-as-a-Service oder Infrastrukturmodelle sollten dabei mitgedacht werden, um Investitionsentscheidungen zu erleichtern, Risiken zwischen Anwendern, Betreibern und Kapitalgebern aufzuteilen und externe Finanzierung für industrielle Wärmeinfrastruktur zu mobilisieren.

Anwender: Haushalte

Auch im Haushaltssektor sind gezielte Maßnahmen erforderlich. Um die Akzeptanz von Wärmepumpen zu erhöhen, sollten Informationskampagnen intensiviert werden, die gezielt falsche Vorurteile abbauen und die Vorteile der Technologie verständlich vermitteln.

Langfristige Planungssicherheit durch klare und verlässliche Förderprogramme ist ebenso wichtig wie der kontinuierliche Erhalt bestehender Fördermaßnahmen.

Darüber hinaus muss der Fachkräftemangel adressiert werden, indem Ausbildungsprogramme für Installateure und Servicetechniker verstärkt gefördert werden. Parallel dazu sollten Forschungsprogramme zur Senkung der Produktionskosten sowie des Integrationsaufwands in Bestandsgebäuden vorangetrieben werden. Ein weiteres wichtiges Entwicklungsziel ist die Reduzierung der Schallemissionen, um die Akzeptanz insbesondere in dicht besiedelten Wohngebieten zu steigern.

Regulatorik

Regulatorisch sollten fossile Fehlanreize konsequent überprüft und abgebaut werden, damit Wärmepumpen nicht durch bestehende Begünstigungen konventioneller Wärmeerzeuger benachteiligt werden. Für industrielle und gewerbliche Anwendungen sind insbesondere das Strom-/Gaspreis-Verhältnis und die Ausgestaltung der Netzentgelte entscheidend. Die individuellen Netzentgelte nach § 19 Abs. 2 StromNEV und die damit verbundene 7000-Stunden-Regel sollten so weiterentwickelt werden, dass flexible und netzdienliche Fahrweisen industrieller Wärmepumpen wirtschaftlich attraktiv werden und nicht ein möglichst konstanter Grundlastbezug privilegiert wird.

Für Wärmepumpen in der Niederspannung besteht mit der Neuregelung zu steuerbaren Verbrauchseinrichtungen nach § 14a EnWG bereits ein Instrument zur netzorientierten Integration. Betreiber steuerbarer Verbrauchseinrichtungen, zu denen auch Wärmepumpen zählen können, erhalten im Gegenzug für die Möglichkeit einer temporären netzorientierten Steuerung ein reduziertes Netzentgelt. Diese Regelung adressiert jedoch vor allem kleinere Anlagen im Niederspannungsnetz und ersetzt nicht die notwendige Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik für größere gewerbliche und industrielle Wärmepumpenanwendungen.⁷

Auch für Privatverbraucher bleibt das Strom-/Gaspreis-Verhältnis ein zentraler Faktor für einen fairen Technologiewettbewerb. Eine Reduzierung staatlich induzierter Strompreisbestandteile, etwa der Stromsteuer auf das europarechtliche Mindestniveau, kann die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen verbessern. Gleichzeitig sollten zusätzliche Belastungen durch steigende Netzentgelte begrenzt und stärker an netzdienliches Verhalten gekoppelt werden.

Ergänzend sollten technische und regulatorische Anforderungen an Wärmepumpenprojekte stärker vereinheitlicht werden. Einheitliche Standards, transparente Genehmigungsprozesse und klare Vorgaben für natürliche bzw. brennbare Kältemittel können Planungsrisiken reduzieren, Projektlaufzeiten verkürzen und deutschen sowie europäischen Herstellern den Zugang zu internationalen Märkten erleichtern.

⁷ Bundesnetzagentur - Integration von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen

Förder- und Genehmigungsverfahren sollten zudem vereinfacht, harmonisiert und beschleunigt werden. Besonders relevant sind kürzere Bewilligungszeiten, einheitlichere Anforderungen auf Landes- und Kommunalebene sowie eine stärkere Digitalisierung der Verfahren. Dadurch können Planungsrisiken reduziert und Investitionsentscheidungen insbesondere bei KMU und mittelständischen Industrieunternehmen erleichtert werden. [55]

9.3 Fazit

Die Technikanalyse zeigt, dass Wärmepumpensysteme bis 100°C insbesondere in industriellen und gewerblichen Niedertemperaturanwendungen einen wesentlichen Beitrag zur Defossilisierung der Wärmeversorgung leisten können. Ergänzend bestehen relevante Einsatzmöglichkeiten in Fernwärme und Gebäuden. Für Industrie und GHD liegt die zentrale Herausforderung jedoch nicht mehr primär in der grundsätzlichen technologischen Verfügbarkeit, sondern in der Überführung vorhandener Lösungen in standardisierte, wirtschaftlich tragfähige und betrieblich verlässliche Anwendungen.

Für die zukünftige Energieforschung folgt daraus, dass Demonstrations- und Förderprogramme stärker auf wiederholbare industrielle Anwendungsfälle, modulare Anlagenkonzepte, standardisierte Integrationslösungen und belastbare Betriebsdaten ausgerichtet werden sollten. Parallel müssen regulatorische Rahmenbedingungen so weiterentwickelt werden, dass effiziente elektrische Wärmeerzeugung gegenüber fossilen Referenztechniken nicht benachteiligt wird und flexible, netzdienliche Betriebsweisen wirtschaftlich attraktiv werden. Entscheidend ist damit das Zusammenspiel aus technischer Weiterentwicklung, anwendungsnaher Demonstration, Wissenstransfer, Investitionssicherheit und einem konsistenten Strom-/Gaspreis- sowie Netzentgeltrahmen. Investitionssicherheit entsteht dabei insbesondere durch mehrjährige und verlässlich finanzierte Förderprogramme, planbare Betriebskosten- oder Differenzkosteninstrumente, stabile Strompreis- und Netzentgeltregelungen sowie klare Genehmigungs- und Kältemittelvorgaben über den gesamten Projektzyklus. Gelingt diese Verbindung, können industrielle Wärmepumpen bis 100°C vom heutigen Markt spezialisierter Einzel- und Projektanwendungen in eine breitere industrielle Anwendung überführt werden und damit einen substantiellen Beitrag zur Transformation der Wärmeversorgung leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] OpenAI, Inc., *ChatGPT* (Versionen 4.0, 4.1, 4.5, 5). Zugriff am: 26. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://chatgpt.com/>
- [2] F. Ahrendts *et al.*, "Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland: Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie," Agora Energiewende und Fraunhofer IEG, 2023, doi: 10.24406/PUBLICA-1440.
- [3] S. Wolf, R. Flatau, P. Radgen und M. Blesl, "Systematische Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie. Endbericht, 10. Mai 2017," Ittigen, CH, 2017. Zugriff am: 2. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://waermepumpe-izw.de/wp-content/uploads/2020/05/160510_Bfe-Bericht_WP_industr._Anwendungen.pdf
- [4] S. Wolf, "Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme," Dissertation, IER, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/9610>
- [5] Simon Becker, Alexander Exner, Saikiran Joshi und Sebastian de la Serna, "dena Gebäudereport 2026.: Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand," 2026. Zugriff am: 9. Juli 2026.
- [6] P. Mallaburn, *Retrofitting heat pumps in large nondomestic buildings*, IEA/DESNZ Heat Pump Research Symposium. Zugriff am: 9. Juli 2026.
- [7] O. Lösch *et al.*, "Zur Relevanz der öffentlichen Energieforschungsförderung, insbesondere für Industrie und Gewerbe: Kurzstudie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2," Karlsruhe, Aachen, Bensheim, 2024.
- [8] R. M. Jakobs und C. Stadtländer, "IEA HPT Annex 48.: Industrial Heat Pumps, Second Phase. Final Report.," Borås, Sweden, 2020. Zugriff am: 17. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/final-report-annex-48-industrial-heat-pumps-second-phase/>
- [9] Fabian Huneke, Katharina Hartz, Moritz Zackariat, Philipp Godron, Simon Müller. Alexander Dusolt, Anna Kraus, Dr. Corinna Fischer, Janna Hoppe, Mareike Willems, Mira Wenzel, Niels Wauer und Uta Weiß (alle Agora Energiewende), Dr. Julia Metz und Frank Peter (beide Agora Industrie), Agora Verkehrswende (Dr. Urs Maier) und Dr. Wilhelm Klümper (Agora Ag-

- rar)., "Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023.," Agora Energiewende.
- [10] BMW/PtJ, Hg., "Förderstrukturen im Forschungsbereich Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe: Internes Arbeitspapier," 2024.
- [11] Technische Universität Darmstadt und Karlsruher Institut für Technologie, Hg., "Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt EE4InG," Mrz. 2022. Zugriff am: 24. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ee4ing.de/wp-content/uploads/2020/06/2022-03_28_EE4InG_Sachbericht.pdf
- [12] L. Lyons *et al.*, "Heat pumps in the European Union: Status report on technology development, trends, value chains and markets : 2022," Europäische Kommission, Luxembourg, Rep. EUR 31268 EN, 2022, doi: 10.2760/372872. [Online]. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=d82fc57b-657d-11ed-9f85-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>
- [13] H. Bauer, J. Ehrmaier, L. Gigliotti, F. Liebach, T. Schleyer und A. Simoncini. "Industrial heat pumps: Five considerations for future growth." Zugriff am: 11. März 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/industrial-heat-pumps-five-considerations-for-future-growth#/>
- [14] European Heat Pump Association, Hg., "Industrial heat pumps can deliver: 180°C and higher under development," Zugriff am: 11. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2022/12/Industrial-Heat-Pumps-overview.pdf>
- [15] E. Jochem, *Improving the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2009.
- [16] B. Schäfer, F. A. Toro Chacón, T. Brinkmann, A. Drews, E. Jochem und J. Sauer, "Bewertung von Energieeffizienztechnologien mit der Methodik EDUAR&D an zwei Beispielen," *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 93, Nr. 8, S. 1247–1256, 2021, doi: 10.1002/cite.202000251.
- [17] J. Thirolf, "Ergebnispapier zum Thema der Kühl- und Kältetechnik: Im Rahmen des Begleitforschungsprojekts EE4InG," 2021. Zugriff am: 27. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ee4ing.de/wp-content/uploads/2020/06/FT-ETA-Solutions_Kuehlkaelte-Eduard.pdf

- [18] S. Wischhusen, "Dynamische Simulation zur wirtschaftlichen Bewertung von komplexen Energiesystemen: Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Arbeitsbereich Technische Thermodynamik, Diss., 2005," Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Göttingen, 2005.
- [19] J. Dines, "Außenluft/Wasser-Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Heizungssystemen & Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung," Diplomarbeit, Institut für Wärmetechnik, Technischen Universität Graz, 2013.
- [20] Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein, *Energieeffizienz und Klimaschutz - Trends in der Kältemittel-, System- und Komponentenentwicklung: 4. Innovationstag Kältetechnik : Nürnberg, 10. Oktober 2016* (DKV-Statusbericht Nr. 30). Hannover: Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein DKV e.V, 2016.
- [21] J. Dohmann, *Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [22] D. T. Benjamin Zühlsdorf, "IEA HPT Annex 58.: Task 1 - Technologies," (Task Report), Jg. 2023, 2023.
- [23] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), Hg., "Kälte 2017: Hinweise zur Planung, Ausführung und Betrieb von Kälteanlagen und Kühlgeräten für öffentliche Gebäude.," Berlin, 2017. Zugriff am: 17. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Planen/Maschinenbau-und-Versorgungstechnik/Kaelte_2007/kaelte_2017.pdf
- [24] D. Flum, "Eine Methode zur modellbasierten Planung energieoptimierter Kälte- und Wärmeversorgungssysteme in Produktionsbetrieben," Dissertation, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2021.
- [25] K. Reisner und T. Reisner, *Fachwissen Kältetechnik: Eine Einführung für die Aus- und Weiterbildung mit Aufgaben und Lösungen*, 6. Aufl. Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH, 2016.
- [26] A. Höpfer, "Leistungsregelung bei Hubkolbenverdichtern: Mit neuer Flexibilität zu mehr Systemeffizienz," *KI Kälte · Luft · Klimatechnik*, Jg. 08-09, 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/2014/09/KI_2014_08-09_Praxis_Bitzer.pdf

- [27] S. Yfanti und N. Sakkas, "Technology Readiness Levels (TRLs) in the Era of Co-Creation," *ASI*, Jg. 7, Nr. 2, S. 32, 2024, doi: 10.3390/asi7020032.
- [28] LEA Hessen GmbH, Hg., "Infoportal für Großwärmepumpen. Herstellerdatenbank," Zugriff am: 26. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://grosswaermepumpen-info.de/de/produkte/herstellende/>
- [29] Arpagaus, Cordin, Dr. Frédéric Bless, Michael Uhlmann, Dr. Sidharth Paranjape, Leon Brendel, PhD, Prof. Stefan Bertsch, PhD, "Hochtemperatur Wärmepumpen für industrielle Anwendungen," [Online]. Verfügbar unter: https://www.vea.de/files/user_upload/VEA-Hauptseite/Newsroom/Veranstaltungen/2023/4_-_Hochtemperatur-Waermepumpen_fuer_industrielle_Anwendungen_Arpagaus.pdf
- [30] U. Riedel, "Hochtemperaturwärmepumpen - Schlüsselbaustein der industriellen Wärmewende," Institut für CO₂-arme Industrieprozesse (DLR), 2023. Zugriff am: 11. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www-docs.b-tu.de/wirtschaft/public/Energietag_2023/Forum3_2_Prof.Riedel_DLR.pdf
- [31] F. Agora Industrie, Hg., "Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie," Rep. 269/05-I-2022/DE, 2022. Zugriff am: 24. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-05_IND_DE-P4Heat/A-EW_269_Power-2-Heat_WEB.pdf
- [32] S. Wolf, U. Fahl, M. Blesl, A. Voß und R. Jakobs, "Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland," Universität Stuttgart Universität, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2014. Zugriff am: 9. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: 10.2314/GBV:84567675X
- [33] C. Arpagaus, "Hochtemperatur-Wärmepumpen: für industrielle Anwendungen," [Online]. Verfügbar unter: https://grosswaermepumpen-kongress.com/wp-content/uploads/2019/05/Cordin_Arpagaus.pdf
- [34] SINTEF, Hg., "Strengthening Industrial Heat Pump Innovation: Decarbonizing Industrial Heat," 2020. Zugriff am: 11. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/industrial-heat-pump-whitepaper/2020-07-10-whitepaper-ihp-a4.pdf>

- [35] TRANE. "Flexible und komfortable Kälte- und Wärmeversorgung für ein 5-Sterne-Hotel in Italien." Zugriff am: 11. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://trane.eu/de/about-trane/story-details.html?storyId=41>
- [36] V. Bürger *et al.*, "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050: Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand," Dessau-Roßlau, 2017.
- [37] R. Gritzki *et al.*, *Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012.
- [38] Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. und Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Ökonomie des Planens und Bauens, Hg., "ENOB: dataNWG. Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude," Mrz. 2022. Zugriff am: 26. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/BMWi-03ET1315_ENOBdataNWG_Schlussbericht_final.pdf
- [39] AGEb, "Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken," 2024. Zugriff am: 16. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/>
- [40] Bundesregierung. "Klimaneutrale Fernwärme: Kommunale Wärmeplanung für ganz Deutschland." Zugriff am: 11. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv-bundesregierung/waermeplanungsgesetz-2213692>
- [41] MAN Energy Solutions. "Mega-Wärmepumpe liefert erste Wärme für Esbjerg." Zugriff am: 11. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.man-es.com/de/unternehmen/pressemitteilungen/press-details/2024/11/28/mega-w%C3%A4rmepumpe-liefert-erste-w%C3%A4rme-f%C3%BCr-esbjerg>
- [42] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. "Mannheim baut Flusswasser-Großwärmepumpe." Zugriff am: 11. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.waermepumpe.de/presse/blog/mannheim-baut-flusswasser-grosswaermepumpe/>
- [43] ARUP Group, "Industrial Boilers: Study to develop cost and stock assumptions for options to enable or require hydrogen-ready industrial boilers," Jg. 2022.

- [44] V. Cigolotti, M. Genovese und P. Fragiaco, "Comprehensive Review on Fuel Cell Technology for Stationary Applications as Sustainable and Efficient Poly-Generation Energy Systems," *Energies*, Jg. 2021, Nr. 14, S. 1–28, 2021, doi: 10.3390/en14164963.
- [45] Tobias Fleiter, Matthias Rehfeldt, Lisa Neusel, Simon Hirzel, Marius Neuwirth, Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf, "CO2-neutrale Prozesswärme durch Elektrifizierung und Einsatz von Wasserstoff: Policy Brief," Policy Brief, Fraunhofer ISI; IOB RWTH Aachen, 2025.
- [46] Franziska Bockelmann (Projektleitung), Markus Peter, Henning Roggenkamp, Mathias Schlosser, "EnOB: future:heatpump II: Erweiterung und Ausbau des Vordimensionierungs-programms WPSOURCE," 2022.
- [47] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Hg., "8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung: Forschungsmissionen für die Energiewende," 2023.
- [48] S. Besser, *Förderbekanntmachung zur angewandten Energieforschung im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms*. Berlin.
- [49] IN4climate.NRW, Hg., "Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie: Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW," Düsseldorf, 2022.
- [50] S. Hirzel, "Energieeffiziente Querschnittstechnologien innerhalb des Forschungsprojekts TF Energiewende: Technologiebericht," Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2017.
- [51] P. Stathopoulos, "Regenerative Hochtemperatur-Wärme: Schlüsseltechnologie für die CO2-Minderung im Industriesektor," DLR-Institut für CO2-arme Industrieprozesse, 2022.
- [52] Bundesnetzagentur. "Energiamarkt aktuell. Der Strommarkt im Jahr 2024." Zugriff am: 11. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/215556>
- [53] Rhode, Clemens, Arnold-Kiefer, Sonja, *Erstellung einer Anwendungsbilanz für die Jahre 2021 bis 2023: für die Sektoren Industrie und GHD*, Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz e.V.
- [54] Umweltbundesamt. "Energieverbrauch privater Haushalte." Zugriff am: 11. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>

- [55] M. Miara, P. Schossig, A. Burger, F. Ahrendts und P. Stathopoulos, "Industrie- und Großwärmepumpenworkshop: Chancen, Bedürfnisse, Herausforderungen sowie Hemmnisse," Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Berlin, Mai. 2025.
- [56] IEA, "Annual Report 2024 Heat Pumping Technologies," Jg. 2024.
- [57] P. Viebahn *et al.*, "Technologien für die Energiewende. Politikbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)," Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2018.
- [58] E. Shehu, "Competitiveness of the heat pump sector in Europe: Report," Brüssel, 2024.
- [59] M. Müller, Dr. Röllig Peter und R. Paatzsch, "Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln," 2016.
- [60] M. Sabel und B. Schreinermacher, "Positionspapier des Bundesverbands Wärmepumpe (BWP) e. V.," 2025.
- [61] P. Stathopoulos, D. Krüger, P. Nitz und Stieglitz Robert, "Prozesswärme mit konzentrierender Solarthermie und Hochtemperatur-Wärmepumpen,"
- [62] M. Sabel, B. Schreinermacher und J. Otting, "Positionspapier des Bundesverbands Wärmepumpe (BWP) e. V.," 2024.
- [63] Bundesverbands Wärmepumpe (BWP) e. V, *Pressemitteilung des Bundesverbands Wärmepumpe (BWP) e. V.: Wärmepumpen: Markt geht auf 193.000 Geräte zurück, aber Vertrauen in die Förderung steigt*, 2025. Zugriff am: 5. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.waerpumpe.de/fileadmin/user_upload/25-01-21_PI_Absatzzahlen.pdf

Abkürzungen

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEG	Bundesförderung für effiziente Gebäude
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ äq.	Kohlendioxid - Äquivalent
EEW	Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft
EHPA	European Heat Pump Association
EFP	Energieforschungsprogramm
EFSI	European Fund for Strategic Investments
EU-ETS	European Union Emissions Trading System
FBK	Förderbekanntmachung
FuE	Forschung und Entwicklung
FN IuG	Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HTWP	Hochtemperatur-Wärmepumpe
IEA	Internationale Energieagentur
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NH ₃	Ammoniak
PFAS	per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
RRF	Recovery and Resilience Facility
TER	Total Energy Recovery
TFA	Trifluoressigsäure
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Typische Struktur des EDUAR&D-Prozesses [11]	10
Abbildung 3-1 Einordnung von Wärmepumpensegmenten im Technikzyklus ([7], eigene Ergänzung).....	15
Abbildung 3-2 Industrielle Wärmepumpenanwendungen nach Annex 48 [8, S. 25].....	19
Abbildung 3-3 Prozesswärmebedarf nach Branche und Temperaturniveau [4, S. 118]..	20
Abbildung 3-4 Versorgungstemperaturen und Wärmeverbräuche (rechts in PJ) industrieller Prozesse [32, S. 20]	21
Abbildung 4-1 EnArgus-Auswertung zu Wärmepumpenvorhaben [Stichtag der Auswertung: 11.06.2024, eigene Darstellung]	29
Abbildung 4-2 Auswertung zu vom PtJ geförderten Wärmepumpenvorhaben [Stichtag der Auswertung: 01.01.2025, eigene Darstellung]	33
Abbildung 4-3 Auswahl geförderter FuE-Vorhaben im Energieforschungsprogramm mit Beteiligung ausgewählter großer Wärmepumpenhersteller in Deutschland (eigene Darstellung)	36
Abbildung 5-1 Definition Potenzialbegriffe [eigene Darstellung nach [4]]	39
Abbildung 6-1 Schematische Darstellung zentraler Akteursgruppen und ausgewählter Wechselbeziehungen im deutschen Innovationssystem für Wärmepumpen bis 100°C (eigene Darstellung)	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Typologie und Differenzierungsmerkmale von Wärmepumpen [19, 20]	12
Tabelle 3-2 Verdichterbauarten im Vergleich [2, S. 60, 23, 8ff., 24, 14f., 25, 26].....	14
Tabelle 3-3 Hersteller industrieller Wärmepumpen bis 100°C [28].....	16
Tabelle 3-4 Großwärmepumpen deutscher Hersteller bis 100°C [2, S. 130]	17
Tabelle 3-5 Konkurrenztechnologien zu Wärmepumpen bis 100°C ([29], [31], [43], [44], [45], Eigene Einschätzung).....	26
Tabelle 4-1 Suchergebnisse Google Scholar (absolute, nicht kumuliert), 11.06.2024	29
Tabelle 4-2 Suchtreffer zu Technologieaspekten in der EnArgus-Datenbank (absolute, nicht kumuliert), 20.06.2024	30
Tabelle 4-3 Ausgewählte PtJ-geförderte Wärmepumpenprojekte (Projektbeginn 2020–2024) [Projektträger Jülich]	34
Tabelle 5-1 Szenarioanalyse zur Primärenergieeinsparung durch Industriewärmepumpen [50, S. 42].....	39
Tabelle 6-1 Beispielhafte Auswahl zentraler Akteure im Innovationssystem für Industriewärmepumpen [22, S. 162]	42
Tabelle 8-1 Hemmnisse industrieller Wärmepumpen bis 100°C.....	53
Tabelle 8-2 Fünf-Punkte-Plan für den Markthochlauf von Power-to-Heat [31]	57